

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO  
INSTITUTO DE ASTRONOMIA, GEOFÍSICA E CIÊNCIAS ATMOSFÉRICAS  
DEPARTAMENTO DE CIÊNCIAS ATMOSFÉRICAS

LUIZ FERNANDO KRÜGER

**Projeções Climáticas das Ciclogêneses no Atlântico Sul**  
**Utilizando os Modelos HadAM3 e RegCM3**

São Paulo  
2009

# **Livros Grátis**

<http://www.livrosgratis.com.br>

Milhares de livros grátis para download.

LUIZ FERNANDO KRÜGER

**Projeções Climáticas das Ciclogêneses no Atlântico Sul Utilizando os Modelos  
HadAM3 e RegCM3**

Dissertação apresentada ao Instituto de  
Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas da  
Universidade de São Paulo para obtenção do título  
de Mestre em Ciências Atmosféricas.

Orientadora: Rosmeri Porfírio da Rocha

São Paulo  
2009

## FOLHA DE APROVAÇÃO

Luiz Fernando Krüger

Projeções Climáticas das Ciclogêneses no Atlântico Sul Utilizando os Modelos HadAM3 e RegCM3

Dissertação apresentada ao Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas da Universidade de São Paulo para obtenção do título de Mestre em Ciências Atmosféricas.

Aprovado em:

Banca examinadora

Prof. Dr. \_\_\_\_\_

Instituição: \_\_\_\_\_ Assinatura: \_\_\_\_\_

Prof. Dr. \_\_\_\_\_

Instituição: \_\_\_\_\_ Assinatura: \_\_\_\_\_

Prof. Dr. \_\_\_\_\_

Instituição: \_\_\_\_\_ Assinatura: \_\_\_\_\_

*Àqueles que fazem de cada obstáculo um motivo a mais para alcançar seus objetivos.*

## **AGRADECIMENTOS**

A minha orientadora Dra. Rosmeri Porfírio da Rocha pelo conhecimento transmitido, paciência e amizade.

Aos amigos que me acompanharam ao longo de mais esta etapa e, em especial, à Michelle Simões Reboita, ao Diego Simões Fernandes, ao Ivan Saraiva, ao José Felipe da Silva Farias, ao Nelson Vidaurre Navarrete e ao Rubinei Machado pela boa vontade em dividir seus conhecimentos e pela amizade durante o desenvolvimento desta pesquisa.

À minha família pelo apoio e incentivo em todos os momentos, em especial, a minha mãe e ao meu irmão Nelson por estarem sempre presentes e dispostos a ajudar.

À minha namorada pelo apoio e paciência em todos os momentos.

À professora Simone Vieira de Assis por me auxiliar nos primeiros passos na vida científica e aos professores Edmilson Dias de Freitas e Tércio Ambrizzi pelas importantes sugestões no desenvolvimento desta pesquisa.

Pela infra-estrutura do laboratório do Grupo de Estudos Climáticos (GrEC-USP) que é mantida pelo Prof. Dr. Tércio Ambrizzi e Profa. Dra. Rosmeri P. da Rocha.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pelo apoio financeiro.

Aos funcionários do Departamento de Ciências Atmosféricas do IAG-USP e de forma especial aos da Seção de Informática, Sebastião e Samuel, pelo apoio técnico e amizade.

E a todos que de alguma forma contribuíram para a realização desta pesquisa.

**SUMÁRIO**

<b>LISTA DE FIGURAS.....</b>	<b>viii</b>
<b>LISTA DE TABELAS .....</b>	<b>xv</b>
<b>LISTA DE SIGLAS.....</b>	<b>xvi</b>
<b>RESUMO.....</b>	<b>xix</b>
<b>ABSTRACT.....</b>	<b>xx</b>
<b>1 INTRODUÇÃO.....</b>	<b>21</b>
1.1    Ciclones Extratropicais.....	21
1.2    Mudanças Climáticas .....	25
1.3    Objetivos .....	29
<b>2 METODOLOGIA .....</b>	<b>31</b>
2.1    O Modelo Climático Regional – RegCM3.....	31
2.2    O Modelo Global do Hadley Centre – HadAM3.....	32
2.3    Descrição do Algoritmo para Rastreamento dos Ciclones Extratropicais .....	34
2.4    Simulações Climáticas .....	35
2.4.1    Validação e cenários B2 e A2: Dados e Metodologia.....	37
2.4.1.1    Precipitação e Temperatura .....	37
2.4.1.2    Climatologia dos Ciclones Extratropicais.....	38
<b>3 RESULTADOS.....</b>	<b>40</b>
3.1    Temperatura e Precipitação.....	40
3.1.1    Clima Presente.....	40

---

3.1.2	Tendências para os Cenários B2 e A2.....	52
3.2	Ciclones Extratropicais.....	62
3.2.1	Clima Presente.....	62
3.2.2	Tendências para os Cenários B2 e A2.....	81
<b>4</b>	<b>CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....</b>	<b>96</b>
	<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....</b>	<b>102</b>

**LISTA DE FIGURAS**

- Figura 2.1 – Emissão de CO<sub>2</sub> no clima presente (até o ano 2000) e cenários de emissões no período 2000 – 2100. Fonte: IPCC (2001). .....33
- Figura 2.2 – Domínio das simulações, topografia da América do Sul (em metros) e regiões de interesse. ....36
- Figura 3.1 – Precipitação média (mm/dia) anual do CRU e RegCM3 para o período de 1975 – 1989 e do CMAP para o período 1979 – 1989: (a) análise do CRU, (b) análise do CMAP e (c) simulação do RegCM3. ....41
- Figura 3.2 – Precipitação média (mm/dia) do CRU e RegCM3 para o período de 1975 – 1989 e do CMAP para o período 1979 – 1989, para o trimestre DJF: (a) análise do CRU, (b) análise do CMAP e (c) simulação do RegCM3 e para o trimestre JJA: (d) análise do CRU, (e) análise do CMAP e (f) simulação do RegCM3.....44
- Figura 3.3 – Temperatura média (°C) anual para o período 1975 – 1989: (a) análise do CRU, (b) análise do NCEP e (c) simulação do RegCM3.....45
- Figura 3.4 – Temperatura média (°C) no período de 1975 – 1989 para o trimestre DJF: (a) análise do CRU, (b) análise do NCEP e (c) simulação do RegCM3 e para o trimestre JJA: (d) análise do CRU, (e) análise do NCEP e (f) simulação do RegCM3. ....47

Figura 3.5 – Ciclo anual da precipitação (mm/dia) do CRU, CMAP e RegCM3 para as regiões: (a) AMZ, (b) NDE, (c) RCO, (d) SDE e (e) SUL e da temperatura (°C) do CRU, NCEP e RegCM3 para as regiões: (f) AMZ, (g) NDE, (h) RCO, (i) SDE e (j) SUL, definidas na Figura 2.2, sendo CMAP para o período 1979 – 1989 e CRU, RegCM3 e NCEP para o período 1975 – 1989. ....	49
Figura 3.5 (continuação).....	50
Figura 3.6 – Ciclo anual da precipitação (mm/dia) do CMAP e RegCM3 para as regiões: (a) LBR, (b) LUR e (c) LAR e da temperatura (°C) do NCEP e RegCM3 para as regiões: (d) LBR, (e) LUR e (f) LAR, definidas na Figura 2.2, sendo CMAP para o período 1979 – 1989 e RegCM3 e NCEP para o período 1975 – 1989. ....	51
Figura 3.7 – Anomalia média anual da precipitação (mm/dia) do RegCM3, dos cenários B2 (a) e A2 (b) do período 2071 – 2085 em relação à precipitação do período 1975 – 1989. ....	53
Figura 3.8 – Anomalia média trimestral da precipitação (mm/dia) do RegCM3 dos cenários B2 e A2 do período 2071 – 2085 em relação à precipitação do período 1975 – 1989: (a) cenário B2 para o trimestre DJF; (b) cenário A2 para o trimestre DJF; (c) cenário B2 para o trimestre JJA e (d) cenário A2 para o trimestre JJA. ....	54
Figura 3.9 – Anomalia média anual da temperatura (°C) do RegCM3, dos cenários B2 (a) e A2 (b) do período 2071 – 2085 em relação à temperatura do período 1975 – 1989. ....	55

- Figura 3.10 – Anomalia média trimestral da temperatura ( $^{\circ}\text{C}$ ) do RegCM3, dos cenários B2 e A2 do período 2071 – 2085 em relação à temperatura do período 1975 – 1989: (a) cenário B2 para o trimestre DJF; (b) cenário A2 para o trimestre DJF; (c) cenário B2 para o trimestre JJA e (d) cenário A2 para o trimestre JJA. ....57
- Figura 3.11 – Ciclo anual da precipitação (mm/dia) do RegCM3, do clima presente (1975 – 1989) e dos cenários B2 e A2 do período 2071 – 2085, para as regiões: (a) AMZ, (b) NDE, (c) RCO, (d) SDE e (e) SUL e da temperatura ( $^{\circ}\text{C}$ ) do RegCM3, do clima presente (1975 – 1989) e dos cenários B2 e A2 do período 2071 – 2085, para as regiões: (f) AMZ, (g) NDE, (h) RCO, (i) SDE e (j) SUL. ....58
- Figura 3.11 (continuação).....59
- Figura 3.12 – Ciclo anual da precipitação (mm/dia) do RegCM3, do clima presente (1975 – 1989) e dos cenários B2 e A2 do período 2071 – 2085, para as regiões: (a) LBR, (b) LUR e (c) LAR e da temperatura ( $^{\circ}\text{C}$ ) do RegCM3, do clima presente (1975 – 1989) e dos cenários B2 e A2 do período 2071 – 2085, para as regiões: (d) LBR, (e) LUR e (f) LAR. ....61
- Figura 3.13 – Total de ciclones do NCEP, HadAM3 e RegCM3 para os limiares de  $\zeta_{10} \leq -1,0 \times 10^{-5} \text{s}^{-1}$  e  $\zeta_{10} \leq -2,5 \times 10^{-5} \text{s}^{-1}$ , no período 1975 – 1989. ....62
- Figura 3.14 – Número médio trimestral de ciclones do NCEP, HadAM3 e RegCM3 para o período 1975 – 1989: (a)  $\zeta_{10} \leq -1,0 \times 10^{-5} \text{s}^{-1}$  e (b)  $\zeta_{10} \leq -2,5 \times 10^{-5} \text{s}^{-1}$  .....64
- Figura 3.15 – Vorticidade média ( $\text{s}^{-1}$ ) trimestral dos ciclones do NCEP, HadAM3 e RegCM3 para o período 1975 – 1989: (a)  $\zeta_{10} \leq -1,0 \times 10^{-5} \text{s}^{-1}$  e (b)  $\zeta_{10} \leq -2,5 \times 10^{-5} \text{s}^{-1}$  e,

distribuição de freqüência dos ciclones do NCEP, HadAM3 e RegCM3 em intervalos de vorticidade, para o período 1975 – 1989: (c)  $\zeta_{10} \leq -1,0 \times 10^{-5} \text{s}^{-1}$  e (d)  $\zeta_{10} \leq -2,5 \times 10^{-5} \text{s}^{-1}$  .....66

Figura 3.16 – Duração média (dias) trimestral dos ciclones do NCEP, HadAM3 e RegCM3 para o período 1975 – 1989: (a)  $\zeta_{10} \leq -1,0 \times 10^{-5} \text{s}^{-1}$  e (b)  $\zeta_{10} \leq -2,5 \times 10^{-5} \text{s}^{-1}$  e, distribuição de freqüência dos ciclones do NCEP, HadAM3 e RegCM3 em intervalos de duração, para o período 1975 – 1989: (c)  $\zeta_{10} \leq -1,0 \times 10^{-5} \text{s}^{-1}$  e (d)  $\zeta_{10} \leq -2,5 \times 10^{-5} \text{s}^{-1}$  .....67

Figura 3.17 – Deslocamento médio (km) trimestral dos ciclones do NCEP, HadAM3 e RegCM3 para o período 1975 – 1989: (a)  $\zeta_{10} \leq -1,0 \times 10^{-5} \text{s}^{-1}$  e (b)  $\zeta_{10} \leq -2,5 \times 10^{-5} \text{s}^{-1}$  e, distribuição de freqüência dos ciclones do NCEP, HadAM3 e RegCM3 em intervalos de deslocamento, para o período 1975 – 1989: (c)  $\zeta_{10} \leq -1,0 \times 10^{-5} \text{s}^{-1}$  e (d)  $\zeta_{10} \leq -2,5 \times 10^{-5} \text{s}^{-1}$  .....68

Figura 3.18 – Velocidade média de deslocamento (m/s) trimestral dos ciclones do NCEP, HadAM3 e RegCM3 para o período 1975 – 1989: (a)  $\zeta_{10} \leq -1,0 \times 10^{-5} \text{s}^{-1}$  e (b)  $\zeta_{10} \leq -2,5 \times 10^{-5} \text{s}^{-1}$  e, distribuição de freqüência dos ciclones do NCEP, HadAM3 e RegCM3 em intervalos de velocidade média de deslocamento, para o período 1975 – 1989: (c)  $\zeta_{10} \leq -1,0 \times 10^{-5} \text{s}^{-1}$  e (d)  $\zeta_{10} \leq -2,5 \times 10^{-5} \text{s}^{-1}$  .....69

Figura 3.19 – Densidade anual de ciclones para o período 1975 – 1989: (a) NCEP com  $\zeta_{10} \leq -1,0 \times 10^{-5} \text{s}^{-1}$ , (b) HadAM3 com  $\zeta_{10} \leq -1,0 \times 10^{-5} \text{s}^{-1}$ , (c) RegCM3 com  $\zeta_{10} \leq -1,0 \times 10^{-5} \text{s}^{-1}$ , (d) NCEP com  $\zeta_{10} \leq -2,5 \times 10^{-5} \text{s}^{-1}$ , (e) HadAM3 com  $\zeta_{10} \leq -2,5 \times 10^{-5} \text{s}^{-1}$  e (f) RegCM3 com  $\zeta_{10} \leq -2,5 \times 10^{-5} \text{s}^{-1}$  .....72

Figura 3.20 – Densidade de ciclones com $\zeta_{10} \leq -1,0 \times 10^{-5} \text{s}^{-1}$ para o período 1975 – 1989, para o trimestre DJF (dezembro, janeiro e fevereiro): (a) NCEP, (b) HadAM3 e (c) RegCM3, para o trimestre MAM (março, abril e maio): (d) NCEP, (e) HadAM3 e (f) RegCM3, para o trimestre JJA (junho, julho e agosto): (g) NCEP, (h) HadAM3 e (i) RegCM3, e para o trimestre SON (setembro, outubro e novembro): (j) NCEP, (k) HadAM3 e (l) RegCM3.....	75
Figura 3.20 (Continuação).....	76
Figura 3.21 – Densidade de ciclones com $\zeta_{10} \leq -2,5 \times 10^{-5} \text{s}^{-1}$ para o período 1975 – 1989, para o trimestre DJF (dezembro, janeiro e fevereiro): (a) NCEP, (b) HadAM3 e (c) RegCM3, para o trimestre MAM (março, abril e maio): (d) NCEP, (e) HadAM3 e (f) RegCM3, para o trimestre JJA (junho, julho e agosto): (g) NCEP, (h) HadAM3 e (i) RegCM3, e para o trimestre SON (setembro, outubro e novembro): (j) NCEP, (k) HadAM3 e (l) RegCM3.....	77
Figura 3.21 (Continuação).....	78
Figura 3.22 – Total de ciclones do RegCM3 para os limiares de $\zeta_{10} \leq -1,0 \times 10^{-5} \text{s}^{-1}$ e $\zeta_{10} \leq -2,5 \times 10^{-5} \text{s}^{-1}$ , no período 1975 – 1989 e nos cenários B2 e A2 do período 2071 - 2085. ....	82
Figura 3.23 – Número médio trimestral de ciclones do RegCM3 para o período 1975 – 1989 e nos cenários B2 e A2 do período 2071 – 2085: (a) $\zeta_{10} \leq -1,0 \times 10^{-5} \text{s}^{-1}$ e (b) $\zeta_{10} \leq -2,5 \times 10^{-5} \text{s}^{-1}$ .....	83

Figura 3.24 – Vorticidade média ( $s^{-1}$ ) trimestral dos ciclones do RegCM3 para o período 1975 – 1989 e nos cenários B2 e A2 do período 2071 – 2085: (a)  $\zeta_{10} \leq -1,0 \times 10^{-5} s^{-1}$  e (b)  $\zeta_{10} \leq -2,5 \times 10^{-5} s^{-1}$  e, distribuição de frequência dos ciclones do RegCM3 em intervalos de vorticidade, para o período 1975 – 1989 e nos cenários B2 e A2 do período 2071 – 2085: (c)  $\zeta_{10} \leq -1,0 \times 10^{-5} s^{-1}$  e (d)  $\zeta_{10} \leq -2,5 \times 10^{-5} s^{-1}$  .....85

Figura 3.25 – Duração média (dias) trimestral dos ciclones do RegCM3 para o período 1975 – 1989 e nos cenários B2 e A2 do período 2071 – 2085: (a)  $\zeta_{10} \leq -1,0 \times 10^{-5} s^{-1}$  e (b)  $\zeta_{10} \leq -2,5 \times 10^{-5} s^{-1}$  e, distribuição de frequência do RegCM3 para o período 1975 – 1989 e nos cenários B2 e A2 do período 2071 – 2085: (c)  $\zeta_{10} \leq -1,0 \times 10^{-5} s^{-1}$  e (d)  $\zeta_{10} \leq -2,5 \times 10^{-5} s^{-1}$  .....86

Figura 3.26 – Deslocamento médio (km) trimestral dos ciclones do RegCM3 para o período 1975 – 1989 e nos cenários B2 e A2 do período 2071 – 2085: (a)  $\zeta_{10} \leq -1,0 \times 10^{-5} s^{-1}$  e (b)  $\zeta_{10} \leq -2,5 \times 10^{-5} s^{-1}$  e, distribuição de frequência dos ciclones do RegCM3 para o período 1975 – 1989 e nos cenários B2 e A2 do período 2071 – 2085: (c)  $\zeta_{10} \leq -1,0 \times 10^{-5} s^{-1}$  e (d)  $\zeta_{10} \leq -2,5 \times 10^{-5} s^{-1}$  .....87

Figura 3.27 – Velocidade média de deslocamento (m/s) trimestral dos ciclones do RegCM3 para o período 1975 – 1989 e nos cenários B2 e A2 do período 2071 – 2085: (a)  $\zeta_{10} \leq -1,0 \times 10^{-5} s^{-1}$  e (b)  $\zeta_{10} \leq -2,5 \times 10^{-5} s^{-1}$  e, distribuição de frequência dos ciclones do RegCM3 para o período 1975 – 1989 e nos cenários B2 e A2 do período 2071 – 2085: (c)  $\zeta_{10} \leq -1,0 \times 10^{-5} s^{-1}$  e (d)  $\zeta_{10} \leq -2,5 \times 10^{-5} s^{-1}$  .....88

Figura 3.28 – Densidade anual de ciclones do RegCM3: (a) cenário B2 no período 2071 – 2085, com  $\zeta_{10} \leq -1,0 \times 10^{-5} s^{-1}$ , (b) cenário A2 no período 2071 – 2085, com  $\zeta_{10} \leq -$

1,0x10 <sup>-5</sup> s <sup>-1</sup> , (c) cenário B2 no período 2071 – 2085, com $\zeta_{10} \leq -2,5 \times 10^{-5} \text{s}^{-1}$ e (d) cenário A2 no período 2071 – 2085, com $\zeta_{10} \leq -2,5 \times 10^{-5} \text{s}^{-1}$ . .....	90
Figura 3.29 – Densidade de ciclones do RegCM3 com $\zeta_{10} \leq -1,0 \times 10^{-5} \text{s}^{-1}$ , para o cenário B2 no período 2071 – 2085, para os trimestres: (a) DJF, (b) MAM, (c) JJA e (d) SON e para o cenário A2 no período 2071 – 2085, para os trimestres: (e) DJF, (f) MAM, (g) JJA e (h) SON. ....	91
Figura 3.29 (Continuação).....	92
Figura 3.30 – Densidade de ciclones do RegCM3 com $\zeta_{10} \leq -2,5 \times 10^{-5} \text{s}^{-1}$ , para o cenário B2 no período 2071 – 2085, para os trimestres: (a) DJF, (b) MAM, (c) JJA e (d) SON e para o cenário A2 no período 2071 – 2085, para os trimestres: (e) DJF, (f) MAM, (g) JJA e (h) SON. ....	93
Figura 3.30 (Continuação).....	94

**LISTA DE TABELAS**

Tabela 3.1 – Características médias sazonais dos ciclones e desvio padrão sazonal, para o NCEP, HadAM3 e RegCM3 no período 1975 – 1989, para os ciclones com $\zeta_{10} \leq -1,0 \times 10^{-5} \text{s}^{-1}$ e com $\zeta_{10} \leq -2,5 \times 10^{-5} \text{s}^{-1}$ .....	80
Tabela 3.2 – Características médias sazonais dos ciclones e desvio padrão sazonal, para o RegCM3 no período 1975 – 1989 e nos cenários B2 e A2 do período 2071 – 2085, para os ciclones com $\zeta_{10} \leq -1,0 \times 10^{-5} \text{s}^{-1}$ e com $\zeta_{10} \leq -2,5 \times 10^{-5} \text{s}^{-1}$ .....	95

**LISTA DE SIGLAS**

AMZ	Amazônia
AR4	Fourth Assessment Report
A2	Cenário de alta emissão de gases de efeito estufa
BATS	Biosphere-Atmosphere Transfer Scheme
B2	Cenário de baixa emissão de gases de efeito estufa
CCM	Community Climate Model
CCM2	Community Climate Model version 2
CCM3	Community Climate Model version 3
CFCs	Clorofluorcarbonos
CMAP	Climate Prediction Center - Merged Analysis of Precipitation
CRU	Climatic Research Unit
CPTEC	Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos
DOE	Department of Energy
ECMWF	European Centre of Medium Range Weather Forecast
GARP	Global Atmospheric Research Program
GLCC	Global Land Cover Characterization
GPCP	Global Precipitation Climatology Project
GrEC	Grupo de Estudos Climáticos
HadAM3	Modelo Global do Hadley Centre
HadAM3H	Hadley Centre Global Atmospheric Model

---

IAG	Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas
IPCC	Intergovernmental Panel on Climate Change
LAR	Costa sul da Argentina
LBR	Costa sul/sudeste do Brasil
LUR	Costa sul/sudeste do Uruguai
MM4	Mesoscale Model – version 4
MM5	Mesoscale Model – version 5
NCAR	National Center for Atmospheric Research
NCEP	National Centers of Environmental Prediction
NDE	Nordeste
NOAA	National Oceanic and Atmospheric Administration
PNMM	Pressão ao nível médio do mar
PRECIS	Providing Regional Climates for Impacts Studies
PROBIO	Projeto de Conservação e Utilização Sustentável da Diversidade Biológica Brasileira
RegCM3	Regional Climate Model – version 3
SDE	Sudeste
SRES	Special Report Emission Scenarios
SUBEX	SUB-grid Explicit Moisture Scheme
SUL	Sul
TAR	Third Assessment Report
TSM	Temperatura da Superfície do Mar
USP	Universidade de São Paulo

UTC	Universal Time Coordinated
ZCAS	Zona de Convergência do Atlântico Sul
$\zeta_{10}$	Vorticidade relativa a 10 m de altura

## RESUMO

Este estudo analisou possíveis impactos dos cenários de mudanças climáticas na climatologia de ciclones extratropicais no Atlântico Sul. O *Regional Climate Model – versão 3* (RegCM3) foi aninhado ao *Modelo Global do Hadley Centre* (HadAM3) no clima presente (1975 – 1989) e no futuro (2071 – 2085 – cenários A2 e B2). Primeiramente avaliou-se a climatologia simulada pelo RegCM3 de precipitação e de temperatura no clima presente. Para ambas variáveis, o RegCM3 simulou padrão espacial e sazonal semelhante ao das análises, mas com diferenças na intensidade. Para os cenários futuros, o RegCM3 simulou anomalias positivas de temperatura do ar, maiores sobre o norte e nordeste do Brasil para o A2, coincidindo com as maiores reduções de precipitação. Um esquema automático de rastreamento de ciclones, que utiliza a vorticidade relativa do vento a 10 metros de altura, foi utilizado para obter as climatologias de ciclones simuladas pelos modelos RegCM3 e HadAM3 e também na reanálise do NCEP (*National Center for Environmental Prediction*). Os ciclones simulados pelo RegCM3 e HadAM3 foram mais fracos que os do NCEP no clima presente (1975 – 1989). No entanto, a distribuição espacial da densidade ciclogênica simulada pelo RegCM3 foi mais próxima do NCEP. A climatologia projetada pelo RegCM3 para os cenários futuros (A2 e B2) indicou redução no total de ciclones, tempo de vida médio, intensidade inicial média e velocidade de deslocamento médio. As maiores alterações ocorreram no cenário A2. As três regiões ciclogênicas na costa leste da América do Sul (costa sul/sudeste do Brasil, sudeste do Uruguai e sul da Argentina) se mantiveram ativas nas simulações do clima futuro, com pequenas diferenças na intensidade e posição do núcleo de máxima densidade. Além disso, a região de ciclogêneses inicialmente intensas deslocou-se em direção ao Pólo Sul.

**ABSTRACT**

This study examined possible impacts of climate change scenarios in the extratropical cyclones climatology over the South Atlantic Ocean. The Regional Climate Model - version 3 (RegCM3) was nested in the Hadley Center Global Model (HadAM3) in the present (1975-1989) and future (2071 to 2085 - scenarios A2 and B2) climates. At first, RegCM3 simulated climatology of precipitation and temperature in the present climate was evaluated. For both variables, RegCM3 simulated seasonal and spatial patterns similar to the analysis, but with differences in intensity. For the future climate scenarios, RegCM3 simulated positive anomalies of temperature, higher on the north and northeast of Brazil in A2 scenario, coinciding with the largest reductions in rainfall. An automatic scheme for cyclone tracking, which uses the 10-m height wind relative vorticity, was used to obtain the cyclone climatology in the simulations of RegCM3 and HadAM3 models and also in the NCEP (National Center for Environmental Prediction). In the present climate (1975-1989), the cyclones simulated by RegCM3 and HadAM3 were weaker than those of NCEP. However, the RegCM3 represented the spatial distribution according to NCEP. RegCM3 projected climatology for the future scenarios (A2 and B2) shows a reduction of the total number of cyclones, mean lifetime, mean initial intensity, and mean displacement velocity. These reductions are larger in the A2 scenario. The three cyclogenetic regions on the east coast of South America (south coast/southeast of Brazil, southeastern Uruguay and southern Argentina) remained active in the RegCM3 future climate projections. However, there is a slight difference in intensity and position of the core of maximum density. Moreover, the region of initially intense cyclogenesis displaced toward the South Pole.

## 1 INTRODUÇÃO

### 1.1 Ciclones Extratropicais

Conhecer as regiões mais propícias à ocorrência de ciclogêneses, bem como, as condições favoráveis para a formação e intensificação de sistemas ciclônicos é de extrema importância socioeconômica. A atuação dos ciclones pode trazer desde benefícios, abastecendo reservatórios e possibilitando chuvas necessárias aos cultivos agrícolas, até grandes prejuízos, causando inundações e destruição devido às tempestades e ventos fortes. Assim, estudos destes fenômenos de tempo podem contribuir para o conhecimento necessário na melhora da capacidade dos meteorologistas e modelos numéricos em prevê-los com antecedência suficiente para minimizar perdas e danos.

Os primeiros estudos que buscaram definir regiões mais propícias à ocorrência de ciclogêneses se basearam em análise visual de mapas de pressão ao nível médio do mar (Taljaard, 1967; Gan, 1992) ou mapas de linha de corrente em superfície (Necco, 1982a,b).

Através de mapas de pressão ao nível médio do mar do Hemisfério Sul para o período julho/1957 a dezembro/1958 e considerando como ciclogênese a ocorrência de ao menos uma isóbara fechada, Taljaard (1967) identificou as costas leste dos continentes como propícias à ciclogêneses, com maior frequência nas latitudes médias na faixa entre 35°S e 55°S, com máximos em 45°S. Necco (1982a) utilizou mapas de linhas de corrente em superfície elaborados pelo Centro Meteorológico dos Estados

Unidos, durante o ano de operação do GARP (Global Atmospheric Research Program), para estudar perturbações ciclônicas na região  $0^{\circ}$  a  $90^{\circ}\text{W}$  e  $10^{\circ}\text{S}$  a  $55^{\circ}\text{S}$ . Obteve que 70% dos 119 ciclones encontrados se iniciaram neste domínio. Em um estudo posterior, Necco (1982b) destacou que as máximas intensidades de ciclones sobre o Atlântico Sul ocorrem paralelos à costa da América do Sul, o que sugere certa influência das correntes marítimas.

Através de cartas de pressão ao nível médio do mar em horários sinóticos (00, 06, 12 e 18 UTC) para o período janeiro/1979 – dezembro/1988, além de imagens de satélite, Gan (1992) obteve uma climatologia de ciclones na América do Sul. Nesta análise um ciclone extratropical foi definido a partir da identificação de uma baixa pressão que apresentasse ao menos uma isóbara fechada, com intervalo de 2,0 hPa, no mínimo de 4 cartas sinóticas consecutivas. Esta climatologia mostrou maior frequência de ciclones no inverno e outono, com menor frequência no verão. Em termos de áreas ciclogênicas, Gan (1992) obteve dois máximos: um sobre o Golfo de São Matias ( $42,4^{\circ}\text{S}$  –  $62,5^{\circ}\text{W}$ ) e o outro no Uruguai (aproximadamente  $32,5^{\circ}\text{S}$  –  $50^{\circ}\text{W}$ ). Nestas regiões a densidade e área ocupada pelos sistemas foram semelhantes nas estações de transição, mas no inverno ambos se intensificam no Uruguai, enquanto que esta intensificação no Golfo de São Matias ocorre no verão.

A natureza manual da análise de mapas sinóticos e imagens de satélite limita estudos que considerem séries de dados muito longas. Algoritmos de rastreamento automático de ciclones e anticiclones foram desenvolvidos e permitem estudos de longas séries temporais em curto espaço de tempo, além de produzirem resultados que podem ser facilmente analisados.

Um algoritmo de rastreamento de ciclones a partir de mínimos de vorticidade relativa geostrófica em 1000 hPa obtida de análises do ECMWF (*European Centre for Medium-Range Weather Forecasts*) foi utilizado por Sinclair (1994) para o período 1980 – 1986. Nesta climatologia a costa leste da América do Sul e o oceano Pacífico se destacam como regiões com alta densidade de ciclogêneses ao norte de 40°S, enquanto as costas oeste dos continentes mostraram menor atividade ciclogênética. A maior (menor) atividade ciclogênética na costa leste (oeste) dos continentes estaria relacionada com a presença de águas oceânicas mais quentes (frias) na superfície.

Com a mesma metodologia de Sinclair (1994), Sinclair (1995) identificou as costas leste da Austrália e da América do Sul como regiões preferenciais de atividade ciclogênética no inverno. Sinclair (1996) utilizando dados do ECMWF no período de 1980 – 1994 obteve como regiões ciclogênicas as costas sul da Argentina, sul/sudeste do Uruguai, semelhante a Gan (1992), e uma terceira região ciclogênética de fraca intensidade próxima a 25°S na costa do Brasil.

Um período mais longo (1958 – 1997) foi utilizado na climatologia de ciclogêneses no Hemisfério Sul (Simmonds e Keay 2000) através da reanálise do NCEP (*National Centers for Environmental Prediction – National Center for Atmospheric Research*, NCEP–NCAR, Kalnay et al., 1996). Simmonds e Keay (2000) utilizaram esquema automático de rastreamento de ciclones considerando a pressão. Os autores encontraram o inverno como a estação mais ciclogênética e o verão com menos ciclones. No entanto, a frequência de ciclones no outono e primavera foi muito próxima à do inverno. No inverno os ciclones são mais duradouros e se deslocam por distâncias

muito maiores (2315 km em média), enquanto no verão possuem menor tempo de vida que no inverno e também se deslocam menos (1946 km em média).

Considerando apenas a América do Sul, Sugahara (2000) rastreou ciclones a partir de mínimos de vorticidade obtida do vento a 10 metros de altura na análise do ECMWF no período de janeiro/1985 – dezembro/1992. Na climatologia de Sugahara (2000) a amplitude intersazonal de ciclones foi pequena, com inverno e primavera com mais ciclones e outono e verão com menos ciclogêneses. Assim como em Sinclair (1996), Sugahara (2000) também obteve as costas do Uruguai, sul da Argentina e a costa sul/sudeste do Brasil como regiões ciclogênicas.

Reboita (2008) aplicou o algoritmo de Sugahara (2000) para identificar ciclones nas simulações do *Regional Climate Model – version 3* (RegCM3, Pal et al., 2007). Estas simulações utilizaram como condições iniciais e de fronteira os campos do projeto R2 da reanálise do NCEP (NCEP/DOE, Kanamitsu et al., 2002). O RegCM3 simulou as três regiões ciclogênicas na costa leste da América do Sul, (no sul da Argentina, na desembocadura do Rio da Prata no Uruguai e próximo à costa sul/sudeste do Brasil) presentes na climatologia do NCEP. Este estudo destacou que o RegCM3 subestimou em apenas -1% o total de ciclones ( $\zeta_{10} \leq -1,5 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$ ) e em -9,5% os ciclones inicialmente intensos ( $\zeta_{10} \leq -2,5 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$ ). Isto indicaria dificuldades do RegCM3 em simular ciclones inicialmente intensos. Contudo, parte desta subestimativa deveu-se ao fato que muitos sistemas embora simulados pelo RegCM3 foram excluídos pelo algoritmo de rastreamento ao não atingirem limiares mínimos pré-definidos ou saírem do domínio de rastreamento antes de completarem 24 horas de duração. Reboita (2008) mostrou ainda que o RegCM3 simulou maior ocorrência de ciclones intensos no

inverno, enquanto sistemas de menor intensidade foram quase igualmente distribuídos nas quatro estações do ano.

## 1.2 Mudanças Climáticas

Os relatórios do *Intergovernmental Panel on Climate Change* (IPCC) vêm indicando mudanças consideráveis no clima terrestre. Através da combinação de projeções de diferentes modelos globais, o IPCC AR4 (2007) apresentou estimativas de aumento de temperatura média global nos cenários A2 e B2 (cenários de alta e baixa concentração de poluentes, respectivamente – IPCC, 2001) de +3,4°C (2,0°C a 5,0°C) para o A2 e +2,4°C para o B2 (1,4°C a 3,8°C). Estas projeções indicam aumento das temperaturas mínimas, que por consequência elevarão as temperaturas médias diárias, diminuindo a amplitude térmica diária.

O modelo global HadAM3 foi utilizado para realizar projeções climáticas para cenários de concentração dos gases do efeito estufa (A2 e B2) proposto pelo IPCC (2001). As integrações do HadAM3 se iniciaram no período pré-industrial (1860) e seguiram até o futuro, até 2100. O cenário A2 projeta uma alta concentração de gases de efeito estufa e o B2 considera baixa concentração destes gases a partir da hipótese de que todos os países ratificariam o protocolo de Kyoto (IPCC, 2001).

Considerando valores médios globais, Johns et al. (2001) mostrou que o HadAM3 projetou aquecimento em relação ao clima presente. Para o cenário B2 o aquecimento seria de +2,9°C e no A2 o aumento de temperatura pode chegar a +4°C em relação ao clima presente até o ano 2100. O aquecimento sobre as áreas continentais atingiria valores maiores, ou seja, até +6°C e +4°C nos cenários A2 e B2, respectivamente, ou seja, aproximadamente o dobro do projetado para a atmosfera

sobre os oceanos. Nos cenários obtidos do HadAM3, a precipitação média global sobre os continentes apresenta períodos de aumento e de redução em relação ao clima presente. No entanto, sobre os oceanos o HadAM3 projeta redução entre 0,10 e 0,15 mm/dia até o ano de 2100, com maiores reduções para o cenário A2.

Para a América do Sul, Ambrizzi et al. (2007) avaliaram cenários de mudanças climáticas utilizando 3 modelos climáticos regionais (PRECIS, RegCM3 e ETA/CPTEC/CPTEC) aninhados às simulações do clima presente e futuro (cenários A2 e B2) do modelo global HadAM3. Os resultados indicaram redução da intensidade da chuva durante a estação chuvosa nas regiões norte/nordeste do Brasil para os cenários futuros. Nas demais regiões brasileiras, Ambrizzi et al. (2007) mostraram que as mudanças na precipitação devem ser menores e também obtiveram um baixo nível de confiança nas projeções devido à baixa concordância entre as simulações dos 3 modelos regionais. Este trabalho destacou que as mudanças na precipitação do clima presente para o clima futuro seriam maiores no cenário A2. Com relação à temperatura, Ambrizzi et al. (2007) obtiveram aquecimento em todas as regiões do país nos cenários A2 e B2, com alta concordância entre os 3 modelos regionais, exceto na região centro-oeste do Brasil. Esta região em particular não apresentou mudanças na temperatura para o cenário B2. Da mesma forma que para a precipitação, as maiores mudanças foram obtidas para o cenário A2 sobre a região amazônica. Quantitativamente, nesta área a estimativa foi de aumento na temperatura média anual de +4 – +8°C e de +3– +5°C para os cenários A2 e B2, respectivamente. Para o nordeste do Brasil, o aquecimento projetado atingiu +2 – +3°C no cenário B2 e até +4°C no A2. As regiões centro-oeste e sudeste do Brasil apresentaram aquecimento semelhante ao do

nordeste no cenário B2 e da ordem de +4 – +6°C para o A2. Na região sul do Brasil, o cenário B2 indicou aquecimento de +2 – +3°C enquanto no A2 o aquecimento chegou a +3 – +4°C.

Uma questão importante em mudanças climáticas é entender como os sistemas de tempo (sistemas frontais, ciclones extratropicais, ciclones tropicais, circulações de brisa, etc.) serão influenciados nos cenários de aquecimento global. Esta questão já vem sendo investigada, com um dos focos direcionados a entender o comportamento dos ciclones extratropicais nos cenários de aquecimento. Utilizando modelo global, Zhang e Wang (1997) encontraram redução na atividade de ciclones durante o inverno do Hemisfério Norte ao considerar aumento dos gases do efeito estufa. Os principais mecanismos físicos responsáveis por esta redução seriam (a) diminuição do gradiente meridional de temperatura, entre os trópicos e extratropicos desde a superfície até a média-troposfera, (b) redução do contraste térmico terra-mar no leste das regiões costeiras dos continentes, e (c) o aumento dos fluxos de calor latente.

Em um cenário com o dobro de CO<sub>2</sub>, Sinclair e Watterson (1999) encontraram redução de 10 a 15% na atividade de ciclones e anticiclones em todo o globo. Contudo, Sinclair e Watterson (1999) discutiram que há indícios de aumento da frequência de ciclones durante o inverno próximo dos principais “storm tracks”, ou seja, regiões conhecidas por intensa atividade ciclônica nos dois hemisférios.

Considerando a concentração de gases de efeito estufa observada para o período 1850 – 1990, e a projeção do cenário IS92a para o período 1990 – 2100, Fyfe (2003) avaliou a climatologia de ciclones extratropicais no Hemisfério Sul. Os ciclones foram definidos por Fyfe (2003) como centros de baixa pressão nos campos de pressão

ao nível médio do mar (PNMM), para que somente sistemas intensos fossem incluídos. Este estudo mostrou o deslocamento da zona baroclínica em direção ao pólo concordando com redução do número de ciclones na faixa de 40°S – 60°S de latitude, e aumento nas latitudes polares (ao sul 60°S). Considerando as duas faixas latitudinais investigadas, Fyfe (2003) obteve redução de 30% no total de ciclones até 2100.

Em um estudo seguinte, Lambert e Fyfe (2006) rastrearam ciclones na PNMM média diária dos modelos utilizados pelo IPCC AR4 (2007) nos cenários futuros SRES-B1, SRES-A1B e SRES-A2 (IPCC TAR, 2001). Eles encontraram redução no total de ciclones (PNMM  $\leq$  1015 hPa) e aumento no número de ciclones intensos (PNMM  $\leq$  970 hPa para o Hemisfério Norte e PNMM  $\leq$  960 hPa para o Hemisfério Sul). As maiores mudanças ocorreram no cenário A2 (cenário de maior concentração de gases de efeito estufa). Contudo, as análises de Lambert e Fyfe (2006) não mostraram mudanças evidentes na distribuição geográfica dos ciclones nos cenários de aquecimento global.

Sob um cenário de aquecimento de 3K e utilizando modelo global, Watterson (2006) estudou possíveis impactos na climatologia de ciclones na faixa latitudinal 20°N – 70°N. Watterson (2006) mostrou que pode ocorrer redução de 6% no número de ciclones durante o inverno e de 2% no total anual, mas a intensidade dos ciclones não sofreu grandes mudanças em relação aos do clima presente.

Utilizando o modelo regional RegCM3, aninhado ao Hadley Centre Global Atmospheric Model (HadAM3H – resolução horizontal de 1,25 (latitude) X 1,875 (longitude) – Jones et al., 2001), Lionello et al. (2007) avaliaram possíveis mudanças, em relação ao clima presente (1961 – 1990), na climatologia de ciclones sobre a Europa no período 2071 – 2100 para os cenários A2 e B2. Em termos regionais,

Lionello et al. (2007) obtiveram aumento da intensidade média das ciclogêneses sobre o Atlântico Norte e Leste e redução sobre a Rússia e leste da região mediterrânea. As mudanças foram maiores para o cenário de maior aquecimento (A2).

De acordo com o IPCC AR4 (2007), embora poucos estudos tenham sido realizados, os resultados apontam para redução no número de ciclones fracos e aumento de ciclones intensos. Estas mudanças seriam maiores no cenário A2. O IPCC AR4 (2007) também aponta para mudança na faixa preferencial de deslocamento dos ciclones extratropicais, com migração em direção aos pólos, embora as análises de Lambert e Fyfe (2006) não apontem para comportamento semelhante. Além disto, a maior parte das conclusões sobre os ciclones no clima futuro foi obtida de projeções realizadas com modelos globais, que possuem resolução horizontal grosseira para resolver adequadamente muitos dos sistemas de tempo.

### **1.3 Objetivos**

Este estudo tem como objetivo analisar possíveis impactos na climatologia de ciclones extratropicais que se desenvolvem sobre o Atlântico Sul nos cenários de mudanças climáticas B2 e A2 (Johns et al., 2001). A análise destas climatologias no presente e futuro é realizada nas simulações climáticas dos modelos HadAM3 (global) e RegCM3 (regional). Como objetivos específicos têm-se:

1. avaliar a eficiência do RegCM3 aninhado no HadAM3 em simular a climatologia de ciclones para o clima presente. Isto é obtido através da validação da climatologia de ciclones simulados pelo RegCM3 com as obtidas diretamente da re-análise do NCEP para o clima presente (período 1975 – 1989);

2. obter a climatologia dos ciclones simulados pelo RegCM3, aninhado no HadAM3, para os cenários B2 e A2, no período de 2071 – 2085. Comparações destas simulações com a do clima presente possibilitam avaliar o impacto dos cenários climáticos na climatologia de ciclones (número de eventos, intensidade, duração, deslocamento, velocidade de deslocamento e região preferencial de ocorrência).

Esta dissertação está organizada da seguinte forma. O capítulo 2 descreve os modelos RegCM3 e HadAM3, o algoritmo utilizado no rastreamento dos ciclones, os dados e a metodologia. O capítulo 3 apresenta uma avaliação da climatologia simulada pelo RegCM3 para o clima presente e tendências para os cenários B2 e A2. E o capítulo 4 apresenta o sumário e as conclusões deste trabalho.

## 2 METODOLOGIA

### 2.1 O Modelo Climático Regional – RegCM3

O RegCM3 mantém a mesma estrutura dinâmica do MM5 (é um modelo compressível, em diferenças finitas, hidrostático e em coordena vertical sigma), utiliza um esquema “*split-explicit*” para integração no tempo e possui um algoritmo que reduz a difusão horizontal na presença de intensos gradientes de topografia (Giorgi et al., 1993a,b).

A primeira versão do RegCM3 é resultado da inclusão de uma série de parametrizações físicas, de transferência radiativa e de interação solo - planta - atmosfera aplicada à estrutura dinâmica presente no MM4 visando obter um modelo regional para estudos de clima (Dickinson et al., 1989 e Giorgi, 1990).

Atualmente se dispõe da versão 3 do Modelo Regional Climático (RegCM3). Esta versão inclui o Biosphere - Atmosfere Transfer Scheme (BATS) para representar processos de interação solo - planta – atmosfera (Dickinson et al., 1986) e o esquema de transferência radiativa do NCAR Community Climate Model (CCM) versão 3 (Kiehl et al., 1996).

Os processos úmidos no RegCM3 são resolvidos através de uma parametrização para convecção cumulus profundo e outra para a precipitação na escala da grade. O RegCM3 dispõe de três esquemas para parametrização de convecção cumulus profundo, Grell (Grell, 1993) com os fechamentos de Arakawa e Schubert (Grell et al., 1994) e de Fritsch e Chappell (Fritsch e Chappell, 1980), Kuo

(Anthes, 1977) e Emanuel (Emanuel, 1991). Neste estudo foi utilizado o esquema de parametrização de convecção cumulus profundo de Grell (Grell, 1993) que considera uma corrente ascendente e uma descendente que só se misturam no topo e na base destas (não há entranhamento lateral). O aquecimento e umedecimento resultante da aplicação do esquema são determinados a partir dos fluxos de massa de compensação de desentranhamento no topo e base da nuvem. O fechamento utilizado será o de Fritsch e Chappell (Fritsch e Chappell, 1980) que remove a energia de flutuação disponível durante um período de tempo específico (neste estudo será de 30 minutos). O esquema para parametrização da precipitação na escala da grade é o SUBEX (Subgrid Explicit Moisture Scheme, Pal et al., 2000) que resolve apenas uma equação para previsão de água de nuvem que é diretamente utilizada nos cálculos de transferência radiativa.

Foi utilizado relaxação exponencial nas fronteiras do RegCM3 pois Giorgi et al. (1993a) mostraram que esta fornece uma transição mais suave entre as simulações e as condições de fronteira (projeções do HadAM3).

## **2.2 O Modelo Global do Hadley Centre – HadAM3**

São utilizadas neste estudo as projeções da versão atmosférica do modelo global do Hadley Centre (HadAM3) forçadas com anomalias de temperatura da superfície do mar (TSM) obtidas da componente oceânica do modelo acoplado HadCM3. Os efeitos do vapor d'água, ozônio e gases de efeito estufa são representados explicitamente nos cálculos de transferência radiativa do HadAM3 (Edwards e Slingo, 1996) que também possui uma parametrização simples de aerossóis (Cusak et al, 1998). A descrição

completa de ambos modelos e o procedimento de simulação podem ser encontrados em Gordon et al. (2000), Pope et al. (2000) e Johns et al. (2001).

As simulações do HadAM3 foram realizadas em uma grade com 19 níveis em coordenada vertical híbrida, e com resolução horizontal de 2,5° de latitude por 3,75° de longitude. As simulações do HadAM3 cobrem o período pré-industrial e se estendem até o período futuro (1860 – 2100). Para este período, foram realizadas simulações considerando os cenários de aumento de concentração dos gases do efeito estufa (Figura 2.1) conhecidos na literatura como B2 e A2 (IPCC, 2001), cujas concentrações são fornecidas em Johns et al. (2001).

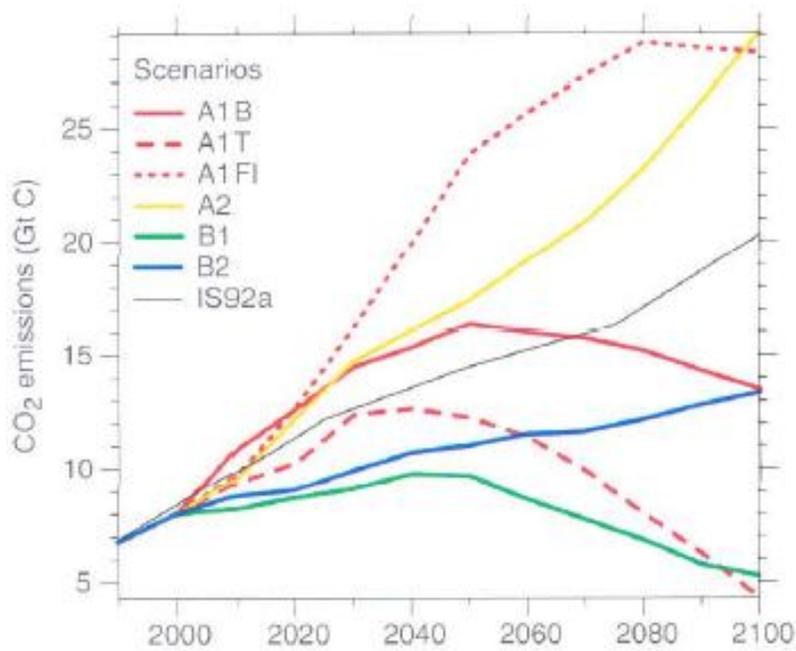


Figura 2.1 – Emissão de CO<sub>2</sub> no clima presente (até o ano 2000) e cenários de emissões no período 2000 – 2100. Fonte: IPCC (2001).

### 2.3 Descrição do Algoritmo para Rastreamento dos Ciclones Extratropicais

O algoritmo utilizado para identificação e rastreamento dos ciclones extratropicais foi desenvolvido por Sugahara (2000) e adaptado por Reboita (2008). Este algoritmo rastreia ciclones extratropicais a partir de mínimos de vorticidade relativa, calculados a partir da velocidade do vento a 10 metros de altura.

O processo de identificação e rastreamento dos ciclones envolve basicamente três etapas: 1) identificação do mínimo de vorticidade, 2) localização da posição após o primeiro deslocamento e 3) busca pelas posições seguintes (Reboita, 2008).

Na primeira etapa, o algoritmo compara a vorticidade relativa a 10 metros de altura ( $\zeta_{10}$ ) em cada ponto de grade com a dos pontos vizinhos e considera como centro do ciclone o ponto que possuir a menor  $\zeta_{10}$ , se a vorticidade neste ponto for menor ou igual a um limiar pré-estabelecido. Após identificar um mínimo de vorticidade, o algoritmo interpola o campo de  $\zeta_{10}$  para uma grade de alta resolução para corrigir a posição do sistema.

Na etapa seguinte, a posição do mínimo de  $\zeta_{10}$  identificada na grade de baixa resolução é transferida para a grade do tempo posterior (também de baixa resolução), como um referencial para a busca da nova posição através dos procedimentos descritos na etapa 1.

Uma vez conhecida a posição de um sistema em dois tempos consecutivos é possível determinar a sua velocidade de deslocamento. Esta velocidade será empregada na etapa 3 (busca pelas posições seguintes) como uma estimativa inicial (*first guess*) da posição do sistema no tempo futuro. Ao saber aproximadamente a nova

posição do ciclone, o algoritmo repete os procedimentos iniciais: busca da posição do mínimo de  $\zeta_{10}$  ao redor dos pontos vizinhos e correção da posição na grade de alta resolução. As demais posições futuras são calculadas a partir da estimativa da velocidade de deslocamento do sistema sempre entre os dois últimos intervalos de tempo consecutivos.

Após rastrear todos os ciclones localizados no primeiro passo de tempo o algoritmo repete as mesmas etapas para os demais. Desta forma, o algoritmo identifica e rastreia repetidamente ciclones que já foram identificados e rastreados nos passos de tempo anteriores. Então, o algoritmo aplica um filtro que elimina os sistemas que apresentam três ou mais posições iguais as observadas em trajetórias rastreadas em passos de tempo anteriores.

O algoritmo fornece posição (latitude, longitude), intensidade (em termos de vorticidade do vento a 10 m de altura) e pressão na superfície para todos os passos de tempo ao longo da trajetória de cada ciclone.

Uma descrição completa deste algoritmo é encontrada em Sugahara (2000) e em Reboita (2008).

## 2.4 Simulações Climáticas

Foram realizadas simulações climáticas com o RegCM3 aninhado ao HadAM3 para o clima presente (1975 – 1989) e para os cenários B2 e A2 do clima futuro (2071 – 2085). Giorgi e Mearns (1999) sugerem que sejam excluídos da análise os primeiros meses de integração para permitir um ajuste entre a dinâmica interna do modelo e fatores regionais no domínio de simulação. Portanto, neste estudo foram excluídos das

análises os 12 primeiros meses de integração. Assim, a simulação do clima presente foi iniciada em janeiro de 1974 e as do clima futuro em janeiro de 2070. A área de abrangência das simulações (Figura 2.2) inclui grande parte da América do Sul, leste do Oceano Pacífico e Atlântico Sul. Optou-se por estes limites por corresponderem ao maior domínio permitido com o recorte disponível do HadAM3. As simulações do RegCM3 utilizaram 60 km de resolução horizontal, 18 níveis verticais e intervalo de tempo de integração de 90 segundos. Os dados de fisiografia (cobertura vegetal e tipo de solo) e topografia para as simulações foram obtidos do United States Geological Survey (USGS) e Global Land Cover Characterization (GLCC, Loveland et al., 2000), respectivamente, com resolução horizontal de 10-minutos.

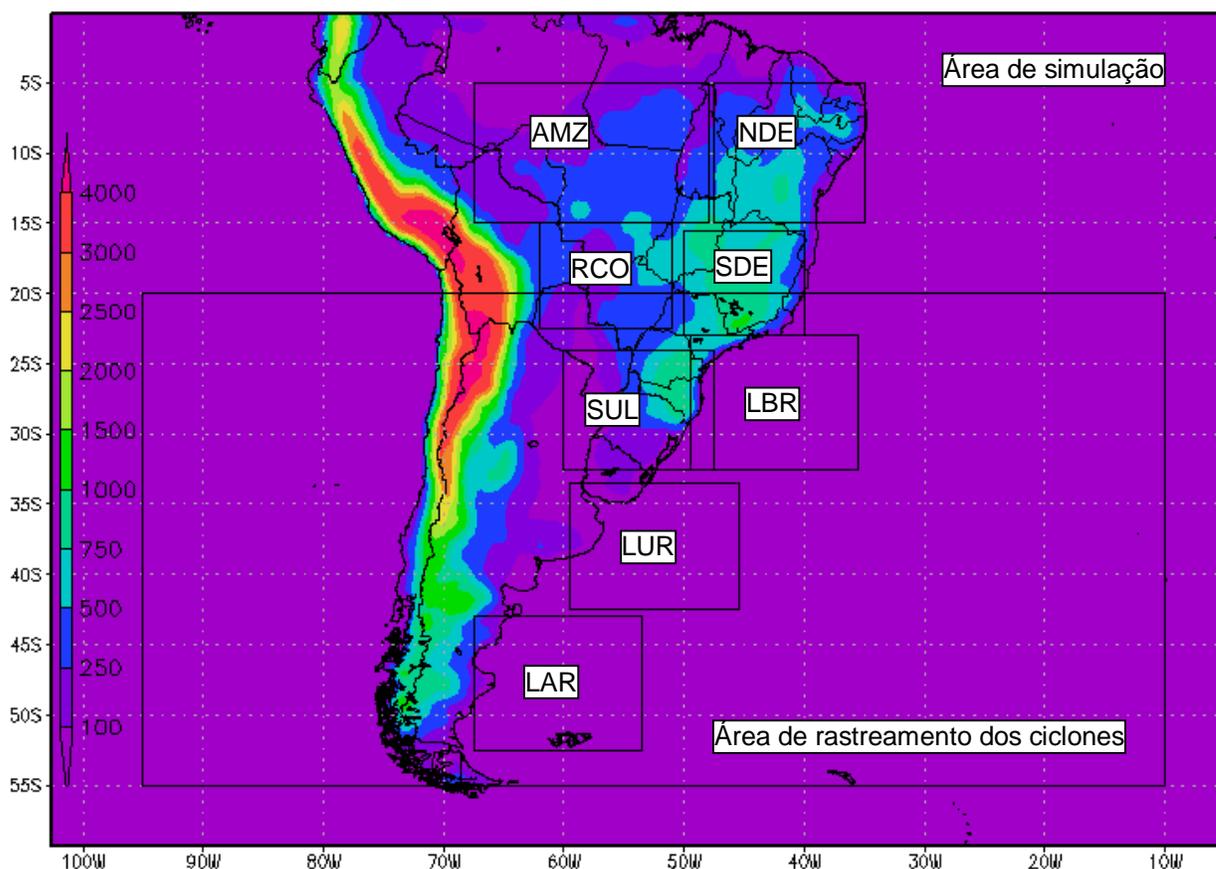


Figura 2.2 – Domínio das simulações, topografia da América do Sul (em metros) e regiões de interesse.

As condições iniciais e de fronteira (vento, temperatura, geopotencial, umidade relativa e pressão) e TSM para as simulações com o RegCM3 foram fornecidas pelo modelo HadAM3, tanto para o clima presente como para o futuro. O RegCM3 utilizou as mesmas concentrações dos gases de efeito estufa (CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>, N<sub>2</sub>O e CFCs), especialmente uniformes, do modelo HadAM3 (Johns et al. 2001). Os cenários climáticos futuros adotados neste estudo correspondem aos cenários A2 e B2 SRES (IPCC, 2001). O cenário A2 projeta uma alta concentração de gases de efeito estufa e o B2 considera baixa concentração destes gases (IPCC, 2001).

## **2.4.1 Validação e cenários B2 e A2: Dados e Metodologia**

### **2.4.1.1 Precipitação e Temperatura**

Foi avaliada a eficiência do RegCM3 em simular precipitação e temperatura na América do Sul. Analisou-se as médias anual e sazonal no domínio da Figura 2.2 e o ciclo anual através de médias mensais em 5 regiões sobre o Brasil (Amazônia – AMZ, Nordeste – NDE, Centro-Oeste – RCO, Sudeste – SDE e Sul – SUL, Figura 2.2) e em 3 regiões na costa leste da América do Sul (costa sul-sudeste do Brasil – LBR, sul do Uruguai e leste da Argentina – LUR e costa sul da Argentina - LAR, Figura 2.2) indicadas como regiões ciclogênicas (Gan, 1992; Sinclair, 1996 e Reboita, 2008).

A precipitação do *Climate Prediction Center - Merged Analysis of Precipitation* (CMAP) com resolução de 2,5° X 2,5° (latitude X longitude), obtida em [www.cdc.noaa.gov/cdc/data.cmap.html](http://www.cdc.noaa.gov/cdc/data.cmap.html), e a do *Climatic Research Unit* (CRU) foram utilizadas para validar a precipitação simulada pelo RegCM3. Destaca-se que o período de estudo no RegCM3 e CRU foi de 15 anos (1975 – 1989) e no CMAP de 11 anos

(1979 – 1989). Isto porque se optou por utilizar somente a precipitação do CMAP no período de simulação do RegCM3.

Utilizou-se ainda a temperatura (a 2 metros de altura) do CRU e do *National Center for Environmental Prediction – National Center for Atmospheric Research* (NCEP/NCAR – que será citado como NCEP – Kalnay et al., 1996), do período 1975 – 1989, para validar o RegCM3.

#### **2.4.1.2 Climatologia dos Ciclones Extratropicais**

O algoritmo para rastreamento dos ciclones extratropicais foi aplicado às simulações do RegCM3 (clima presente e cenários B2 e A2 do clima futuro), na reanálise do NCEP (vento zonal e meridional a 10 metros de altura) e na simulação do HadAM3 (clima presente). O algoritmo fornece posição, vorticidade e pressão ao nível médio do mar para todas as posições da trajetória de cada ciclone. A partir destas informações foram calculadas as regiões ciclogênicas preferenciais, tempo de vida, deslocamento, velocidade de deslocamento e intensidade (dada pela vorticidade no centro do ciclone). A análise destas informações permitiu elaborar uma climatologia para os ciclones extratropicais sobre o Atlântico Sul em termos anuais e sazonais.

A validação do RegCM3 e do HadAM3 foi realizada comparando a climatologia dos ciclones simulados com a obtida do NCEP. Como a resolução espacial do RegCM3 e do HadAM3 são diferentes da resolução espacial do NCEP, optou-se por interpolar as simulações (RegCM3 e HadAM3) para a mesma resolução espacial do NCEP (2,5° X 2,5° – latitude X longitude).

As fronteiras do domínio de rastreamento dos ciclones (Figura 2.2) foram colocadas suficientemente distantes das bordas da grade do RegCM3 para evitar que a

área de aplicação do algoritmo de rastreamento fosse influenciada por erros devido as fronteiras laterais. Após o rastreamento foram excluídos das análises todos os sistemas que se iniciaram sobre o Oceano Pacífico e sobre o continente.

Buscou-se todo sistema ciclônico com duração mínima de 24 horas e  $\zeta_{10} \leq -1,0 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$ . Com relação à duração definiu-se também um limiar máximo, de 10 dias. Desta forma se algum sistema ultrapassou este limiar, sua última posição foi registrada como a posição correspondente a 10 dias.

Foram considerados dois grupos de ciclones: um que inclui todos os ciclones com vorticidade relativa inicial  $\zeta_{10} \leq -1,0 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$ , e outro formado somente pelos ciclones que se iniciaram com  $\zeta_{10} \leq -2,5 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$  (ciclones inicialmente intensos).

Com base na primeira posição dos sistemas calculou-se mapas de densidade anual e sazonal de ciclogêneses. A densidade é definida como a razão do número de sistemas em regiões de  $5^\circ \times 5^\circ$  (latitude X longitude) pela área da mesma, semelhante à Reboita (2008). Para facilitar a apresentação dos resultados, a densidade foi multiplicada por  $10^4$  e dividida pelo total de anos (o que fornece a média anual).

Com as posições inicial e final de cada ciclone, fornecida pelo algoritmo de rastreamento, calculou-se o deslocamento dos ciclones e conhecendo a duração do sistema (também fornecida pelo algoritmo de rastreamento) se obteve a velocidade média.

### 3 RESULTADOS

#### 3.1 Temperatura e Precipitação

##### 3.1.1 Clima Presente

As análises – média anual – da precipitação do CRU (Figura 3.1a) e do CMAP (Figura 3.1b) foram utilizadas para validar o RegCM3 (Figura 3.1c). O CMAP é mais seco que o CRU nas regiões norte e centro-oeste do Brasil e mais úmido no nordeste. Contudo, a distribuição espacial da precipitação no CRU e no CMAP é similar: bastante úmido na região norte (de 4 a 6 mm/dia), úmido na regiões centro-oeste, sul e sudeste (2 a 4 mm/dia) e, seco na região nordeste (1 a 2 mm/dia). O RegCM3 simula de forma coerente a distribuição espacial da precipitação do CRU e CMAP, entretanto, é mais seco (aproximadamente 2 mm/dia a menos) do que estas análises em toda a área estudada. É importante salientar que o RegCM3 acumula precipitação nas fronteiras do domínio de simulação e, por isso, não serão analisadas as informações das variáveis meteorológicas numa faixa de aproximadamente 5° (latitude, longitude) próximo as bordas.

Na estação quente (DJF), o CRU (Figura 3.2a) e o CMAP (Figura 3.2c) mostram precipitação de 6 a 8 mm/dia em toda área que compreende as regiões norte, centro-oeste e sudeste do Brasil (sendo o CRU ligeiramente mais úmido) e precipitação da ordem de 4 a 6 mm/dia sobre a região sul, exceto no sul do Rio Grande do Sul com precipitação na faixa de 2 a 4 mm/dia. As taxas de precipitação no CRU e no CMAP são semelhantes na região nordeste do Brasil (2 a 4 mm/dia), exceto na parte leste onde o

CRU é mais seco, com precipitação de 1 a 2 mm/dia. A região mais úmida nas análises indica a presença da Zona de Convergência do Atlântico Sul (ZCAS) que é uma faixa persistente de nebulosidade convectiva com orientação noroeste-sudeste, associada a uma zona de convergência na baixa troposfera (Kodama, 1992 e Quadro, 1994). A ZCAS se estende desde o sul da Amazônia até o Oceano Atlântico Subtropical e é mais evidente nos meses de verão, ou seja, no período de maior convecção tropical. Quadro (1994) observou, no período de 1980 a 1989, ao menos um evento de ZCAS, com duração mínima de 4 dias, em todos os meses de verão analisados.

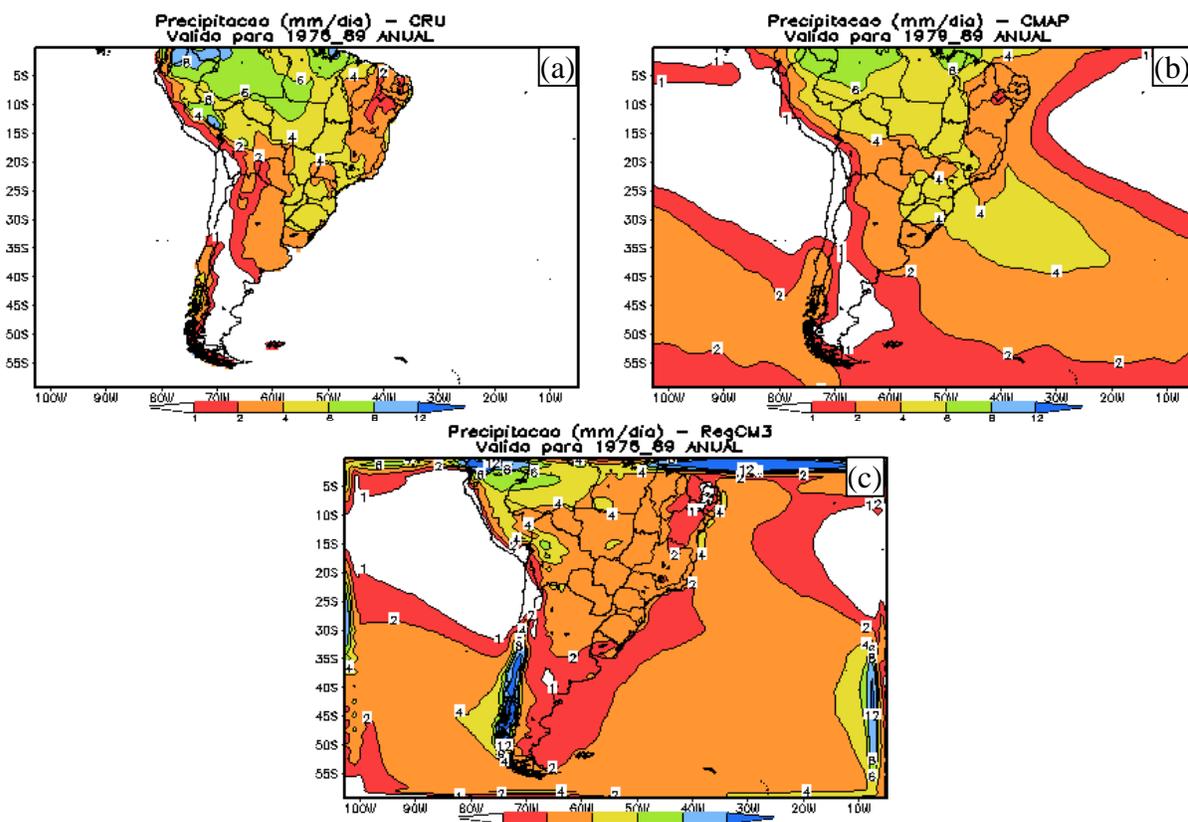


Figura 3.1 – Precipitação média (mm/dia) anual do CRU e RegCM3 para o período de 1975 – 1989 e do CMAP para o período 1979 – 1989: (a) análise do CRU, (b) análise do CMAP e (c) simulação do RegCM3.

No período JJA, CRU (Figura 3.2d) e CMAP (Figura 3.2e) mostram uma extensa área seca sobre a parte central do Brasil que inclui a região norte, ao sul de 10°S,

regiões centro-oeste e sudeste, acima de 20°S, e região nordeste, exceto o litoral. Comparada a essas áreas, o sul da região sudeste e a região sul do Brasil são mais úmidas e grande parte da precipitação é proveniente da passagem de ciclones extratropicais. Estes são responsáveis pelo núcleo de maior precipitação sobre o Rio Grande do Sul durante o inverno, que corresponde à estação de maior atividade ciclogênica na costa leste da América do Sul (Gan, 1992; Sinclair, 1995; Simmonds e Keay, 2000; Sugahara, 2000 e Reboita, 2008 – quando considerada a climatologia de ciclones inicialmente intensos).

Por outro lado, o máximo de precipitação na costa leste do nordeste do Brasil estava relacionado aos sistemas de ventos locais e, a maior precipitação no outono e inverno estaria, provavelmente, associada à convergência dos alísios com a brisa terrestre (Kousky, 1980). Isto porque neste período a brisa terrestre é mais intensa devida ao maior contraste térmico entre a temperatura do ar em superfície sobre o continente e a temperatura na superfície do mar.

O RegCM3 (Figura 3.2c,f), mesmo mais seco, reproduz a distribuição espacial da precipitação das análises do CRU e CMAP (Figura 3.2) nos trimestres DJF (dezembro, janeiro e fevereiro) e JJA (junho, julho e agosto). Contudo, no trimestre quente a banda de precipitação sobre o Oceano Atlântico no CMAP (Figura 3.2b), correspondente ao ramo oceânico da ZCAS (Carvalho et al., 2002), aparece deslocada para nordeste no RegCM3 (Figura 3.2c). Salieta-se que Machado (2008) utilizando o RegCM3 aninhado ao modelo global CPTEC/COLA, para os trimestres DJF de 2005/2006 e 2006/2007, mostrou deslocamento similar para nordeste da ZCAS. A precipitação do RegCM3 (Figura 3.2c) no norte e nordeste do Brasil foi semelhante a do CRU (Figura 3.2a) e

CMAP (Figura 3.2b) nesta estação. No trimestre JJA, o RegCM3 (Figura 3.2f) simulou a faixa de precipitação sobre o Sul do Brasil e a estreita banda de precipitação na costa (que se estende da região sudeste ao nordeste brasileiro). Embora o modelo tenha simulado a intensidade da precipitação no litoral nordestino, subestima a intensidade sobre o Rio Grande do Sul, se comparado com as análises (CRU – Figura 3.2d e CMAP – Figura 3.2e).

O RegCM3 (Figura 3.2c) simula também a grande área seca presente nas análises do CRU (Figura 3.2a) e do CMAP (Figura 3.2b) que no verão atinge a metade norte do Chile e metade sul da Argentina e que no inverno inclui toda a Argentina, Paraguai, Bolívia e litoral do Peru (Figuras 3.2d,e,f).

A Figura 3.3 apresenta a temperatura média anual do período 1975 – 1989. O CRU (Figura 3.3a) concorda com o NCEP (Figura 3.3b) sobre os Andes e no Brasil, exceto na região norte e parte central do nordeste do Brasil, onde é mais quente. O RegCM3 (Figura 3.3c) simula padrão espacial semelhante ao CRU (Figura 3.3a) sobre o centro-oeste e norte do Brasil, exceto na faixa do oeste da Amazônia, onde é mais frio e similar ao NCEP (Figura 3.3b). Apresenta uma faixa fria mais estreita e extensa que nas análises (Figuras 3.3a,b) sobre o leste das regiões sul e sudeste do Brasil e é semelhante ao NCEP (Figura 3.3b) no nordeste do Brasil.

No trimestre DJF, o CRU (Figura 3.4a) apresenta temperaturas semelhantes ao NCEP (Figura 3.4b) somente no litoral nordestino, sul e sudeste do Brasil e é mais quente nas demais regiões. No inverno, a área mais fria sobre o sul e sudeste do Brasil atinge latitudes menores no NCEP (Figura 3.4e), que também apresenta temperaturas menores que as do CRU (Figura 3.4d) em todo Amazonas e Pará. Contudo, o padrão

espacial da temperatura nas demais regiões é similar entre as análises (CRU – Figura 3.4d e NCEP – Figura 3.4e).

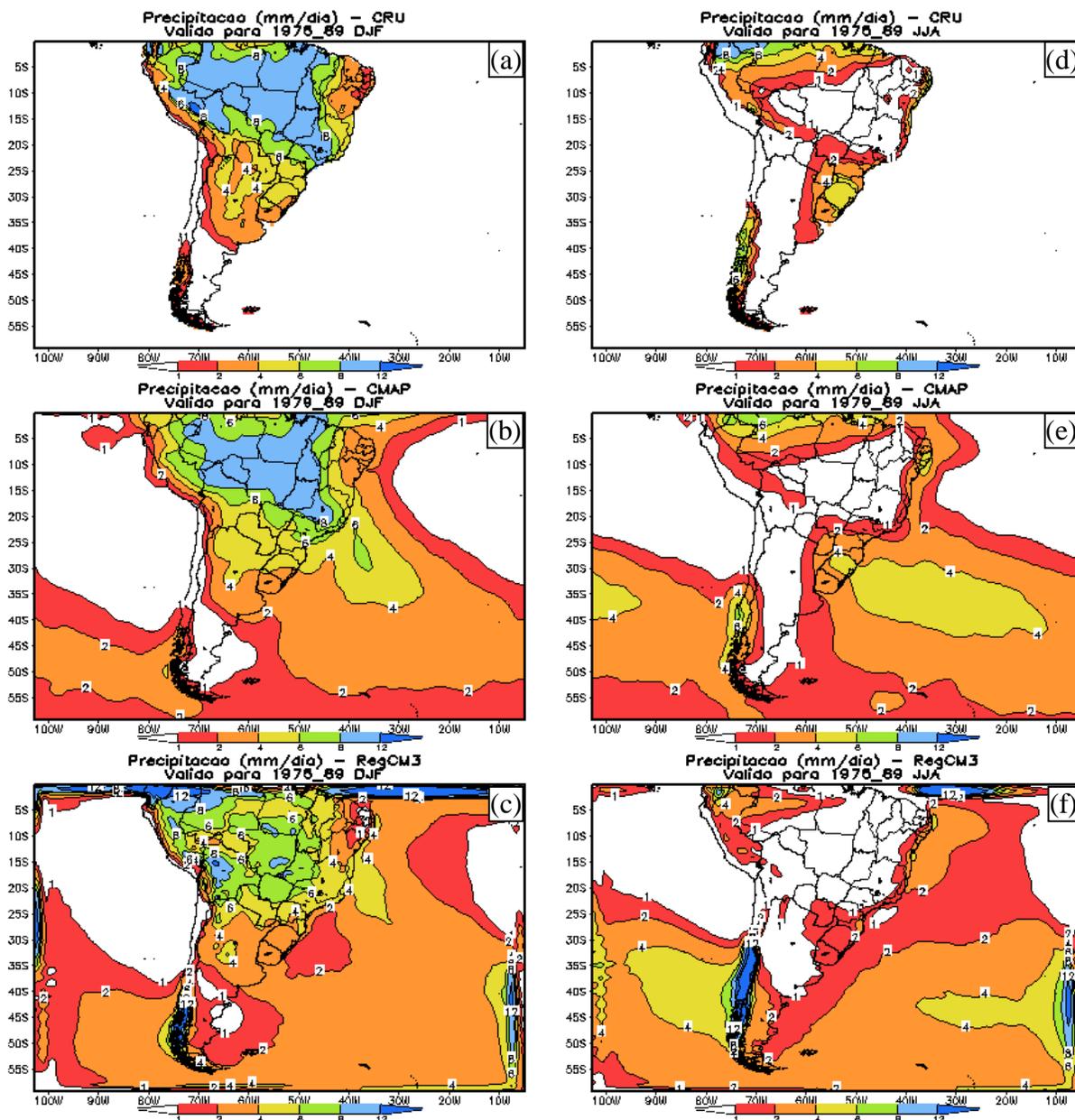


Figura 3.2 – Precipitação média (mm/dia) do CRU e RegCM3 para o período de 1975 – 1989 e do CMAP para o período 1979 – 1989, para o trimestre DJF: (a) análise do CRU, (b) análise do CMAP e (c) simulação do RegCM3 e para o trimestre JJA: (d) análise do CRU, (e) análise do CMAP e (f) simulação do RegCM3.

No verão, o RegCM3 (Figura 4.3c) simulou distribuição espacial de temperatura semelhante ao NCEP (Figura 3.4b), com temperatura entre 20 e 25°C em todo o Brasil.

Porém, na área central do nordeste e leste da região sul simulou temperaturas maiores e no Atlântico menores que o NCEP (Figura 3.4b). No período JJA, a faixa de temperaturas menores sobre o sul e sudeste do Brasil, presente nas análises CRU (Figura 3.4d) e NCEP (Figura 3.4e), é mais larga e se estende até a região nordeste no RegCM3 (Figura 3.4f). Contudo, RegCM3 e CRU apresentam padrão similar no restante do domínio continental.

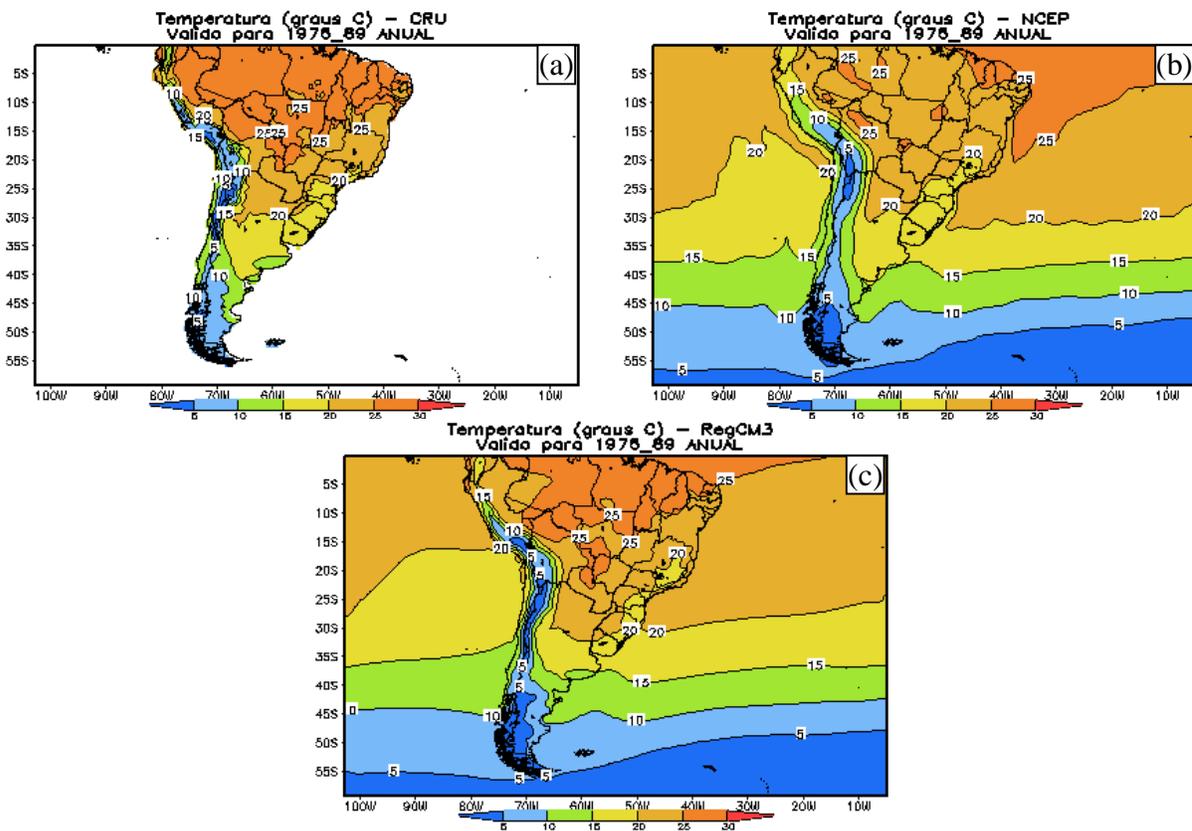


Figura 3.3 – Temperatura média (°C) anual para o período 1975 – 1989: (a) análise do CRU, (b) análise do NCEP e (c) simulação do RegCM3.

As figuras 3.5 e 3.6 apresentam, nas regiões destacadas na Figura 2.2, os ciclos anuais médios de temperatura do ar e precipitação.

As análises do CRU e CMAP (Figura 3.5a) mostram o ciclo anual da precipitação na região norte do Brasil (AMZ) bem pronunciado, com mínimo de 1 mm/dia no mês de

julho e máximo de 10 mm/dia na estação chuvosa. Nesta região (Figura 3.5f), o NCEP apresenta período frio de abril a julho e o CRU de maio a julho, e quente entre agosto a novembro no NCEP e setembro a novembro no CRU. O NCEP é até 2°C mais frio que o CRU de outubro a junho e similar nos meses de agosto e setembro.

Embora simule corretamente a fase do ciclo anual de precipitação, o RegCM3 é mais seco que o CRU e CMAP na região AMZ (Figura 3.5a) durante o período chuvoso. O ciclo anual de temperatura simulado é diferente do CRU e NCEP (Figura 3.5f), com a estação quente começando em agosto e setembro no NCEP e CRU, respectivamente, e em maio no RegCM3. Entretanto, o RegCM3 posicionou corretamente o trimestre quente do NCEP embora tenha adiantado de abril a junho para fevereiro a abril o período frio. A temperatura simulada na AMZ começa a aumentar ao mesmo tempo que a chuva começa a diminuir, e atinge o pico no fim da estação seca. Isto indica um forte *feedback* entre ausência de chuva, redução da nebulosidade e aumento da temperatura no RegCM3 o que não é encontrado nas observações.

O CRU e o CMAP apresentam o ciclo anual da precipitação semelhante na região nordeste (NDE – Figura 3.5b) com as estações chuvosa e seca bem definidas apresentando máximos e mínimos, respectivamente, nos períodos de dezembro a abril e maio a outubro. O CRU e CMAP apresentam o ciclo anual de precipitação semelhante. A temperatura do CRU, embora em fase com o NCEP, é cerca de 1 a 2°C mais quente de novembro a julho e aproximadamente 0,5°C superior no restante do período. O RegCM3 posicionou corretamente o pico da estação chuvosa do CRU e CMAP, entretanto, reduziu sua intensidade e duração, aumentando em dois meses a estação seca. Com relação à temperatura (Figura 3.5g), o ciclo anual é semelhante ao

NCEP, embora com amplitude anual ligeiramente maior que a desta reanálise, além disso  $0,4^{\circ}\text{C}$  mais frio na estação fria e  $1^{\circ}\text{C}$  mais quente em outubro (mês mais quente no NCEP e RegCM3).

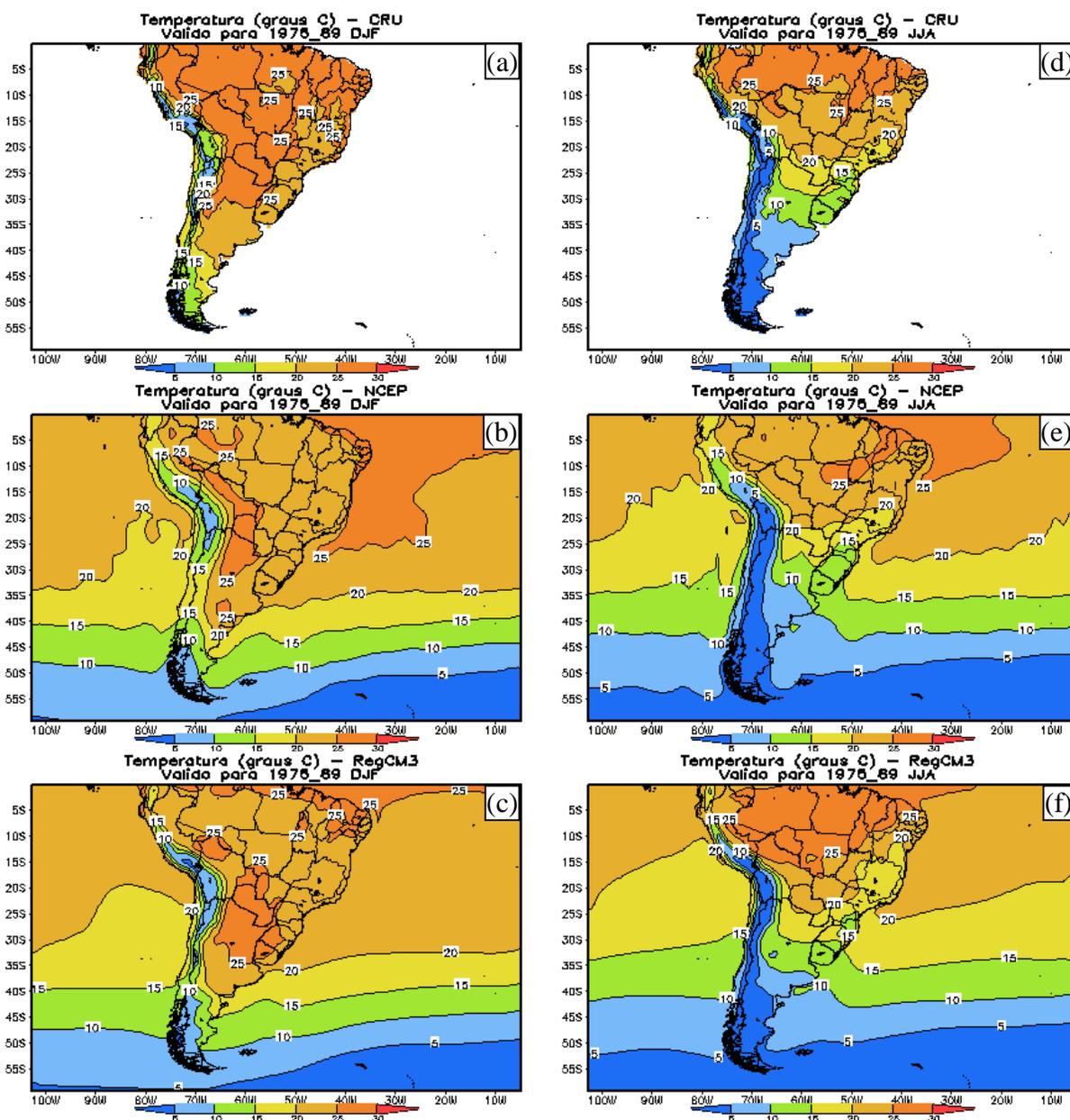


Figura 3.4 – Temperatura média ( $^{\circ}\text{C}$ ) no período de 1975 – 1989 para o trimestre DJF: (a) análise do CRU, (b) análise do NCEP e (c) simulação do RegCM3 e para o trimestre JJA: (d) análise do CRU, (e) análise do NCEP e (f) simulação do RegCM3.

Nas regiões RCO (Figura 3.5c) e SDE (Figura 3.5d), CRU e CMAP apresentam fase e amplitude do ciclo anual de precipitação semelhante, com a estação seca entre maio a setembro e a chuvosa entre novembro a março. Na região SUL (Figura 3.5e) estas análises apresentam fraca amplitude do ciclo anual de precipitação, com menor taxa de precipitação no trimestre junho – julho – agosto.

Na região centro-oeste (RCO – Figura 3.5c), o RegCM3 simula a fase do ciclo anual de precipitação do CMAP e CRU porém intensifica a estação seca e a chuvosa. O RegCM3 também simulou a variabilidade mensal da precipitação do CMAP e CRU na região SDE (Figura 3.5d), embora sempre mais seco. Na SUL (Figura 3.5e), concorda com as análises ao apresentar o inverno como a estação do ano menos chuvosa e ao simular o máximo de precipitação de novembro. No entanto, o RegCM3 é mais seco durante todo o ano, implicando em subestimativa de 50% da chuva do CMAP e CRU no período de março a setembro.

O NCEP é mais frio que o CRU no centro-oeste (Figura 3.6h) de novembro a julho e mais quente em agosto e setembro. Assim, o trimestre frio de maio a julho no NCEP coincide com o trimestre frio do CRU. No entanto, os máximos de temperatura no NCEP estão entre setembro a outubro e no CRU entre outubro a março. Na região sudeste (SDE – Figura 3.6i), o NCEP e o CRU mostram temperatura semelhante no inverno, já nas demais estações o CRU é mais quente que o NCEP. Na região sul (SUL – Figura 3.6j), NCEP e CRU apresentam o ciclo anual de temperatura bem definido, com o NCEP ligeiramente mais frio no verão.

Quanto a temperatura na RCO (Figura 3.5h), o padrão do ciclo anual do RegCM3 é mais próximo do NCEP, embora mais quente no inverno e primavera. Na região SDE

(Figura 3.5i), o RegCM3 simula o inverno mais rigoroso e a primavera mais quente que as análises e as demais estações semelhante ao NCEP. Na região SUL (Figura 3.5j), o RegCM3 simulou a fase e amplitude anual da temperatura das análises, embora ligeiramente mais quente.

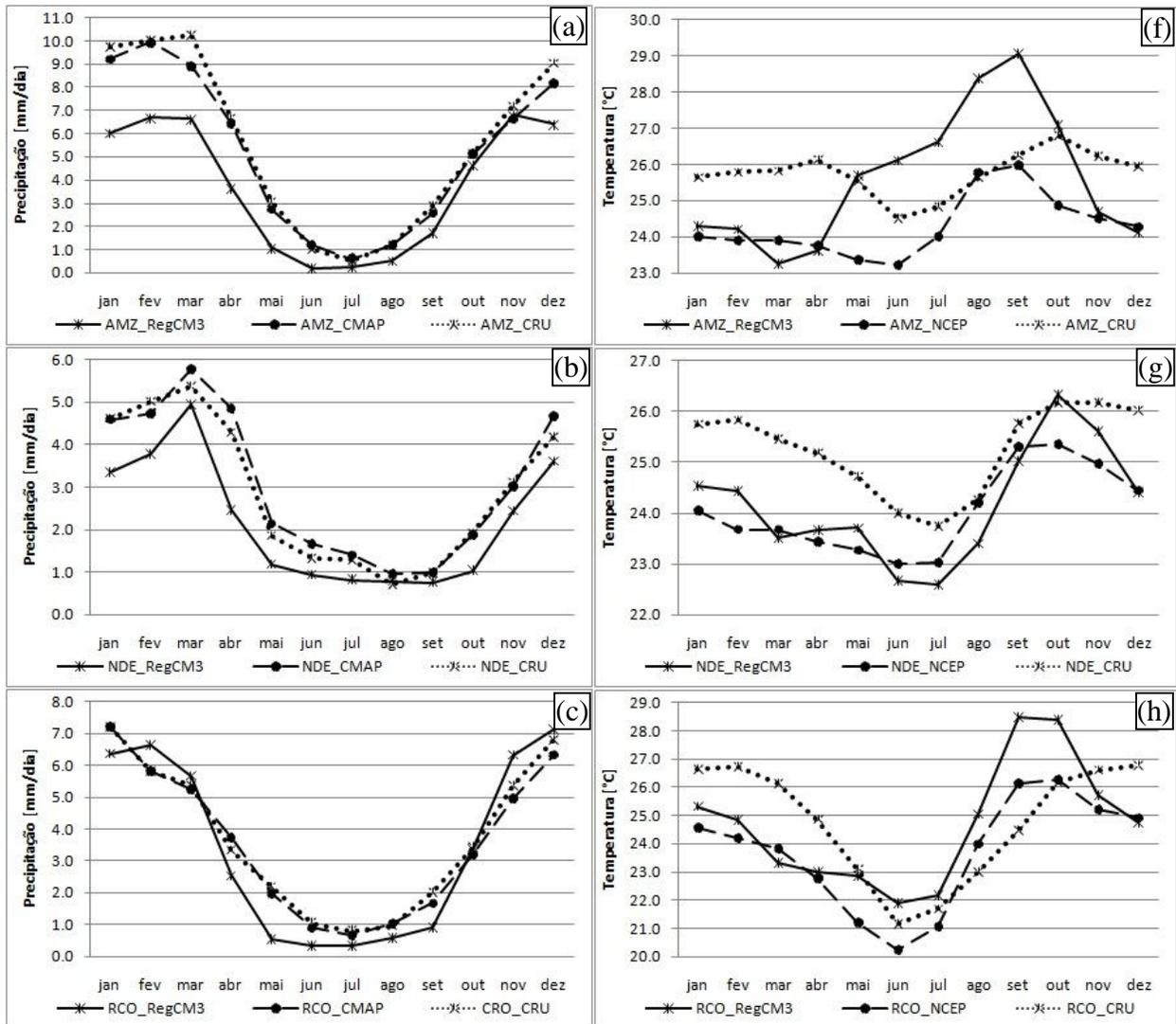


Figura 3.5 – Ciclo anual da precipitação (mm/dia) do CRU, CMAP e RegCM3 para as regiões: (a) AMZ, (b) NDE, (c) RCO, (d) SDE e (e) SUL e da temperatura (°C) do CRU, NCEP e RegCM3 para as regiões: (f) AMZ, (g) NDE, (h) RCO, (i) SDE e (j) SUL, definidas na Figura 2.2, sendo CMAP para o período 1979 – 1989 e CRU, RegCM3 e NCEP para o período 1975 – 1989.

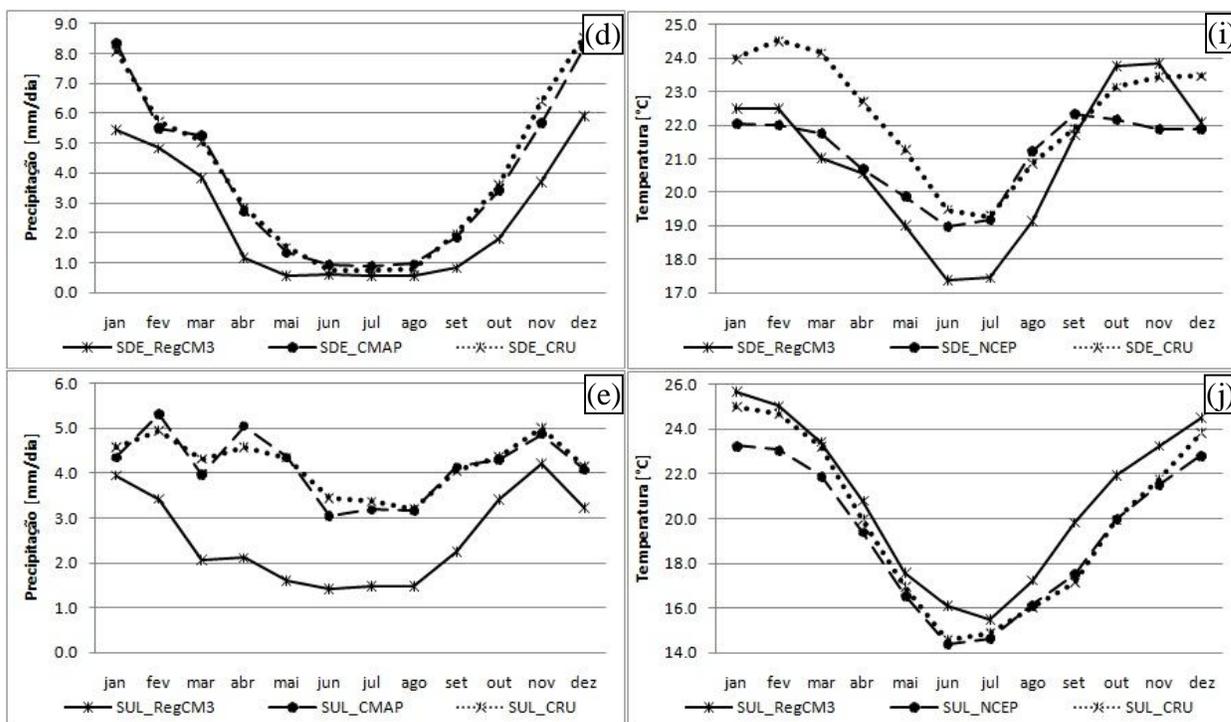


Figura 3.5 (continuação)

O CRU não fornece informações de precipitação e temperatura sobre os oceanos, assim, foi utilizada apenas a precipitação do CMAP e a temperatura do NCEP para validar o RegCM3 nas regiões litorâneas (Figura 2.2) do Brasil (LBR), do Uruguai (LUR) e da Argentina (LAR).

Na região LBR (Figura 3.6a), o RegCM3 embora mantendo o verão mais úmido que o inverno, subestima a chuva do CMAP em 50%. Na LUR (Figura 3.6b) também subestima a precipitação. Por outro lado, na região LAR (Figura 3.6c), o RegCM3 superestima a precipitação do CMAP durante todo o ano. Estes resultados concordam com Reboita (2008) que ao validar a precipitação simulada com o RegCM3 nas mesmas regiões obteve que o modelo era mais seco que o ECMWF, NCEP e GPCP na LBR e LUR e ligeiramente mais úmido que o NCEP e ECMWF na LAR.

A temperatura do RegCM3, nas três regiões (LBR – Figura 3.6d, LUR – Figura 3.6e e LAR – Figura 3.6f) do oeste do oceano Atlântico, apresenta o mesmo padrão do ciclo anual da reanálise mas é mais frio, concordando com Reboita (2008). A subestimativa da temperatura do RegCM3 em relação ao NCEP é mais evidente na região LBR (Figura 3.6d) e menor na LUR (Figura 3.6e).

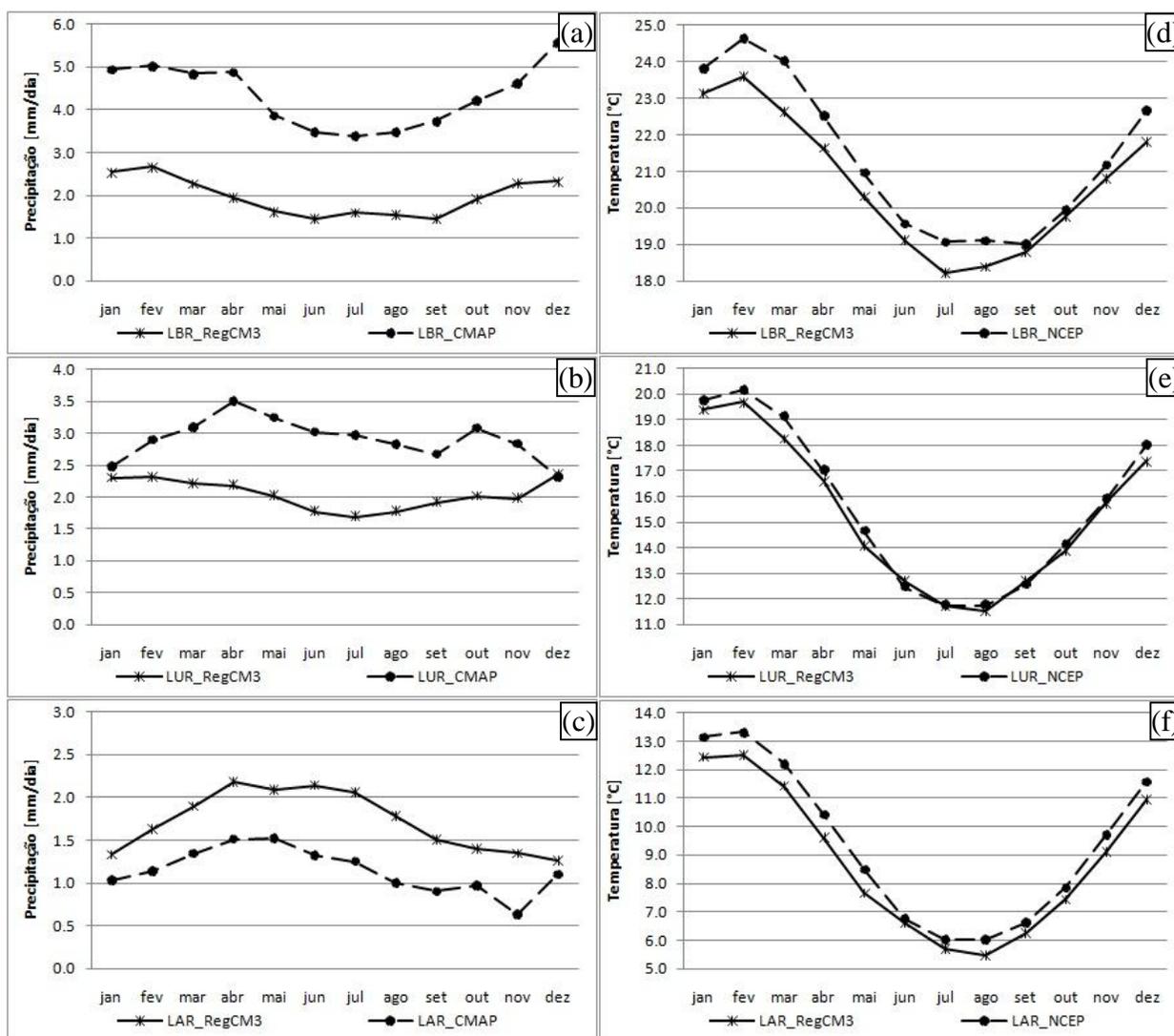


Figura 3.6 – Ciclo anual da precipitação (mm/dia) do CMAP e RegCM3 para as regiões: (a) LBR, (b) LUR e (c) LAR e da temperatura (°C) do NCEP e RegCM3 para as regiões: (d) LBR, (e) LUR e (f) LAR, definidas na Figura 2.2, sendo CMAP para o período 1979 – 1989 e RegCM3 e NCEP para o período 1975 – 1989.

### 3.1.2 Tendências para os Cenários B2 e A2

As Figuras de anomalias discutidas neste item foram obtidas a partir da diferença entre as climatologias simuladas pelo RegCM3 para o clima presente, entre 1975 – 1989, e o futuro, entre 2071 – 2085, nos cenários A2 e B2. É importante lembrar que as análises não incluem qualquer discussão dos resultados de simulação em uma faixa de aproximadamente 5° próximo às fronteiras laterais.

O padrão espacial dos campos médios anuais de anomalia da precipitação simulada pelo RegCM3 para os cenários B2 (Figura 3.7a) e A2 (Figura 3.7b) do clima futuro (2071 – 2085) mostra certa similaridade entre os dois cenários, diferindo apenas no módulo da anomalia. Estas anomalias indicam para os dois cenários um aumento da chuva anual no centro-oeste da América do Sul (exceto entre 30 – 40°S no Chile), norte da Argentina e parte do sul do Brasil (Figuras 3.7a-b) e uma redução no centro-oeste do Brasil, incluindo parte da região sudeste. As anomalias positivas no norte da Argentina e no Uruguai atingem 1,5 mm/dia no cenário A2 enquanto no B2 não ultrapassam 0,5 mm/dia. Por outro lado, no Equador e Peru as anomalias são mais intensas no cenário B2 (Figura 3.7a), chegando a 3 mm/dia, do que no A2(Figura 3.7b), onde atingem 1,5 mm/dia. As regiões com anomalias positivas sobre o Brasil são Rondônia e noroeste do Mato Grosso, com intensidade semelhante nos dois cenários. As anomalias negativas no leste do Amazonas e do Mato Grosso, no Pará, sudeste e nordeste do Brasil projetam um cenário A2 um pouco mais seco que o B2, exceto no litoral da região sul com anomalia positiva de 0,5 mm/dia.

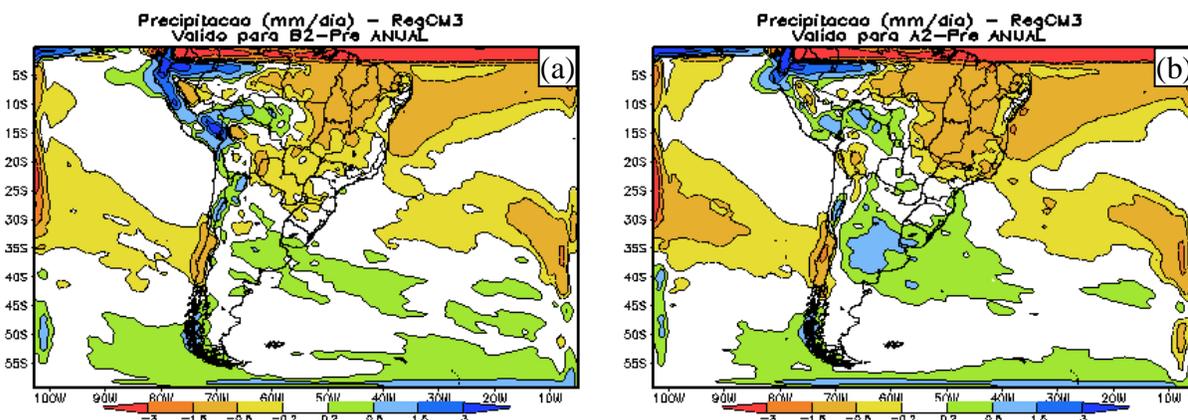


Figura 3.7 – Anomalia média anual da precipitação (mm/dia) do RegCM3, dos cenários B2 (a) e A2 (b) do período 2071 – 2085 em relação à precipitação do período 1975 – 1989.

Para valores sazonais, os cenários B2 (Figura 3.8a) e A2 (Figura 3.8b) mostram extensa faixa com anomalias positivas na precipitação de verão (DJF) desde o Peru, estendendo-se pelo oeste das regiões norte e centro-oeste e sul do Brasil, até o Uruguai e norte da Argentina. Estas anomalias positivas indicam o cenário B2 mais úmido que o A2 na parte norte e mais seco do que o A2 ao sul de 20°S. Algumas áreas com anomalias positivas das Figuras 3.8a-b não são aparentes nas simulações do RegCM3 em Ambrizzi et al. (2007) em função do intervalo de 1 mm/dia adotado por estes autores. No entanto, a intensificação da chuva nos cenários futuros no ramo oceânico da ZCAS e norte da Argentina é semelhante ao reportado em Ambrizzi et al. (2007). O leste das regiões norte e centro-oeste, o setor norte do sudeste e nordeste do Brasil constituem uma ampla área de anomalias negativas, com o cenário A2 mais seco que o B2. No inverno (JJA), os cenários futuros (Figura 3.8c,d) mostram anomalias negativas sobre o sul do Brasil, Mato Grosso do Sul, Uruguai, Peru, Amazonas e norte do Pará, incluindo ainda a Bolívia no cenário B2. Na maior parte do Brasil central e norte (Mato Grosso, Goiás, sul e leste do Pará, sudeste e nordeste) as projeções indicam que a chuva deve ser semelhante à do clima presente no trimestre JJA. Uma

faixa estreita de anomalia positiva (aproximadamente 0,5 mm/dia) de precipitação é projetada nos dois cenários (B2 e A2) sobre o leste do nordeste do Brasil.

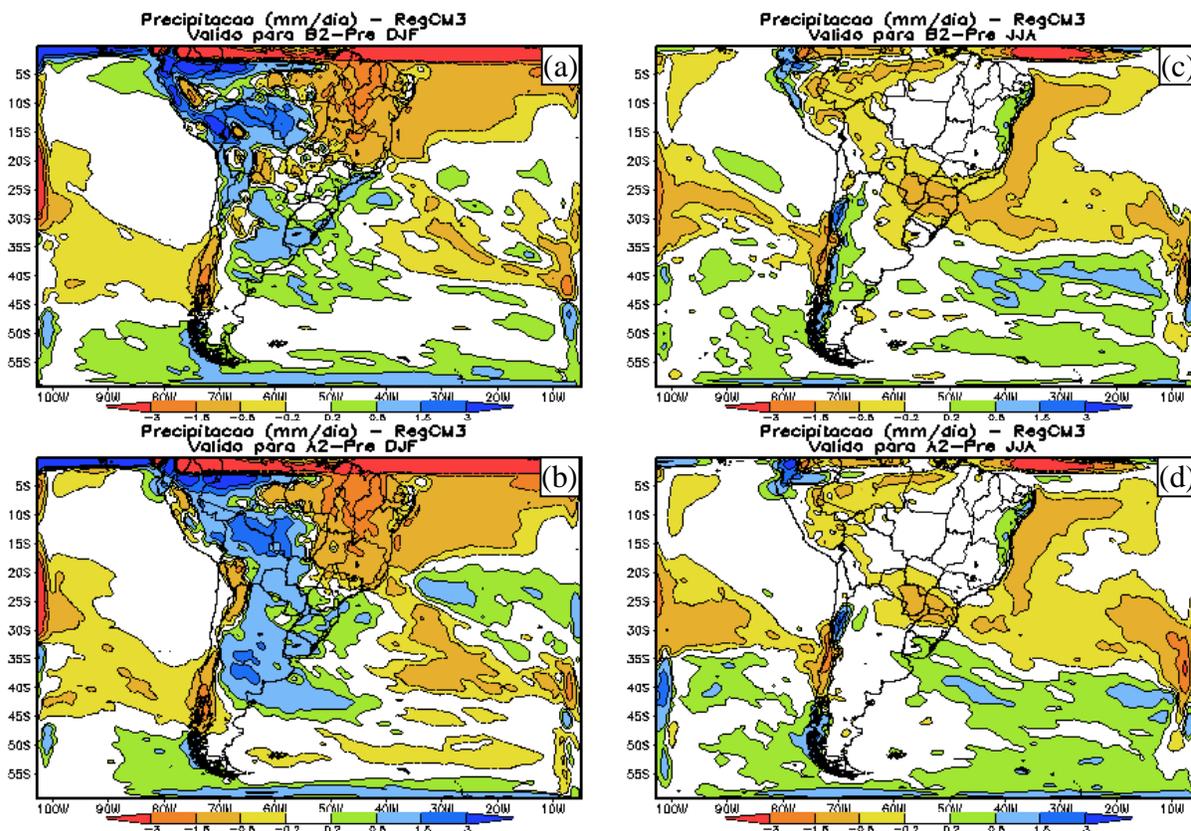


Figura 3.8 – Anomalia média trimestral da precipitação (mm/dia) do RegCM3 dos cenários B2 e A2 do período 2071 – 2085 em relação à precipitação do período 1975 – 1989: (a) cenário B2 para o trimestre DJF; (b) cenário A2 para o trimestre DJF; (c) cenário B2 para o trimestre JJA e (d) cenário A2 para o trimestre JJA.

Para a temperatura do ar, os cenários B2 e A2 (Figuras 3.9a-b) apresentam padrão semelhante, com uma área de aquecimento de até 2°C na América ao sul de 30°S, incluindo oceano Pacífico e parte do sudoeste do Atlântico. Na parte norte do Oceano Pacífico os cenários mostram aquecimento superior a 2°C. Sobre o continente, ao norte de 30°S, o cenário B2 mostra anomalia positiva, entre 2 e 4°C, incluindo o norte da Argentina com aquecimento de cerca de 2°C. No cenário A2 o aquecimento atinge 4 a 6°C em toda região norte e centro-oeste, noroeste do sudeste e leste do

nordeste do Brasil. Estes padrões concordam com os resultados de Johns et al. (2001) que obtiveram maior aquecimento sobre as regiões continentais e para o cenário A2.

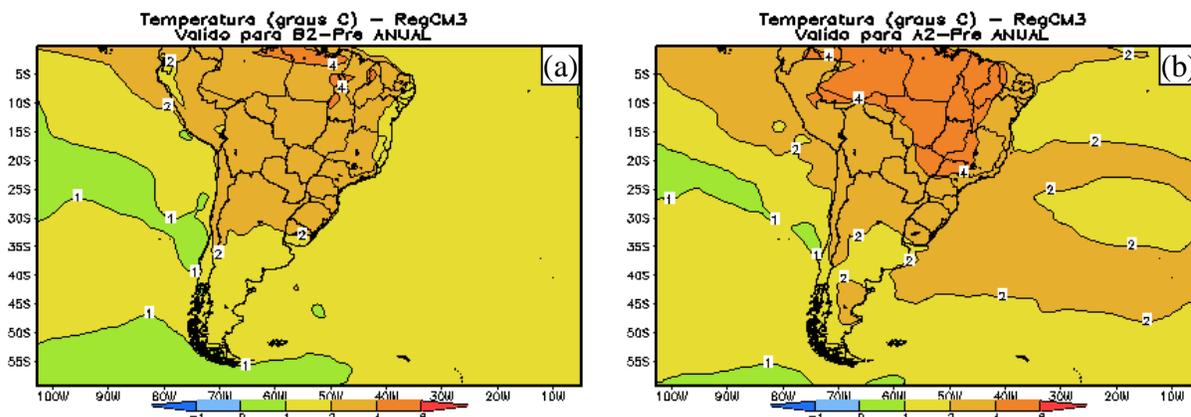


Figura 3.9 – Anomalia média anual da temperatura (°C) do RegCM3, dos cenários B2 (a) e A2 (b) do período 2071 – 2085 em relação à temperatura do período 1975 – 1989.

Assim como para a média anual (Figuras 3.8a-b), no verão e inverno o cenário A2 (Figuras 3.10b,d) indica maiores anomalias positivas do que o B2 (Figuras 3.10a,c). As anomalias no oceano Pacífico nos cenários B2 (Figura 3.10a) e A2 (Figura 3.10b) são semelhantes em intensidade (0 – 2°C) e padrão espacial no verão, entretanto, no inverno as anomalias do B2 (Figura 3.10c) são menores que as anomalias do A2. No Oceano Atlântico, o cenário B2 (Figuras 3.10a,c) mostra padrão de aquecimento similar nas duas estações (DJF e JJA). Já o cenário A2 apresenta a região sobre o Oceano Atlântico, entre as latitudes de 15°S e 50°S, com maior aquecimento no verão (Figura 3.10b) e menor no inverno (Figura 3.10d). Contudo, o cenário A2 é mais quente que o B2 no Oceano Atlântico nas duas estações estudadas (verão e inverno).

Durante o verão da América do Sul, o cenário B2 (Figura 3.10a) apresenta anomalias de 1 a 2°C no litoral brasileiro (desde o Rio Grande do Sul até o Rio Grande do Norte), centro-sul do Chile e Argentina, e na Bolívia. A forte redução do aquecimento nesta última área, em comparação as vizinhanças, pode estar associada ao aumento

da chuva neste cenário (Figura 3.8a). A projeção de maior aquecimento no cenário B2 é encontrada no Maranhão e Piauí. O cenário A2 (Figura 3.10b) projeta maiores temperaturas que o B2 em praticamente toda a América do Sul durante o verão, com aquecimento que pode atingir 4 a 6°C em parte das regiões norte e nordeste do Brasil, como também obtido em Ambrizzi et al. (2007).

No inverno, no B2 (Figura 3.10c) as anomalias positivas projetadas são menores do que no verão (entre 1 a 2°C) em todo leste do nordeste brasileiro, enquanto em outras áreas do continente o aquecimento pode superar 4°C. No cenário A2 (Figura 3.10d) o padrão de anomalia de temperatura do ar mostra uma grande área do Brasil com anomalias positivas de 4 a 6°C, incluindo o norte e centro-oeste do Brasil, Peru e Paraguai.

Na região AMZ (Figura 3.11a), as maiores anomalias na precipitação (redução da precipitação em aproximadamente 1,0 mm/dia) são projetadas para os meses de transição da estação chuvosa para a seca (abril) e da estação seca para a chuvosa (outubro). Para o trimestre novembro a janeiro os dois cenários projetam mais chuva que o clima presente, com anomalia positiva de até 0,5 mm/dia. A temperatura (AMZ – Figura 3.11f) segue a precipitação, com maiores anomalias positivas nos meses de maior anomalia negativa da precipitação. O A2 mostra-se sempre mais quente que o B2, com aquecimento de 3 a 6°C, enquanto o B2 atinge 2,4 a 5°C.

Os cenários B2 e A2 reduzem quase à metade (cerca de 1,0 a 2,0 mm/dia) a quantidade de precipitação da estação chuvosa sobre o NDE (Figura 3.11b), com a estação seca similar à do clima presente. As anomalias na temperatura nesta região

(Figura 3.11g) variam de 1,8 a 3,7°C (2,4 a 4,7°C) no B2 (A2) ao longo do ano, com menor anomalia na estação seca e o maior na chuvosa.

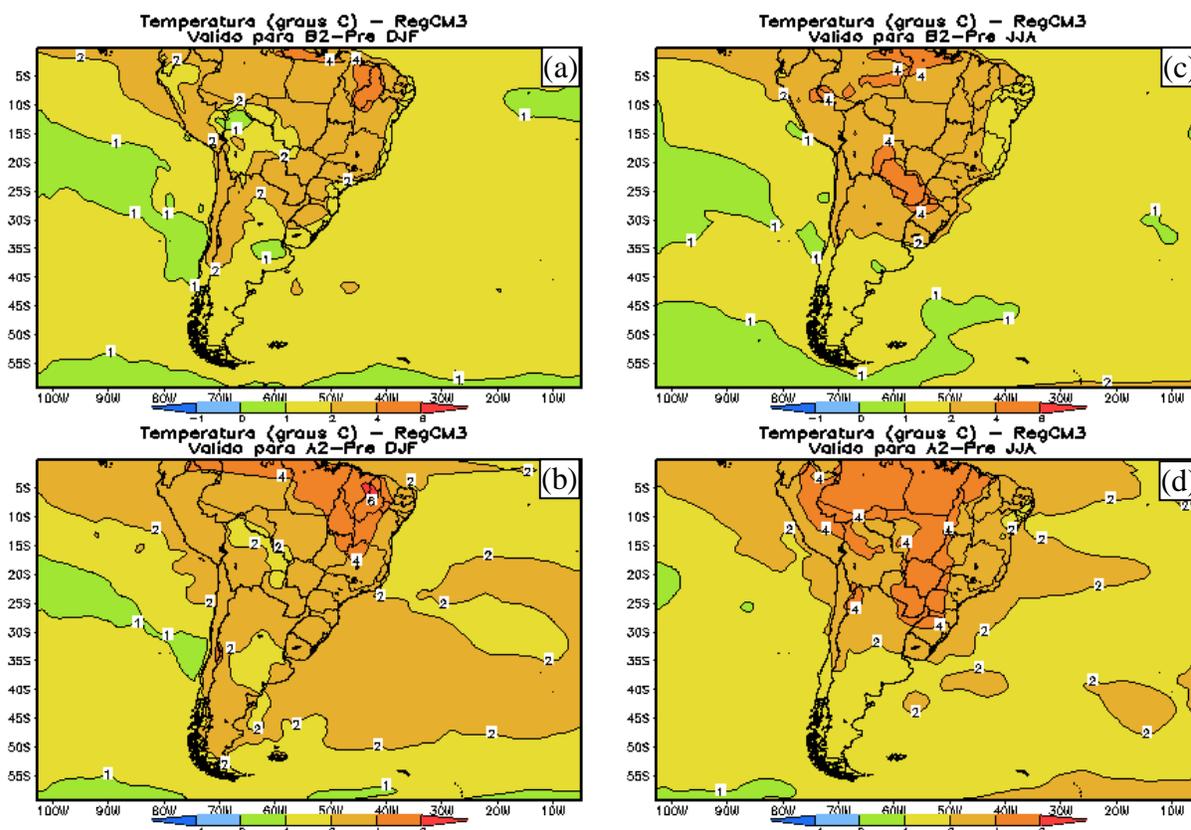


Figura 3.10 – Anomalia média trimestral da temperatura (°C) do RegCM3, dos cenários B2 e A2 do período 2071 – 2085 em relação à temperatura do período 1975 – 1989: (a) cenário B2 para o trimestre DJF; (b) cenário A2 para o trimestre DJF; (c) cenário B2 para o trimestre JJA e (d) cenário A2 para o trimestre JJA.

Para a RCO (Figura 3.11c) as projeções do A2 e B2 são de precipitação de normal a até 1,2 mm/dia acima do normal (A2) durante o verão, que coincide com o pico da estação chuvosa desta região. Estas projeções indicam uma redução de até 1,0 mm/dia da chuva mensal nas transições das estações seca – chuvosa – seca. Os maiores aumentos de temperatura (Figura 3.11h) ocorreriam nos meses de maior redução na precipitação, com amplitude anual semelhante para os dois cenários (1,8 – 4,8°C no B2 e 1,9 – 4,9°C no A2). Na região SDE (Figura 3.11d,i) as maiores anomalias

negativas na precipitação foram obtidas na primavera no cenário A2, correspondendo à estação e ao cenário de maior aquecimento nesta região.

Um resultado diferente é projetado para a região SUL nos cenários B2 e A2, ou seja, nesta região a maior redução de precipitação é projetada para o inverno (junho – julho – agosto), com redução de até -0,4 mm/dia (Figura 3.11e). No outono e dezembro o cenário A2 indica um aumento da chuva em até 1 mm/dia em relação ao clima presente. O aumento de temperatura ao longo do ano é muito semelhante nos dois cenários (Figura 3.11j).

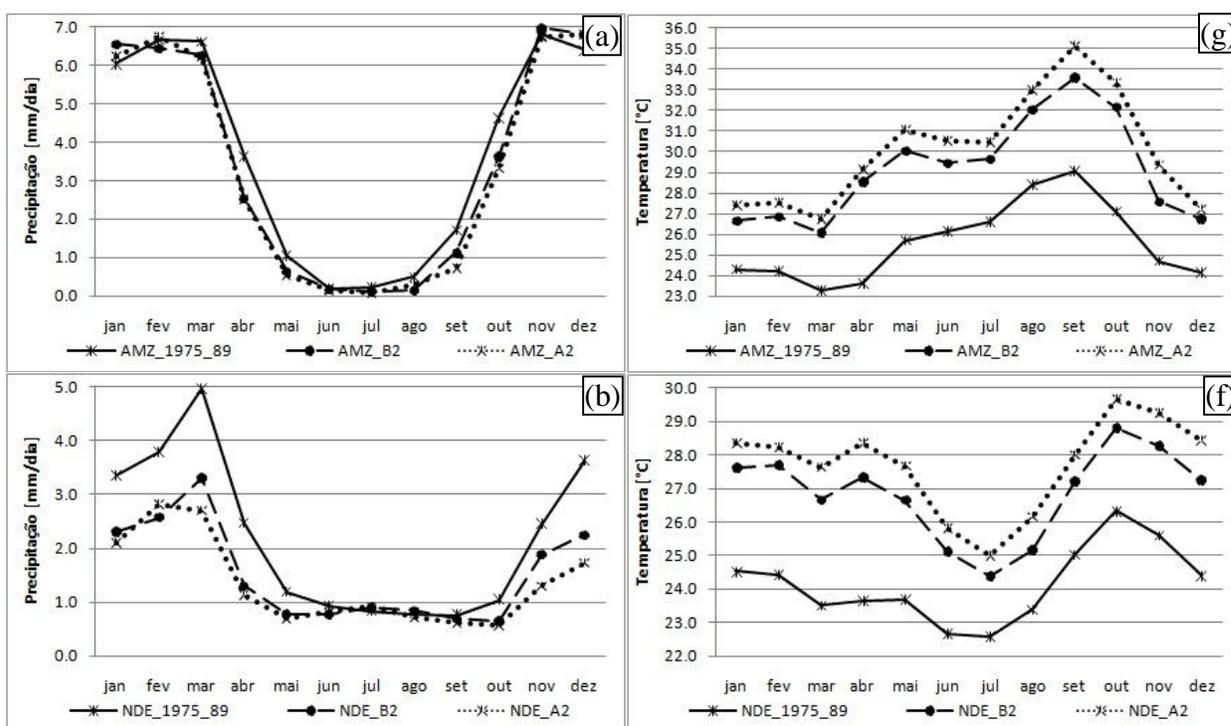


Figura 3.11 – Ciclo anual da precipitação (mm/dia) do RegCM3, do clima presente (1975 – 1989) e dos cenários B2 e A2 do período 2071 – 2085, para as regiões: (a) AMZ, (b) NDE, (c) RCO, (d) SDE e (e) SUL e da temperatura (°C) do RegCM3, do clima presente (1975 – 1989) e dos cenários B2 e A2 do período 2071 – 2085, para as regiões: (f) AMZ, (g) NDE, (h) RCO, (i) SDE e (j) SUL.

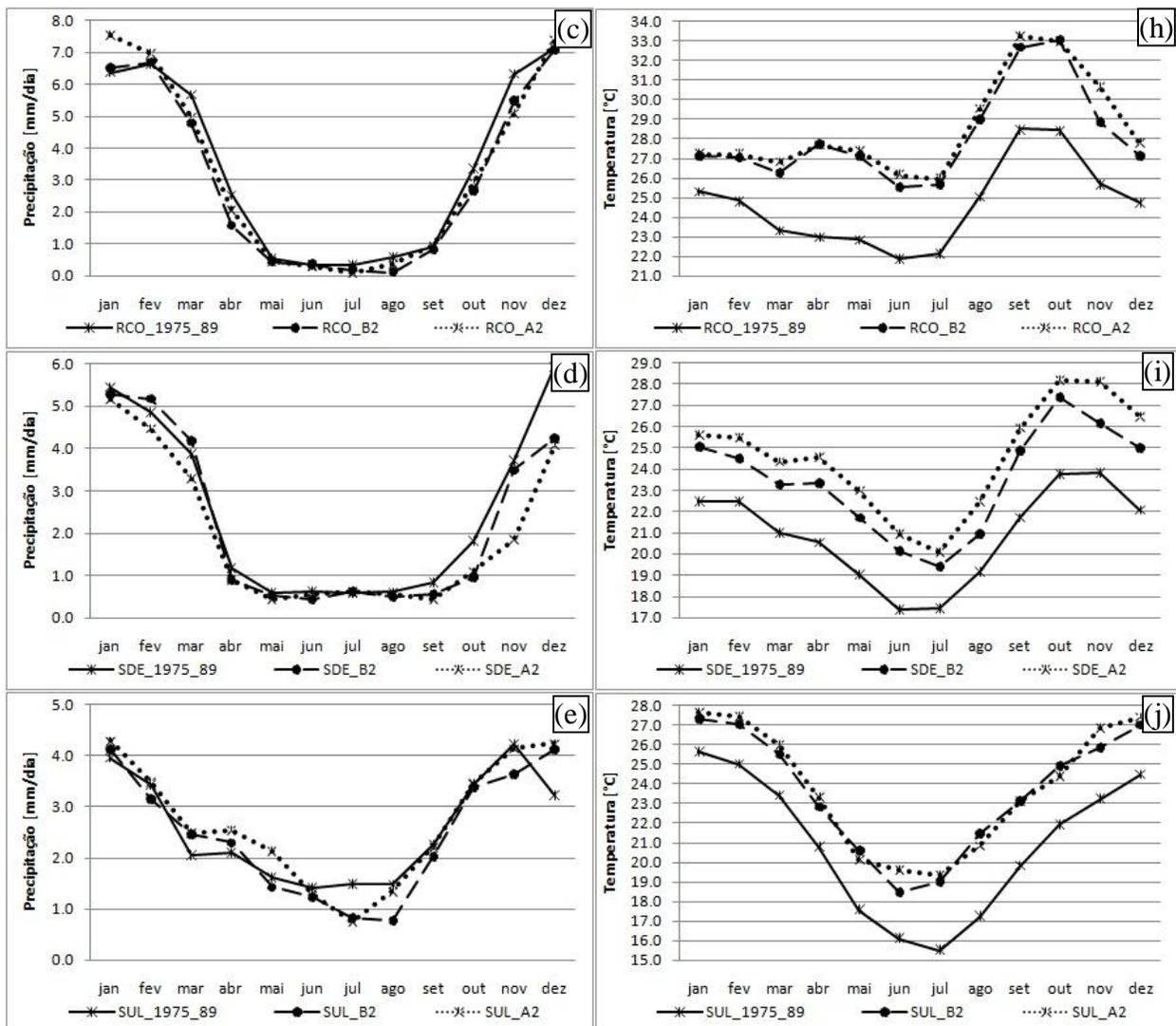


Figura 3.11 (continuação)

As estimativas de mudança de chuva na área oceânica LBR (Figura 3.12a) indicam maiores anomalias no cenário B2. Os dois cenários (B2 e A2) aumentam a precipitação no período chuvoso (em até 0,6 mm/dia) e reduzem (em até 0,8 mm/dia) no período seco. O aumento no período chuvoso estaria associado à intensificação da chuva no ramo oceânico da ZCAS mostrado nas Figuras 3.8a-b e também nas simulações analisadas por Ambrizzi et al. (2007) para os modelos *Providing Regional Climates for Impacts Studies* (PRECIS, 2002) e RegCM3. Mais ao sul, no leste do

Uruguai, na área LUR (Figura 3.12b), as simulações estão indicando aumento da chuva nos cenários de aquecimento (exceto entre agosto – outubro no B2), e diferente do obtido para o LBR, na maioria dos meses o maior aumento de chuva é projetado para o cenário A2. Também a amplitude projetada, diferença de precipitação entre as estações seca e chuvosa, é maior nos cenários A2 e B2 que no clima presente (Figura 3.12.b), onde a precipitação mostra-se quase igualmente distribuída ao longo do ano.

A precipitação para os cenários B2 e A2 na região LAR (Figura 3.12c) é semelhante à do clima presente, com anomalias positivas (cerca de 0,3 mm/dia) entre janeiro e maio no A2 (janeiro e abril no B2), e nos meses seguintes alternando entre mais seco e mais chuvoso.

Para as regiões oceânicas, LBR (Figura 3.12d), LUR (Figura 3.12e) e LAR (Figura 3.12f), o ciclo anual e aumento de temperatura é muito semelhante para os cenários B2 e A2 (A2 em média 0,5°C mais quente que B2). Em relação ao clima presente, o B2 mostra aumentos entre 0,8 – 1,9°C e o A2 entre 1,3 – 2,8°C.

Os cenários futuros (B2 e A2) mostram aquecimento nas 8 regiões estudadas (Figuras 3.11f-j e 3.12d-f), com o A2 mais quente que o B2 (Johns et al., 2001; Ambrizzi et al., 2007 e IPCC AR4., 2007). De forma geral, as diferenças de temperatura entre os cenários A2 e B2 são maiores nas regiões AMZ, NDE e SDE (Figura 3.11f,g,i). Quanto à precipitação, tanto o cenário A2 como o B2 projetam redução da chuva nas estações chuvosas e manutenção ou pequena redução na estação seca nas regiões continentais AMZ, NDE, RCO e SDE (Figuras 3.11a-d). Nestas regiões as maiores anomalias positivas de temperatura ocorrem quando as anomalias negativas de precipitação são maiores. Isto estaria associada à baixa taxa de precipitação nesta área simulada pelo

RegCM3, e então em uma atmosfera mais seca aumenta a radiação solar absorvida em superfície resultando em temperaturas maiores. No entanto, na região SUL (Figura 3.11e) tanto os cenários B2 como A2 projetam um cenário mais úmido do que o presente no verão – outono e de normal a mais seco em parte dos meses de inverno – primavera.

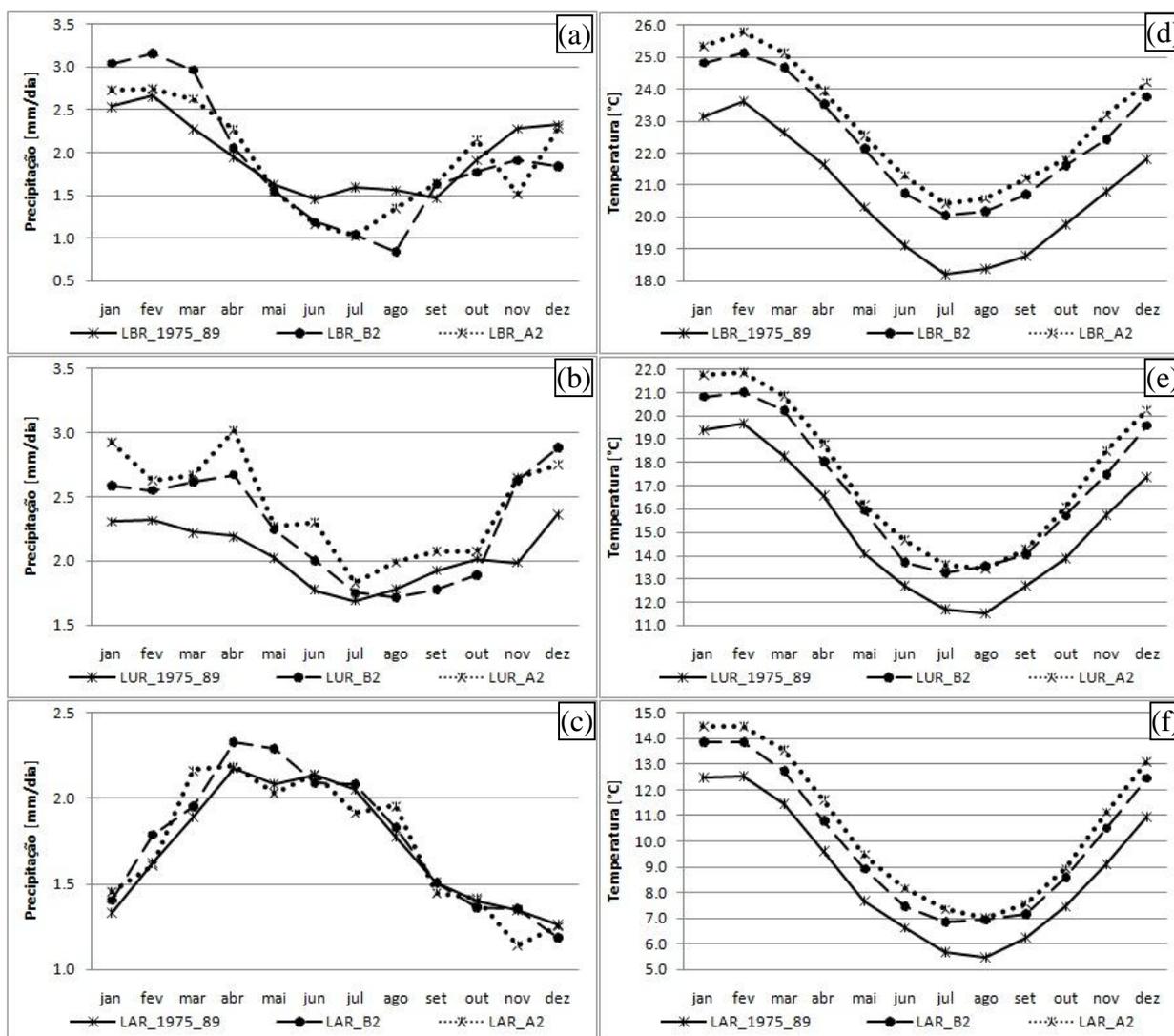


Figura 3.12 – Ciclo anual da precipitação (mm/dia) do RegCM3, do clima presente (1975 – 1989) e dos cenários B2 e A2 do período 2071 – 2085, para as regiões: (a) LBR, (b) LUR e (c) LAR e da temperatura (°C) do RegCM3, do clima presente (1975 – 1989) e dos cenários B2 e A2 do período 2071 – 2085, para as regiões: (d) LBR, (e) LUR e (f) LAR.

## 3.2 Ciclones Extratropicais

### 3.2.1 Clima Presente

Para a região do Oceano Atlântico indicada na Figura 2.2, durante o período de 15 anos (1975 – 1989), a Figura 3.13 mostra que o NCEP fornece um total de 3654 ciclones, com duração igual ou superior a 24 horas e vorticidade inicial  $\zeta_{10} \leq -1,0 \times 10^{-5} \text{s}^{-1}$ , sendo que 51,7% deste total corresponde a ciclones inicialmente intensos ( $\zeta_{10} \leq -2,5 \times 10^{-5} \text{s}^{-1}$ ). Para o HadAM3 obtém-se 3204 ciclones e apenas 17,7% destes são inicialmente intensos. Portanto, existe uma subestimativa de 12,3% e 69,9% do total de ciclones e dos inicialmente intensos, respectivamente, em relação ao NCEP, mostrando maior dificuldade do HadAM3 em simular ciclones intensos. O RegCM3, aninhado ao HadAM3, fornece um total de 4035 ciclones, e destes 24,8% são inicialmente intensos. Assim, o RegCM3 superestima em 10,4% o total de ciclones do NCEP, embora também subestime ciclones com vorticidade inicial  $\zeta_{10} \leq -2,5 \times 10^{-5} \text{s}^{-1}$  (subestimativa de 47,0% em relação ao NCEP).

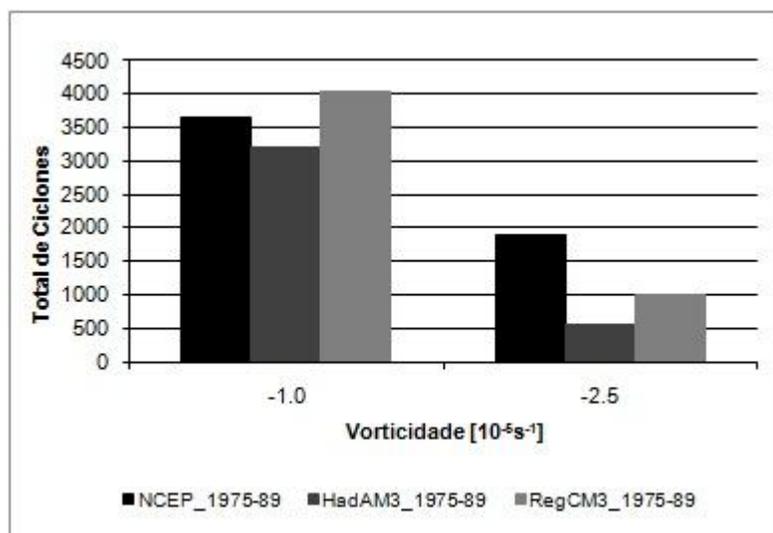


Figura 3.13 – Total de ciclones do NCEP, HadAM3 e RegCM3 para os limiares de  $\zeta_{10} \leq -1,0 \times 10^{-5} \text{s}^{-1}$  e  $\zeta_{10} \leq -2,5 \times 10^{-5} \text{s}^{-1}$ , no período 1975 – 1989.

Considerando todos os ciclones sobre o Atlântico Sul que se iniciaram com  $\zeta_{10} \leq -1,0 \times 10^{-5} \text{s}^{-1}$ , a distribuição sazonal mostra que o NCEP possui  $60,9 \pm 2,9$  ciclones por trimestre, com número semelhante de ciclones no inverno e primavera (Figura 3.14a). No HadAM3 o ciclo sazonal é bastante suavizado, com  $53,4 \pm 0,8$  ciclones/trimestre, e além de subestimar o número de eventos do NCEP mostra a frequência de ciclones diminuindo do verão para o inverno, contrapondo-se também ao NCEP (Figura 3.14a). Para o total de ciclones no período de 15 anos, o RegCM3 superestima o número de ciclones do NCEP em todas as estações do ano, fornecendo  $67,3 \pm 2,0$  ciclones/trimestre. No NCEP, o trimestre JJA (inverno) e SON (primavera) são mais ciclogênicos, com menos ciclogêneses no outono e verão, concordando com Sugahara (2000). Este resultado é oposto ao de Reboita (2008) que obteve o outono como estação mais ciclogênica quando se considera todo o Atlântico Sul. Esta diferença pode resultar do limiar de vorticidade utilizado por Reboita (2008) que desconsiderou ciclones com  $\zeta_{10} > -1,5 \times 10^{-5} \text{s}^{-1}$ , do período de análise (1990 – 1999) e também por Reboita (2008) ter utilizado a reanálise NCEP/DOE (Kanamitsu, 2002) enquanto o presente estudo considera os ciclones com  $\zeta_{10} > -1,0 \times 10^{-5} \text{s}^{-1}$  (mesmo limiar utilizado em Sugahara (2000) nos dados do ECMWF para o período 1985 – 1992) da reanálise NCEP/NCAR (Kalnay et al., 1996) para o período 1975 – 1989. O RegCM3 simula distribuição sazonal média de todos os ciclones similar ao NCEP, embora mais suavizada, e indica também o outono com menor número de ciclones, com o inverno e primavera como estações mais ciclogênicas, assim como no NCEP.

Considerando somente os ciclones inicialmente mais intensos (Figura 3.14b), no NCEP tem-se  $31,5 \pm 2,1$  ciclones/trimestre, número que decresce para  $9,5 \pm 1,7$

ciclones/trimestre no HadAM3, enquanto o RegCM3 simula  $16,7 \pm 4,6$  ciclones/trimestre. No NCEP o número de ciclogêneses é muito próximo na primavera – verão – outono, com um pico de ciclogêneses no inverno, concordando com Taljaard (1967), Gan (1992), Simmonds e Keay (2000) e Reboita (2008). Os ciclos sazonais do HadAM3 e do RegCM3 também apresentam maior número de ciclogêneses inicialmente intensas no inverno seguido do outono, como também simulou o RegCM3 para o período de 1990 – 1999 (Reboita, 2008).

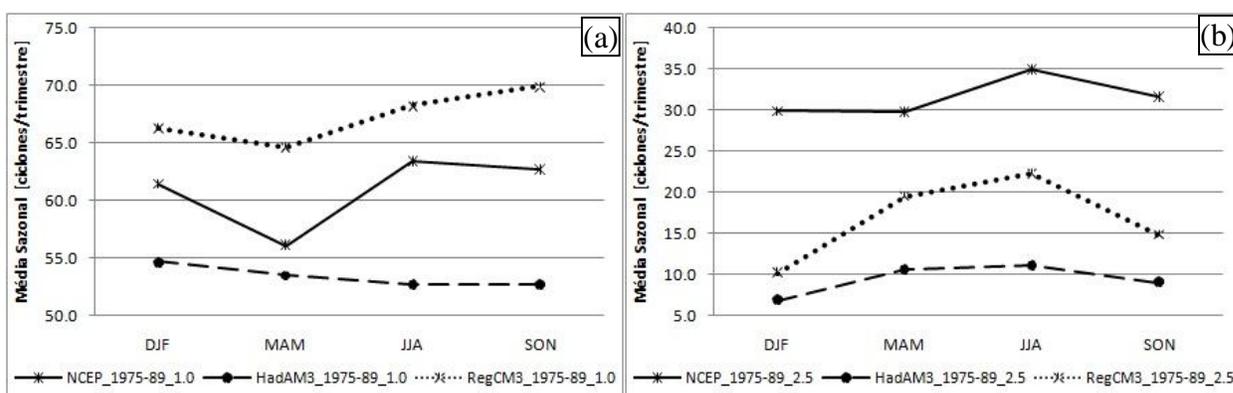


Figura 3.14 – Número médio trimestral de ciclones do NCEP, HadAM3 e RegCM3 para o período 1975 – 1989: (a)  $\zeta_{10} \le -1,0 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$  e (b)  $\zeta_{10} \le -2,5 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$ .

Em termos de vorticidade média inicial, tanto o HadAM3 quanto o RegCM3 indicam ciclones mais fracos que o NCEP, com o ciclones do NCEP apresentando vorticidade média inicial de  $-2,78 \pm 0,07 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$ , e de  $-1,87 \pm 0,08 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$  e  $2,06 \pm 0,14 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$  para o HadAM3 e RegCM3, respectivamente.

Como indica a Figura 3.15a, os ciclones simulados (RegCM3 e HadAM3) e do NCEP são inicialmente mais intensos (vorticidade mais ciclônica) no inverno e mais fracos no verão. Pela Figura 3.15c, apenas 1% dos ciclones do NCEP apresenta vorticidade inicial entre  $-1,0$  e  $-1,5 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$  contra 41,7% e 33,6% do HadAM3 e

RegCM3, respectivamente, resultando em vorticidade média inicial mais fraca nas simulações (Figura 3.15a), portanto, ciclones inicialmente muito mais fracos do que no NCEP. Comparativamente, o RegCM3 apresenta uma correção nos resultados do HadAM3, simulando ciclones inicialmente um pouco mais intensos que o HadAM3 em todas as estações do ano (Figura 3.15a-b) e em todas as categorias (Figura 3.15c).

Para a vorticidade inicial dos ciclones intensos (Figura 3.15b), a média obtida do NCEP é de  $-3,47 \pm 0,05 \times 10^{-5} \text{s}^{-1}$ , e de  $-3,32 \pm 0,09 \times 10^{-5} \text{s}^{-1}$  no HadAM3 e  $-3,38 \pm 0,05 \times 10^{-5} \text{s}^{-1}$  no RegCM3, mostrando novamente valores médios mais próximos entre o RegCM3 e o NCEP. Em valores relativos nota-se que tanto o RegCM3 como HadAM3 simulam vorticidade média inicial muito próximo do NCEP (Figura 3.15d) para os ciclones inicialmente intensos. Os trimestres MAM e JJA apresentam ciclones inicialmente mais intensos, porém enquanto no NCEP a vorticidade ciclônica inicial média é maior no inverno, no HadAM3 e RegCM3 isto ocorre no outono (Figura 3.15b). No NCEP e HadAM3 os ciclones são inicialmente mais fracos no verão e primavera, e no RegCM3 na primavera (Figura 3.15b). A distribuição de frequência relativa de ciclones inicialmente mais intensos (Figura 3.15d), assim como a Figura 3.15b, mostra maior percentual de ciclones intensos no NCEP. O HadAM3 apresenta maior percentual de ciclones que o NCEP com vorticidade inicial média na classe  $-2,5$  e  $-3,0 \times 10^{-5} \text{s}^{-1}$  e o RegCM3 na classe  $-3,0$  e  $-4,0 \times 10^{-5} \text{s}^{-1}$  (Figura 3.15d).

A duração média dos ciclones do NCEP ( $2,8 \pm 0,1$  dias) é semelhante ao HadAM3 ( $2,9 \pm 0,0$  dias) e RegCM3 ( $2,9 \pm 0,1$  dias). Para os ciclones inicialmente intensos ( $\zeta_{10} \leq -2,5 \times 10^{-5} \text{s}^{-1}$ ) nota-se redução no tempo de vida para 2,6, 2,5 e 2,7 dias para o NCEP, HadAM3 e RegCM3, respectivamente.

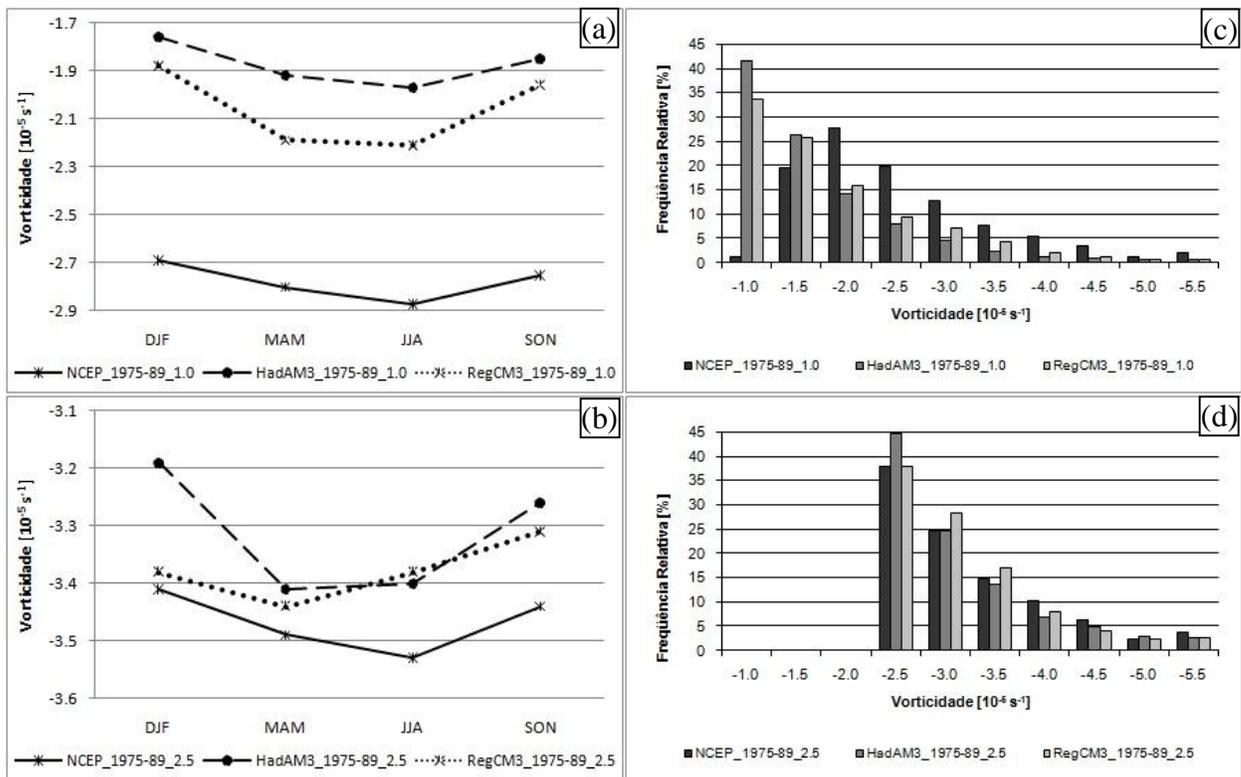


Figura 3.15 – Vorticidade média ( $\text{s}^{-1}$ ) trimestral dos ciclones do NCEP, HadAM3 e RegCM3 para o período 1975 – 1989: (a)  $\zeta_{10} \leq -1,0 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$  e (b)  $\zeta_{10} \leq -2,5 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$  e, distribuição de freqüência dos ciclones do NCEP, HadAM3 e RegCM3 em intervalos de vorticidade, para o período 1975 – 1989: (c)  $\zeta_{10} \leq -1,0 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$  e (d)  $\zeta_{10} \leq -2,5 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$ .

A variabilidade sazonal do tempo de vida dos ciclones nas simulações e NCEP está entre 2,6 e 3,1 dias para o total de ciclones (Figura 3.16a) e entre 2,4 e 2,9 dias para os inicialmente intensos (Figura 3.16b). Estas figuras mostram que no inverno os ciclones em geral possuem menor duração, exceto no RegCM3 com ciclones inicialmente intensos apresentando menor tempo de vida na primavera. Na distribuição de freqüência simulações e NCEP apresentam comportamento semelhante para o total de ciclones (Figura 3.16c), mas as simulações mostram maior percentual de ciclones inicialmente intensos com duração inferior a 2,0 dias do que o NCEP (Figura 3.16d).

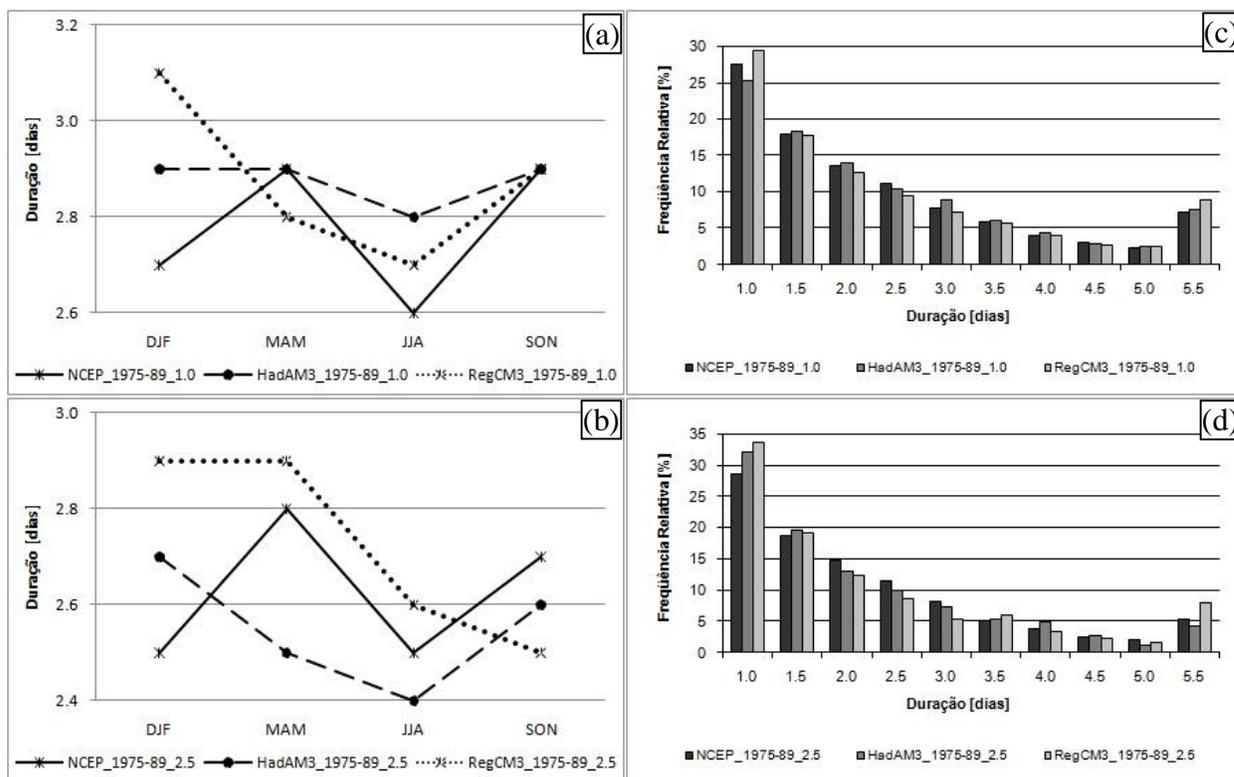


Figura 3.16 – Duração média (dias) trimestral dos ciclones do NCEP, HadAM3 e RegCM3 para o período 1975 – 1989: (a)  $\zeta_{10} \leq -1,0 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$  e (b)  $\zeta_{10} \leq -2,5 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$  e, distribuição de freqüência dos ciclones do NCEP, HadAM3 e RegCM3 em intervalos de duração, para o período 1975 – 1989: (c)  $\zeta_{10} \leq -1,0 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$  e (d)  $\zeta_{10} \leq -2,5 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$ .

Em relação ao deslocamento médio, considerando todos os ciclones no NCEP estes percorrem  $2087,9 \pm 132,6$  km, no HadAM3  $2165,4 \pm 72,3$  km e no RegCM3  $1943,0 \pm 68,5$  km, com maior deslocamento no inverno e menor no verão (Figura 3.17a), concordando com Simmonds e Keay (2000), Gan (1992) e Reboita (2008), e aproximadamente 90% dos ciclones têm deslocamento entre 500 e 3500 km (Figura 3.17c). A superestimativa do HadAM3 em relação ao NCEP não ultrapassa 50 km do outono à primavera e 200 km no verão. O RegCM3 coincide com o NCEP no verão e o subestima em até 200 km nas demais estações.

Os ciclones inicialmente intensos em média têm maior deslocamento no NCEP (2092,8 ± 76,1 km) e HadAM3 (1970,1 ± 88,7 km) do que no RegCM3 (1949,3 ± 47,6 km). Um maior percentual de ciclones intensos (até 22%) mostra deslocamento de 1000 a 1500 km (Figura 3.17d) nas simulações e NCEP, mas com variação sazonal bastante diferente entre NCEP e simulações (Figura 3.17b,d).

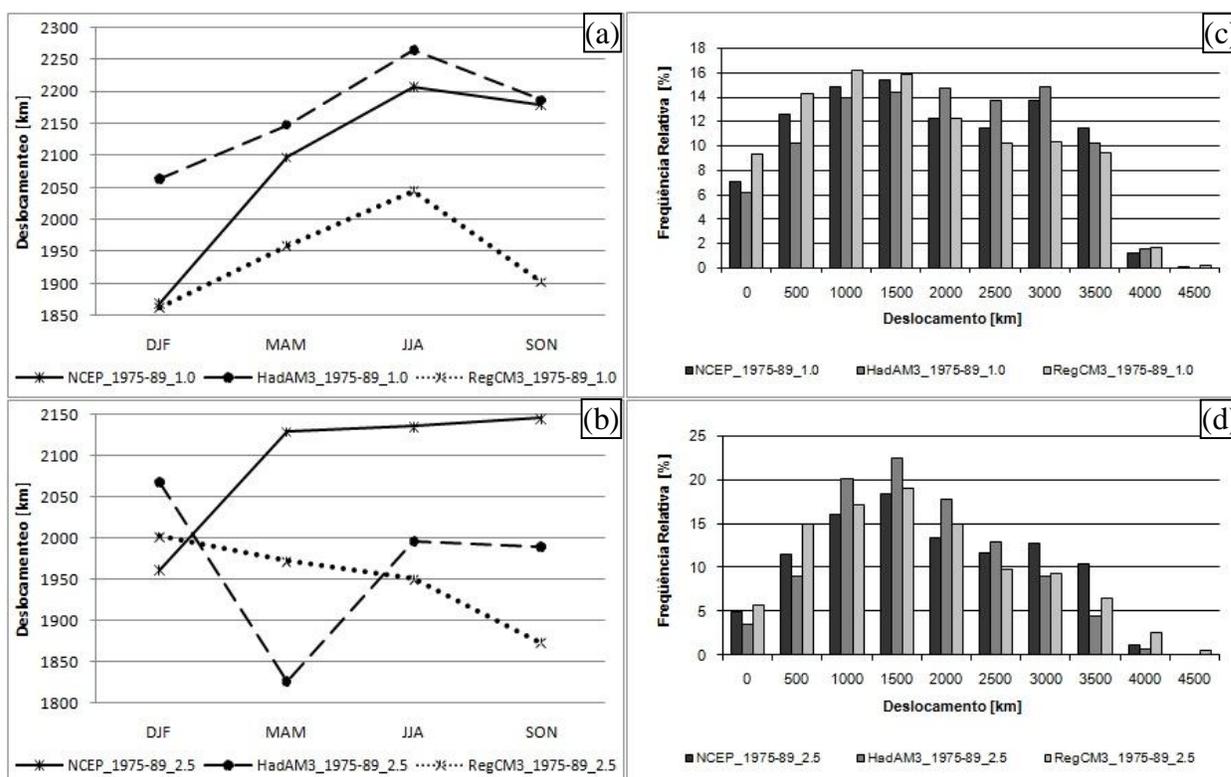


Figura 3.17 – Deslocamento médio (km) trimestral dos ciclones do NCEP, HadAM3 e RegCM3 para o período 1975 – 1989: (a)  $\zeta_{10} \leq -1,0 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$  e (b)  $\zeta_{10} \leq -2,5 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$  e, distribuição de freqüência dos ciclones do NCEP, HadAM3 e RegCM3 em intervalos de deslocamento, para o período 1975 – 1989: (c)  $\zeta_{10} \leq -1,0 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$  e (d)  $\zeta_{10} \leq -2,5 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$ .

A variação sazonal da velocidade média de deslocamento de todos os ciclones (Figura 3.18a) é semelhante no NCEP e nas simulações (RegCM3 e HadAM3), devido às durações (Figura 3.16a) e deslocamentos (Figura 3.17a) similares, com maiores velocidades no inverno e menores no verão (Simmonds e Keay, 2000). Todos os

ciclones no NCEP deslocam-se com velocidade média de  $9,6 \pm 0,6$  m/s, sendo um pouco mais rápidos no HadAM3 ( $10,0 \pm 0,4$  m/s) e mais lentos no RegCM3 ( $9,3 \pm 0,6$  m/s). Os ciclones inicialmente mais intensos deslocam-se com velocidade um pouco maior tanto no NCEP ( $10,1 \pm 0,3$  m/s) como no RegCM3 ( $9,7 \pm 0,2$  m/s). Em termos de distribuição sazonal, o HadAM3 (RegCM3) apresenta nas quatro estações do ano ciclones mais (menos) velozes comparados ao NCEP (Figuras 3.18a,b). Nas distribuições de freqüências nota-se maior percentual de ciclones com velocidades médias entre 5,0 a 12,5 m/s (Figuras 3.18c,d).

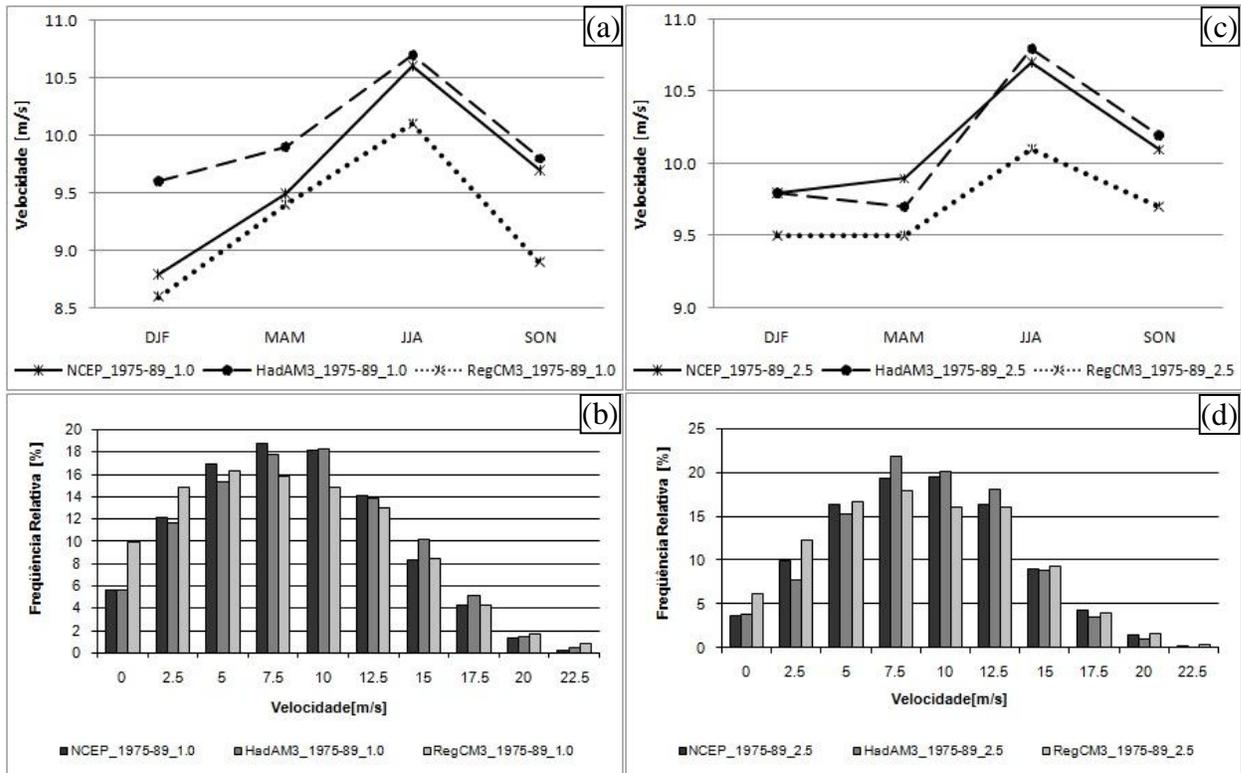


Figura 3.18 – Velocidade média de deslocamento (m/s) trimestral dos ciclones do NCEP, HadAM3 e RegCM3 para o período 1975 – 1989: (a)  $\zeta_{10} \leq -1,0 \times 10^{-5} s^{-1}$  e (b)  $\zeta_{10} \leq -2,5 \times 10^{-5} s^{-1}$  e, distribuição de freqüência dos ciclones do NCEP, HadAM3 e RegCM3 em intervalos de velocidade média de deslocamento, para o período 1975 – 1989: (c)  $\zeta_{10} \leq -1,0 \times 10^{-5} s^{-1}$  e (d)  $\zeta_{10} \leq -2,5 \times 10^{-5} s^{-1}$ .

A Figura 3.19 apresenta as densidades médias anuais, para o período 1975 – 1989, de todos (inicialmente  $\zeta_{10} \leq -1,0 \times 10^{-5} \text{s}^{-1}$ ) os ciclones e dos inicialmente mais intensos (com  $\zeta_{10} \leq -2,5 \times 10^{-5} \text{s}^{-1}$ ) obtidas do NCEP, HadAM3 e RegCM3. A densidade anual de todas as ciclogêneses do NCEP indica três regiões ciclogenéticas na costa leste da América do Sul: sul da Argentina (LAR), costa sul/sudeste do Uruguai (LUR) e costa sul/sudeste do Brasil (LBR) (Sinclair, 1996 e Reboita, 2008). Dentre estas regiões, a LAR apresenta maior dimensão horizontal e a LUR maior densidade (Figura 3.19a), semelhante à Reboita (2008). Considerando apenas os ciclones inicialmente mais intensos, a Figura 3.19d mostra bem definidos os núcleos ciclogenéticos no sul da Argentina (LAR) e no leste do Uruguai (LUR). Entretanto, no sul/sudeste do Brasil (LBR) a Figura 3.19d mostra um núcleo ciclogenético fraco. Comparando as Figuras 3.19.a e 3.19.d nota-se que na região LBR predominam basicamente ciclogêneses inicialmente fracas, uma vez que ocorre forte redução da densidade ao considerar somente os ciclones inicialmente intensos. Este resultado é semelhante ao de Reboita (2008) e também ao de Gan (1992), se considerarmos que os ciclones obtidos em Gan (1992) correspondem às ciclogêneses inicialmente mais intensas já que este autor considerou ciclogêneses a partir do momento em que os sistemas possuíam ao menos uma isóbara fechada.

Na densidade ciclogenética do HadAM3 (Figura 3.19b) não é evidente o núcleo ciclogenético na região LBR e o da região LUR também é mais fraco que no NCEP. Na LAR, o HadAM3 posiciona em local semelhante ao NCEP o núcleo ciclogenético, embora com menor intensidade. As ciclogêneses inicialmente intensas no HadAM3 praticamente não são simuladas ao norte de 33°S (Figura 3.19e), junto à costa da

América do Sul, com a maior densidade ciclogênica deslocada sobre o Oceano Atlântico e ao sul de 47°S.

O RegCM3 (Figura 3.19c), aninhado ao HadAM3, simula as três regiões ciclogênicas (LBR, LUR e LAR) apresentadas no NCEP (Figura 3.19a) quando todos os ciclones são considerados, mas também apresenta dificuldades em simular a distribuição espacial das ciclogêneses inicialmente intensas (Figura 3.19f). Por exemplo, na simula os núcleos ciclogênicos do NCEP (Figura 3.19d) na costa sul/sudeste do Brasil e na costa do Uruguai e simula a LAR mais fraca e com núcleo mais ao Sul, comparado ao NCEP.

Na distribuição sazonal de todas as ciclogêneses nota-se a presença das três regiões ciclogênicas no leste da América do Sul durante as quatro estações do ano no NCEP (Figuras 3.20a,d,g,j). Na LBR a área ciclogênica mantém dimensões horizontais semelhantes ao longo do ano, porém é mais intensa na primavera e inverno. A LUR é mais intensa no outono, e mantém posição e dimensões horizontais semelhantes ao longo do ano. A região ciclogênica LAR apresenta densidade e dimensões horizontais semelhantes da primavera ao outono e é mais fraca, porém com maiores dimensões horizontais no inverno.

Na LBR, o HadAM3 simula uma banda ciclogênica alongada para nordeste, que é mais larga/fraca no inverno (Figura 3.20h) e mais estreita/intensa no verão (Figura 3.20b). Na LUR os núcleos ciclogênicos foram simulados pelo HadAM3 somente no verão(Figura 3.20b) e primavera (Figura 3.20e). Por outro lado, o HadAM3 simula a região ciclogênica no LAR mais fraca do que o NCEP e com núcleo de máxima densidade ciclogênica deslocado para Sul no outono (em relação ao NCEP).

No inverno e primavera (Figura 3.20k), a LAR teve máximos secundários de menor dimensão, mas com densidade similar, próxima a latitude de 40°S.

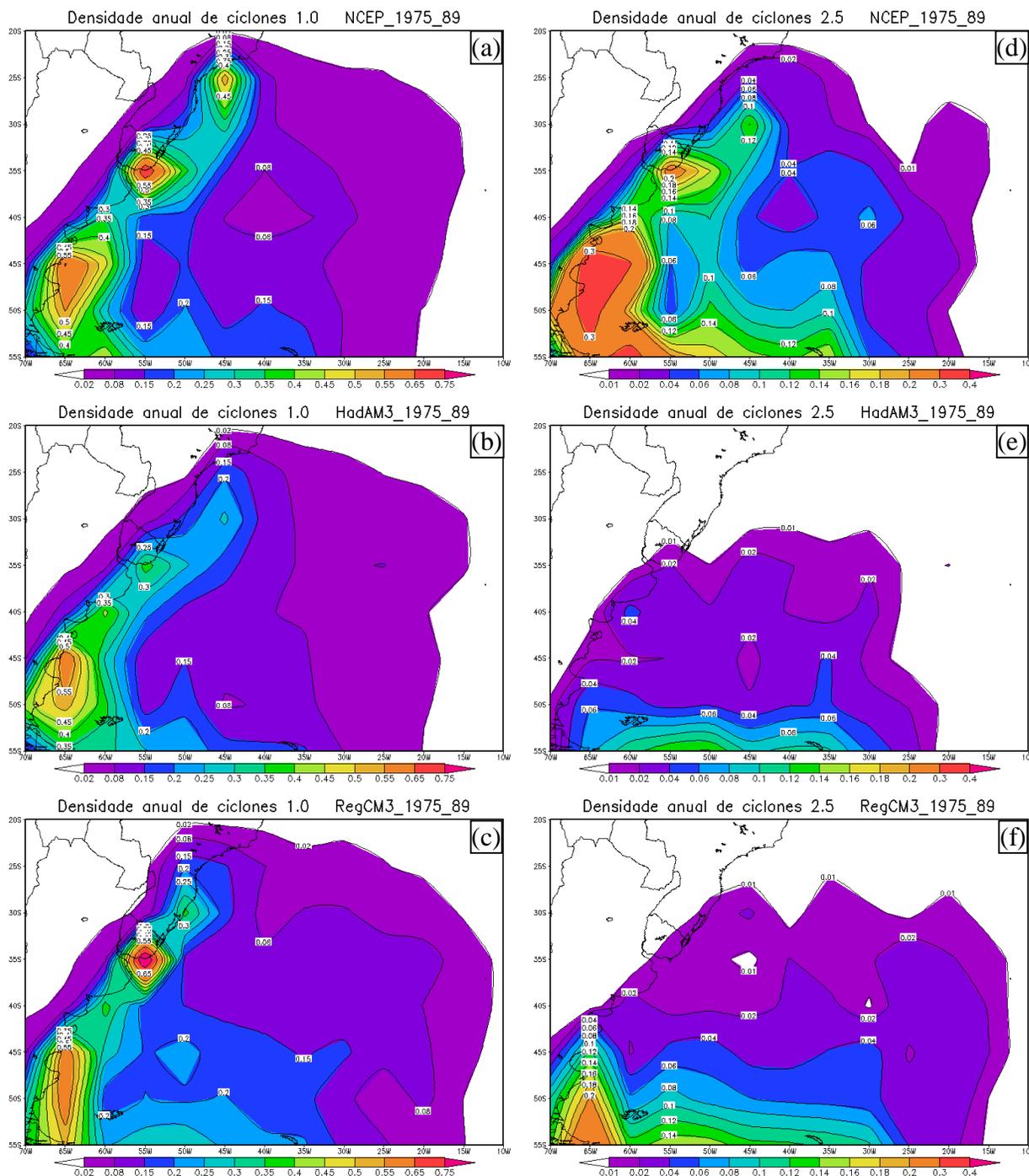


Figura 3.19 – Densidade anual de ciclones para o período 1975 – 1989: (a) NCEP com  $\zeta_{10} \le -1,0 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$ , (b) HadAM3 com  $\zeta_{10} \le -1,0 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$ , (c) RegCM3 com  $\zeta_{10} \le -1,0 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$ , (d) NCEP com  $\zeta_{10} \le -2,5 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$ , (e) HadAM3 com  $\zeta_{10} \le -2,5 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$  e (f) RegCM3 com  $\zeta_{10} \le -2,5 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$ .

Considerando todos os ciclones, o RegCM3 (Figuras 3.20c,f,i,l) simula as três regiões ciclogênicas da costa leste da América do Sul (LBR, LUR e LAR), que assim como no NCEP encontram-se bem definidas nas quatro estações do ano. Com isto, o RegCM3 melhora a distribuição espacial da atividade ciclogênica simulada pelo HadAM3 e aproxima-se do NCEP. O núcleo de ciclogêneses na LBR é simulado pelo RegCM3 em posição e dimensões horizontais semelhantes ao NCEP no inverno e primavera e deslocado para Sul no verão e outono. No entanto, o máximo de densidade ciclogênica em relação ao NCEP é mais intenso no verão e outono e fraco na primavera e inverno. Na LUR a área ciclogênica semelhante nas quatro estações do ano, mas com maior intensidade no verão e mais fraca na primavera. A LAR, assim como no NCEP, apresenta maior densidade no outono, porém é mais fraca no verão (no NCEP esta região é mais fraca no inverno).

Para as ciclogêneses inicialmente intensas ( $\zeta_{10} \leq -2,5 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$ ) o ciclo sazonal obtido do NCEP (Figuras 3.21a,d,g,j) apresenta um núcleo na LBR durante todo o ano, que é mais intenso no verão e mais fraco no outono. No NCEP o núcleo ciclogênico da LUR apresenta maiores densidades no outono e verão e menores densidades na primavera e inverno (Figura 3.21a,d,g,j), contrário ao obtido por (Reboita 2008). Na região LAR a densidade é muito mais intensa do que nas demais regiões ciclogênicas. Esta região apresenta o núcleo de máxima densidade de ciclogêneses com dimensões horizontais maiores no inverno menores no verão (Reboita, 2008). Sobre o Atlântico Sul, o NCEP mostra diversos núcleos e bandas ciclogênicas, sendo que as maiores densidades são encontradas na parte Sul do domínio e são mais fracas e menos evidentes no verão (Reboita, 2008).

No HadAM3 as densidades ciclogênicas sazonais de ciclones inicialmente intensos é menor que no NCEP, com um padrão espacial de várias bandas ciclogênicas fracas e esparsas (Figuras 3.21b,e,h,k). No outono e inverno, o HadAM3 simula ciclogêneses próximo à região ciclogênica LBR, mas deslocada para sudeste. O HadAM3 apresenta ciclogêneses na região LUR somente no outono e primavera. No outono e primavera o HadAM3 mostra LAR deslocada para leste da costa da Argentina, ficando mais distante do continente na primavera, quando se une à outra banda ciclogênica no Sul do domínio (Figura 3.21k).

Assim como no HadAM3, no RegCM3 a densidade ciclogênica é mais fraca do que no NCEP (Figuras 3.21c,f,i,l) e em algumas estações do ano o número de regiões ciclogênicas próximo da costa da América do sul é menor do que no NCEP. No outono e inverno o RegCM3 simula ciclogêneses de acordo com o NCEP na posição da região na LUR, porém com menor intensidade (Figuras 3.21d-f). No LAR, a densidade ciclogênica simulada pelo RegCM3 é sempre menor do que no NCEP e o núcleo de máxima ciclogênese é deslocado para Sul, exceto na primavera. Estes resultados concordam com Reboita (2008) ao demonstrar dificuldade do RegCM3 em simular ciclones inicialmente intensos, sobretudo para as latitudes ao Norte de 45°S.

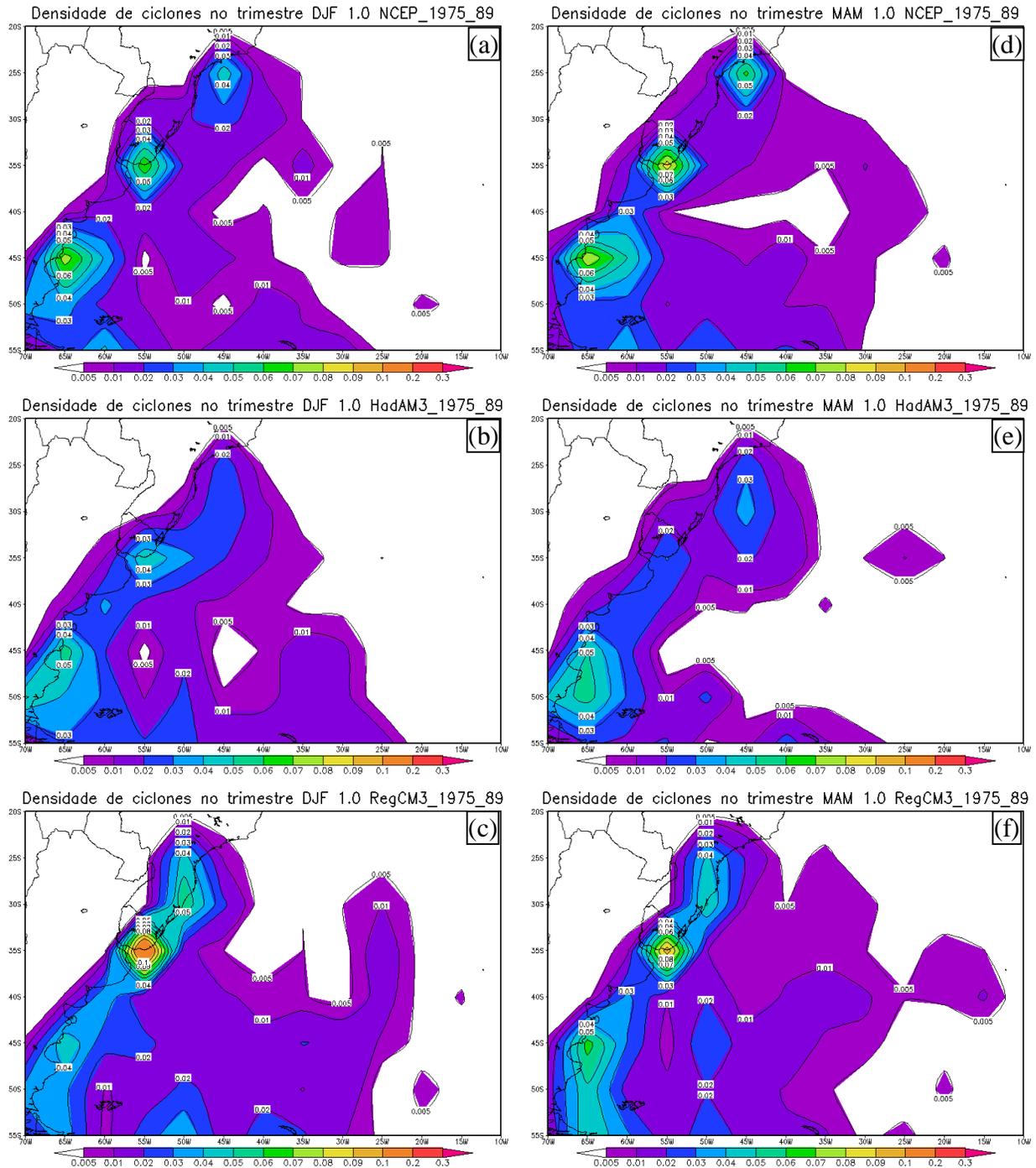


Figura 3.20 – Densidade de ciclones com  $\zeta_{10} \leq -1,0 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$  para o período 1975 – 1989, para o trimestre DJF (dezembro, janeiro e fevereiro): (a) NCEP, (b) HadAM3 e (c) RegCM3, para o trimestre MAM (março, abril e maio): (d) NCEP, (e) HadAM3 e (f) RegCM3, para o trimestre JJA (junho, julho e agosto): (g) NCEP, (h) HadAM3 e (i) RegCM3, e para o trimestre SON (setembro, outubro e novembro): (j) NCEP, (k) HadAM3 e (l) RegCM3.

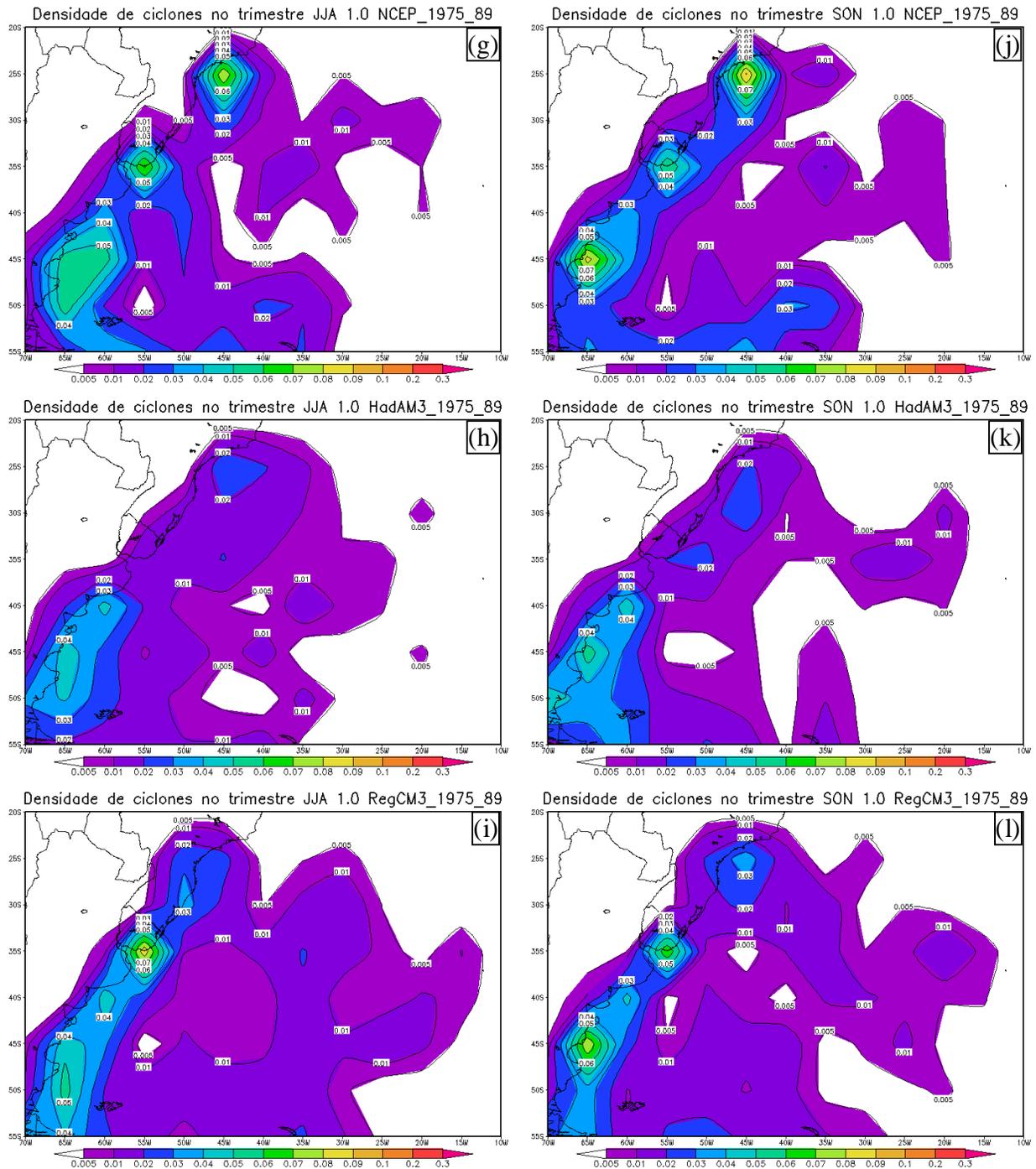


Figura 3.20 (Continuação)

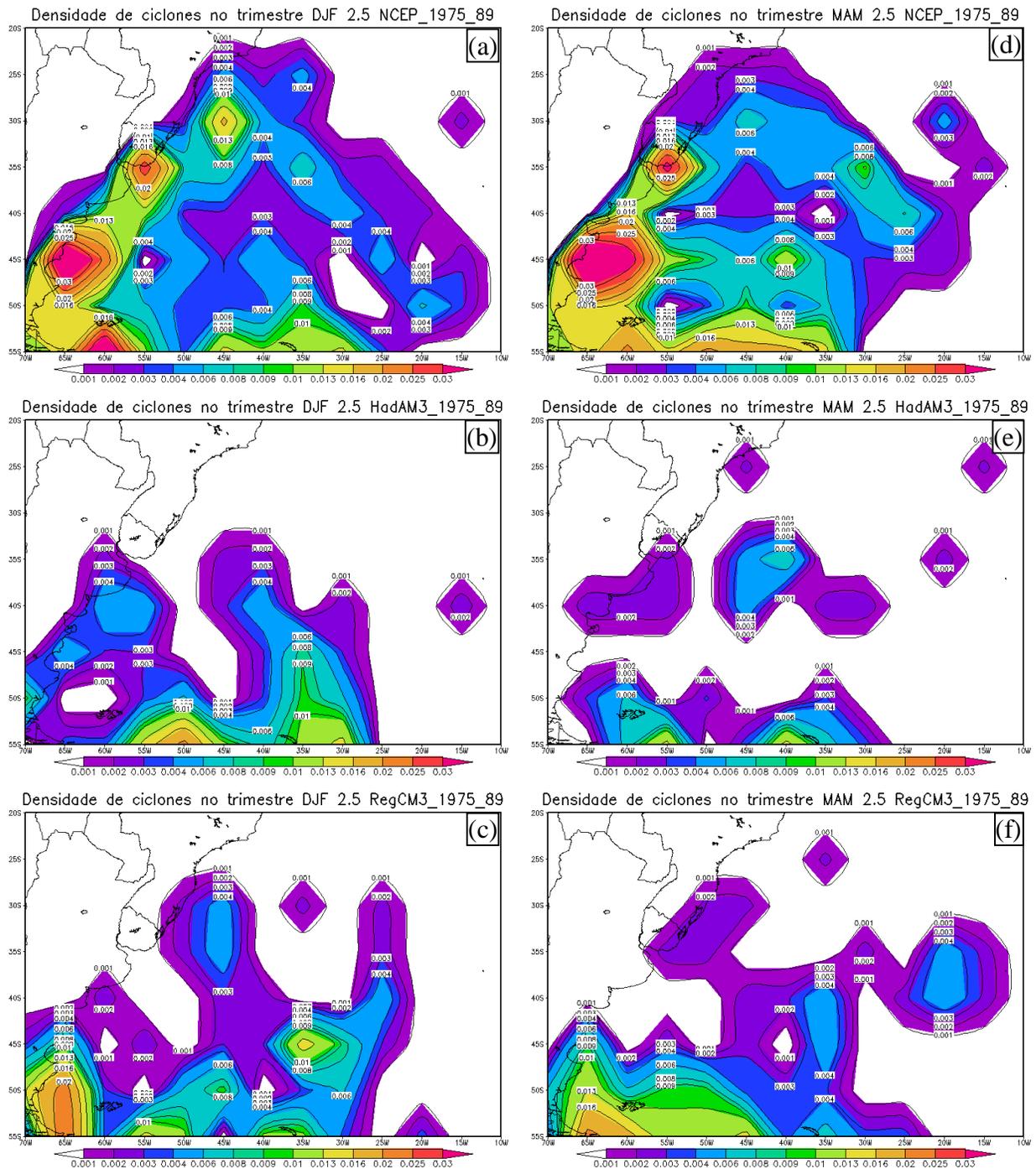


Figura 3.21 – Densidade de ciclones com  $\zeta_{10} \leq -2,5 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$  para o período 1975 – 1989, para o trimestre DJF (dezembro, janeiro e fevereiro): (a) NCEP, (b) HadAM3 e (c) RegCM3, para o trimestre MAM (março, abril e maio): (d) NCEP, (e) HadAM3 e (f) RegCM3, para o trimestre JJA (junho, julho e agosto): (g) NCEP, (h) HadAM3 e (i) RegCM3, e para o trimestre SON (setembro, outubro e novembro): (j) NCEP, (k) HadAM3 e (l) RegCM3.

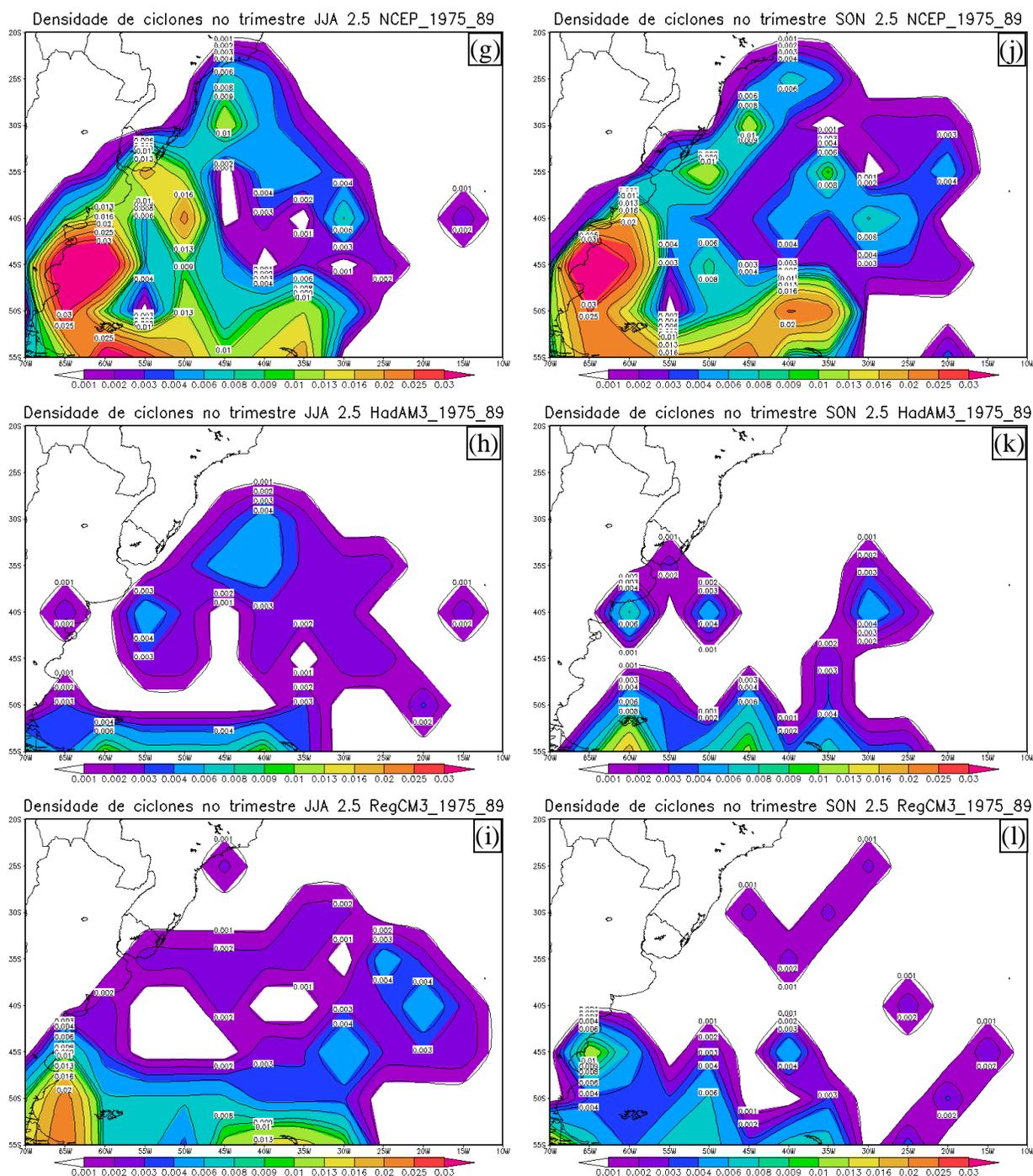


Figura 3.21 (Continuação)

As principais características médias sazonais dos ciclones do NCEP, HadAM3 e RegCM3 foram sumarizadas na Tabela 3.1. Reboita (2008), considerando todos os ciclones com  $\zeta_{10} \leq -1,5 \times 10^{-5} \text{s}^{-1}$  obteve como características médias, vorticidade inicial

$\zeta_{10} = -2,5 \times 10^{-5} \text{s}^{-1}$ , duração de 2,6 dias, deslocamento de 2421,1 km e velocidade de 10,8 m/s. No presente estudo se utilizou  $\zeta_{10} \leq -1,0 \times 10^{-5} \text{s}^{-1}$ , para incluir ciclones mais fracos, e isto pode ter resultado na maior duração, menor deslocamento (por incluir ciclones mais fracos) e por consequência velocidade inferior à obtida por Reboita (2008). E, da mesma forma que em Reboita (2008), a comparação do RegCM3 com o NCEP resultou em ciclones com maior vortacidade (indicando ciclones mais fracos), maior duração, menor deslocamento e velocidade no RegCM3.

Os ciclones intensos (NCEP –  $\zeta_{10} \leq -2,5 \times 10^{-5} \text{s}^{-1}$ ) apresentaram duração e vortacidade semelhantes à Reboita (2008), mas o deslocamento 14,1% inferior resultou em uma menor velocidade no presente estudo. Também similar a Reboita (2008), se obteve intensidade (dado pela vortacidade), deslocamento e velocidade menor do RegCM3 em comparação com o NCEP.

Contudo, ficou evidente que características como número de ciclones, vortacidade, deslocamento (Tabela 3.1) e regiões ciclogênicas principais (Figuras 3.20 a 3.22) do NCEP são melhor representadas pelo RegCM3, aninhado ao HadAM3, do que no rastreamento realizado diretamente nas simulações do HadAM3.

Tabela 3.1 – Características médias sazonais dos ciclones e desvio padrão sazonal, para o NCEP, HadAM3 e RegCM3 no período 1975 – 1989, para os ciclones com  $\zeta_{10} \leq -1,0 \times 10^{-5} \text{s}^{-1}$  e com  $\zeta_{10} \leq -2,5 \times 10^{-5} \text{s}^{-1}$ .

Médias trimestrais	$\zeta_{10} \leq -1,0 \times 10^{-5} \text{s}^{-1}$			$\zeta_{10} \leq -2,5 \times 10^{-5} \text{s}^{-1}$		
	NCEP 1975_89	HadAM3 1975_89	RegCM3 1975_89	NCEP 1975_89	HadAM3 1975_89	RegCM3 1975_89
Ciclones/trimestre	60,9 ± 2,9	53,4 ± 0,8	67,3 ± 2,0	35,1 ± 2,1	9,5 ± 1,7	16,7 ± 4,6
Duração (dias)	2,8 ± 0,1	2,9 ± 0,0	2,9 ± 0,1	2,6 ± 0,1	2,5 ± 0,1	2,7 ± 0,2
Vorticidade ( $10^{-3} \text{s}^{-1}$ )	-2,78 ± 0,07	-1,87 ± 0,08	-2,06 ± 0,14	-3,47 ± 0,05	-3,32 ± 0,09	-3,38 ± 0,05
Deslocamento (km)	2087,9 ± 132,6	2165,4 ± 72,3	1943,0 ± 68,5	2092,8 ± 76,1	1970,1 ± 88,7	1949,3 ± 47,6
Velocidade (m/s)	9,6 ± 0,6	10,0 ± 0,4	9,3 ± 0,6	10,1 ± 0,3	10,1 ± 0,4	9,7 ± 0,2

### 3.2.2 Tendências para os Cenários B2 e A2

Considerando a área de rastreamento dos ciclones sobre o Atlântico Sul (Figura 2.2), o RegCM3 nos cenários futuros (B2 e A2 – período 2071 – 2085) comparado ao clima presente (período 1975 – 1989) mostra redução no número total de ciclogêneses (Figura 3.22). Este resultado concorda com os de Zhang e Wang (1997), Sinclair e Watterson (1999), Waterson (2006), Fyfe (2003) e Lambert e Fyfe (2006) que obtiveram redução no número de ciclones para cenários de aquecimento. Nos resultados do RegCM3, as reduções são maiores para o cenário de maior concentração de gases de efeito estufa (A2) e para os ciclones inicialmente mais intensos. Considerando todos os ciclones, os cenários B2 e A2 simulam 3846 e 3745 sistemas durante os 15 anos de simulação (2071 – 2085), respectivamente, representando reduções respectivas de 4,7 e 7,2%. Entretanto, os ciclones intensos foram ainda mais afetados, sobretudo no cenário A2 com redução projetada de 20,9%, enquanto no B2 a redução estimada é de 11,3%.

De acordo com Fyfe (2003) a redução de ciclogêneses na faixa 40°S – 60°S e aumento na faixa superior a 60°S está relacionada ao deslocamento para o pólo da área ciclogênética, associada com o deslocamento da zona baroclínica em direção ao Pólo. Zhang e Wang (1997) apontam ainda a redução do contraste térmico terra-mar no leste das regiões costeiras dos continentes e o aumento dos fluxos de calor latente como possíveis causas da redução dos ciclones em cenários de aquecimento global.

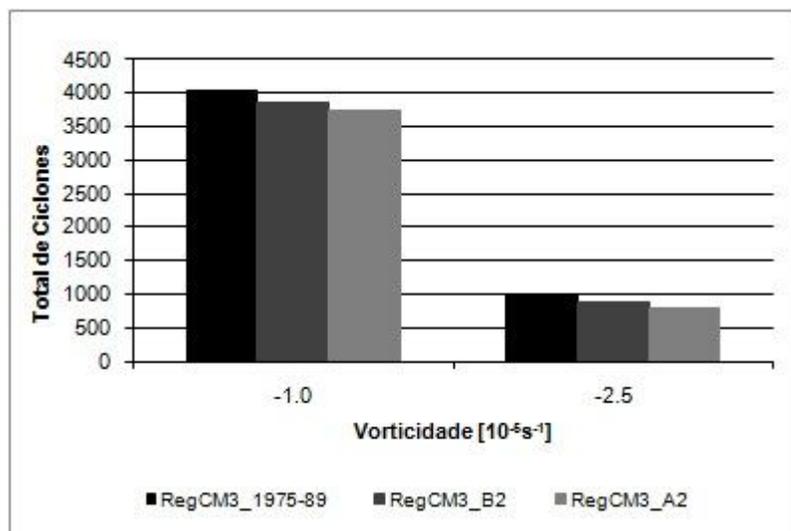


Figura 3.22 – Total de ciclones do RegCM3 para os limiares de  $\zeta_{10} \leq -1,0 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$  e  $\zeta_{10} \leq -2,5 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$ , no período 1975 – 1989 e nos cenários B2 e A2 do período 2071 - 2085.

Além de redução no número total de ciclogêneses, a Figura 3.23a indica também mudanças na distribuição sazonal de ciclogêneses nos cenários B2 e A2. Enquanto no cenário B2 a maior redução no número de ciclogêneses é projetada para a primavera (de 70 para 64) no A2 é no inverno (redução de 68 para 59). As menores diferenças entre o clima presente e futuro são projetadas para o verão e outono (Figura 3.23a). Apenas no outono o cenário B2 projeta maior quantidade de ciclones comparado ao clima presente.

Contudo, na Figura 3.23b que considera somente ciclones inicialmente intensos, indica apenas redução no número de sistemas, sem modificar seu ciclo anual em relação ao clima presente. Os ciclones intensos dos dois cenários (B2 e A2) apresentam maior frequência de eventos no inverno seguido do outono e menor frequência no verão e primavera, como no clima presente. Assim como para o total de ciclones (Figura 3.23a), a maior redução na frequência de ciclones intensos é projetada para o cenário A2 (Figura 3.23b).

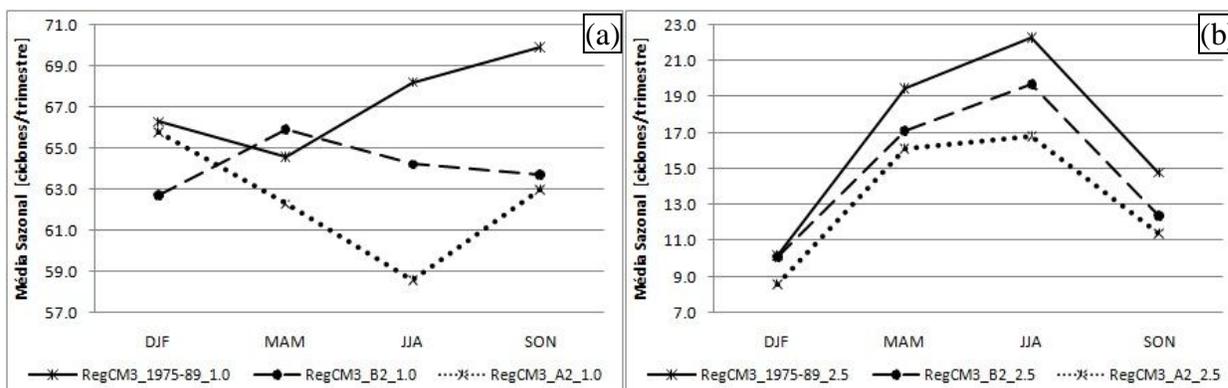


Figura 3.23 – Número médio trimestral de ciclones do RegCM3 para o período 1975 – 1989 e nos cenários B2 e A2 do período 2071 – 2085: (a)  $\zeta_{10} \leq -1,0 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$  e (b)  $\zeta_{10} \leq -2,5 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$ .

Uma questão importante é se a mudança projetada para o número de eventos implicaria também em mudanças nas características médias dos sistemas, tais como, vorticidade inicial, tempo de vida, etc. Considerando todos os ciclones, existe um pequeno aumento na vorticidade inicial média que para o clima presente é de  $-2,06 \pm 0,14 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$  e nos cenários B2 e A2 projeta-se  $-2,02 \pm 0,12 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$  e  $-1,98 \pm 0,12 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$ , respectivamente. Ou seja, projeta-se tanto redução como enfraquecimento inicial dos ciclones, sobretudo no cenário A2. Como mostra a Figura 3.24b deverá ocorrer um aumento no percentual de ciclones inicialmente fracos nos cenários futuros, sobretudo no A2. A distribuição sazonal da vorticidade inicial média mostra que os ciclones permanecerão mais intensos no inverno – outono e mais fracos no verão – primavera nos cenários futuros (Figura 3.24a).

Os ciclones intensos ( $\zeta_{10} \leq -2,5 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$ ) seguem o mesmo padrão do total de ciclones com relação à distribuição de freqüência da vorticidade média inicial (Figura 3.24d), com aumento no percentual de ciclones que se iniciam com menor vorticidade ciclônica (que indica ciclones mais fracos). No entanto, a distribuição sazonal da vorticidade média apresenta padrão diferente em relação ao clima presente (Figura

3.24b). O cenário B2 mantém o semestre setembro – fevereiro com menor vorticidade ciclônica e o semestre maio – agosto com maior vorticidade ciclônica, indicando que os ciclones no primeiro período permanecerão mais fracos que no segundo (Figura 3.24b). Porém, em valores absolutos a vorticidade ciclônica será menor no B2 (ciclones mais fracos) que no presente ao longo do ano, exceto no inverno (ciclones mais intensos). A variação sazonal do cenário A2 indica uma redução da intensidade inicial dos ciclones no verão – outono (redução da vorticidade ciclônica inicial média) e aumento na primavera e no inverno (Figura 3.24b). Nesta projeção, a primavera passa a apresentar ciclones com vorticidade ciclônica inicial média mais intensa o que é contrário ao clima presente com ciclones inicialmente mais fracos se comparado às demais estações do ano (Figura 3.24b).

Quando se consideram todos os ciclones, a duração média no NCEP, HadAM3 e RegCM3 na Figura 3.25a apresenta padrão sazonal semelhante ao de vorticidade inicial média (Figuras 3.24a). Com isto nos trimestres em que as ciclogêneses apresentam menores vorticidades ciclônicas os sistemas são mais duradouros, ou seja, sistemas inicialmente mais fracos duram mais. Em termos de distribuição de frequência (Figuras 3.25c), os cenários A2 e B2, como no clima presente, mostram predomínio de ciclones com duração entre 1 e 2 dias (acima de 45% dos sistemas). Isto fornece tempo de vida médio nos cenários B2 e A2 de  $2,8 \pm 0,2$  dias, similar ao do clima presente com  $2,9 \pm 0,1$  dias. Nos dois cenários, mantém-se o verão como a estação com sistemas mais duradouros (3,1 dias) e o inverno com ciclones de menor tempo de vida ( $\pm 2,6$  dias). Quanto à distribuição dos ciclones em classes de duração (Figura 3.25c), as maiores mudanças em relação ao clima presente são um aumento no percentual de

ciclones com duração inferior a 1,5 dias no B2 e maior percentual entre 1,5 e 3,0 dias para o A2.

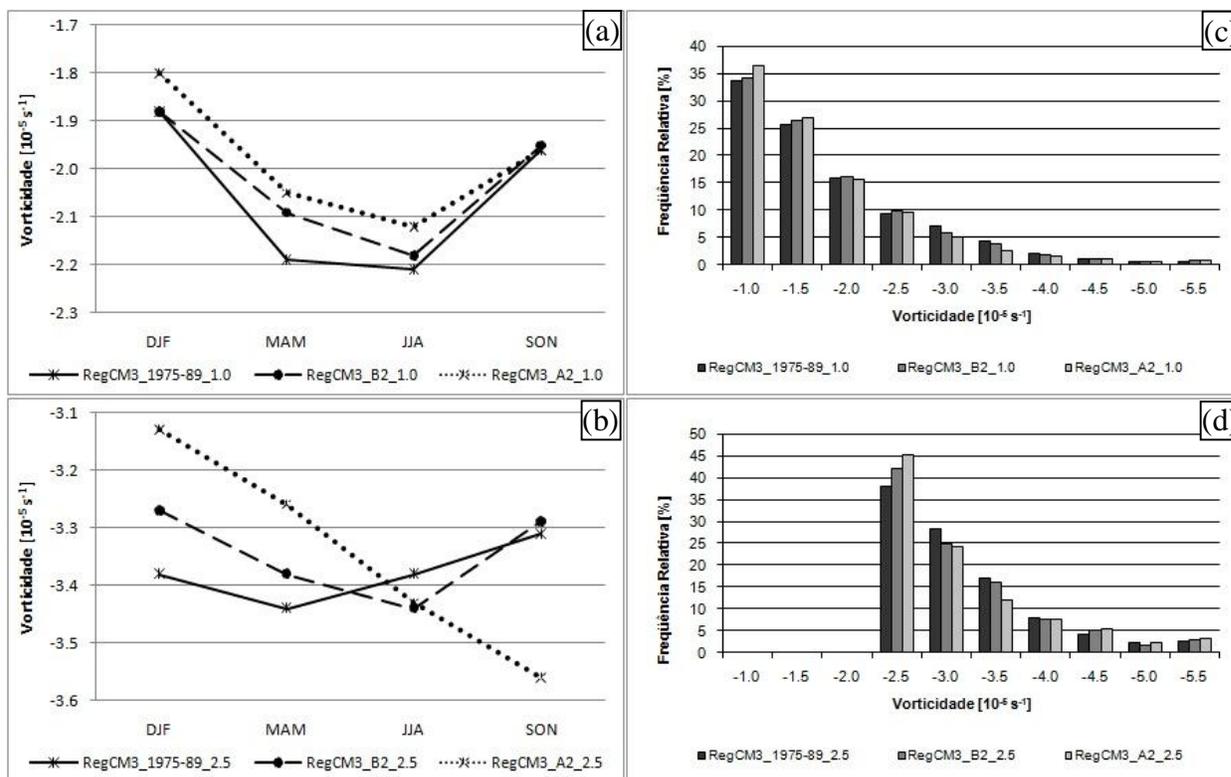


Figura 3.24 – Vorticidade média ( $s^{-1}$ ) trimestral dos ciclones do RegCM3 para o período 1975 – 1989 e nos cenários B2 e A2 do período 2071 – 2085: (a)  $\zeta_{10} \leq -1,0 \times 10^{-5} s^{-1}$  e (b)  $\zeta_{10} \leq -2,5 \times 10^{-5} s^{-1}$  e, distribuição de frequência dos ciclones do RegCM3 em intervalos de vorticidade, para o período 1975 – 1989 e nos cenários B2 e A2 do período 2071 – 2085: (c)  $\zeta_{10} \leq -1,0 \times 10^{-5} s^{-1}$  e (d)  $\zeta_{10} \leq -2,5 \times 10^{-5} s^{-1}$ .

Para os ciclones inicialmente intensos, o cenário A2 mostra maiores diferenças na variação sazonal da duração média dos ciclones do que o cenário B2 (Figura 3.25b). O A2 indica redução (aumento) do tempo de vida dos sistemas no inverno – primavera (verão), enquanto o B2 apresenta pequena redução do tempo de vida na maior parte do ano. Comparado ao clima presente, os dois cenários (Figuras 3.25d) apresentam maior percentual de ciclones intensos com duração entre 2 e 3 dias e menor de duração superior a 5,5 dias.

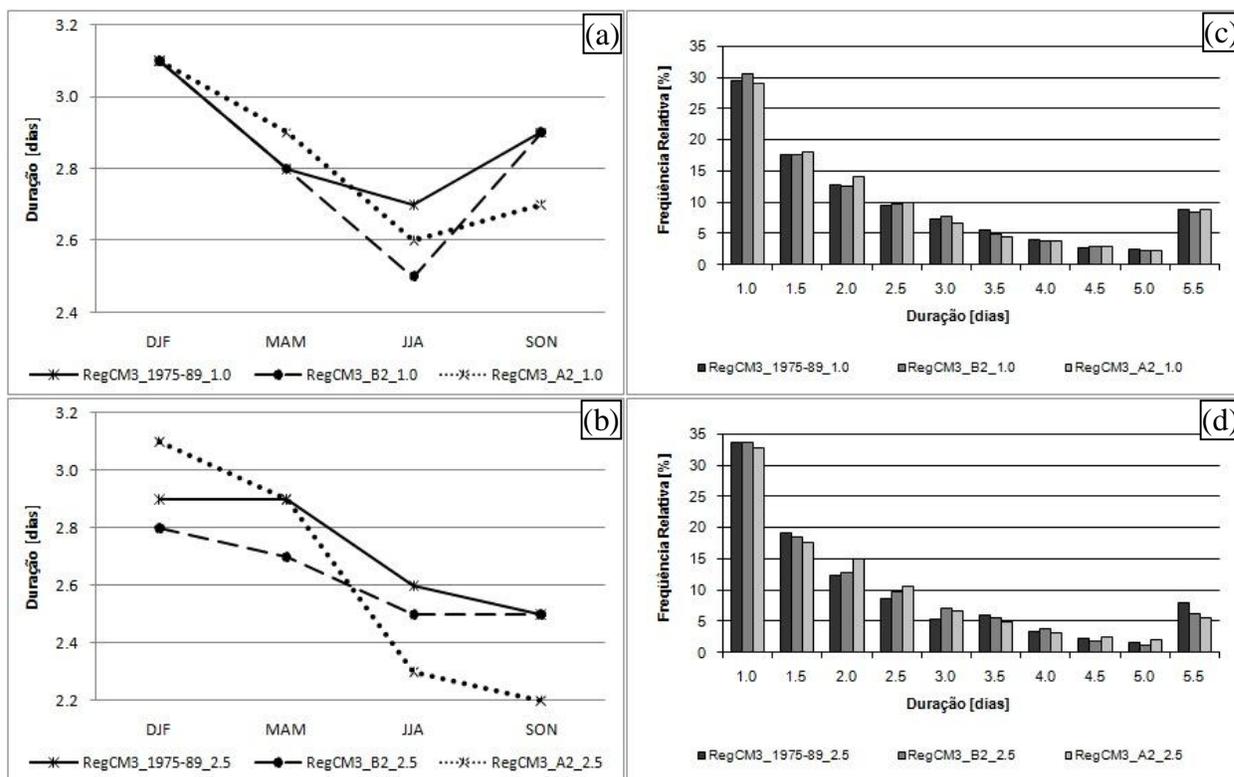


Figura 3.25 – Duração média (dias) trimestral dos ciclones do RegCM3 para o período 1975 – 1989 e nos cenários B2 e A2 do período 2071 – 2085: (a)  $\zeta_{10} \leq -1,0 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$  e (b)  $\zeta_{10} \leq -2,5 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$  e, distribuição de frequência do RegCM3 para o período 1975 – 1989 e nos cenários B2 e A2 do período 2071 – 2085: (c)  $\zeta_{10} \leq -1,0 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$  e (d)  $\zeta_{10} \leq -2,5 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$ .

O deslocamento médio anual e sazonal, assim como a variabilidade entre estações do ano nos cenários futuros, é também semelhante ao clima presente (Figura 3.26a). Nota-se nesta figura, valores médios sazonais um pouco menores, e mantém-se o inverno (verão) como a estação onde os sistemas percorrem maiores (menores) distâncias (Figura 3.26a). Na distribuição de frequência (Figura 3.26c) nota-se aumento da frequência de ciclones com pequeno deslocamento (< 500 km) no A2 e B2, e algumas alterações na frequência de ciclones que percorrem longas distâncias (acima de 1500 km).

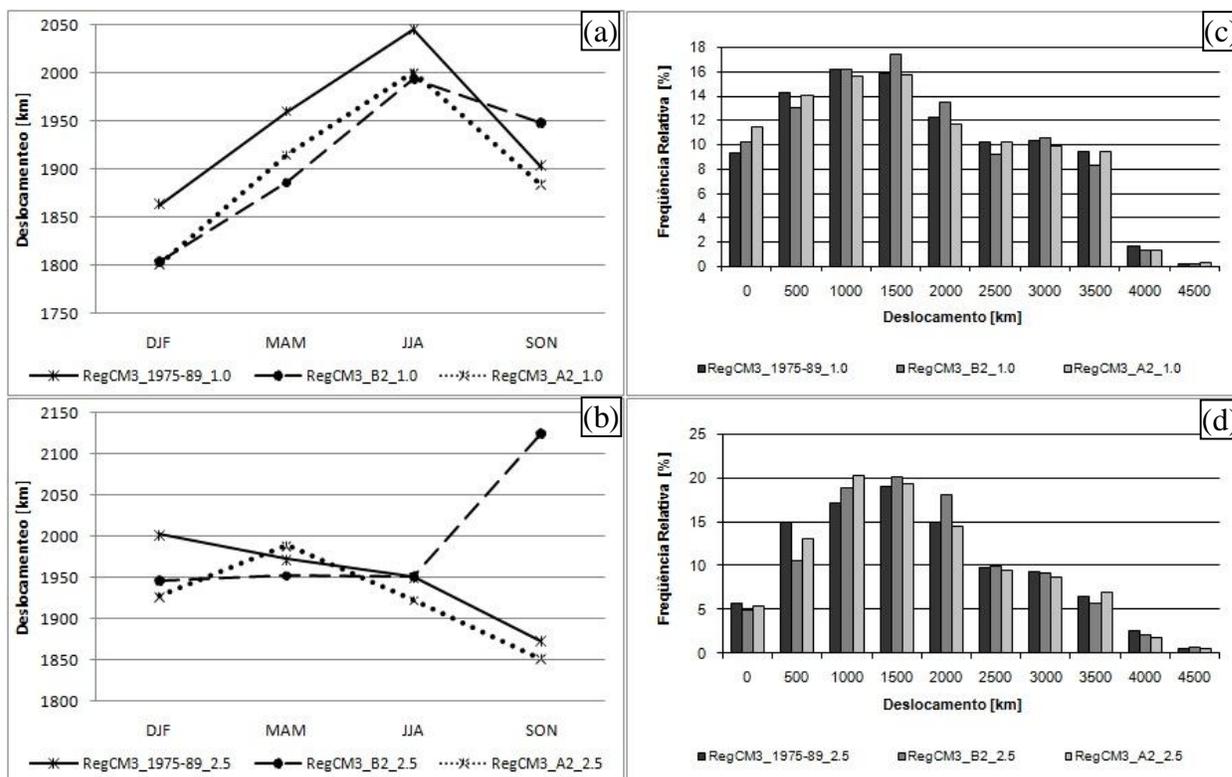


Figura 3.26 – Deslocamento médio (km) trimestral dos ciclones do RegCM3 para o período 1975 – 1989 e nos cenários B2 e A2 do período 2071 – 2085: (a)  $\zeta_{10} \leq -1,0 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$  e (b)  $\zeta_{10} \leq -2,5 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$  e, distribuição de frequência dos ciclones do RegCM3 para o período 1975 – 1989 e nos cenários B2 e A2 do período 2071 – 2085: (c)  $\zeta_{10} \leq -1,0 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$  e (d)  $\zeta_{10} \leq -2,5 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$ .

A velocidade média anual considerando todos os ciclones no cenário B2 é igual a do clima presente ( $9,3 \pm 0,6 \text{ m/s}$ ) e um pouco maior que no A2 ( $9,1 \pm 0,6 \text{ m/s}$ ). O inverno e verão mantêm-se como as estações de sistemas mais rápidos e mais lentos, respectivamente (Figura 3.27a). No cenário B2 a velocidade média projetada é um pouco menor que no presente durante verão – outono e maior na primavera. O aumento da velocidade média nesta estação estaria associado ao maior deslocamento (Figura 3.26a) e manutenção do tempo de vida (Figura 3.25a) no B2, enquanto no A2 deve-se à menor duração dos sistemas (Figura 3.25a).

Para os ciclones inicialmente intensos as projeções para os cenários A2 e B2 mostram ciclo anual diferentes (Figura 3.27b). Enquanto o B2 tende a aumentar a velocidade de deslocamento dos sistemas na maior parte do ano o A2 reduz esta velocidade no verão – outono e aumenta na primavera (Figura 3.27b). Apenas no inverno os cenários A2 e B2 mantêm os sistemas com velocidade média semelhante entre si e também ao clima presente. Na distribuição de frequência (Figura 3.27c) o padrão é semelhante nas três simulações, porém, com os cenários futuros apresentando percentuais pouco superiores para velocidades entre 15 e 20 m/s. O cenário A2 apresenta maiores percentuais que o presente na faixa de velocidade 10,0 – 12,5 m/s e o B2 entre 10,0 – 17,0 m/s.

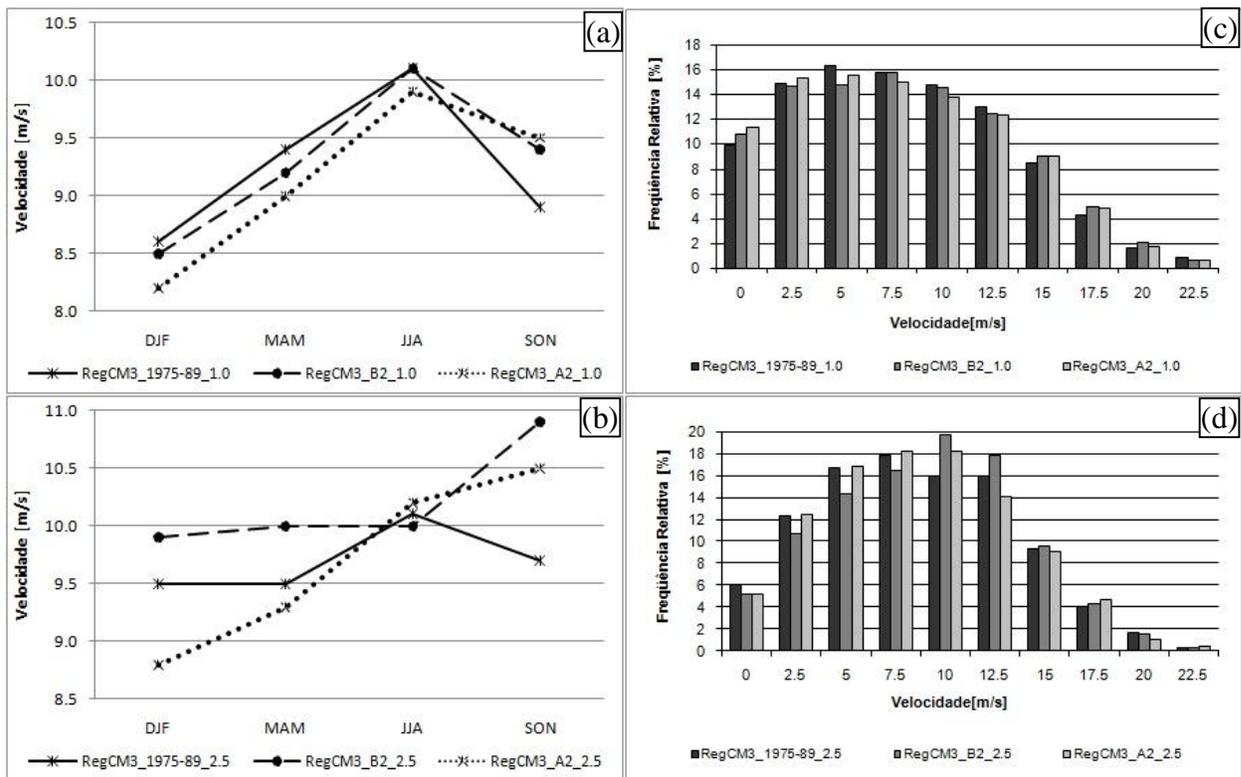


Figura 3.27 – Velocidade média de deslocamento (m/s) trimestral dos ciclones do RegCM3 para o período 1975 – 1989 e nos cenários B2 e A2 do período 2071 – 2085: (a)  $\zeta_{10} \leq -1,0 \times 10^{-5} s^{-1}$  e (b)  $\zeta_{10} \leq -2,5 \times 10^{-5} s^{-1}$  e, distribuição de frequência dos ciclones do RegCM3 para o período 1975 – 1989 e nos cenários B2 e A2 do período 2071 – 2085: (c)  $\zeta_{10} \leq -1,0 \times 10^{-5} s^{-1}$  e (d)  $\zeta_{10} \leq -2,5 \times 10^{-5} s^{-1}$ .

As Figuras 3.28a-d mostram as densidades ciclogênicas médias projetadas para os cenários de mudanças climáticas B2 e A2 (2071 – 2085). Considerando todos os ciclones ( $\zeta_{10} \leq -1,0 \times 10^{-5} \text{s}^{-1}$ ), o cenário B2 (Figura 3.31a) apresenta configuração espacial da densidade de ciclogêneses semelhante ao clima presente (Figura 3.19c), embora com enfraquecimento da densidade na região ciclogênica LAR. Para os ciclones inicialmente intensos ( $\zeta_{10} \leq -2,5 \times 10^{-5} \text{s}^{-1}$ ), o B2 (Figura 3.28c) passa a apresentar um máximo de densidade fraco na área LUR diferente do clima presente (Figura 3.19f), mas mantém a região LAR. Nesta região (LAR) o B2 projeta apenas redução na intensidade, além disso, simula a grande banda ciclogênica sobre o Atlântico Sul.

Também o cenário A2 (Figura 3.28b), assim como o B2, mantém as três regiões ciclogênicas na costa leste da América do Sul quando todos os ciclones são considerados. Na região LBR o cenário A2 apresenta densidade semelhante ao clima presente e ao B2. Na região LUR, o cenário A2 projeta enfraquecimento da atividade ciclogênica, sendo mais fraca que o B2 e o presente. O cenário A2 mantém configuração espacial semelhante ao clima presente na região LAR, mas com densidade intermediária entre a do clima presente e a do cenário B2. Para as ciclogêneses intensas (Figura 3.28d), o A2 simula (e com menor densidade) apenas a região ciclogênica LAR e a banda de ciclogêneses sobre o Atlântico Sul.

Para valores médios anuais, a Figura 3.28 indica que os cenários B2 e A2 tendem a manter a distribuição espacial das áreas de ciclogêneses semelhantes a do clima presente (Figuras 3.19c,f), mas devido à redução no número de ciclones nestes cenários, a intensidade destes máximos tende a ser menor que no presente.

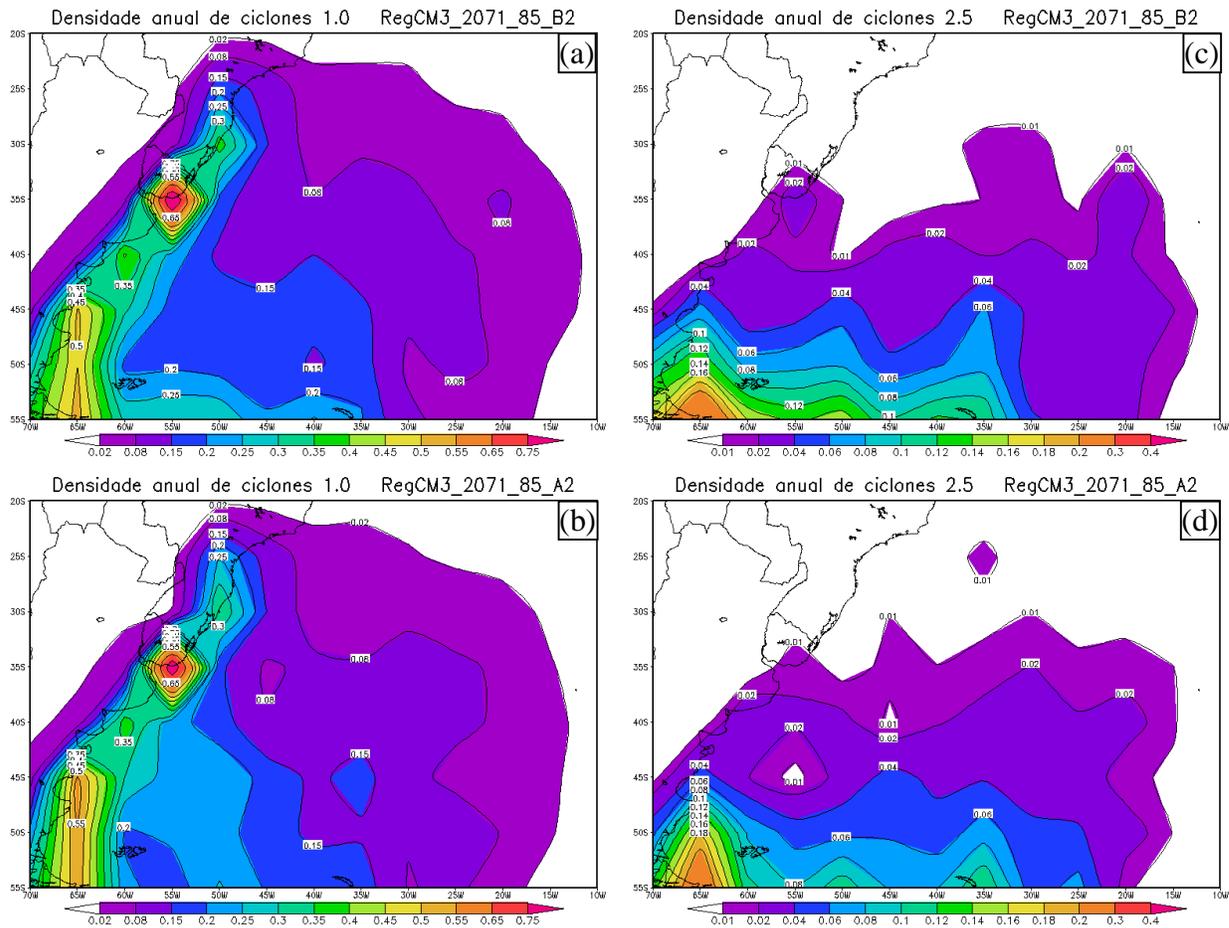


Figura 3.28 – Densidade anual de ciclones do RegCM3: (a) cenário B2 no período 2071 – 2085, com  $\zeta_{10} \leq -1,0 \times 10^{-5} \text{s}^{-1}$ , (b) cenário A2 no período 2071 – 2085, com  $\zeta_{10} \leq -1,0 \times 10^{-5} \text{s}^{-1}$ , (c) cenário B2 no período 2071 – 2085, com  $\zeta_{10} \leq -2,5 \times 10^{-5} \text{s}^{-1}$  e (d) cenário A2 no período 2071 – 2085, com  $\zeta_{10} \leq -2,5 \times 10^{-5} \text{s}^{-1}$ .

O cenário B2 (Figuras 3.29a-d) mantém o padrão espacial da densidade de ciclogêneses semelhante ao clima presente (Figuras 3.20c,f,i,l) no outono e inverno. No entanto, maiores diferenças ocorrem no litoral da Argentina durante o verão pois a região ciclogênica desloca-se para Sul. A região ciclogênica LBR, no B2, mostra menor densidade que no período 1975 – 1989 do inverno ao verão. A LUR apresenta maiores densidades que no clima presente durante o inverno e primavera e menores densidades no outono. As maiores diferenças em relação ao presente (1975 – 1989) ocorreram no litoral sul da Argentina. Esta região mostra maiores dimensões horizontais

que no clima presente, mas apresenta o núcleo de máxima densidade deslocado para Sul no verão; é estreita, fraca e com máximo ciclogênético centrado em 40°S no outono e mostra dois máximos de densidades menores no inverno.

O cenário A2 (Figuras 3.29e-h), em relação ao clima presente (Figuras 3.20c,f,i,l), simula menos ciclogêneses no sul da Argentina (LAR) no inverno e primavera. Nesta estação, o núcleo ciclogênético LAR apresentou dimensões horizontais maiores embora com menor densidade. No litoral sul/sudeste do Brasil (LBR) houve pequena redução nas ciclogêneses nas quatro estações do ano, mantendo a primavera com menos ciclogêneses nesta região e o verão e outono com maior densidade de ciclogêneses. No sul/sudeste do Uruguai (LUR), houve redução nas ciclogêneses no verão e outono e aumento no inverno.

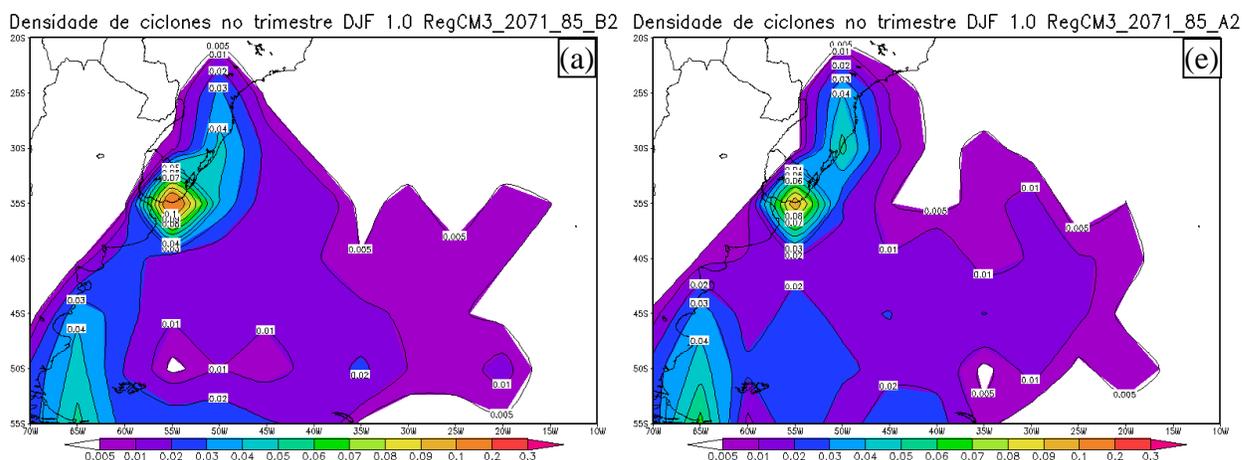


Figura 3.29 – Densidade de ciclones do RegCM3 com  $\zeta_{10} \leq -1,0 \times 10^{-5} \text{s}^{-1}$ , para o cenário B2 no período 2071 – 2085, para os trimestres: (a) DJF, (b) MAM, (c) JJA e (d) SON e para o cenário A2 no período 2071 – 2085, para os trimestres: (e) DJF, (f) MAM, (g) JJA e (h) SON.

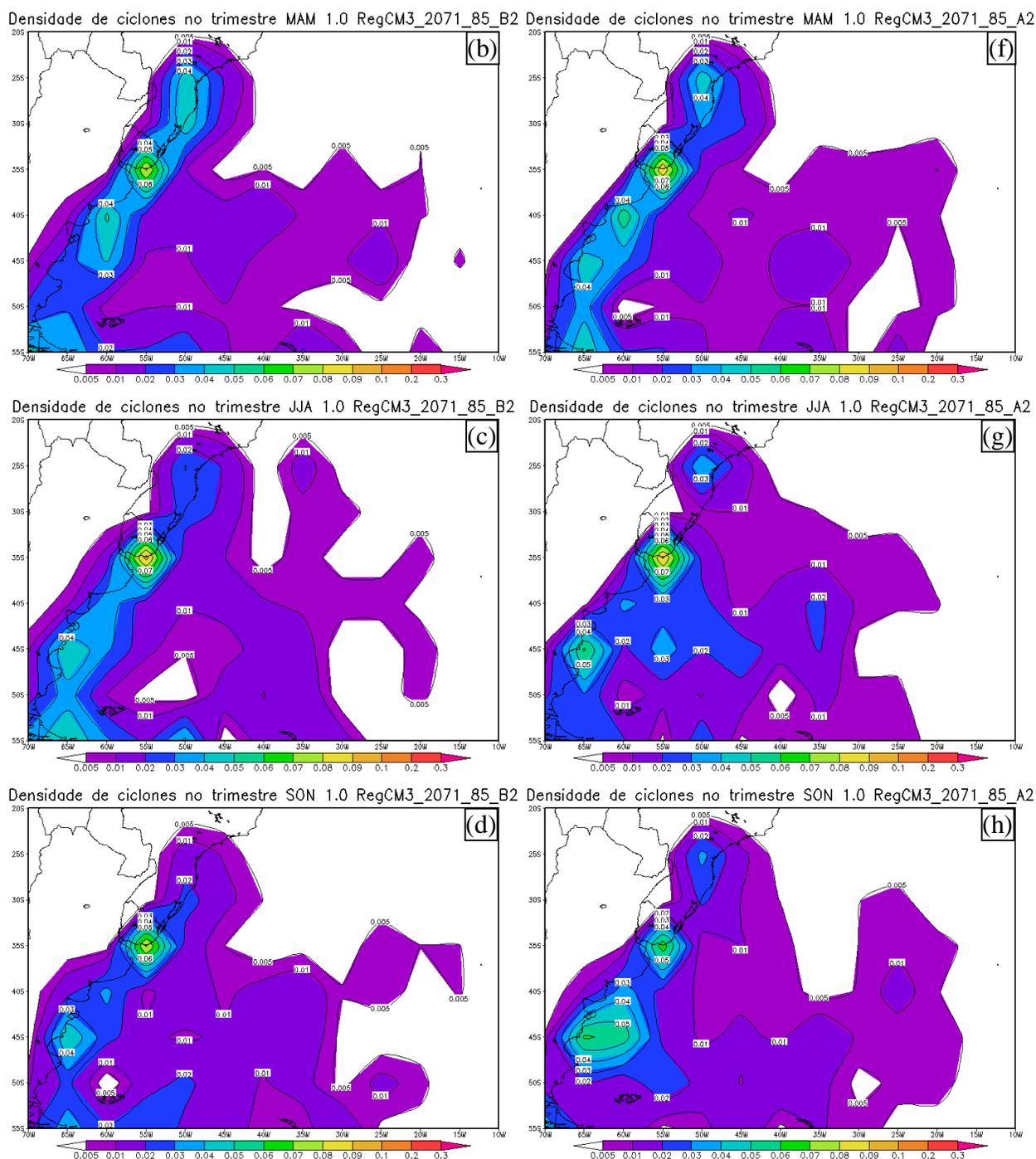


Figura 3.29 (Continuação)

Os cenários B2 (Figura 3.30a-d) e A2 (Figura 3.30e-h) mostram redução nas densidades de ciclogêneses intensas, principalmente na faixa ao Norte de 45°S no B2 e

ao Norte de 50°S no A2, semelhante a Fyfe (2003). Contudo, alguns padrões do clima presente (Figuras 3.21c,f,i,l) como um máximo ciclogênético no sul da Argentina, uma banda ciclogênética no sul do domínio e núcleos fracos e esparsos sobre o Atlântico Sul são mantidos.

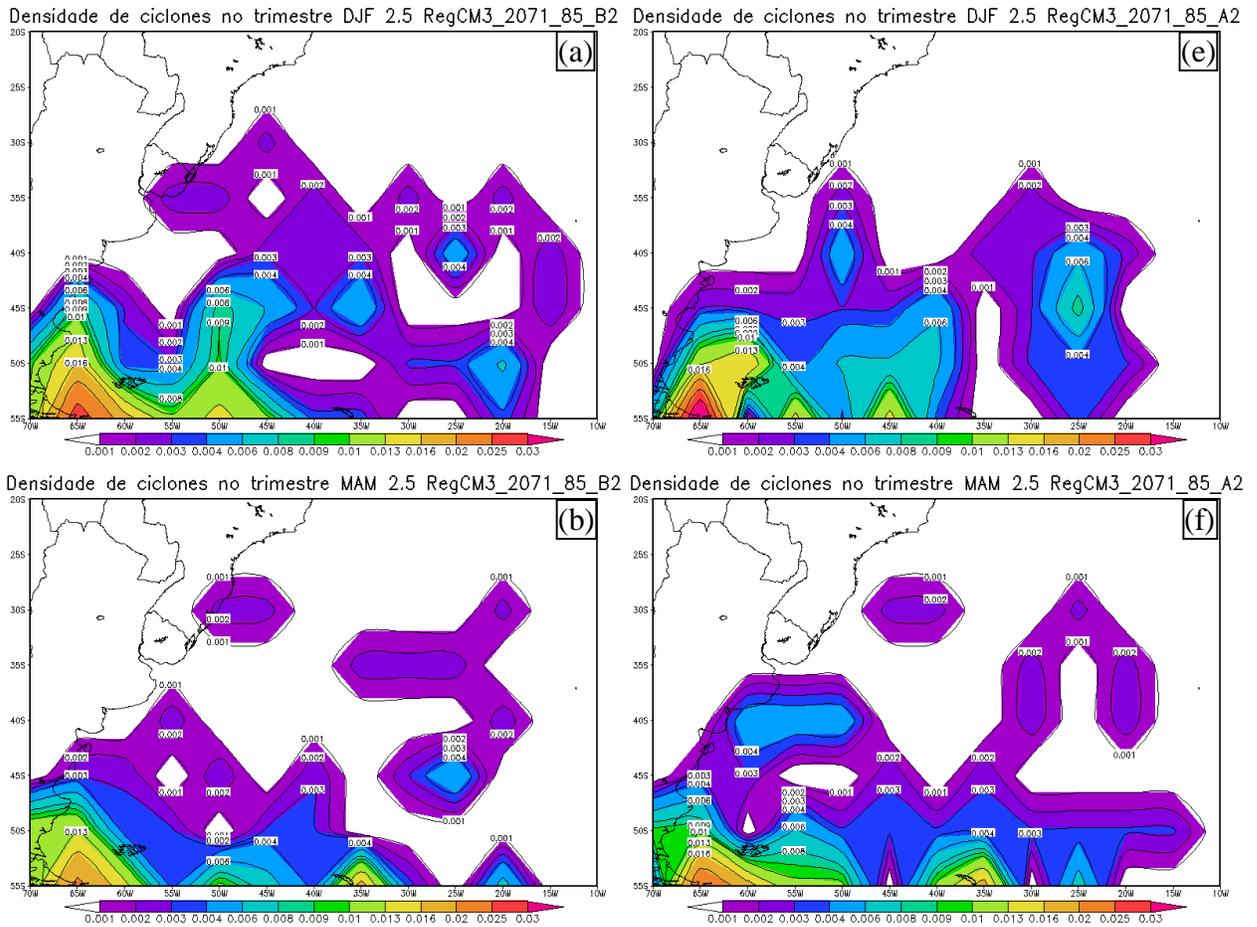


Figura 3.30 – Densidade de ciclones do RegCM3 com  $\zeta_{10} \leq -2,5 \times 10^{-5} s^{-1}$ , para o cenário B2 no período 2071 – 2085, para os trimestres: (a) DJF, (b) MAM, (c) JJA e (d) SON e para o cenário A2 no período 2071 – 2085, para os trimestres: (e) DJF, (f) MAM, (g) JJA e (h) SON.

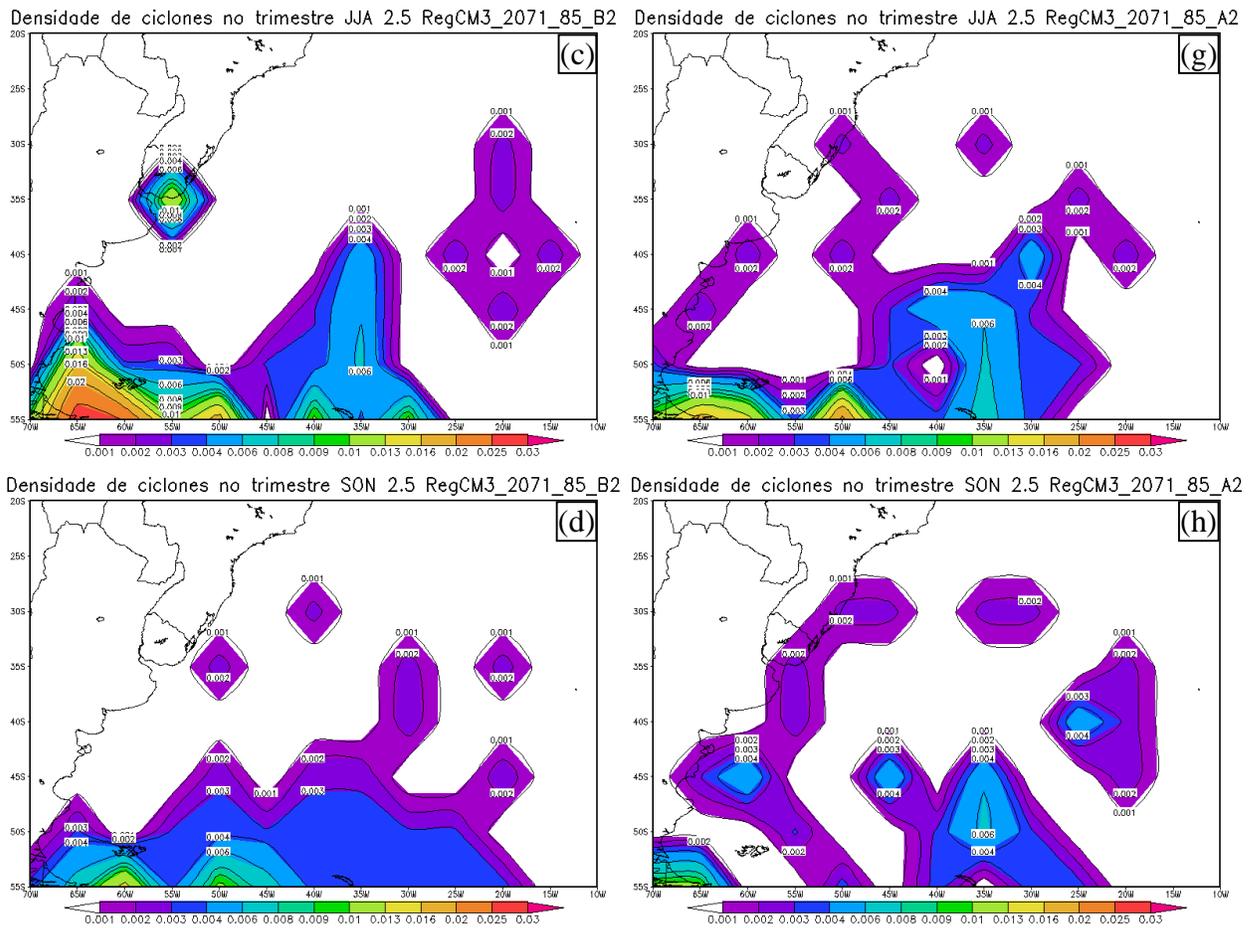


Figura 3.30 (Continuação)

A tabela 3.2 resume as principais características dos ciclones simulados pelo RegCM3 para o clima presente (1975 – 1989) e para os cenários B2 e A2 (2071 – 2085). O RegCM3 nos cenários futuros (B2 e A2 – período 2071 – 2085) comparado ao clima presente (período 1975 – 1989) mostra redução no número de ciclones e em maior percentual para os ciclones inicialmente intensos ( $\zeta_{10} \leq -2,5 \times 10^{-5} \text{s}^{-1}$ ) no cenário A2. Quanto ao tempo de vida, os dois cenários (B2 e A2) apresentam mesma duração que é um pouco inferior à duração do clima presente. Em relação à vorticidade média inicial, o cenário B2 apresenta vorticidade ciclônica semelhante ao clima presente, enquanto no A2 ocorre uma pequena redução. Isto indica que as maiores reduções na

intensidade média inicial dos ciclones ocorrem para maiores concentrações de gases de efeito estufa. Devido às durações e deslocamentos dos ciclones nos cenários B2 e A2 semelhantes ao obtido no clima presente, obteve-se também velocidades médias similares para os cenários futuros e o clima presente.

Tabela 3.2 – Características médias sazonais dos ciclones e desvio padrão sazonal, para o RegCM3 no período 1975 – 1989 e nos cenários B2 e A2 do período 2071 – 2085, para os ciclones com  $\zeta_{10} \leq -1,0 \times 10^{-5} \text{s}^{-1}$  e com  $\zeta_{10} \leq -2,5 \times 10^{-5} \text{s}^{-1}$ .

Médias trimestrais	$\zeta_{10} \leq -1,0 \times 10^{-5} \text{s}^{-1}$			$\zeta_{10} \leq -2,5 \times 10^{-5} \text{s}^{-1}$		
	RegCM3 1975_89	RegCM3 2071_85_B2	RegCM3 2071_85_A2	RegCM3 1975_89	RegCM3 2071_85_B2	RegCM3 2071_85_A2
<b>Ciclones/trimestre</b>	67,3 ± 2,0	64,1 ± 1,2	62,4 ± 2,6	16,7 ± 4,6	14,8 ± 3,8	13,2 ± 3,4
<b>Duração (dias)</b>	2,9 ± 0,1	2,8 ± 0,2	2,8 ± 0,2	2,7 ± 0,2	2,6 ± 0,1	2,6 ± 0,4
<b>Vorticidade (<math>10^{-9} \text{s}^{-1}</math>)</b>	-2,06 ± 0,14	-2,02 ± 0,12	-1,98 ± 0,12	-3,38 ± 0,05	-3,35 ± 0,07	-3,35 ± 0,16
<b>Deslocamento (km)</b>	1943,0 ± 68,5	1908,2 ± 70,9	1900,1 ± 71,2	1949,3 ± 47,6	1993,1 ± 75,7	1922,8 ± 48,5
<b>Velocidade (m/s)</b>	9,3 ± 0,6	9,3 ± 0,6	9,1 ± 0,6	9,7 ± 0,2	10,2 ± 0,4	9,7 ± 0,7

#### 4 CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Este estudo analisou os impactos na climatologia de ciclones do Atlântico Sul para os cenários de mudanças climáticas B2 e A2 (IPCC TAR, 2001), conforme projetado pelo modelo RegCM3 aninhado ao modelo global HadAM3. O período de 1975 – 1989 foi utilizado para caracterizar o clima presente, enquanto para os cenários B2 e A2 utilizou-se o período de 2071 – 2085. Para validar as climatologias do RegCM3, a climatologia de precipitação e de temperatura simuladas no clima presente foram comparadas com análises observacionais. A precipitação simulada foi comparada com as análises do CRU e do CMAP. Já a temperatura do ar com as análises do CRU e NCEP. Posteriormente foram quantificadas as anomalias, calculadas como a diferença entre o período 2071 – 2085 e 1975 – 1989, de precipitação e de temperatura projetadas pelo RegCM3 para os cenários B2 e A2.

Para o clima presente, o RegCM3 embora mais seco que as análises do CRU e do CMAP, simulou a distribuição espacial da chuva média anual e sazonal semelhante ao destas análises. Em cinco regiões analisadas sobre o Brasil (Amazônia – AMZ, Nordeste – NDE, Centro-Oeste – RCO, Sudeste – SDE e Sul – SUL), o RegCM3 subestima a taxa de precipitação, exceto na estação chuvosa da RCO, mas simula o ciclo anual em fase com as análises do CRU e CMAP. Nas regiões ciclogênicas no setor oeste do Oceano Atlântico, próximo à costa leste da América do Sul, o RegCM3 simulou corretamente o padrão do ciclo anual de precipitação da análise CMAP. No entanto, o RegCM3 simula a metade da taxa de precipitação da análise do CMAP no litoral sul/sudeste do Brasil (LBR) e na costa do Uruguai (LUR, exceto no verão) e

simula aproximadamente 30% mais precipitação que o CMAP no litoral Sul da Argentina (LAR).

A simulação de temperatura do ar pelo RegCM3 no clima presente apresentou distribuição espacial mais semelhante com o CRU do que com o NCEP. Porém, em termos de ciclo anual médio em algumas regiões nota-se que a amplitude térmica anual simulada pelo RegCM3 é mais próxima do NCEP do que com o CRU. No entanto, as temperaturas simuladas pelo RegCM3 apresentaram estação quente mais longa e com maiores temperaturas do que ambas análises (CRU e NCEP) na Amazônia. Isto estaria associado à baixa taxa de precipitação nesta área simulada pelo RegCM3 e, então, em uma atmosfera mais seca aumenta a radiação solar absorvida em superfície resultando em temperaturas maiores. Por outro lado, o RegCM3 simulou inverno mais rigoroso no sudeste do Brasil, com temperaturas menores, o que seria explicado pela sub-estimativa de precipitação nesta região. Já neste caso, a atmosfera mais seca simulada pelo RegCM3 permitiria maior perda radiativa por onda longa no período noturno, com conseqüente resfriamento e, então, invernos mais frios.

No período 2071 – 2085, as projeções do RegCM3 foram coerentes com o IPCC AR4 (2007), ou seja, maior aquecimento e maiores alterações na distribuição espacial da precipitação no cenário de maior concentração de gases de efeito estufa (A2). Em escala regional, concordam também com Ambrizzi et al. (2007) ao localizar maior aquecimento e redução na precipitação sobre o continente nas regiões norte e nordeste do Brasil. Os cenários A2 e B2 reduzem a taxa de precipitação simulada pelo RegCM3 para o clima presente nas regiões AMZ, NDE, RCO e SDE. Na região SUL, tanto o cenário A2 como o B2 indicam precipitação de normal a mais úmido do que o clima

presente no verão e outono, respectivamente, e de normal a mais seco no inverno e primavera, respectivamente. Na AMZ, região com maior aquecimento nos cenários futuros, o RegCM3 projetou aumentos de 2,4 a 5°C no cenário B2 e de 3 a 6°C no A2. A redução na taxa de precipitação nesta região atingiu até 1,0 mm/dia nos meses de transição da estação chuvosa para a seca (abril) e da estação seca para a chuvosa (outubro). Na região NDE, segunda região de maior aquecimento no Brasil, o RegCM3 projetou anomalias positivas de temperatura de 1,8 a 3,7°C no cenário B2 e de 2,4 a 4,7°C no A2. Este aumento de temperatura foi acompanhado de redução de 1,0 a 2,0 mm/dia na taxa de precipitação da estação chuvosa para os dois cenários.

As climatologias de ciclogêneses foram obtidas através de um esquema automático de rastreamento de ciclones que adotou limiares de vorticidade ciclônica mínima  $\zeta_{10} \leq -1,0 \times 10^{-5} \text{s}^{-1}$  e de tempo de vida mínimo de 24 horas e máximo de 10 dias. Este rastreamento foi realizado na reanálise do NCEP e HadAM3 no clima presente e no RegCM3, tanto no clima presente como nos cenários B2 e A2.

Para o clima presente (1975 – 1989), as climatologias de ciclones do RegCM3 e HadAM3 foram comparadas com a obtida da reanálise do NCEP. As principais características climatológicas das ciclogêneses na América do sul, tais como, número total de ciclones, intensidade inicial média e duração média, além da localização espacial das regiões ciclogênicas preferenciais do RegCM3 foram mais semelhantes ao NCEP do que as obtidas diretamente do HadAM3.

O NCEP forneceu um total de 3654 ciclones durante os 15 anos de estudo (1975 – 1989), com 51,7% destes correspondendo a ciclones inicialmente intensos ( $\zeta_{10} \leq -2,5 \times 10^{-5} \text{s}^{-1}$ ). No HadAM3 foram identificados 3204 ciclones e apenas 17,7% destes

foram inicialmente intensos. Portanto, em relação ao NCEP o HadAM3 subestimou -12,3% o total de ciclones e em -69,9% os inicialmente intensos. Isto indica grande dificuldade do HadAM3 em simular ciclones inicialmente intensos. Ainda no clima presente, o RegCM3 (aninhado ao HadAM3) simulou um total de 4035 ciclones, sendo 24,8% destes inicialmente intensos, aproximando-se então dos números fornecidos pelo NCEP. Assim, comparado ao NCEP o RegCM3 superestimou em 10,4% o total de ciclones e subestimou os inicialmente intensos em -47,0%.

Em termos de distribuição espacial, núcleos ciclogênicos conhecidos no NCEP e de trabalhos anteriores (Gan, 1992; Sinclair, 1996; Simmonds e Keay, 2000; e Reboita 2008), tais como, costa sul/sudeste do Brasil (LBR) e da costa do Uruguai (LUR) não foram bem definidos no HadAM3. Além disso, o HadAM3 simulou maior densidade de ciclogêneses intensas sobre o Atlântico, no sul do domínio e distante da costa, o que também difere do NCEP. Quando todos os ciclones são considerados, o RegCM3 simula as três regiões ciclogênicas (LBR, LUR e LAR – leste da Argentina) obtidas no NCEP. Porém, como o HadAM3, o RegCM3 apresentou dificuldades na simulação das ciclogêneses intensas, principalmente na costa sul/sudeste do Brasil e do Uruguai.

Em se tratando de mudanças climáticas, o RegCM3 projetou redução na quantidade total de ciclones, intensidade inicial média, deslocamento e velocidade média para os dois cenários de aquecimento. Contudo, as maiores reduções foram projetadas pelo RegCM3 para o cenário A2. Nas projeções do RegCM3, os cenários B2 e A2 indicam reduções respectivas de -4,7% e -7,2% para o total de ciclones. Entretanto, estas reduções atingem -11,3% para o B2 e -20,9% para o A2 quando se consideram apenas os ciclones inicialmente intensos. Este resultado é similar ao obtido

de modelos globais por Zhang e Wang (1997), Sinclair e Watterson (1999), Watterson (2006) e Fyfe (2003) que projetam reduções de 2% (Watterson, 2006) a 30% (Fyfe, 2003) no total de ciclones até 2100. De acordo com Fyfe (2003), a menor quantidade de ciclones nos cenários de aquecimento global é explicada principalmente pelo deslocamento das regiões ciclogênicas para sul, associada ao deslocamento da zona baroclínica nestes cenários.

Sazonalmente, nas projeções do RegCM3 a maior frequência de ciclones inicialmente intensos continua sendo no inverno e outono e nestas estações a intensidade inicial média dos ciclones também é maior. Como no clima presente, nos cenários B2 e A2 no verão os ciclones, tanto o total como os inicialmente mais intensos, continuam sendo menos frequentes. Com relação a tempo de vida, deslocamento e velocidade médios sazonais, os cenários B2 e A2 também apresentam comportamento semelhante ao clima presente, mostrando o inverno (verão) como a estação em que os ciclones apresentam menor (maior) duração, porém maior (menor) deslocamento e velocidade.

A distribuição espacial das áreas de ciclogêneses nos cenários B2 e A2 é semelhante a do clima presente, mas devido à redução no número de ciclones nestes cenários, a intensidade destes máximos tende a ser menor que no presente. Entretanto, os dois cenários (B2 e A2) mostram reduções maiores nas densidades de ciclogêneses intensas, principalmente na faixa ao Norte de 45°S no B2 e ao Norte de 50°S no A2, mas são mantidos alguns padrões do clima presente, como um máximo ciclogênico no sul da Argentina, uma banda ciclogênica no sul do domínio e núcleos fracos e esparsos sobre o Atlântico Sul.

Uma questão não realizada neste trabalho, seria analisar as características médias da atmosfera para encontrar possíveis mudanças na circulação que expliquem a redução nas ciclogêneses encontradas nas projeções do RegCM3. Isto permitiria encontrar justificativas físicas para as diferenças encontradas. Outra sugestão seria identificar os gradientes de TSM nas projeções do HadAM3, contraste térmico terra-mar no leste das regiões costeiras dos continentes, fluxos de calor latente dentre outras variáveis, visto que Zhang e Wang (1997) apontam estes como alguns dos mecanismos responsáveis pela redução dos ciclones nos cenários de mudanças climáticas.

Seria importante também utilizar simulações mais longas e outros modelos regionais e globais (para as fronteiras). Isto permitiria uma maior confiabilidade nas projeções climáticas através da utilização de técnica de previsão por conjunto e obter margens de incertezas nas projeções.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Ambrizzi, T., Rocha, R., Marengo, J., A., I. Pisnitchenko, L Alves, Fernandez, J. P. 2007: Cenários regionalizados para o Brasil para o Século XXI: Projeções de clima utilizando três modelos regionais. Relatório 3. MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE – MMA, SECRETARIA DE BIODIVERSIDADE E FLORESTAS - -SBF, DIRETORIA DE CONSERVAÇÃO DA BIODIVERSIDADE – DCBio Mudanças Climáticas Globais e Efeitos sobre a Biodiversidade – Sub projeto: Caracterização do clima atual e definição das alterações climáticas para o território brasileiro ao longo do Século XXI. Brasília, Fevereiro de 2007.

Anthes, R. A., 1977: A cumulus parameterization scheme utilizing a one-dimensional cloud model, *Mon. Wea. Rev.*, **117**, 1423-1438.

Cusack, S., A. Slingo, J.M. Edwards, and M. Wild, 1998: The radiative impact of a simple aerosol climatology on the Hadley Centre GCM. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.* 124: 2517-2526.

Carvalho, L.M.V et al., 2002: Extreme precipitation events in southeastern South América and large-scale convective patterns in the South Atlantic Convergence Zone. *Journal of Climate*, Boston, v.15, p. 2377-2394.

Dickinson, R., Kennedy, P., Henderson-Sellers, A. and Wilson, M. (1986). Biosphereatmosphere transfer scheme (bats) for the ncar community climate model, Technical report, National Center for Atmospheric Research.

Dickinson, R. E.; R. M. Errico; F. Giorgi; G. T. Bates, 1989: A regional climate model for the western United States. *Climate Change*, **15**, 383-422.

Edwards, J.M. and A. Slingo, 1996: Studies with a flexible new radiation code. I: Choosing a configuration for a large scale model. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.* 122: 689-719.

Emanuel, K. A., 1991: A scheme for representing cumulus convection in large-scale models. *J.Atmos. Sci.*, 48, 2313–2329.

Fritsch, J. M. and Chappell, C. F., 1980: Numerical prediction of convectively driven mesoscale pressure systems. part i: Convective parameterization, *Journal of Atmospheric Sciences*.

Fyfe, J. C., 2003: Extratropical Southern Hemisphere Cyclone: Harbingers of Climate Change? *J. Climate*, **16**, 2802-2805.

Gan, M. A., 1992: Ciclogêneses e Ciclones sobre a América do Sul. Tese de Doutorado em Meteorologia, Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, INPE-5400-TDI/479, 225 p.

Giorgi, F.; L. O. Mearns, 1999: Introduction to special section: regional climate modeling revisited. *J. Geophys. Res.*, **104**, D6, 6335-6352.

Giorgi, F.; M. R. Marinucci; G. T. Bates, 1993 a: Development of a Second-Generation Regional Climate Model (RegCM2). Part I: Boundary-Layer and Radiative Transfer Processes, *Mon. Wea. Rev.*, **121**, 2794-2813.

Giorgi, F.; M. R. Marinucci; G. T. Bates; G. De Canio, 1993 b: Development of a Second Generation Regional Climate Model (RegCM2). Part II: Convective Processes and Assimilation of Lateral Boundary Conditions, *Mon. Wea. Rev.*, **121**, 2814-2832.

Giorgi, F., 1990: Simulation of Regional Climate using a Limited Area Model Nested in a General Circulation Model. *J. Climate*, **3** (9), 941-963.

Gordon, C., C. Cooper, C.A. Senior, H. Banks, J.M. Gregory, T.C. Johns, J.F.B. Mitchell and R.A. Wood, 2000: The simulation of SST, sea ice extents and ocean heat transports in a version of the Hadley Centre coupled model without flux adjustments. *Climate Dynamics* **16**: 147-168.

Grell, G. A., 1993: Prognostic Evaluation of Assumptions used by Cumulus Parameterizations, *Mon. Wea. Rev.*, **121**, 764-787.

Grell, G. A., Dudhia, J. and Staufer, D. R., 1994: A description of the 3rd-generation penn state/ncar mesoscale model (mm5), Technical report, National Center for Atmospheric Research.

Intergovernmental Panel on Climate Change – IPCC, 2001: Climate Change 2001: The Scientific Basis IPCC WG. Cambridge Univ. Press, 881pp.

Intergovernmental Panel on Climate Change – IPCC, 2007: Climate Change 2007: The Scientific Basis, IPCC, Geneva.

Johns, T.C., J.M. Gregory, W.J. Ingram, C.E. Johnson, A. Jones, J.F.B. Mitchell, D.L. Roberts, D.M.H. Sexton, D.S. Stevenson, S.F.B. Tett, M.J. Woodage, 2001: Anthropogenic climate change for 1860 to 2100 simulated with the HadCM3 model under updated emission scenarios. Hadley Centre Technical Note No. 22, 62p.

Kodama, Y. M., 1992: Large-scale common features of subtropical precipitation zones (the Baiu frontal zone, the SPCZ, and the SACZ), Part I: Characteristics of subtropical frontal zones. *J. Meteor. Soc. Japan*, **70**, 813–835.

Kalnay, E., e Co-autores, 1996: The NCEP/NCAR 40-Year Reanalysis Project. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, **77**, 437–471.

Kanamitsu, M.; W. Ebisuzaki; J. Woollen; S. –K. Yang; J. J. Hnilo; M. Fiorino; G. L. Potter, 2002: NCEP-DOE AMIP-II Reanalysis (R-2). *Bull. Am. Met. Soc.*, **83**, 1631-1643.

Kiehl, J. T.; J. J. Hack; G. B. Bonan; B. A. Boville; B. P. Briegleb; D. L. Williamson; P. J. Rasch, 1996: Description of the NCAR Community Climate Model (CCM3), *Tech. Rep. TN-420+STR*, NCAR, Boulder, Colorado, pp. 152.

Kousky, V., 1980. Diurnal rainfall variation in Northeast Brazil, *Mon. Wea. Rev.*, 108, 488-498, 1980.

Lambert SJ, Fyfe JC, 2006: Changes in winter cyclone frequencies and strengths simulated in enhanced greenhouse warming experiments: results from the models participating in the IPCC diagnostic exercise. *Clim Dyn* 26:713.

Lionello, P; U. Boldrin; F. Giorgi, 2007: Future changes in cyclone climatology over Europe as inferred from a regional climate simulation. *Clim. Dyn.*, DOI 10.1007/s00382-007-0315-0.

Loveland, T. R.; Reed, B. C.; Brown J. F.; Ohlen. D. O.; Zhu, J.; Yang, L.; Merchant, J. W., 2000: Development of a global land cover characteristics database and IGBP DISCOVER from 1-km AVHRR Data. *International Journal of Remote Sensing*, 21, 1303-1330.

Machado, R., D., 2008: Avaliação de previsões climáticas sazonais sobre o Brasil e a dependência na parametrização de convecção. Dissertação de Mestrado em Meteorologia, IAG/USP, 122 p.

Murray, R. J., and I. Simmonds, 1991a: A numerical scheme for tracking cyclone centers from digital data. Part I: Development and operation of the scheme. *Aust. Meteor. Mag.*, **39**, 155-166.

Murray, R. J., and I. Simmonds, 1991b: A numerical scheme for tracking cyclone centers from digital data. Part II: Application to January and July general circulation model simulations. *Aust. Meteor. Mag.*, **39**, 167-180.

Necco, G. V., 1982a: Comportamiento de Vortices Ciclonicos En El Area Sudamerica Durante El FGGE: Ciclogenesis. *Meteorologica*, **13** (1), 7-19.

Necco, G. V., 1982b: Comportamiento de Vortices Ciclonicos En El Area Sudamerica Durante El FGGE: Trayectorias y Desarrollos. *Meteorologica*, **13** (1), 21-34.

Pal, J. S., E. E. Small, and E. A. B. Eltahir, 2000: Simulation of regional-scale water and energy budgets: Representation of subgrid cloud and precipitation processes within RegCM. *J. Geophys. Res.*, 105 (D24), 29579-29594.

Pal, J.S. ; Giorgi, F. ; Bi, X. ; Elguindi, N. ; Solmon, F. ; Gao, X. ; Rauscher, S.; Francisco, R. ; Zakey, A. ; Winter, J ; Ashfaq, M. ; Syed, F. ; Bell, J.I. ; Diffenbaugh, N.s.; Rocha, R. P. da . Regional Climate Modeling for the Developing World: The ICTP RegCM3 and RegCNET. *Bulletin of the American Meteorological Society*, v. 88, p. 1395-1409, 2007.

- Pope, V. D., M. L. Gallani, P. R. Rowntree and R. A. Stratton, 2000: The impact of new physical parametrizations in the Hadley Centre climate model -- HadAM3. *Climate Dynamics*, 16: 123-146.
- PRECIS 2002: PRECIS-Providing Regional Climates for Impacts Studies. The Hadley Centre Regional Climate Modelling system. Hadley Centre, Exeter, UK. 29 p.
- Quadro, M. F. L. de, 1994: Estudo de Episódios de Zona de Convergência do Atlântico Sul (Zcas) sobre a América do Sul. Dissertação de Mestrado, São José dos Campos, INPE, 124 p.
- Reboita, M. S., 2008: Ciclones Extratropicais sobre o Atlântico Sul: Simulação Climática e Experimentos de Sensibilidade. Tese de Doutorado em Meteorologia, IAG/USP, 359 p.
- Reynolds, R. W.; N. A. Rayner; T. M. Smith; D. C. Stokes; W. Wang, 2002: An improved in situ and satellite SST analysis for climate. *J. Climate*, **15**, 1609-1625.
- Simmonds, I., and K. Keay, 2000: Mean Southern Hemisphere Extratropical Cyclone Behavior in the 40-Year NCEP–NCAR Reanalysis. , **13**, 873–885.
- Sinclair, M. R.; I. G. Watterson, 1999: Objective Assessment of Extratropical Weather Systems in Simulated Climates. *J. Climate*, **12**, 3467-3485.
- Sinclair, M. R., 1994: An Objective Cyclone Climatology for the Southern Hemisphere. *Monthly Weather Review*, **122**, 2239-2256.
- Sinclair, M. R., 1995: A climatology of cyclogenesis for the Southern Hemisphere. *Monthly Weather Review*, **123**, 1601-1619.
- Sinclair, M. R., 1996: Reply. *Monthly Weather Review*, **124**, 2615-2618.
- Sugahara, S., 2000: Variação Anual da Frequência de Ciclones no Atlântico Sul. In: XI Congresso Brasileiro de Meteorologia, Rio de Janeiro, RJ, 16 a 20 de outubro de 2000.
- Taljaard, J. J., 1967: Development, distribution and movement of cyclones and anticyclones in the Southern Hemisphere during IGY. *J. Appl. Meteor.*, **6**, 973-987.
- Watterson, I. G., 2006: The intensity of precipitation during extratropical cyclones in global warming simulations: a link of cyclone intensity? *Tellus*, **58A**, 82-97.
- Zhang, Y., and W.-C. Wang, 1997: Model-simulated northern winter cyclone and anticyclone activity under a greenhouse warming scenario. *J. Climate*, **10**, 1616–1634.

# Livros Grátis

( <http://www.livrosgratis.com.br> )

Milhares de Livros para Download:

[Baixar livros de Administração](#)

[Baixar livros de Agronomia](#)

[Baixar livros de Arquitetura](#)

[Baixar livros de Artes](#)

[Baixar livros de Astronomia](#)

[Baixar livros de Biologia Geral](#)

[Baixar livros de Ciência da Computação](#)

[Baixar livros de Ciência da Informação](#)

[Baixar livros de Ciência Política](#)

[Baixar livros de Ciências da Saúde](#)

[Baixar livros de Comunicação](#)

[Baixar livros do Conselho Nacional de Educação - CNE](#)

[Baixar livros de Defesa civil](#)

[Baixar livros de Direito](#)

[Baixar livros de Direitos humanos](#)

[Baixar livros de Economia](#)

[Baixar livros de Economia Doméstica](#)

[Baixar livros de Educação](#)

[Baixar livros de Educação - Trânsito](#)

[Baixar livros de Educação Física](#)

[Baixar livros de Engenharia Aeroespacial](#)

[Baixar livros de Farmácia](#)

[Baixar livros de Filosofia](#)

[Baixar livros de Física](#)

[Baixar livros de Geociências](#)

[Baixar livros de Geografia](#)

[Baixar livros de História](#)

[Baixar livros de Línguas](#)

[Baixar livros de Literatura](#)  
[Baixar livros de Literatura de Cordel](#)  
[Baixar livros de Literatura Infantil](#)  
[Baixar livros de Matemática](#)  
[Baixar livros de Medicina](#)  
[Baixar livros de Medicina Veterinária](#)  
[Baixar livros de Meio Ambiente](#)  
[Baixar livros de Meteorologia](#)  
[Baixar Monografias e TCC](#)  
[Baixar livros Multidisciplinar](#)  
[Baixar livros de Música](#)  
[Baixar livros de Psicologia](#)  
[Baixar livros de Química](#)  
[Baixar livros de Saúde Coletiva](#)  
[Baixar livros de Serviço Social](#)  
[Baixar livros de Sociologia](#)  
[Baixar livros de Teologia](#)  
[Baixar livros de Trabalho](#)  
[Baixar livros de Turismo](#)