



Universidade Federal do Rio de Janeiro

Centro de Ciências Matemáticas e da Natureza

Instituto de Geociências

Departamento de Meteorologia

**TENDÊNCIAS OBSERVADAS E PROJEÇÕES FUTURAS DE
EXTREMOS CLIMÁTICOS NA CIDADE DO RIO DE JANEIRO**

Wanderson Luiz Silva

Orientadora: D. Sc. Claudine Pereira Dereczynski

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

Rio de Janeiro, RJ

Janeiro, 2012

TENDÊNCIAS OBSERVADAS E PROJEÇÕES FUTURAS DE
EXTREMOS CLIMÁTICOS NA CIDADE DO RIO DE JANEIRO

Wanderson Luiz Silva

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

Aprovada por:

Prof.^a D. Sc. Claudine Pereira Dereczynski

Prof.^a D. Sc. Maria Gertrudes Alvarez Justi da Silva

Prof.^a D. Sc. Sin Chan Chou

Rio de Janeiro, RJ

Janeiro, 2012

TENDÊNCIAS OBSERVADAS E PROJEÇÕES FUTURAS DE
EXTREMOS CLIMÁTICOS NA CIDADE DO RIO DE JANEIRO

LUIZ SILVA, WANDERSON

Tendências Observadas e Projeções
Futuras de Extremos Climáticos na

Cidade do Rio de Janeiro

[Rio de Janeiro], 2012

85 p., 29,7 cm (UFRJ, 2012)

Monografia – Universidade Federal do Rio
de Janeiro, Departamento de Meteorologia

1. Extremos Climáticos
2. Modelo Eta
3. Mudanças Climáticas
4. Projeções Futuras
5. Rio de Janeiro

*“Não existe um caminho para a felicidade.
A felicidade é o caminho.
Ser feliz sem motivo é a mais autêntica forma de felicidade.”*
(Carlos Drummond de Andrade)

AGRADECIMENTOS

Primeiramente, agradeço a Deus pela graça de viver e desfrutar de todos os momentos de alegria, tristeza, oportunidades e dificuldades que a vida me impõe. Sem dúvida, o amparo divino move as mais puras energias para a expansão da minha fé e de minha sabedoria.

A toda minha família pelo amor, carinho, cuidado e palavras de incentivo que me fizeram sustentar a vontade de alcançar tudo o que já alcancei. Agradeço, especialmente, à minha mãe, Rose, pelo seu resplandecente apoio, desde sua afetuosa atenção até sua deliciosa comida. Agradeço também ao meu pai, Wagner, por seu grande espírito estimulador e também pelo auxílio financeiro. À minha avó, Zilda, pela ternura de sua companhia e também pelas roupas lavadas e passadas. À minha irmã, Cynthia, pelos cômicos instantes que sempre me revigoram. E agradeço igualmente aos demais familiares pela presença e pela influência direta ou indireta no desenvolvimento de minha vida.

Agradeço à minha super orientadora Claudine que me ajuda a trilhar minha vida acadêmica e científica desde 2009, se mostrando sempre muito atenciosa, empolgada, responsável e trabalhadora. Obrigado por me ensinar a ser pesquisador e pelas guloseimas.

Ao Armando Tavares (INMET), a Chou Sin Chan (CPTEC), a María Valverde (INPE) e ao Igor Balteiro (UFRJ), pelo auxílio e colaboração a alguns elementos que constituem a essência da minha pesquisa de iniciação científica.

Agradeço a todos os professores do Departamento de Meteorologia da UFRJ pela contribuição aos conhecimentos adquiridos durante minha formação acadêmica. Um obrigado muito especial para os(as) professores(as) Claudine, Justi e Isimar que, além de Mestres, também são meus amigos.

Aos meus hiper amigos da faculdade, Fabricio, Fabio, Bia, Suzanna, Karina, Ian e Thábata, com os quais compartilho momentos de muito estudo, diversão, desespero, vitória e nervosismo. Aos meus grandes amigos, Mariana, Leandro, Taciane, Edinho e Fabíola que me acompanham a muito tempo em todos os setores de minha vida. Aos meus companheiros de trabalho em Furnas, Dani, Marcelo e Angela que ampliam meu horizonte de “sapiência meteorológica” e me concedem conselhos construtivos, e igualmente, claro, aos meus amigos de estágio, Juliana e Luiz Felipe, com os quais amplifiquei laços fraternos de amizade. Um obrigado especial também aos veteranos e calouros mais próximos de mim.

Agradeço ainda a todos que fazem parte, de alguma maneira, da minha vida. Tenho certeza que cada um coopera do modo que Deus julga melhor e necessário para minha evolução vital.

RESUMO

TENDÊNCIAS OBSERVADAS E PROJEÇÕES FUTURAS DE EXTREMOS CLIMÁTICOS NA CIDADE DO RIO DE JANEIRO

Wanderson Luiz Silva

Janeiro/2012

Um estudo sobre detecção e projeções futuras de mudanças climáticas na cidade do Rio de Janeiro é elaborado através da análise de indicadores de extremos climáticos de precipitação e temperaturas mínima e máxima. O objetivo é apoiar trabalhos sobre impactos, vulnerabilidade e adaptação às alterações climáticas no município. Dados observacionais diários de precipitação e temperatura de duas estações meteorológicas do INMET (Alto da Boa Vista e Santa Cruz) e as saídas das simulações dos quatro membros do modelo climático regional Eta do CPTEC/INPE aninhado ao modelo global HadCM3 do *Hadley Centre* são utilizados. O modelo Eta-HadCM3 utiliza para o clima presente (1961-1990) CO₂ igual a 330 ppm e para o futuro (2011-2100) cenário SRES-A1B de emissões. As tendências presentes e as projeções futuras foram avaliadas utilizando-se o software RCLimDex (Serviço Meteorológico Canadense) e também foram submetidas a testes estatísticos. Os resultados indicam que os totais pluviométricos anuais têm se elevado e que os eventos de chuvas moderadas a fortes têm se tornado mais frequentes nos últimos anos. Para o futuro projeta-se um aumento expressivo tanto na frequência de ocorrência quanto na quantidade de chuvas associada a tais eventos extremos, além de períodos secos mais longos e períodos úmidos mais curtos. Com relação à temperatura, nota-se tendência de aquecimento, com valores mais significativos para os índices baseados na temperatura máxima. As médias anuais das temperaturas máximas (mínimas) podem ficar entre 2 e 6°C (2 e 5°C) acima dos valores do clima presente, no final do século XXI. Os dias e noites quentes (frios) estão se tornando mais (menos) frequentes a cada ano e para o futuro (2100) projeta-se que cerca de 40 a 80% dos dias e entre 60 e 90% das noites no ano serão quentes, além de praticamente não ocorrerem mais dias e noites frios na cidade do Rio de Janeiro.

ABSTRACT

OBSERVED TRENDS AND FUTURE PROJECTIONS OF CLIMATIC EXTREMES IN RIO DE JANEIRO CITY

A detection and future projections of climate change study in Rio de Janeiro city is developed through the analysis of indicators of extreme climatic events, based on daily maximum and minimum series as well as daily totals of precipitation. The goal of this work is to support employments on impacts, vulnerability and adaptation to climate change in the city. Observational data from two meteorological stations (Alto da Boa Vista and Santa Cruz) and 4-members simulations from Eta-HadCM3 regional model are used. The model uses for the present climate (1961-1990) CO₂ equal to 330 ppm and for the future (2011-2100) SRES-A1B emissions scenario. The results indicate that annual rainfall totals have been rising and that the events of moderate to heavy rains have become more frequent in recent years. For the future it is projected a significant increase in both frequency of occurrence and the amount of rainfall associated with such extreme events, besides of longer dry periods and shorter wet periods. With respect to temperature, there is a warming trend, with more meaningful values for the indices based on maximum temperature. The average annual maximum (minimum) temperature can be between 2 and 6°C (2 and 5°C) above the values of the present climate at the end of the 21st century. The warm (cold) days and nights are becoming more (less) frequent each year and for the future (2100) it is projected that about 40 to 80% of the days and between 60 and 90% of nights in the year will be warm, and practically it will not occur any more cold days and nights in Rio de Janeiro city.

ÍNDICE TEMÁTICO

1. INTRODUÇÃO	1
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	3
2.1 Detecção de Mudanças Climáticas no Clima Presente (Século XX)	3
2.2 Projeções de Mudanças Climáticas Futuras (Século XXI)	12
3. O CLIMA NO MUNICÍPIO DO RIO DE JANEIRO	24
4. METODOLOGIA E DADOS	27
4.1 Dados Observacionais do INMET	27
4.2 Modelo Climático Regional Eta-HadCM3	29
4.2.1 Ensemble do Modelo Global HadCM3 (Hadley Centre)	29
4.2.2 Modelo Regional Eta (CPTEC)	30
4.2.3 Integração do Modelo Climático Regional Eta-HadCM3	32
4.2.4 Dados do Modelo Eta-HadCM3	33
4.3 Software RClimDex	34
4.3.1 Análises das Séries de Indicadores Climáticos geradas pelo RClimdex ...	38

4.4 Testes Estatísticos	39
5. RESULTADOS	41
5.1 Clima Presente (1961 – 1990)	41
5.1.1 Precipitação	41
5.1.2 Temperatura Mínima	49
5.1.3 Temperatura Máxima	54
5.2 Clima Futuro (2011 – 2100)	61
5.2.1 Precipitação	61
5.2.2 Temperatura Mínima	64
5.2.3 Temperatura Máxima	68
6. CONCLUSÕES	74
7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	76

ÍNDICE DE FIGURAS

- Figura 2.1:* Tendências nos índices baseados nas temperaturas mínimas diárias no período de 1960 a 2000. Triângulos para cima (para baixo) indicam tendências positivas (negativas). Triângulos hachurados correspondem às tendências significativas ao nível de 5%. O tamanho dos triângulos é proporcional à magnitude da tendência de (a) noites frias e (b) noites quentes (Fonte: adaptado de Vincent *et al.*, 2005). **6**
- Figura 2.2:* Tendências no índice de precipitação PRCPTOT (total pluviométrico anual). Uma elevação (redução) é representada por uma cruz (um círculo). Símbolos em negrito indicam tendências significativas ao nível de 5% (Fonte: adaptado de Haylock *et al.*, 2006). **7**
- Figura 2.3:* Tendências (em dias por década, mostradas em mapas) e anomalias anuais relativas aos valores médios de 1961-1990 (mostradas em gráficos) para séries anuais de índices de percentis de temperatura para 1951-2003 para (a) noites frias, (b) noites quentes, (c) dias frios e (d) dias quentes. As tendências foram calculadas somente para os pontos com dados suficientes (no mínimo 40 anos de dados durante o período, sendo que o último ano da série não fosse anterior a 1999). As linhas pretas nos mapas englobam regiões onde as tendências são significativas ao nível de 5%. A linha laranja nos gráficos são as tendências não lineares obtidas por suavização utilizando-se um filtro binomial de 21 termos (Fonte: Alexander *et al.*, 2006). **8**
- Figura 2.4:* Tendências observadas em índices de extremos climáticos para 1960-2000. A linha preta delimita as áreas onde as tendências são estatisticamente significativas ao nível de 5%. (Fonte: Marengo *et al.*, 2010). **9**
- Figura 2.5:* Tendência de: (a) precipitação total (1951-2000), em mm/década e (b) temperatura mínima (1961-2000), em °C/década. Círculos com contornos grossos indicam significância estatística do teste de Mann-Kendall ao nível de 5% (Fonte: Obregón e Marengo, 2007). **10**
- Figura 2.6:* Eventos de chuvas intensas por décadas em São Paulo no período de 1933 a 2009 (Fonte: Nobre *et al.* 2010 – Estação Meteorológica do IAG/USP; análise de Júlia Reid, INPE). **11**

- Figura 2.7:* Temperaturas médias anuais e respectivas tendências para a cidade do Rio de Janeiro (estação climatológica principal do INMET) e de São Paulo (estação do IAG/USP) (Fonte: Sansigolo *et al.*, 1992). **12**
- Figura 2.8:* Mudanças projetadas pelo modelo regional MM5 para o período 2081-2090 em relação ao período 1981-1990 nas temperaturas médias (°C) de (a, b) verão, de (c, d) inverno e (e, f) anual para os cenários SRES-A2 (coluna à esquerda) e SRES-B2 (coluna à direita) (Fonte: Nuñez *et al.*, 2008). **18**
- Figura 2.9:* Mudanças projetadas pelo modelo regional MM5 para o período 2081-2090 em relação ao período 1981-1990 na precipitação média de (a, b) verão (mm/dia), de (c, d) inverno (mm/dia) e (e, f) anual (mm) para os cenários SRES-A2 (coluna à esquerda) e SRES-B2 (coluna à direita) (Fonte: Nuñez *et al.*, 2008). **19**
- Figura 2.10:* Anomalias de (a, b) precipitação média anual (%) e de (c, d) temperatura média anual (°C) projetadas pelos modelos climáticos regionais HadRM3P (à esquerda) e RegCM3 (à direita), para o período 2071-2100 com relação ao período 1961-1990, no cenário pessimista de emissões A2. As regiões em destaque indicam a RMSP e a RMRJ (Fonte: Torres *et al.*, 2009). **20**
- Figura 2.11:* Padrões projetados de mudanças futuras na precipitação (%) em relação às simulações do clima presente (1961-1990) no verão (acima) e no inverno (abaixo) (Fonte: Marengo *et al.*, 2011). **22**
- Figura 2.12:* Anomalia dos índices RX1day e RX5day corrigidos para o período 2011-2040, nas localidades da região em estudo (Fonte: Valverde *et al.*, 2009). **23**
- Figura 3.1:* Mapa da cidade do Rio de Janeiro, com a localização dos maciços e bairros das Zonas Norte, Sul e Oeste e Centro. **24**
- Figura 3.2:* Ciclo anual das temperaturas máxima e mínima nas estações meteorológicas do Alto da Boa Vista (1967-2007) e de Santa Cruz (1964-2009). **25**
- Figura 3.3:* Distribuição da precipitação total anual média no período de 1997 a 2006, elaborado a partir dos dados de 30 postos pluviométricos da Fundação Geo-Rio (Fonte: adaptado de Dereczynski *et al.*, 2009). **26**
- Figura 4.1:* Fotos das estações meteorológicas (a) do Alto da Boa Vista e (b) de Santa Cruz (Fonte: INMET). **29**

<i>Figura 4.2:</i>	Pontos de grade do modelo Eta-HadCM3 sobre o Estado do Rio de Janeiro. O quadrado representa a capital fluminense e o círculo vermelho envolve o ponto utilizado neste trabalho.	33
<i>Figura 4.3:</i>	Mapa da Cidade do Rio de Janeiro com a localização das estações meteorológicas do INMET (Alto da Boa Vista e Santa Cruz) e do ponto de grade do modelo Eta-HadCM3.	34
<i>Figura 4.4:</i>	Interface do software RCLimDex.	35
<i>Figura 5.1:</i>	Gráfico de tendências observadas no indicador de extremo climático de precipitação PRCPTOT (precipitação anual total) para as estações do INMET e <i>ensemble</i> do modelo Eta-HadCM3, referentes à cidade do Rio de Janeiro.	42
<i>Figura 5.2:</i>	Gráfico de tendências observadas no índice de extremo climático de precipitação R30mm para as estações do INMET e <i>ensemble</i> do modelo Eta-HadCM3, referentes ao município do Rio de Janeiro.	43
<i>Figura 5.3:</i>	Gráficos de tendências observadas nos indicadores de extremos climáticos de precipitação (a) R95p (chuvas fortes) e (b) R99p (chuvas intensas) para as estações do INMET e <i>ensemble</i> do modelo Eta-HadCM3, referentes à cidade do Rio de Janeiro.	44
<i>Figura 5.4:</i>	Gráficos de tendências observadas nos índices de extremos climáticos de precipitação (a) RX1day (chuvas extremas) e (b) RX5day (chuvas severas) para as estações do INMET e <i>ensemble</i> do modelo Eta-HadCM3, referentes ao município do Rio de Janeiro.	45
<i>Figura 5.5:</i>	Gráfico de tendências observadas no indicador de extremo climático de precipitação SDII para as estações do INMET e <i>ensemble</i> do modelo Eta-HadCM3, referentes à cidade do Rio de Janeiro.	46
<i>Figura 5.6:</i>	Gráficos de tendências observadas nos índices de extremos climáticos de precipitação (a) CDD (períodos secos) e (b) CWD (períodos úmidos) para as estações do INMET e <i>ensemble</i> do modelo Eta-HadCM3, referentes ao município do Rio de Janeiro.	47
<i>Figura 5.7:</i>	Gráfico de tendências observadas no indicador TMINmean para as estações do INMET e <i>ensemble</i> do modelo Eta-HadCM3, referentes à cidade do Rio de Janeiro.	49

- Figura 5.8:* Gráficos de tendências observadas nos índices de extremos climáticos de temperatura mínima (a) TN10p (noites frias) e (b) TN90p (noites quentes) para as estações do INMET e *ensemble* do modelo Eta-HadCM3, referentes ao município do Rio de Janeiro. **50**
- Figura 5.9:* Gráficos de tendências observadas no indicador CSDI (ondas de frio) para as estações do INMET e *ensemble* do modelo Eta-HadCM3, referentes à cidade do Rio de Janeiro. **51**
- Figura 5.10:* Gráficos de tendências observadas nos índices de extremos climáticos de temperatura mínima (a) TNn e (b) TNx para as estações do INMET e *ensemble* do modelo Eta-HadCM3, referentes ao município do Rio de Janeiro. **52**
- Figura 5.11:* Gráfico de tendências observadas no indicador de extremo climático de temperatura mínima TR20 para as estações do INMET e *ensemble* do modelo Eta-HadCM3, referentes à cidade do Rio de Janeiro. **54**
- Figura 5.12:* Gráfico de tendências observadas no índice de extremo climático de temperatura máxima TMAXmean para as estações do INMET e *ensemble* do modelo Eta-HadCM3, referentes ao município do Rio de Janeiro. **55**
- Figura 5.13:* Gráficos de tendências observadas nos indicadores de extremos climáticos de temperatura máxima (a) TX10p (dias frios) e (b) TX90p (dias quentes) para as estações do INMET e *ensemble* do modelo Eta-HadCM3, referentes à cidade do Rio de Janeiro. **56**
- Figura 5.14:* Gráfico de tendências observadas no índice de extremo climático de temperatura máxima WSDI (ondas de calor) para as estações do INMET e *ensemble* do modelo Eta-HadCM3, referentes ao município do Rio de Janeiro. **57**
- Figura 5.15:* Gráficos de tendências observadas nos indicadores de extremos climáticos de temperatura máxima (a) TXn e (b) TXx para as estações do INMET e *ensemble* do modelo Eta-HadCM3, referentes à cidade do Rio de Janeiro. **58**
- Figura 5.16:* Gráfico de tendências observadas no índice de extremo climático de temperatura máxima SU25 para as estações do INMET e *ensemble* do modelo Eta-HadCM3, referentes ao município do Rio de Janeiro. **59**

- Figura 5.17:* Gráfico de tendências observadas no indicador de extremo climático de temperatura DTR (amplitude térmica) para as estações do INMET e *ensemble* do modelo Eta-HadCM3, referentes à cidade do Rio de Janeiro. **60**
- Figura 5.18:* Gráficos de projeções futuras para os índices de extremos climáticos de precipitação (a) PRCPTOT (precipitação anual total), (b) R30mm, (c) R95p (chuvas fortes) e (d) RX1day (chuvas extremas), conforme o *ensemble* do modelo Eta-HadCM3, referentes ao município do Rio de Janeiro. **62**
- Figura 5.19:* Gráfico de tendências observadas no indicador de extremo climático de precipitação CDD (períodos secos), conforme o *ensemble* do modelo Eta-HadCM3, referentes à cidade do Rio de Janeiro. **64**
- Figura 5.20:* Gráfico de projeções futuras para o índice de extremo climático de temperatura mínima (a) TMINmean, conforme os quatro membros do modelo Eta-HadCM3 e (b) anomalias do indicador em relação ao período de 1961-1990, referentes ao município do Rio de Janeiro. **65**
- Figura 5.21:* Gráficos de projeções futuras para os índices de extremos climáticos de temperatura mínima (a) TN10p (noites frias) e (b) TN90p (noites quentes), conforme os quatro membros do modelo Eta-HadCM3, referentes à cidade do Rio de Janeiro. **66**
- Figura 5.22:* Gráficos de projeções futuras para os indicadores de extremos climáticos de temperatura mínima (a) TNx e (b) TR20, conforme os quatro membros do modelo Eta-HadCM3, referentes ao município do Rio de Janeiro. **67**
- Figura 5.23:* Tendências e projeções futuras para o índice de extremo climático de temperatura mínima TR20 na RMRJ, segundo o membro controle do modelo Eta-HadCM3. O número no centro de cada quadrado equivale ao valor do índice para o respectivo ponto de grade do modelo (Análise: *María Valverde*, INPE). **68**
- Figura 5.24:* Gráfico de projeções futuras para o indicador de extremo climático de temperatura máxima (a) TMAXmean, conforme os quatro membros do modelo Eta-HadCM3 e (b) anomalias do índice em relação ao período de 1961-1990, referentes à cidade do Rio de Janeiro. **69**

- Figura 5.25:* Gráficos de projeções futuras para os indicadores de extremos climáticos de temperatura máxima (a) TX10p (dias frios) e (b) TX90p (dias quentes), conforme os quatro membros do modelo Eta-HadCM3, referentes ao município do Rio de Janeiro. **70**
- Figura 5.26:* Gráfico de projeções futuras para o índice de extremo climático de temperatura máxima WSDI (ondas de calor), conforme os quatro membros do modelo Eta-HadCM3, referentes à cidade do Rio de Janeiro. **71**
- Figura 5.27:* Gráficos de projeções futuras para os indicadores de extremos climáticos de temperatura máxima (a) TXx e (b) SU25, conforme os quatro membros do modelo Eta-HadCM3, referentes ao município do Rio de Janeiro **72**
- Figura 5.28:* Tendências e projeções futuras para o índice de extremo climático de temperatura máxima SU25 na RMRJ, segundo o membro controle do modelo Eta-HadCM3. O número no centro de cada quadrado equivale ao valor do indicador para o respectivo ponto de grade do modelo (Análise: *María Valverde*, INPE). **73**

ÍNDICE DE TABELAS

<i>Tabela 4.1:</i>	Informações sobre as estações meteorológicas do INMET utilizadas no estudo.	27
<i>Tabela 4.2:</i>	Número de dias ao ano com falhas nos dados de totais pluviométricos diários e temperaturas máximas e mínimas nas estações meteorológicas do Alto da Boa Vista e de Santa Cruz, do INMET.	28
<i>Tabela 4.3:</i>	Índices de extremos climáticos de precipitação calculados e analisados neste trabalho.	37
<i>Tabela 4.4:</i>	Índices de extremos climáticos de temperatura mínima calculados e analisados neste estudo.	37
<i>Tabela 4.5:</i>	Índices de extremos climáticos de temperatura máxima calculados e analisados neste trabalho.	38
<i>Tabela 5.1:</i>	Valores referentes aos percentis 95 e 99 associados aos totais pluviométricos diários das estações do Alto da Boa Vista e de Santa Cruz e do modelo Eta-HadCM3 no período climatológico de 1961-1990.	44
<i>Tabela 5.2:</i>	Magnitudes dos indicadores de extremos climáticos relacionados à precipitação nas estações meteorológicas do Alto da Boa Vista e de Santa Cruz e no modelo Eta-HadCM3. Os valores em negrito são considerados estatisticamente significativos ao nível de confiança de 5%.	48
<i>Tabela 5.3:</i>	Valores referentes aos percentis 10 e 90 associados aos dados diários de temperatura mínima das estações do Alto da Boa Vista e de Santa Cruz e do modelo Eta-HadCM3 no período climatológico de 1961-1990.	50
<i>Tabela 5.4:</i>	Magnitudes dos indicadores de extremos climáticos relacionados à temperatura mínima nas estações meteorológicas do Alto da Boa Vista e de Santa Cruz e no modelo Eta-HadCM3. Os valores em negrito são considerados estatisticamente significativos ao nível de confiança de 5%.	54
<i>Tabela 5.5:</i>	Valores referentes aos percentis 10 e 90 associados aos dados diários de temperatura máxima das estações do Alto da Boa Vista e de Santa Cruz e do modelo Eta-HadCM3 no período climatológico de 1961-1990.	56
<i>Tabela 5.6:</i>	Magnitudes dos indicadores de extremos climáticos relacionados à temperatura máxima nas estações meteorológicas do Alto da Boa Vista e de Santa Cruz e no modelo Eta-HadCM3. Os valores em negrito são considerados estatisticamente significativos ao nível de confiança de 5%.	60

LISTA DE SIGLAS

AB – Alta da Bolívia

APN – Asia Pacific Network

AR4 – Fourth Assessment Report of IPCC

ASAS – Alta Subtropical do Atlântico Sul

ASPS – Alta Subtropical do Pacífico Sul

BC – Baixa Continental

CCCMA – Canadian Centre for Climate Modelling and Analysis

CCI – Comissão de Climatologia

CJS – Corrente de Jato Subtropical

CLIVAR – Research Program Climate Variability and Predictability

CPTEC – Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos

CREAS – Cenários Regionais de Mudanças Climáticas para a América do Sul

CRU – Climate Research Unit

EPF – Ensemble de Perturbações Físicas

ETCCDMI – Expert Team on Climate Change Detection Monitoring and Indices

GFDL – Geophysical Fluid Dynamics Laboratory

GISS – Goddard Institute for Space Studies

GrADS – Grid Analysis and Display System

HadCM3 – UK Met Office Hadley Centre Coupled Model (Version 3)

IAG – Instituto Astronômico e Geofísico

INMET – Instituto Nacional de Meteorologia

INPE – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais

IPCC – Intergovernmental Panel on Climate Change

JBN – Jato de Baixos Níveis

MCG – Modelo de Circulação Geral

MCGAO – Modelo de Circulação Geral da Atmosfera e dos Oceanos

MIROC – Model for Interdisciplinary Research on Climate

MM5 – Fifth-Generation Mesoscale Model

NCAR – National Center for Atmospheric Research

NCDC – National Climatic Data Center

NCEP – National Centers for Environmental Prediction

NOAA – National Oceanic and Atmospheric Administration

OMM – Organização Meteorológica Mundial

PNMM – Pressão ao Nível Médio do Mar

REQM – Raiz do Erro Quadrático Médio

RMRJ – Região Metropolitana do Rio de Janeiro

RMSP – Região Metropolitana de São Paulo

SCM – Sistema Convectivo de Mesoescala

SRES – Special Report on Emissions Scenarios

TSM – Temperatura da Superfície do Mar

UNFCCC – United Nation Framework Convention on Climate Change

USP – Universidade de São Paulo

ZCAS – Zona de Convergência do Atlântico Sul

ZCIT – Zona de Convergência Intertropical

1. INTRODUÇÃO

Os relatórios periódicos do Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (*Intergovernmental Panel on Climate Change – IPCC*) sobre as causas, impactos e medidas de mitigação das mudanças climáticas globais representam uma referência padrão do assunto para toda a comunidade científica, governos e indústrias em todo o mundo. O Quarto Relatório de Avaliação (*Fourth Assessment Report – AR4*) do IPCC (IPCC, 2007) diz que enchentes e secas se tornarão mais frequentes na América Latina.

Uma das principais preocupações da sociedade contemporânea referente às projeções futuras do clima diz respeito às possíveis mudanças na frequência e intensidade dos eventos extremos de curta duração. Fortes ondas de calor e de frio, secas intensas, enchentes severas, entre outros extremos climáticos tem sido motivo de grande interesse dos pesquisadores devido ao seu enorme impacto no ambiente e na população, ocasionando altos prejuízos monetários e, em alguns casos, perdas humanas. O Brasil, que atualmente já vem sendo afetado pelas consequências de eventos extremos, tais como as enchentes ocorridas na Região Serrana do Rio de Janeiro em janeiro de 2011, com mais de 900 mortes, ainda poderá ser mais profundamente impactado pelas alterações projetadas para o futuro. Desigualdades regionais e sociais aumentam a vulnerabilidade da população brasileira às mudanças climáticas. Assim como as grandes cidades de países em desenvolvimento, as maiores metrópoles brasileiras, em particular, São Paulo e Rio de Janeiro, apresentam inúmeros problemas socioambientais associados aos padrões de desenvolvimento e transformações do espaço.

A frequência e a intensidade de eventos extremos de precipitação e temperatura têm aumentado em várias regiões do país nos últimos 50 anos. Dias frios, noites frias e geadas tem se tornado menos frequentes, enquanto que o número de ocorrências de chuvas fortes, dias quentes, noites quentes e ondas de calor têm aumentado (Marengo *et al.*, 2007). Tais mudanças nos eventos extremos produzem intensos impactos nas atividades humanas tais como a agricultura, saúde, desenvolvimento e planejamento urbano e gerenciamento de recursos hídricos.

Para elaborar projeções de mudanças climáticas futuras utilizam-se modelos numéricos de circulação geral da atmosfera. Entretanto, os modelos globais, que necessitam cobrir um amplo domínio, não são capazes de representar o grande número de processos de retroalimentação que ocorre nas escalas sub-grade controlados por aspectos locais, tais como a topografia, os limites terra-mar, a vegetação e outros. Portanto, projeções de mudanças climáticas futuras regionalizadas obtidas a partir de modelos regionais aninhados a modelos

globais estão sendo elaboradas para várias regiões do mundo. No Centro de Previsão do Tempo e Estudos Climáticos (CPTEC) do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), o modelo regional Eta (Mesinger *et al.*, 1988) foi adaptado para realizar integrações climáticas presentes e futuras (Chou *et al.*, 2011 e Marengo *et al.*, 2011), aninhado ao modelo global do *UK Met Office Hadley Centre* (HadCM3), denominando-se Eta-HadCM3.

Neste trabalho, são analisadas as tendências observadas nos indicadores de extremos climáticos de precipitação e de temperaturas máxima e mínima em duas estações meteorológicas do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET) na cidade do Rio de Janeiro: Alto da Boa Vista, localizada em um ambiente florestado com pouco adensamento urbano (Maciço da Tijuca), e Santa Cruz, situada numa região de alto crescimento da malha urbana (Zona Oeste). Além disso, são avaliadas as simulações do clima presente (1961-1990) e as projeções futuras (até o final do século XXI) de tais índices utilizando o modelo regional Eta-HadCM3, com o cenário A1B do IPCC. O objetivo é, através das análises dos resultados obtidos, apoiar estudos de vulnerabilidade e adaptação aos cenários de mudanças climáticas no município.

No Capítulo 2 é apresentada uma revisão da literatura que trata sobre os temas pertinentes à detecção e projeções de alterações climáticas. No capítulo 3, mostra-se um breve resumo das características climáticas da cidade do Rio de Janeiro, com foco nas estações meteorológicas do Alto da Boa Vista e de Santa Cruz. A metodologia e os dados utilizados para o desenvolvimento do estudo são abordados no Capítulo 4. Os resultados da detecção e das projeções futuras de mudanças climáticas são expostos, analisados e discutidos no Capítulo 5. Finalmente, no Capítulo 6 estão as conclusões e as considerações finais.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste capítulo é feita uma revisão da literatura sobre detecção das mudanças climáticas no clima presente e suas projeções futuras, com ênfase na América do Sul e mais especificamente no Brasil.

O termo “mudanças climáticas” neste trabalho está sendo empregado para se referenciar a todas as alterações no clima, considerando-se tanto as mudanças naturais quanto as antropogênicas, assim como utilizado pelo IPCC (IPCC, 2007), diferentemente do que é considerado pela *United Nation Framework Convention on Climate Change* (UNFCCC). O termo “mudanças climáticas” é empregado pela UNFCCC para se referir às alterações no clima atribuídas direta ou indiretamente à atividade humana.

A detecção da mudança climática é o processo de demonstrar que o clima tem mudado em algum sentido estatístico definido, sem provar a causa para tal alteração. Por outro lado, a atribuição é o processo de estabelecer as causas mais prováveis para a mudança detectada com algum nível definido de confiança (Le Treut e Somerville, 2007). Neste trabalho a ênfase é dada na detecção das mudanças relacionadas à temperatura e à precipitação, sem envolver aspectos relacionados à atribuição de tais alterações.

2.1 Detecção de Mudanças Climáticas no Clima Presente (Século XX)

De acordo com Alexander *et al.* (2006), durante décadas, a maior parte das análises de mudanças climáticas globais utilizando dados observacionais se baseavam em mudanças nos valores médios de precipitação e temperatura do ar, que estavam disponíveis para boa parte do globo. Contudo, nem sempre um aumento na média está relacionado com um aumento dos extremos. As mudanças nos extremos como, por exemplo, redução dos dias frios, aumento da duração das ondas de calor, aumento na frequência de chuvas intensas ou de secas severas, tem um impacto muito maior na sociedade e ecossistemas em geral do que um aumento dos valores médios (Karl *et al.*, 1997; Easterling *et al.*, 2000; Meehl *et al.*, 2000 e Frich *et al.*, 2002). Para analisar tais indicadores de extremos é necessário obter uma longa série de dados diários e a disponibilidade destes dados em todo o planeta ainda é inadequada. No estudo “global” elaborado por Frich *et al.* (2002) quase nenhuma análise de extremos era possível para a maior parte da América Central e América do Sul, África e sul da Ásia.

O *Expert Team on Climate Change Detection Monitoring and Indices* (ETCCDMI) foi estabelecido pela Comissão de Climatologia (CCI) da Organização Meteorológica Mundial

(OMM – *World Meteorological Organization*) e pelo *Research Program Climate Variability and Predictability* (CLIVAR) para coordenar dois esforços complementares a fim de viabilizar a análise global de extremos. Um esforço foi a coordenação internacional de desenvolvimento de um conjunto de índices de mudanças climáticas focando primariamente em extremos. O segundo esforço foi no sentido de coordenar workshops internacionais com o objetivo de preencher as lacunas identificadas em estudos anteriores a nível mundial.

O ETCCDMI propôs então a realização de workshops nos moldes da *Asia Pacific Network* (APN) (Manton *et al.*, 2011). Durante a APN, vários cientistas de diferentes países na região da Ásia/Pacífico conduziram o controle de qualidade de seus próprios dados e computaram índices de extremos climáticos para serem a seguir trocados entre os membros participantes. O Brasil foi um dos países escolhidos para congrega pesquisadores da América do Sul, e os resultados de tal workshop, realizado em agosto de 2004 em Maceió (AL), estão publicados em Vincent *et al.* (2005) e Haylock *et al.* (2006), relacionados, respectivamente, à temperatura do ar e à precipitação.

Na análise dos extremos climáticos a nível global, Frich *et al.* (2002) utilizaram índices baseados em valores diários de temperaturas máxima e mínima, e nos totais pluviométricos diários. Tais indicadores podem ser aplicados a uma grande variedade de climas e são capazes de detectar possíveis alterações climáticas em todas as estações do ano. Apenas séries com 40 anos ou mais de registros quase completos foram utilizadas. Cerca de 3000 séries temporais de indicadores foram analisadas. Os resultados de Frich *et al.* (2002) indicaram que a maior parte do Hemisfério Norte e da Austrália apresentou um aquecimento no período de 1946 a 1999 e o número de dias com temperatura mínima inferior a 0°C sofreu um decréscimo mundial uniforme ao longo da segunda metade do século XX. Em muitas partes do planeta, a amplitude dos extremos de temperaturas máxima e mínima intranual indicou um declínio sistemático e estatisticamente significativo no decorrer das últimas 4 a 5 décadas. Ondas de calor com duração cada vez maior foram observadas no Alasca, no Canadá, no centro-leste da Europa, na Sibéria e no centro da Austrália e o indicador associado a noites quentes apresentou uma elevação na maior parte das áreas observadas, com exceção de algumas pequenas regiões do Canadá e da China. De uma forma geral, os índices relacionados aos extremos de precipitação mostraram um padrão heterogêneo no globo, com alterações positivas e negativas. Notou-se um expressivo aumento dos eventos de precipitação intensa no sul da África, no sudeste da Austrália, no oeste da Rússia, em partes da Europa e no leste dos Estados Unidos. Observou-se também uma enfática diminuição nos eventos de

chuvas severas no leste da Ásia e na Sibéria. Os autores concluíram que uma proporção significativa da área terrestre do planeta foi cada vez mais afetada por mudanças expressivas nos extremos climáticos durante a segunda metade do século XX.

Para a América do Sul, Vincent *et al.* (2005) analisaram as tendências observadas nos indicadores de extremos de temperatura em 68 estações no período de 1960 a 2000. Infelizmente nenhuma estação do Estado do Rio de Janeiro foi incluída nesta verificação e considerando-se a Região Sudeste do Brasil, apenas as estações Água Funda, São Paulo e Campinas (SP) foram utilizadas no trabalho. Os resultados mostram que há poucas estações com expressivas tendências tanto negativas quanto positivas nos índices baseados na temperatura máxima diária. Apenas para a estação Ceres, no norte da Argentina, nota-se uma tendência com significativo decréscimo nos dias quentes (representados pela maior temperatura máxima diária a cada ano). Contrariamente, os indicadores baseados nas temperaturas mínimas diárias exibem tendências enfáticas (Figura 2.1). Expressivas tendências de redução das noites frias (Figura 2.1a) e aumento das noites quentes (Figura 2.1b) são observadas em várias estações localizadas ao longo das costas leste e oeste da América do Sul, e um pouco também no Sul do Brasil. As estações no interior do continente possuem tendências menos significativas. A variação de temperatura diurna (média da diferença entre as temperaturas máxima e mínima diárias) decresceu cerca de 2 a 3°C em muitas localidades. Tendências sazonais também foram examinadas pelos mesmos autores com o intuito de determinar se há alguma estação do ano com mudanças mais significativas nos indicadores baseados nas temperaturas máximas diárias e se o aquecimento observado nos índices anuais baseados nas temperaturas mínimas diárias pode ser atribuído a uma particular estação do ano. Aparentemente a elevação (redução) na frequência de ocorrência das noites quentes (frias) ocorre predominantemente no verão e no outono. Mais uma vez, muitas das estações com enfática elevação do número de noites quentes estão localizadas perto das costas leste e oeste do continente.

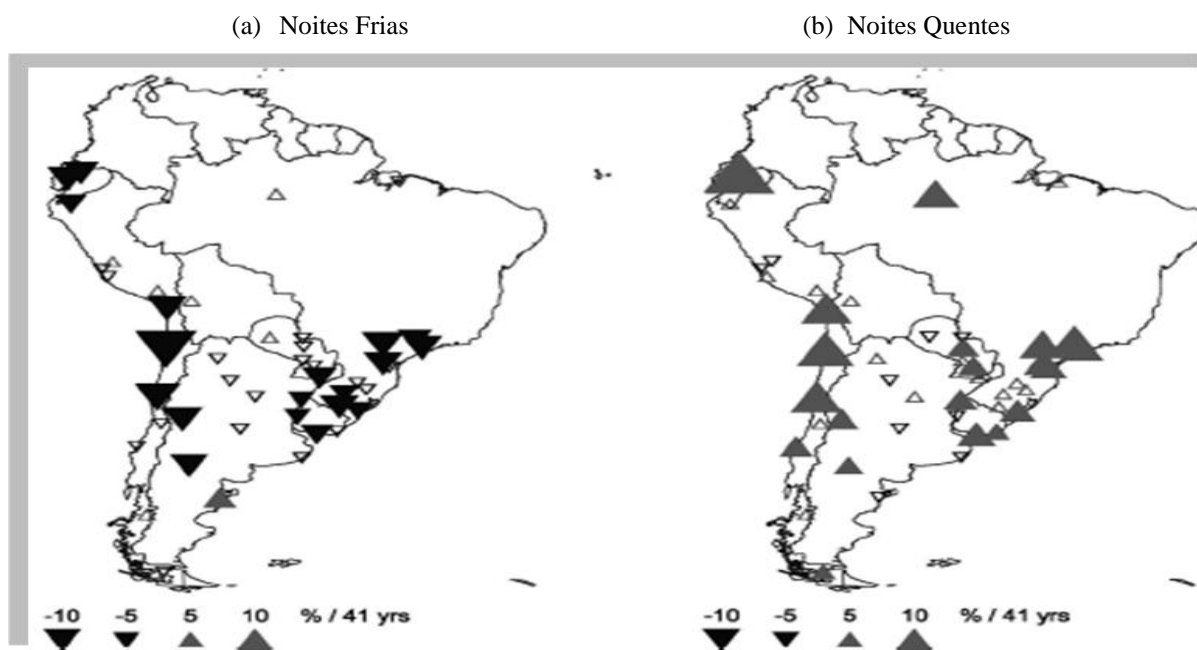


Figura 2.1 – Tendências nos índices baseados nas temperaturas mínimas diárias no período de 1960 a 2000. Triângulos para cima (para baixo) indicam tendências positivas (negativas). Triângulos hachurados correspondem às tendências significativas ao nível de 5%. O tamanho dos triângulos é proporcional à magnitude da tendência de (a) noites frias e (b) noites quentes (Fonte: adaptado de Vincent *et al.*, 2005).

Das 68 estações meteorológicas envolvidas na pesquisa de Vincent *et al.* (2005), 54 delas foram utilizadas por Haylock *et al.* (2006) para examinar possíveis mudanças na precipitação total e na precipitação extrema sobre o mesmo período (1960 a 2000). As tendências nos 12 índices de precipitação utilizados apresentaram várias regiões com mudanças estatisticamente significativas em alguns dos indicadores. O padrão de tendências para os extremos é geralmente o mesmo no total pluviométrico anual, com uma mudança para condições mais úmidas no Equador, no norte do Peru, na região do Sul do Brasil, no Paraguai, no Uruguai e no centro-norte da Argentina (Figura 2.2). Reduções significativas nos indicadores de precipitação foram identificadas no sul do Peru e no sul do Chile.



Figura 2.2 – Tendências no índice de precipitação PRCPTOT (total pluviométrico anual). Uma elevação (redução) é representada por uma cruz (um círculo). Símbolos em negrito indicam tendências significativas ao nível de 5% (Fonte: adaptado de Haylock *et al.*, 2006).

No artigo de Alexander *et al.* (2006) foram então reunidos dados globais, coletados nos diversos workshops promovidos pelo ETCCDMI e a seguir os índices de extremos climáticos calculados foram colocados em pontos de grade. Isto permitiu a apresentação do mais abrangente e atualizado quadro mundial até então das tendências nos indicadores de extremos de temperatura e precipitação. Índices sazonais e anuais para o período de 1951-2003 foram avaliados e as tendências em tais indicadores passaram por um teste de significância estatística. Os resultados mostram alterações expressivas generalizadas nos indicadores de extremos de temperatura associados ao aquecimento, especialmente para aqueles índices derivados da temperatura mínima diária. Mais de 70% da área terrestre do planeta mostrou uma diminuição enfática na ocorrência anual de noites frias (Figura 2.3a) e um aumento na ocorrência anual de noites quentes (Figura 2.3b). Isto implica numa mudança positiva na distribuição da temperatura mínima diária em todo o globo. Os indicadores de extremos de temperatura máxima diária mostram mudanças semelhantes, mas com magnitudes menores (Figuras 2.3c, d). As alterações na precipitação apresentam uma elevação generalizada e significativa, mas as mudanças são muito menos espacialmente coerentes se comparadas com as alterações de temperatura. Os índices de precipitação para a América do Sul mostram uma tendência de condições mais úmidas ao longo do século XX, com declínio no número de dias secos consecutivos, porém ambos sem significância estatística.

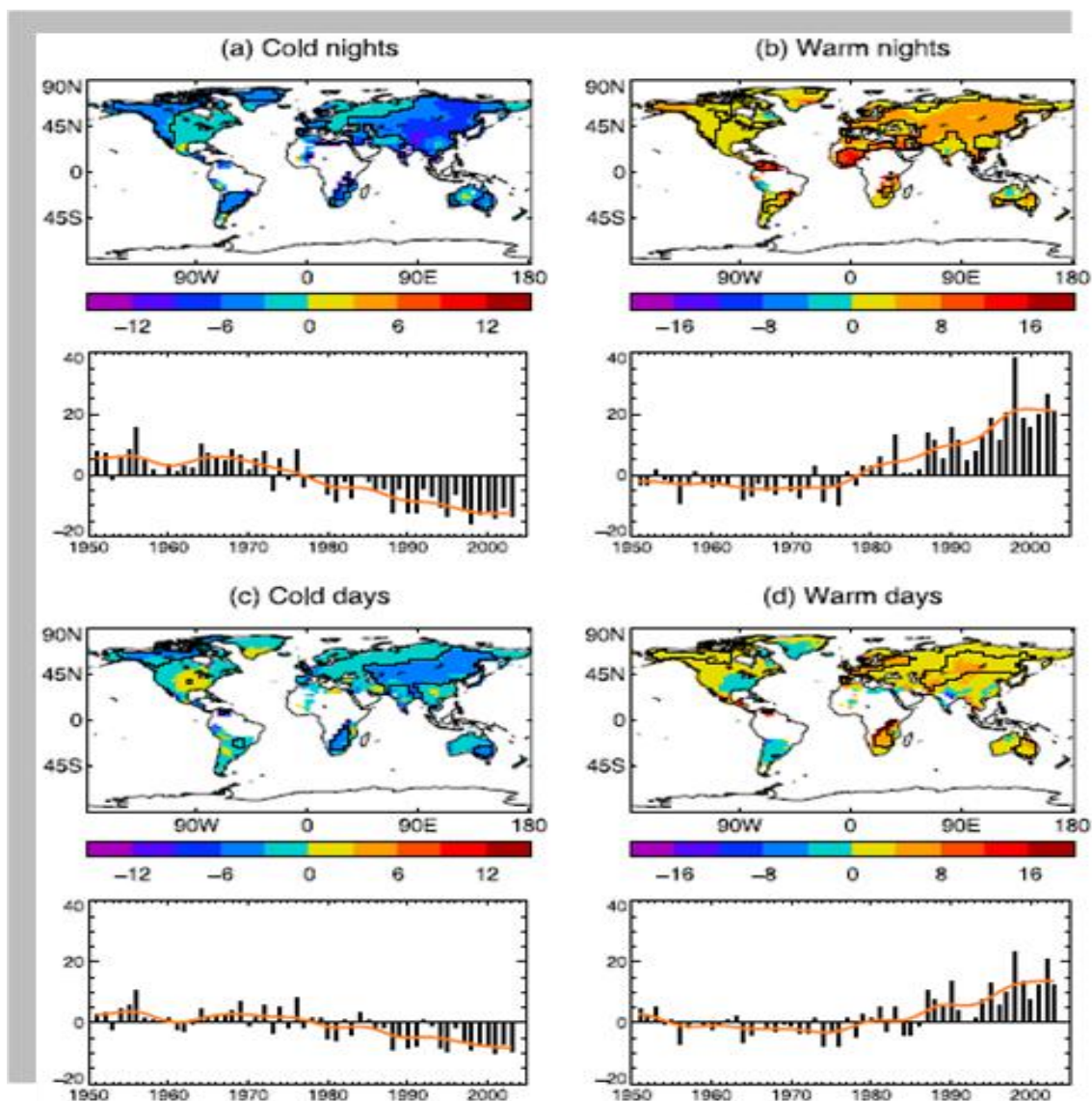


Figura 2.3 – Tendências (em dias por década, mostradas em mapas) e anomalias anuais relativas aos valores médios de 1961-1990 (mostradas em gráficos) para séries anuais de índices de percentis de temperatura para 1951-2003 para (a) noites frias, (b) noites quentes, (c) dias frios e (d) dias quentes. As tendências foram calculadas somente para os pontos com dados suficientes (no mínimo 40 anos de dados durante o período, sendo que o último ano da série não fosse anterior a 1999). As linhas pretas nos mapas englobam regiões onde as tendências são significativas ao nível de 5%. A linha laranja nos gráficos são as tendências não lineares obtidas por suavização utilizando-se um filtro binomial de 21 termos (Fonte: Alexander *et al.*, 2006).

Outras pesquisas retratam aspectos da detecção de mudanças climáticas baseadas em extremos para a América do Sul, incluindo o Brasil como, por exemplo, Marengo e Camargo (2007), Marengo e Valverde (2007), Obregón e Marengo (2007), Marengo *et al.* (2009 e 2010) e Rusticucci *et al.* (2010). Os resultados de tais trabalhos mostram tendências semelhantes àquelas encontradas por Vincent *et al.* (2005) e Haylock *et al.* (2006).

Em Marengo *et al.* (2010) elaborou-se uma comparação entre 3 índices de extremos climáticos observados e simulados por sete modelos acoplados provenientes do IPCC-AR4

para o período de 1960-2000 sobre a América do Sul. Os resultados com dados observacionais (Figura 2.4) mostram um aumento expressivo das noites quentes (TN90), principalmente sobre o sudeste da América do Sul e a costa oeste do sul do Chile. Vincent *et al.* (2005) e Alexander *et al.* (2006) mostraram que este aumento na tendência de TN90 é observado ao longo de todo o ano na América do Sul, sendo mais elevado no verão e outono. Contudo, também foram notadas diminuições não significativas das noites quentes sobre a Bolívia, sul do Peru e norte da Argentina. Com relação à precipitação, foram observadas tendências de elevação no número de dias no ano com acumulado pluviométrico acima de 10 mm (R10), principalmente na costa oeste do Peru e do Equador e no sudeste da América do Sul. No norte do Peru ocorreu um aumento de 4-8 dias com precipitação acima de 10 mm no período analisado, enquanto no sul do Brasil, Uruguai e Paraguai este aumento alcançou até 12 dias. O índice que representa o número máximo de dias consecutivos secos (CDD) exhibe tendências positivas nas regiões se estendendo do oeste do Equador (10-20 dias), sul do Peru, Bolívia e norte da Argentina (10-50 dias) com tendências negativas no centro-oeste do Brasil, Paraguai, sul do Brasil e Uruguai, com redução entre 10 e 40 dias, em concordância com Haylock *et al.* (2006) e Alexander *et al.* (2006).

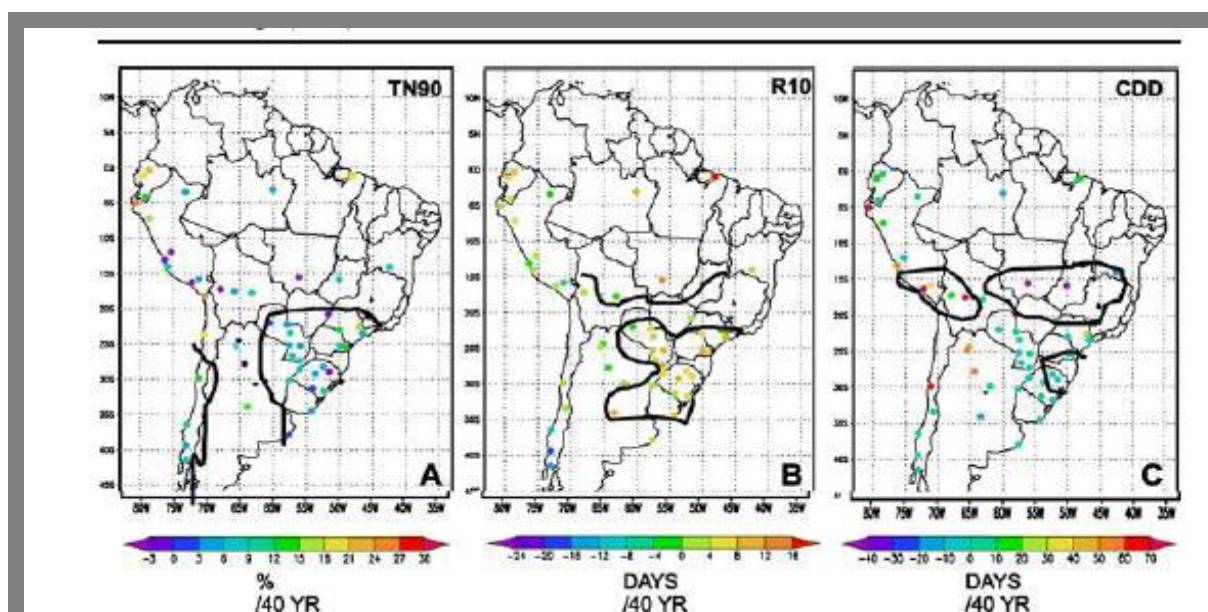


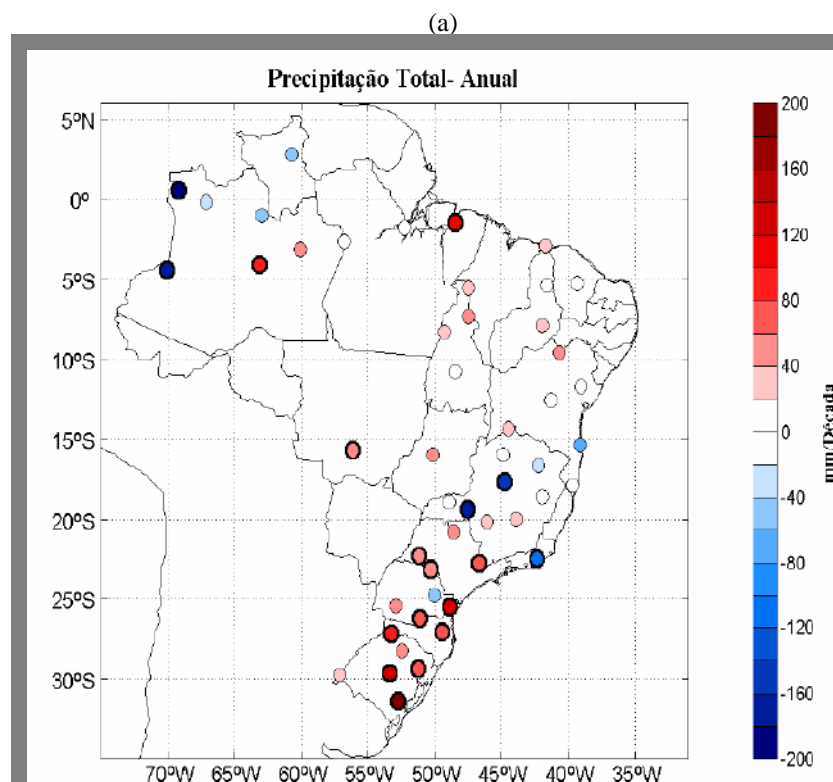
Figura 2.4 – Tendências observadas em índices de extremos climáticos para 1960-2000. A linha preta delimita as áreas onde as tendências são estatisticamente significativas ao nível de 5%. (Fonte: Marengo *et al.*, 2010).

Análises de detecção de mudanças climáticas na Região Sudeste do Brasil podem ser encontradas ainda em Sansigolo *et al.* (1992), Pinto *et al.* (2001), Duursma (2002) *apud*

Marengo e Valverde (2007), Obregón e Marengo (2007), Coelho Netto *et al.* (2008), Maia (2008) e Nobre *et al.* (2010).

Duursma (2002) *apud* Marengo e Valverde (2007) mostra tendência de aquecimento em grandes cidades como São Paulo, com taxa de $0,6^{\circ}\text{C}$ nos últimos 100 anos. Em Campinas, Pinto *et al.* (2001) mostram tendências positivas da temperatura mínima que ultrapassam os $2,5^{\circ}\text{C}/100$ anos. De acordo com Marengo e Valverde (2007) tais tendências não podem ser atribuídas somente à variabilidade natural do clima, mas também ao efeito antrópico associado ao crescimento das cidades.

Obregón e Marengo (2007) verificaram tendências negativas na precipitação em um posto pluviométrico do Estado do Rio de Janeiro (Estação Piller, no município de Nova Friburgo) com valores entre -140 e -160 mm/década, e também no norte e oeste de Minas Gerais, porém verificaram tendências positivas no Estado de São Paulo (Figura 2.5a). Com relação à temperatura mínima média anual, valores positivos foram observados sobre todas as regiões do Brasil, incluindo o Rio de Janeiro (Resende e Nova Friburgo), com aumento de aproximadamente $0,2^{\circ}\text{C}/\text{década}$ (Figura 2.5b).



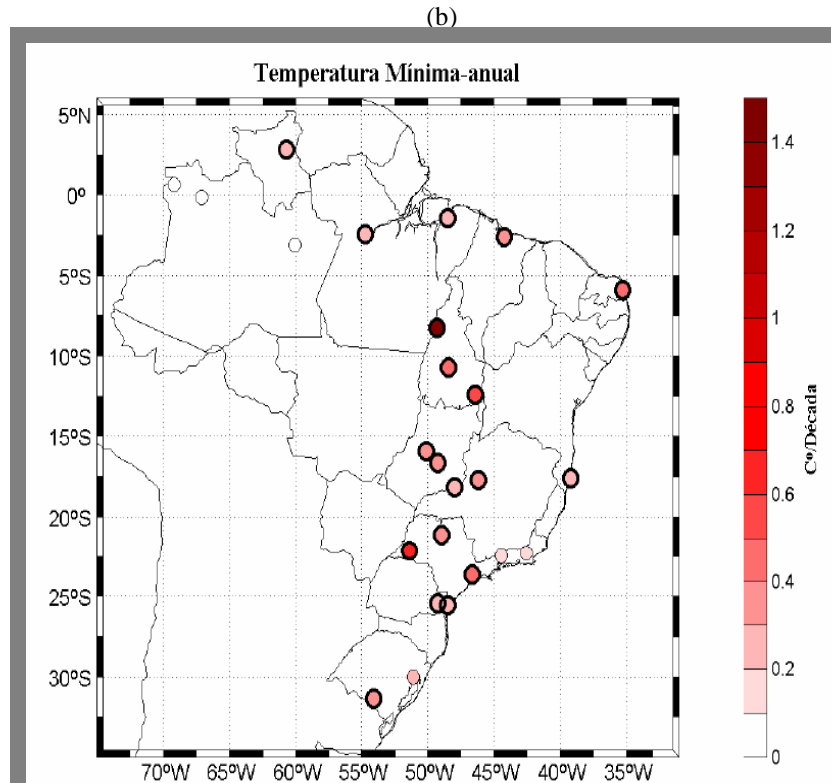


Figura 2.5 – Tendência de: (a) precipitação total (1951-2000), em mm/década e (b) temperatura mínima (1961-2000), em °C/década. Círculos com contornos grossos indicam significância estatística do teste de Mann-Kendall ao nível de 5% (Fonte: Obregón e Marengo, 2007).

Nobre *et al.* (2010) mostram que para São Paulo, na estação do Instituto Astronômico e Geofísico (IAG) da Universidade de São Paulo (USP), as chuvas intensas têm se tornado mais frequentes. Totais pluviométricos diários superiores a 50 mm, que ocorriam com frequência média de 9 vezes a cada 10 anos na década de 1930, passaram a ocorrer com frequência de 40 vezes na década de 2000 (Figura 2.6).

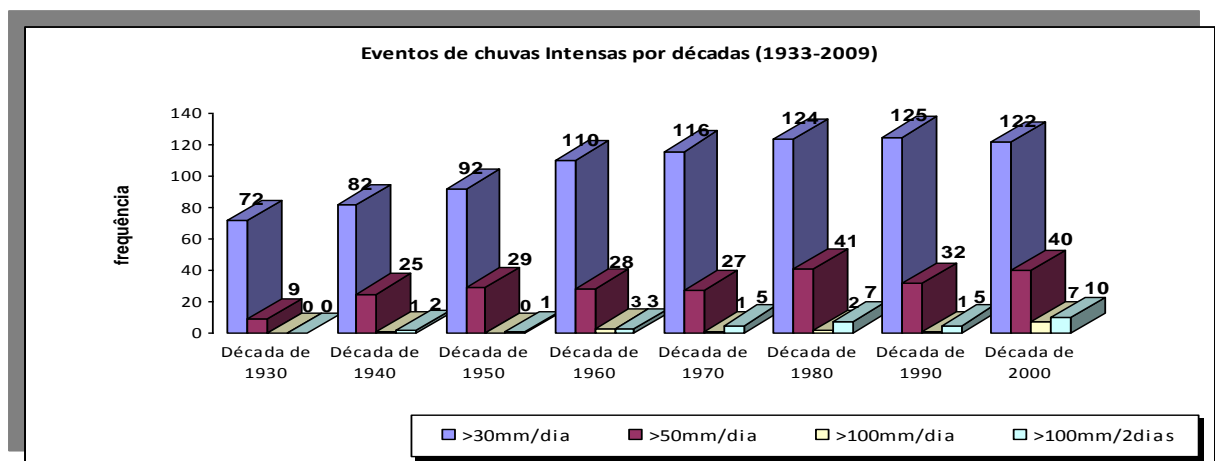


Figura 2.6 – Eventos de chuvas intensas por décadas em São Paulo no período de 1933 a 2009 (Fonte: Nobre *et al.* 2010 – Estação Meteorológica do IAG/USP; análise de Júlia Reid, INPE).

Segundo Coelho Netto *et al.* (2008), a frequência de eventos extremos de precipitação (>100 mm/dia) se elevou no período de 1977 a 2002 na Estação Capela Mayrink (Alto da Boa Vista, Rio de Janeiro) e também na Estação de Resende no Vale do Rio Paraíba do Sul (RJ), onde a série é mais longa (1937-2000).

Maia (2008) analisou as tendências na temperatura média mensal compensada em Bangú (Rio de Janeiro), de janeiro de 1960 a dezembro de 1977 e na estação denominada Rio de Janeiro, de janeiro de 1960 a dezembro de 1989 e evidencia suaves tendências de aumento das temperaturas em ambas as localidades.

Sansigolo *et al.* (1992) avaliaram, por sua vez, séries de temperaturas médias anuais para 9 cidades brasileiras e em todas ocorre aquecimento, principalmente em São Paulo (+0,03°C/ano) e no Rio de Janeiro (0,02°C/ano), como mostra a Figura 2.7.

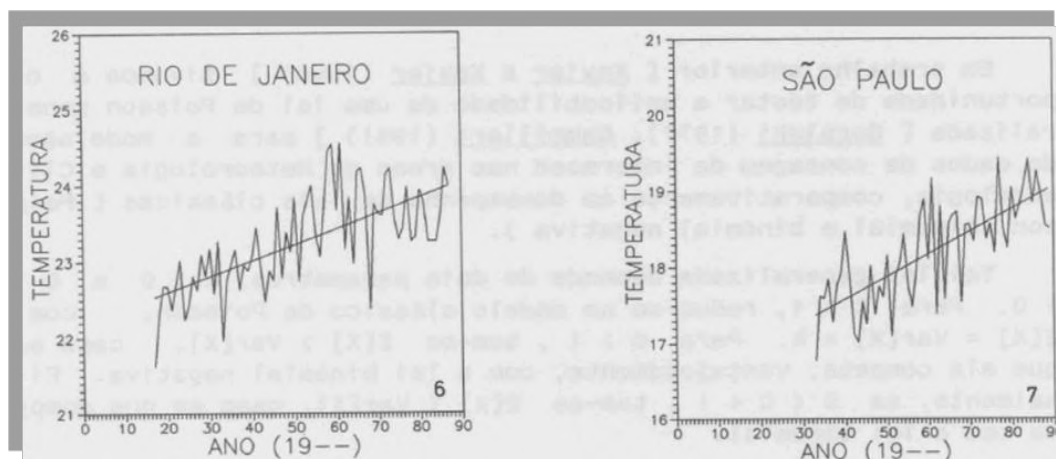


Figura 2.7 – Temperaturas médias anuais e respectivas tendências para a cidade do Rio de Janeiro (principal estação climatológica do INMET) e de São Paulo (estação do IAG/USP) (Fonte: Sansigolo *et al.*, 1992).

2.2 Projeções de Mudanças Climáticas Futuras (Século XXI)

Modelos de Circulação Geral da Atmosfera e dos Oceanos (MCGAOs) são as ferramentas mais promissoras para elaborar projeções das mudanças climáticas futuras. Estes modelos numéricos fornecem uma visão tridimensional do sistema climático, descrevendo os principais processos físicos e dinâmicos, assim como as interações entre os componentes do sistema climático e os mecanismos de retroalimentação (*feedbacks*) entre os processos físicos. Os MCGAOs podem simular climas futuros como resposta às alterações na concentração de gases do efeito estufa e de aerossóis. Contudo, tais modelos com resoluções espaciais tipicamente da ordem de centenas de quilômetros, não são capazes de capturar adequadamente os aspectos de escala regional e, além disso, a integração de diversos

membros é extremamente cara computacionalmente (Cabr e *et al.*, 2010). Uma soluço para este problema   a regionaliza o “*downscaling*” das simula es dos modelos climáticos globais. Os métodos de *downscaling* podem ser estatísticos, utilizando fun es de transferência empírica, ou dinâmicos, através de modelos climáticos regionais. Tais estudos de *downscaling* dinâmico foram iniciados por Dickinson *et al.* (1989), Giorgi e Bates (1989), Giorgi (1990) e Kida *et al.* (1991).

Conjuntos (“*ensembles*”) de modelos representam uma nova abordagem para estudar as faixas de respostas climáticas plausíveis para uma dada forçante, com o objetivo de minimizar e quantificar as incertezas através de índices estatísticos. Duas classes de métodos de gera o de ensembles podem ser definidas: o método “multi-modelo”, que representa uma cole o de modelos de circula o geral de diferentes centros de modelagem, e o método da “perturba o da física”, em que uma única estrutura de modelo   utilizada e as perturba es são introduzidas aos esquemas físicos das parametriza es do modelo (Collins *et al.*, 2006).

Os resultados das proje es climáticas para o futuro com modelos numéricos deveriam ser avaliados, contudo isto não   possível já que não existem dados observacionais de períodos passados cujas mudanças nas forçantes sejam exatamente análogas aquelas esperadas no século XXI (Randall *et al.*, 2007). Uma forma de aumentar a confiança nas proje es climáticas futuras   avaliar se o modelo consegue captar as características do clima presente (século XX). Quando se trata dos modelos regionais, a confiabilidade das simula es em alta resolu o depende da qualidade da condi o de contorno lateral, que   fornecida pelo modelo global, e também da própria capacidade do modelo (regional) de desenvolver características regionais realísticas do clima presente.

A nível global, o IPCC-AR4 (IPCC, 2007) projeta um aumento da temperatura do ar de 2 a 4,5 C em rela o aos níveis registrados antes da Era Pré-Industrial. A estimativa mais exata fala em um aumento médio de 3 C, assumindo que os níveis de dióxido de carbono se estabilizem em 45% acima da taxa atual. Avalia es do clima presente simulados pelos modelos globais participantes do IPCC-AR4 e análises de suas proje es futuras foram elaboradas por diversos pesquisadores (Grimm e Natori, 2006; Lin *et al.*, 2006; Tebaldi *et al.*, 2006; Vera *et al.*, 2006; Garreaud e Falvey, 2008; Valverde e Marengo, 2010 e outros).

Uma primeira análise geral das proje es climáticas globais elaboradas pelos modelos que participaram do IPCC-AR4 foi elaborada por Tebaldi *et al.* (2006). Os pesquisadores analisaram simula es históricas e futuras de dez indicadores de mudanças climáticas gerados por um conjunto de nove modelos de circula o geral (MCGs) do IPCC-AR4. Seus resultados

mostraram que as tendências históricas estavam em geral de acordo com estudos observacionais, fornecendo um sentido básico de confiabilidade nas simulações dos MCGs. Simulações de alterações futuras de indicadores de extremos climáticos para os cenários de emissões futuras, “*Special Report on Emissions Scenarios*” (SRES): A2, B1 e A1B (IPCC, 2000), foram então avaliados. Assim como no século XX, são projetados aumentos para extremos quentes e diminuições para extremos frios, consistentes com o aquecimento geral associado à elevação das emissões de gases do efeito estufa. Comum para todas as simulações é o fato de que as trajetórias do cenário B1 (menores emissões) se separam das trajetórias dos cenários A2 e A1B no decorrer do século XXI, por volta de 2040. Isto é consistente devido ao atraso na resposta do clima e ao acúmulo de CO₂. Os cenários A1B e A2 (maiores emissões) parecem acompanhar um ao outro em quase todo o século XXI na maior parte das simulações, com uma taxa alta e crescente para ondas de calor e noites quentes, e uma taxa alta e decrescente para a amplitude diurna da temperatura e dias frios, se comparadas ao cenário B1. Estas rodadas com maiores forçantes tendem a se separar somente no final do século XXI.

Vera *et al.* (2006) analisaram as saídas de um subconjunto de 7 modelos acoplados do IPCC-AR4, num total de 16 membros, para simular as características da precipitação sobre a América do Sul para o período 2070-2099. Inicialmente detectou-se que os modelos foram capazes de reproduzir a extensão do máximo de precipitação tropical durante o verão, apesar da pequena diferenciação entre os mesmos na intensidade e na localização. Durante o outono, os modelos também simularam bem a migração para norte da Zona de Convergência Intertropical (ZCIT) e da precipitação continental tropical, embora a maioria deles tenha gerado condições secas sobre a Amazônia e uma ZCIT mais estreita e mais zonalmente orientada do que a observada. No inverno, houve uma grande dispersão entre as representações da precipitação dos modelos. Durante a primavera, os modelos conseguiram reproduzir a migração para sul tanto da ZCIT quanto da precipitação tropical. Utilizando o cenário de mudanças climáticas A1B, os autores simularam as condições de precipitação no final do século XXI (2070 – 2099). A maior parte dos modelos reduz a precipitação durante o verão sobre a Patagônia e sul dos Andes, e aumenta sobre o Peru e o sudeste da América do Sul. Além disso, projetam-se alterações negativas de precipitação durante o outono sobre a costa sudoeste do continente e, mais uma vez, mudanças positivas no sudeste sul-americano. A configuração mais significativa que caracteriza as mudanças na precipitação durante o inverno é uma diminuição sobre grande parte da América do Sul. Durante a primavera, projeta-se uma redução da precipitação sobre o sul do continente e um aumento sobre o

noroeste e sudeste sul-americano.

Valverde e Marengo (2010) analisaram as mudanças no padrão de circulação atmosférica sobre a América do Sul para cenários futuros (2011-2100) projetados por cinco modelos globais acoplados do IPCC-AR4, incluindo a terceira versão do MCGAO do *Hadley Centre* (HadCM3), todos forçados com cenário SRES-A2. A avaliação do clima presente (1961-1990) indicou que nenhum dos modelos conseguiu simular o padrão sazonal do clima presente similar ao representado pela Reanálise do *National Centers for Environmental Prediction* (NCEP) / *National Center for Atmospheric Research* (NCAR). No verão e na primavera, os modelos (exceto o MIROC – *Model for Interdisciplinary Research on Climate*) simularam a Alta da Bolívia (AB) e a Baixa Continental (BC) deslocados para oeste em relação à Reanálise. Os autores argumentam que o deslocamento da BC pode estar relacionado com a dificuldade que os modelos possuem em representar a topografia e as fontes de calor. A BC está ligada à convecção sobre a Amazônia, que é dificilmente bem simulada pelos modelos numéricos e, conseqüentemente, isto também pode afetar a correta localização da mesma. Outra característica comum nos modelos foi a Alta Subtropical do Pacífico Sul (ASPS) mais fraca em todas as estações do ano, o que sugeriu menor subsidência sobre sua área de atuação. Além disso, os modelos simulam a BC mais intensa do que na Reanálise. Em termos de precipitação, todos os modelos apresentaram em maior ou menor proporção uma diminuição das chuvas sobre a Amazônia e um excesso de chuvas sobre os Andes. Os modelos também apresentaram dificuldades em configurar a Zona de Convergência do Atlântico Sul (ZCAS), com seu padrão de chuvas estendendo-se desde a Amazônia até o Sudeste do Brasil, exceto o HadCM3. Em geral, os modelos concentram maior quantidade de chuva a leste do continente, o que originou em maior ou menor grau a diminuição da chuva sobre a Amazônia. Para o clima futuro, no verão e na primavera observou-se que a AB continuou deslocada para oeste e a BC para noroeste com relação à climatologia (1961-1990) e no HadCM3 e GISS (*Goddard Institute for Space Studies*) esteve mais intensa. Em relação à temperatura do ar, todos os modelos, sem exceção, apontam para um aquecimento. O HadCM3 e o modelo do *Canadian Centre for Climate Modelling and Analysis* (CCCMA) são os mais extremos com anomalias positivas de até 8°C sobre o centro do continente no inverno e na primavera.

Estudos que tratam de simulações do clima presente e projeções de mudanças climáticas a nível regional, simulados por modelos de alta resolução para a América do Sul são encontrados em Marengo e Ambrizzi, 2006; Ambrizzi *et al.* 2007; Marengo *et al.*, 2007,

2009, 2010; Solman *et al.*, 2007; Nuñez *et al.*, 2008; Soares e Marengo, 2008; Alves e Marengo, 2010; Chou *et al.*, 2011 e outros.

Soares e Marengo (2008) investigaram o fluxo de umidade e o Jato de Baixos Níveis (JBN) a leste dos Andes sobre a América do Sul em um cenário de aquecimento global através do modelo regional HadRM3P do *UK Hadley Centre* ao longo de dois períodos: o primeiro pode ser entendido como o clima presente (1980-1989); o segundo representa um clima futuro (2080-2089) globalmente aquecido com cenário de emissão SRES-A2. Tais simulações mostram um transporte de umidade mais intenso a partir das regiões tropicais para alimentar os Sistemas Convectivos de Mesoescala (SCMs) no norte da Argentina no cenário SRES-A2, comparado com o presente. Isto está associado ao intenso fluxo de norte promovido pelo JBN mais intenso e mais frequente no futuro, trazendo mais umidade da Bacia Amazônica em direção ao sul.

Solman *et al.* (2007) e Nuñez *et al.* (2008) aninharam o modelo regional *Fifth-Generation Mesoscale Model* (MM5) ao modelo global atmosférico HadAM3H para investigar as mudanças climáticas no sul da América do Sul. O modelo regional, com resolução horizontal de aproximadamente 50 km e com 23 níveis sigma na vertical, foi integrado no clima presente (1981-1990) e no clima futuro (2081-2090), com os cenários SRES-A2 e B2. O desempenho do modelo para representar o clima presente é investigado em Solman *et al.* (2007) e as projeções futuras são descritas em Nuñez *et al.* (2008).

Solman *et al.* (2007) demonstram que o modelo regional MM5 reproduz muitos aspectos da climatologia de mesoescala do período 1981-1990 que não são adequadamente captados pelo modelo global HadAM3H. O modelo regional representa melhor a circulação ciclônica nos baixos níveis topograficamente induzida no norte da Argentina durante os meses de verão, entretanto ele não consegue reproduzir a correta localização do sistema de baixa pressão e, em consequência, ocorre um grande desvio no campo de precipitação. Entre outros problemas na representação de sistemas está uma pobre captação do JBN, que é crítico para determinar a precipitação de verão na América do Sul subtropical. Os padrões espaciais médios sazonais das variáveis à superfície concordam razoavelmente bem com as observações, contudo alguns desvios no modelo foram identificados. Para a precipitação, os desvios na simulação incluem uma superestimativa sobre os Andes e uma subestimativa na Bacia do Prata durante o outono e a primavera, e uma superestimativa sobre o Paraguai e Sul do Brasil durante o verão e o outono. Apesar das dificuldades do modelo regional de representar adequadamente a quantidade da precipitação em algumas regiões, ele melhora a

representação dos índices diários em relação ao modelo global, tais como a frequência de dias úmidos e de dias com chuvas superiores ao percentil 95. O MM5 simula adequadamente as temperaturas observadas média, mínima e máxima sobre todo o domínio, exceto sobre o centro da Argentina, onde um desvio positivo de quase 3°C é observado. Este desvio quente coincide com um desvio seco no conteúdo de umidade do solo. O desempenho do modelo regional é geralmente melhor durante a estação fria do que durante a estação quente.

Em Nuñez *et al.* (2008), as análises das projeções futuras com o modelo MM5 revelam que as mudanças simuladas para o período 2081-2090 são maiores para o cenário A2 do que para o cenário B2, apesar das poucas diferenças qualitativas. Para os dois cenários, o aquecimento no Sul do Brasil, no Paraguai, na Bolívia e no nordeste da Argentina é particularmente maior na primavera. Ao longo do ano, o sul da América do Sul sofre um aumento em ambos os cenários, A2 (entre 1,5 e 5,5°C) e B2 (entre 1 e 4°C). As maiores mudanças na temperatura média são projetadas para as regiões tropicais e subtropicais e as menores mudanças são projetadas para latitudes ao sul de 35°S (Figura 2.8). O padrão de mudanças para as temperaturas máxima e mínima são similares ao da temperatura média, contudo as mudanças são maiores para a temperatura máxima do que para a mínima, particularmente sobre regiões tropicais e subtropicais. As mudanças na precipitação variam substancialmente de estação para estação e através das regiões, em resposta à circulação de grande escala. Sobre a costa oeste da América do Sul, ambos os cenários projetam uma redução geral na precipitação (Figura 2.9). Tanto as simulações do cenário A2 quanto do B2 mostram uma elevação geral na precipitação sobre o centro-norte da Argentina, especialmente no verão e no outono, além de um decréscimo da mesma no inverno e na primavera. No outono, as simulações apontam para uma diminuição geral da precipitação no Sul do Brasil. Isto é o reflexo de alterações na circulação atmosférica durante o inverno e a primavera. Mudanças na Pressão ao Nível Médio do Mar (PNMM) mostram uma célula de aumento de pressão centrada nos oceanos Atlântico Sul (verão e outono) e Pacífico Sul (primavera). As integrações também indicaram uma extensão para sul durante o verão das Altas Subtropicais do Atlântico Sul (ASAS) e do Pacífico Sul (ASPS).

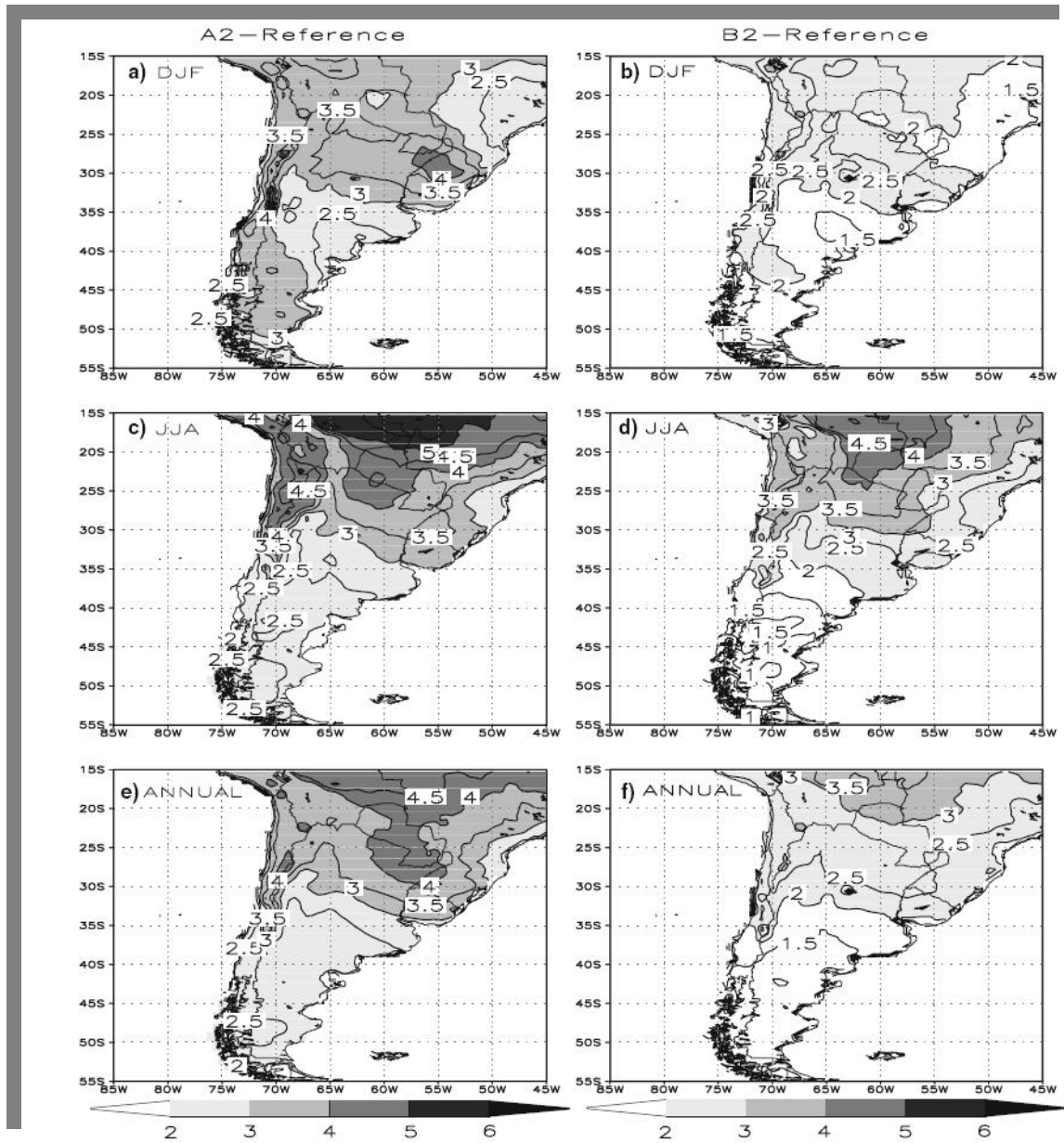


Figura 2.8 – Mudanças projetadas pelo modelo regional MM5 para o período 2081-2090 em relação ao período 1981-1990 nas temperaturas médias (°C) de (a, b) verão, de (c, d) inverno e (e, f) anual para os cenários SRES-A2 (coluna à esquerda) e SRES-B2 (coluna à direita) (Fonte: Nuñez *et al.*, 2008).

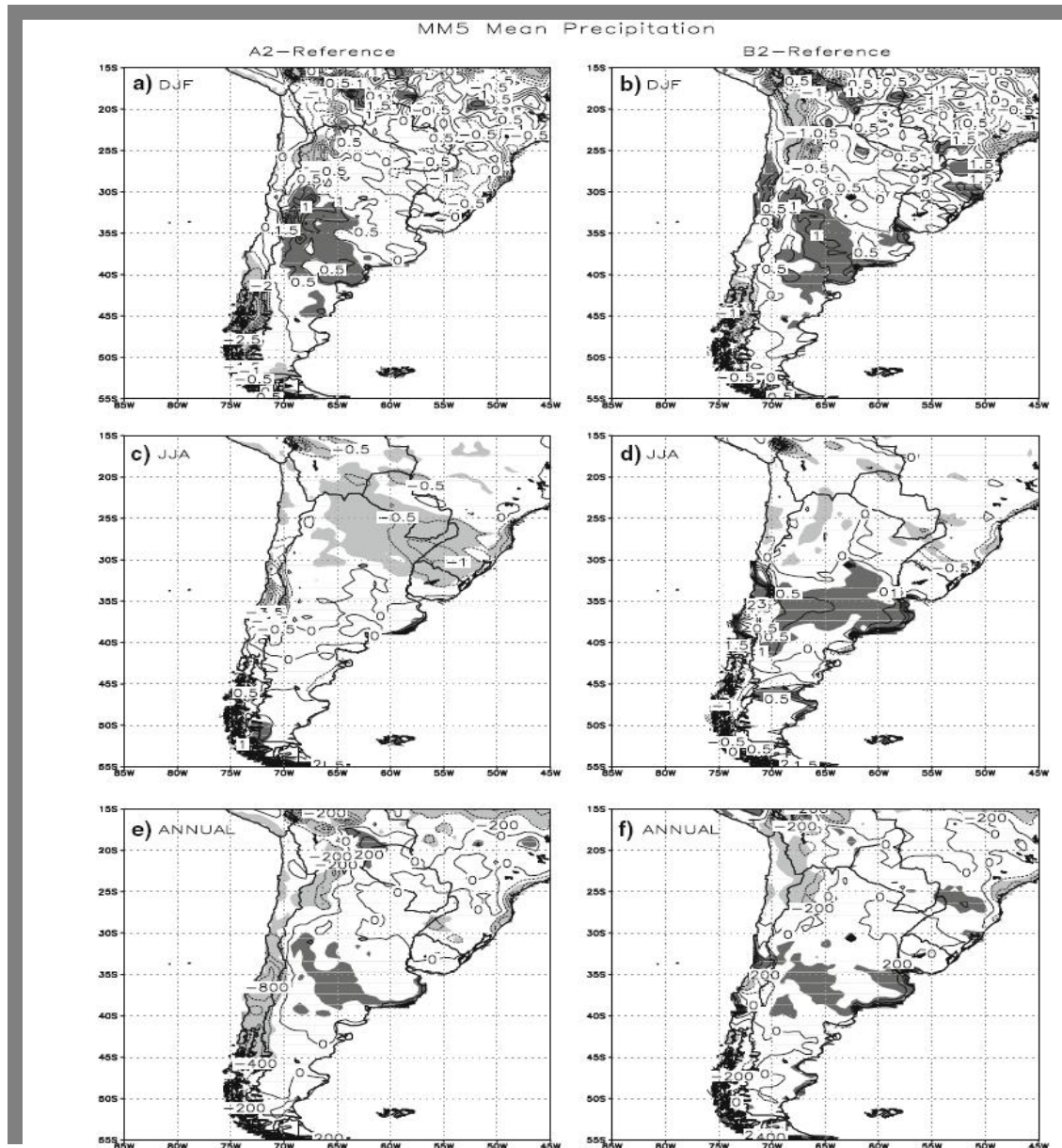


Figura 2.9 – Mudanças projetadas pelo modelo regional MM5 para o período 2081-2090 em relação ao período 1981-1990 na precipitação média de (a, b) verão (mm/dia), de (c, d) inverno (mm/dia) e (e, f) anual (mm) para os cenários SRES-A2 (coluna à esquerda) e SRES-B2 (coluna à direita) (Fonte: Nuñez *et al.*, 2008).

Torres *et al.* (2009) avaliaram as tendências dos extremos de temperatura e precipitação nas Regiões Metropolitanas do Rio de Janeiro (RMRJ) e de São Paulo (RMSP) no final do século XXI. Para isto foram utilizadas as simulações de dois modelos climáticos regionais usados no projeto “Cenários Regionais de Mudanças Climáticas para a América do Sul” (CREAS): RegCM3 e HadRM3P, que tiveram como condição de contorno lateral o modelo global HadAM3P. É importante ressaltar que neste trabalho não foram utilizados dados observacionais da RMRJ e da RMSP para efeito de comparação com as simulações dos modelos regionais no clima presente. As simulações foram realizadas para o período de 1961-

1990 (clima presente) e para 2071-2100, no cenário futuro SRES-A2. Os modelos regionais indicam para a região de estudo um aumento da temperatura média anual que pode chegar a 2-3°C conforme o modelo RegCM3 e 3-4°C segundo o modelo HadRM3P. Os índices de extremos de precipitação para a RMRJ indicam um aumento no número de dias secos consecutivos e uma redução no número de dias no ano com precipitação acima de 10 mm. Para esta mesma região, os modelos prevêem um aumento no máximo anual de precipitação acumulada em 5 dias consecutivos, que poderia ocasionar enchentes e deslizamentos. As tendências nos índices extremos de temperatura, tanto para a RMRJ quanto para a RMSP, indicam um aumento no número de dias e noites quentes e uma diminuição na ocorrência de dias e noites frios. Estes resultados estão sumarizados na Figura 2.10 e são consistentes com um clima mais seco que o atual, com altas temperaturas diurnas e noturnas e com chuvas intensas concentradas em curtos períodos.

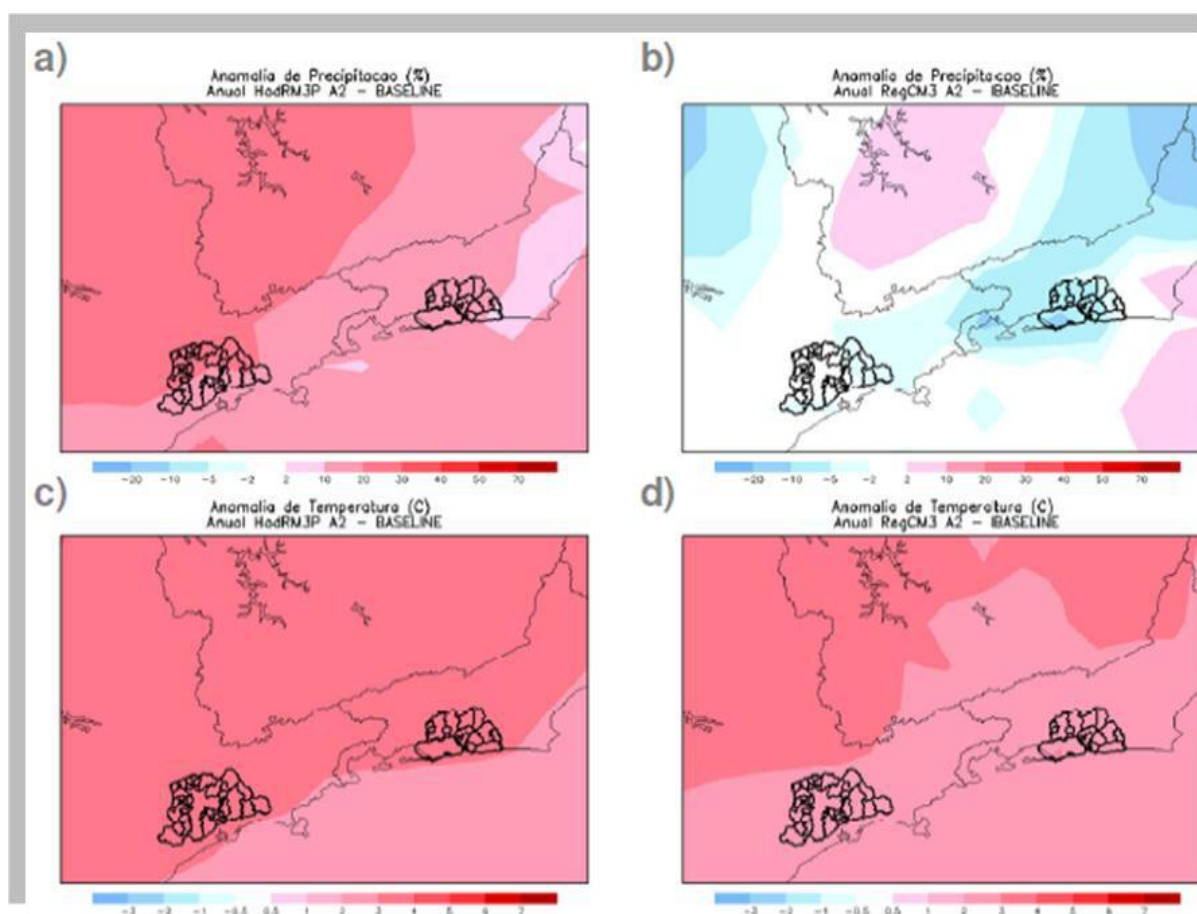


Figura 2.10 - Anomalias de (a, b) precipitação média anual (%) e de (c, d) temperatura média anual (°C) projetadas pelos modelos climáticos regionais HadRM3P (à esquerda) e RegCM3 (à direita), para o período 2071-2100 com relação ao período 1961-1990, no cenário pessimista de emissões A2. As regiões em destaque indicam a RMSP e a RMRJ (Fonte: Torres *et al.*, 2009).

As simulações com o modelo regional Eta-HadCM3, utilizadas neste trabalho, foram avaliadas no clima presente (1961-1990) por Chou *et al.* (2011) e no clima futuro (2011-2099) por Marengo *et al.* (2011). O modelo regional Eta do CPTEC/INPE, foi integrado a partir de quatro membros do modelo global HadCM3: uma integração controle mais três integrações com perturbações na física do modelo (Collins *et al.*, 2006). O modelo Eta-CPTEC, aninhado a estas condições de contorno lateral, foi configurado com resolução horizontal de 40 km e 38 camadas na vertical. Para o clima presente a concentração de CO₂ foi mantida constante com 330 ppm e para o clima futuro utilizou-se o cenário SRES-A1B, mas com cada um dos membros tendo uma distinta sensibilidade climática.

Em Chou *et al.* (2011) a avaliação do clima presente com o modelo Eta-HadCM3 para a América do Sul mostrou que a circulação nos baixos e nos altos níveis reproduz aproximadamente a circulação do modelo global HadCM3, sendo que nos baixos níveis as simulações são capazes de adicionar detalhes da mesoescala que estavam ausentes no modelo HadCM3. A climatologia regionalizada da temperatura do ar e da precipitação está de acordo com as observações da *Climate Research Unit (CRU) of East Anglia* (New *et al.*, 2000). Os maiores erros na simulação da precipitação e da temperatura continental têm sido identificados em áreas da Amazônia, norte da Argentina e Paraguai. Na região Amazônica durante o verão ocorre uma subestimativa da precipitação que é característica de várias simulações. Nas latitudes subtropicais do norte da Argentina uma subestimativa da precipitação é acompanhada por uma superestimativa da temperatura do ar. O espalhamento dos membros do *ensemble* é pequeno quando comparados com a Raiz do Erro Quadrático Médio (REQM) do modelo. Contudo, o ciclo anual da precipitação e da temperatura em algumas áreas, tais como o Nordeste do Brasil, exibem maior dispersão entre os membros. A verificação do desempenho do modelo para reproduzir eventos El Niño e La Niña mostra sinais de anomalias de temperatura e precipitação típicas destes eventos para o verão, embora pequenos deslocamentos das posições das anomalias tenham ocorrido. A Temperatura da Superfície do Mar (TSM) do HadCM3 geralmente subestima o número de eventos El Niño e La Niña, o que pode ter causado o enfraquecimento do sinal nas simulações do Eta-HadCM3.

Marengo *et al.* (2011) avaliaram as projeções climáticas do modelo Eta-HadCM3 para os períodos de 2011-2040, 2041-2070 e 2071-2099 para a América do Sul com foco em três grandes bacias hidrográficas no Brasil: Bacia dos Rios Amazonas, São Francisco e Paraná. As projeções de mudanças na circulação em baixos e altos níveis e na PNMM simulam um padrão de enfraquecimento da circulação tropical e fortalecimento da circulação subtropical,

marcado pela intensificação da Baixa do Chaco e das Altas Subtropicais. Um forte aquecimento (entre 4 e 6°C) do continente sul-americano aumenta o gradiente meridional de temperatura, intensificando a Corrente de Jato Subtropical (CJS). Além disso, tal configuração aumenta o gradiente de temperatura entre o continente e o Oceano Atlântico Sul, levando a gradientes mais fortes de pressão entre o continente e o oceano e a alterações no transporte de umidade e na precipitação. Mudanças no transporte de umidade e nas chuvas são projetadas no setor do Atlântico Tropical, com enfraquecimento dos alísios no Atlântico Norte e subsequentes grandes reduções de chuva na Amazônia e no Nordeste do Brasil (atingindo até 40%), enquanto que as chuvas aumentam na costa norte do Peru, no Equador e no sudeste da América do Sul, atingindo até 30% no norte da Argentina (Figura 2.11). Todas as alterações são mais intensas após 2040. Todas as projeções do modelo mostram um clima mais seco e quente nas bacias dos Rios Amazonas, São Francisco e Paraná, sendo que neste último as mudanças na precipitação são pequenas. A diferença entre a precipitação e a evaporação no cenário A1B regionalizado sugere déficits de água e redução do escoamento fluvial no leste da Amazônia e na Bacia do Rio São Francisco, tornando estas regiões suscetíveis a condições de estiagem no futuro.

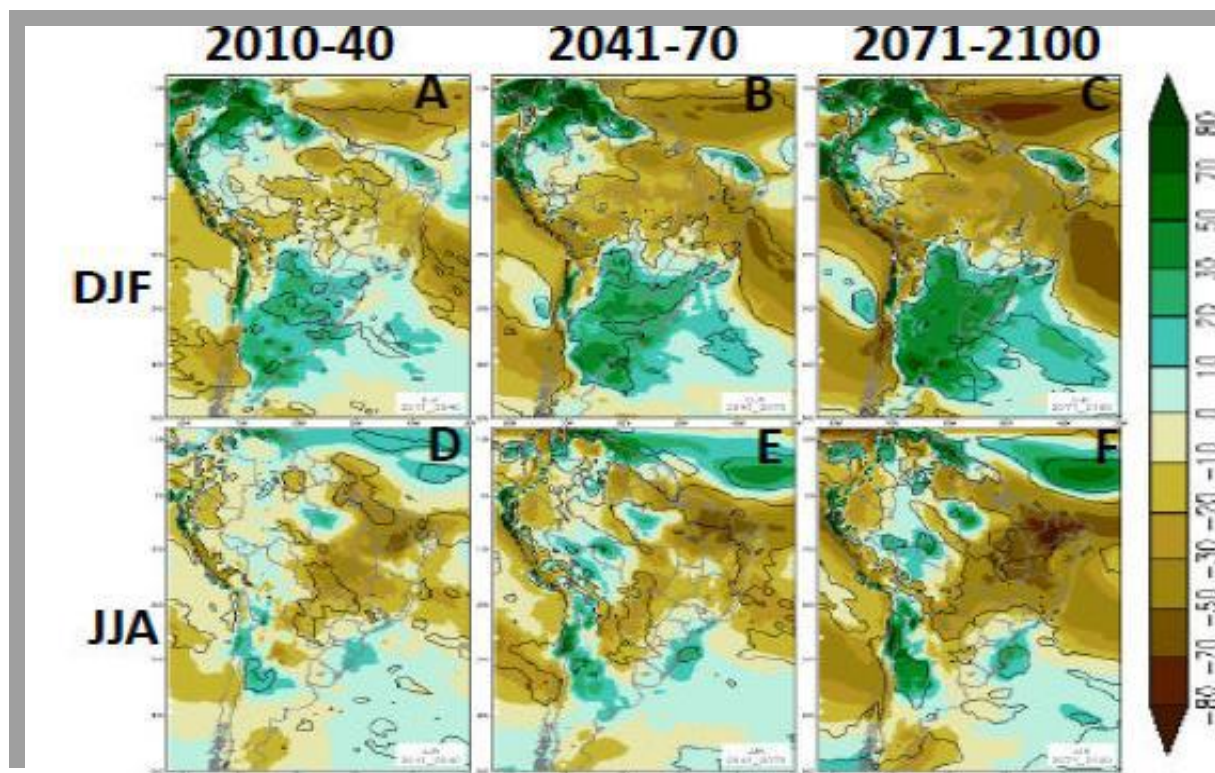


Figura 2.11 – Padrões projetados de mudanças futuras na precipitação (%) em relação às simulações do clima presente (1961-1990) no verão (acima) e no inverno (abaixo) (Fonte: Marengo *et al.*, 2011).

Valverde *et al.* (2009) realizaram uma análise observacional e de modelagem dos acumulados de chuva relacionados a eventos extremos sobre parte das regiões Norte e Nordeste do Brasil, com ênfase em 13 localidades. As saídas da integração controle do modelo climático regional Eta-HadCM3 (Chou *et al.*, 2011 e Marengo *et al.*, 2011) no clima presente (1961-1990) e futuro (2011-2040) com cenário SRES-A1B foram utilizadas para gerar os indicadores RX1day e o RX5day, que correspondem aos valores máximos anuais de chuva acumulada em um e em cinco dias consecutivos, respectivamente. O erro encontrado entre os dados simulados no clima presente com modelo Eta-HadCM3 e os dados climatológicos observacionais foi avaliado, indicando que o modelo subestima o total pluviométrico anual no norte das Regiões Norte e Nordeste. Nas projeções futuras dos índices foi aplicada uma correção, a fim de diminuir em parte a deficiência que o modelo apresentou em simular a climatologia de 1961-1990. A Figura 2.12 apresenta as anomalias dos índices RX1day e RX5day corrigidos para o período 2011-2040. No caso do indicador RX1day quase todas as estações apresentaram um incremento no acumulado de chuva, com uma evidente variabilidade interanual, enquanto que para o índice RX5day a tendência não é tão evidente.

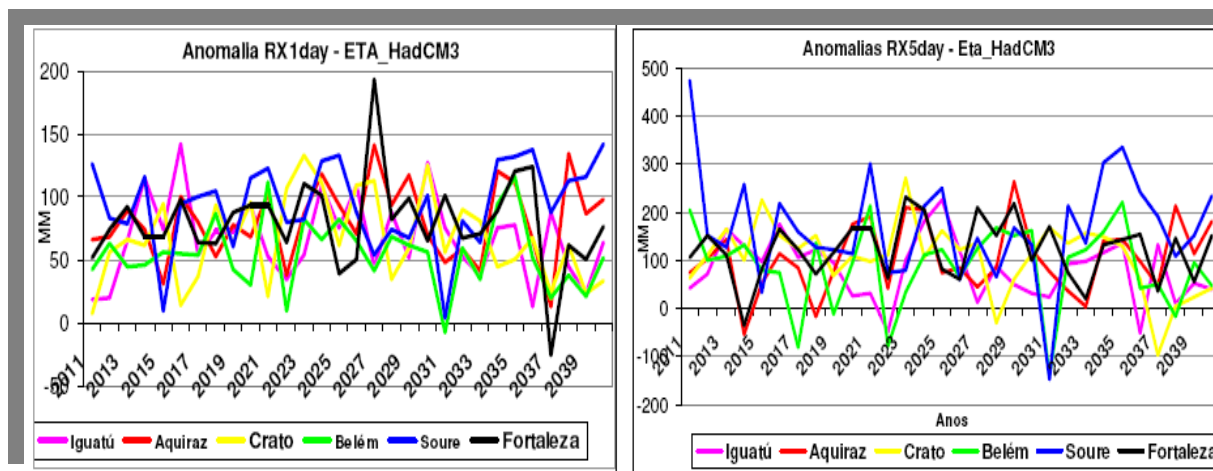


Figura 2.12 – Anomalia dos índices RX1day e RX5day corrigidos para o período 2011-2040, nas localidades da região em estudo (Fonte: Valverde *et al.*, 2009).

3. O CLIMA NO MUNICÍPIO DO RIO DE JANEIRO

Neste capítulo é elaborado um breve resumo sobre as principais características climáticas da cidade do Rio de Janeiro associadas às configurações de vento, temperatura e precipitação em relação aos aspectos fisiográficos do município.

A área em estudo, cidade do Rio de Janeiro (Figura 3.1), localiza-se na Região Sudeste do Brasil, entre os paralelos 22,8 e 23,1°S e os meridianos 43,1 e 43,8°W, sendo influenciada pela presença do Oceano Atlântico ao sul, pela Baía da Guanabara a leste e pela Baía de Sepetiba a oeste. A topografia acidentada da cidade é marcada pela formação de três maciços: o maciço de Gericinó ao norte, o maciço da Tijuca a leste e o maciço da Pedra Branca a oeste. As demais áreas da cidade são planícies, cuja altitude média fica em torno de 20 m, constituindo as Zonas Norte, Sul e Oeste e Centro do município (MMA, 2002). Na região próxima ao Sumaré, no maciço da Tijuca, localiza-se a estação meteorológica do Alto da Boa Vista, e na Zona Oeste da cidade, situa-se a estação de Santa Cruz.

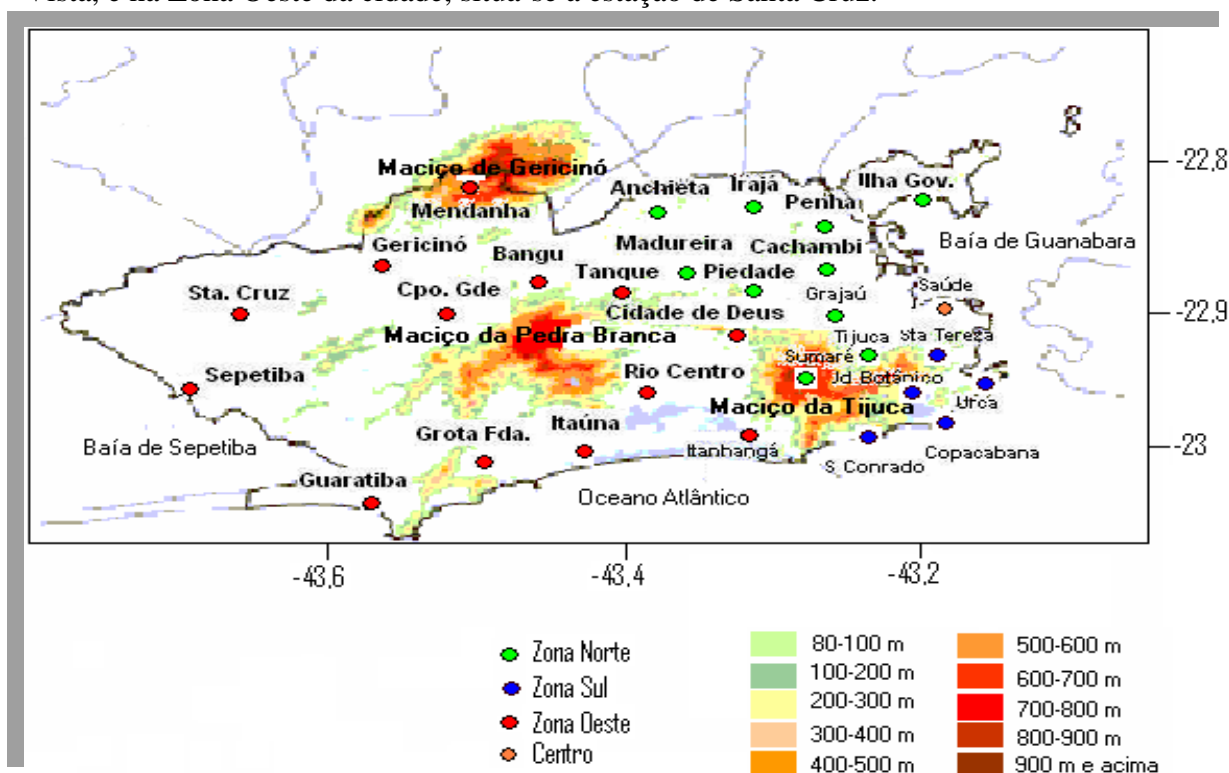


Figura 3.1 – Mapa da cidade do Rio de Janeiro, com a localização dos maciços e bairros das Zonas Norte, Sul e Oeste e Centro (Fonte: adaptado de MMA, 2002).

Apesar da cidade do Rio de Janeiro estar sob a influência da Alta Subtropical do Atlântico Sul (ASAS) durante a maior parte do ano, os ventos mais frequentes não são de nordeste. No município predominam ventos de quadrante sul que ocorrem à tarde e à noite (brisa marítima) e ventos de quadrante norte de madrugada e na manhã (brisa terrestre). Na

primavera e no verão, época em que o aquecimento da superfície continental é mais intenso, o gradiente de temperatura entre o continente e o oceano intensifica a circulação de brisa marítima e aumenta também a frequência dos ventos de quadrante sul em relação ao padrão anual. No outono e no inverno diminui a ocorrência de registros de direção sul e aumenta a frequência dos ventos de norte (Jourdan *et al.*, 2010). A intensidade média do vento no Rio de Janeiro oscila entre 1,9 m/s em junho e 2,9 m/s em novembro, conforme as normais climatológicas do INMET, no período de 1961-1990 (INMET, 2009).

A distribuição espacial da temperatura do ar é influenciada pela topografia e pela atuação das brisas marítima e terrestre. Os maciços da Tijuca e da Pedra Branca, localizados próximos à orla marítima, dificultam a penetração da brisa marítima e dos sistemas transientes para o interior do município, tornando as Zonas Norte e Oeste da cidade mais quentes e secas do que a Zonal Sul e o Centro. As regiões dos maciços apresentam temperaturas inferiores ao restante da cidade em função do grande adensamento florestal associado e à altitude local. Portanto, na estação meteorológica de Santa Cruz (Alto da Boa Vista), registram-se as maiores (menores) temperaturas. O gráfico da Figura 3.2 apresenta as normais climatológicas das temperaturas máxima e mínima para o Alto da Boa Vista e para Santa Cruz. Nota-se pelo gráfico que há uma diferença média de 2,5°C entre as temperaturas do Alto da Boa Vista e de Santa Cruz.

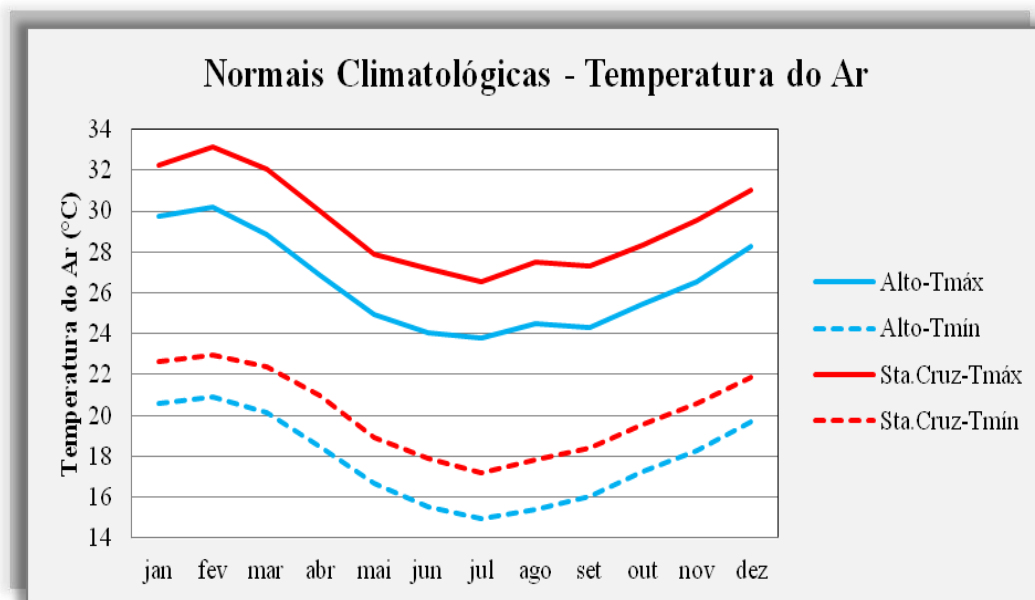


Figura 3.2 – Ciclo anual das temperaturas máxima e mínima nas estações meteorológicas do Alto da Boa Vista (1967-2007) e de Santa Cruz (1964-2009).

Os mesmos aspectos fisiográficos de regionalização na cidade do Rio de Janeiro afetam o comportamento da precipitação, com máximos concentrados junto aos três maciços

existentes na cidade, sendo que no maciço da Tijuca o total pluviométrico anual chega a 2200 mm e na Zona Oeste é inferior a 1200 mm (Figura 3.3). Este padrão de distribuição espacial das chuvas é explicado pelos sistemas meteorológicos em deslocamento, preferencialmente de sul para norte, produzindo máximos (mínimos) de precipitação a barlavento (sotavento) das montanhas. Tal processo ainda é amplificado pelo levantamento de ar úmido trazido pela brisa marítima. A análise de eventos de chuvas moderadas a fortes (maior que 30,0 mm/dia) indica que em 77% dos casos, a precipitação é provocada por sistemas frontais que ocorrem durante todo o ano, com menor frequência no inverno (Dereczynski *et al.*, 2009).

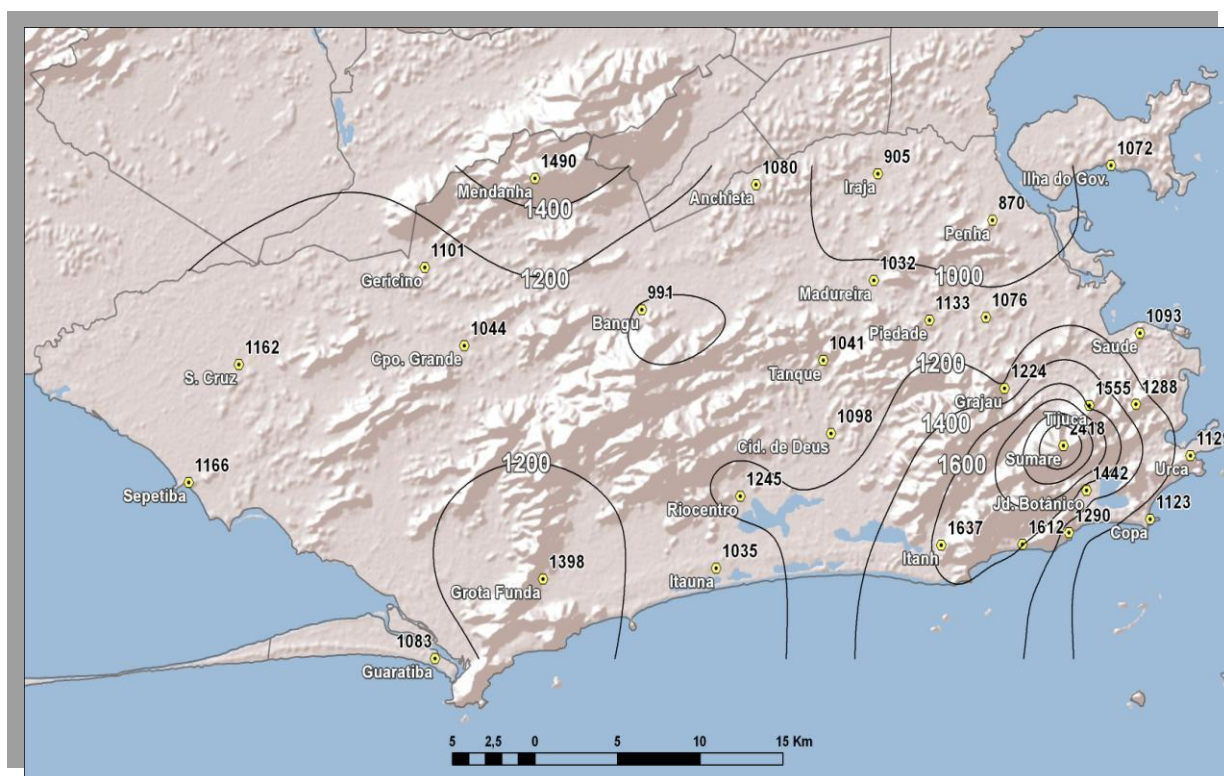


Figura 3.3 – Distribuição da precipitação total anual média no período de 1997 a 2006, elaborado a partir dos dados de 30 postos pluviométricos da Fundação Geo-Rio (Fonte: adaptado de Dereczynski *et al.*, 2009).

A partir do que foi exposto neste capítulo, percebe-se que as duas estações meteorológicas selecionadas para este estudo representam os extremos da cidade do Rio de Janeiro, sendo a estação do Alto da Boa Vista localizada na área mais fria e chuvosa e a estação de Santa Cruz situada na região mais quente e seca do município.

4. METODOLOGIA E DADOS

Neste capítulo, apresentam-se os dados utilizados neste trabalho, oriundos de observações meteorológicas e de modelagem numérica (modelo climático regional Eta-HadCM3). Além disso, descrevem-se o programa RClimDex e os testes estatísticos aplicados a este estudo e ainda alguns detalhes sobre as análises apresentadas no Capítulo 5.

4.1 Dados Observacionais do INMET

Para a investigação de mudanças climáticas em uma determinada região é ideal que se tenha longas séries com valores diários das principais variáveis meteorológicas que caracterizam o clima da mesma, tais como a precipitação e a temperatura do ar. Para este estudo, tais séries foram obtidas para as estações meteorológicas convencionais do Alto da Boa Vista, no período de janeiro de 1967 a dezembro de 2007, e de Santa Cruz, no período de janeiro de 1964 a dezembro de 2009 (Tabela 4.1), do INMET.

Tabela 4.1 – Informações sobre as estações meteorológicas do INMET utilizadas neste estudo.

Estação Meteorológica	<i>Latitude</i>	<i>Longitude</i>	<i>Altitude</i>	<i>Período Analisado</i>
83007 - Alto da Boa Vista	22,95°S	43,27°W	347,1 m	01/jan/1967 a 31/dez/2007
83789 - Santa Cruz	22,92°S	43,68°W	63,0 m	01/jan/1964 a 31/dez/2009

Na Tabela 4.2 são apresentados os números de dias com falhas referentes aos totais pluviométricos diários e às temperaturas máximas e mínimas de ambas as estações meteorológicas (Alto da Boa Vista e Santa Cruz). A estação de Santa Cruz possui 5 anos a mais de dados em comparação à estação do Alto da Boa Vista, além de apresentar um maior número de dados indisponíveis. O Alto da Boa Vista registrou mais falhas nos dados referentes à precipitação, enquanto que Santa Cruz assinalou um número maior de lacunas nos dados relacionados à temperatura. Os anos de 1989 a 1991 foram os que tiveram mais dados indisponíveis no Alto da Boa Vista. Já em Santa Cruz, os anos de 1993 a 1998 foram os que apresentaram um maior número de falhas. Dependendo do número de dias com falhas em uma dada variável num determinado ano, alguns índices específicos de extremos climáticos deixam de ser computados pelo Programa RClimdex. Assim, por exemplo, para gerar a série com os totais pluviométricos anuais para o Alto da Boa Vista, dos 41 anos compreendidos no período de 01/01/1967 a 31/12/2007, 11 anos tiveram de ser descartados da análise, e para Santa Cruz, dos 46 anos da série que se estende do período de 01/01/1964 a 31/12/2009, 13 anos foram retirados.

Tabela 4.2 – Número de dias ao ano com falhas nos dados de totais pluviométricos diários e temperaturas máximas e mínimas nas estações meteorológicas do Alto da Boa Vista e de Santa Cruz, do INMET.

	Alto da Boa Vista			Santa Cruz		
	<i>Prec.</i>	<i>Tmáx.</i>	<i>Tmín.</i>	<i>Prec.</i>	<i>Tmáx.</i>	<i>Tmín.</i>
1964	-	-	-	0	0	0
1965	-	-	-	31	31	31
1966	-	-	-	30	30	30
1967	0	0	0	30	30	30
1968	0	0	0	1	1	1
1969	0	0	0	50	30	30
1970	0	0	0	0	0	0
1971	100	0	0	0	0	0
1972	0	0	0	31	31	31
1973	24	0	0	0	0	0
1974	11	0	1	24	1	11
1975	2	1	2	0	1	0
1976	82	80	80	0	0	0
1977	36	32	32	0	0	0
1978	0	0	0	0	0	0
1979	0	0	0	0	0	0
1980	0	0	0	0	0	0
1981	0	0	0	0	2	2
1982	0	0	0	0	51	51
1983	18	0	0	0	204	204
1984	5	0	0	0	0	0
1985	61	61	61	0	0	0
1986	0	0	0	0	0	0
1987	0	0	0	0	2	2
1988	16	15	15	10	0	0
1989	186	186	187	0	0	0
1990	306	306	306	0	0	0
1991	365	365	365	0	0	0
1992	0	0	0	2	2	2
1993	30	30	30	103	104	103
1994	0	0	0	59	137	136
1995	0	0	3	332	365	365
1996	0	0	0	366	366	366
1997	0	17	0	365	365	365
1998	0	0	0	186	90	130
1999	0	0	0	0	0	0
2000	0	6	3	0	0	2
2001	0	0	0	0	0	0
2002	0	0	0	0	0	0
2003	6	6	6	31	31	31
2004	0	0	0	0	0	0
2005	0	0	0	0	0	0
2006	0	1	1	0	0	0
2007	0	0	0	0	0	0
2008	-	-	-	0	0	0
2009	-	-	-	0	0	0
Total	1248	1106	1092	1651	1874	1923

Apesar da limitação quanto à utilização de somente duas estações meteorológicas, as mesmas não foram deslocadas durante o período de dados analisado e, além disso, elas estão localizadas em ambientes distintos, permitindo comparar duas condições urbanas extremas: a estação do Alto da Boa Vista (Figura 4.1a) está situada dentro da Floresta da Tijuca, onde a vegetação não sofreu grandes pressões e a expansão da malha urbana foi limitada nas últimas décadas, enquanto que a estação de Santa Cruz (Figura 4.1b) localiza-se na Zona Oeste da cidade, onde ocorreu significativo adensamento/expansão do perímetro urbano com eventual redução da cobertura vegetal.



Figura 4.1 – Fotos das estações meteorológicas (a) do Alto da Boa Vista e (b) de Santa Cruz (Fonte: INMET).

4.2 Modelo Climático Regional Eta-HadCM3

Neste estudo, são apresentadas as simulações do clima presente (1961 – 1990) e as projeções do clima futuro (2011 – 2100) geradas pelo modelo regional Eta 40 km do CPTEC aninhado ao MCGAO HadCM3 do Hadley Centre. As informações relativas a tal modelo regional são sumarizadas a seguir e podem ser obtidas em Chou *et al.* (2011) e Marengo *et al.* (2011).

4.2.1 Ensemble do Modelo Global HadCM3 (Hadley Centre)

As condições de contorno do modelo Eta são fornecidas pelo controle e por 3 membros do modelo HadCM3 (Gordon *et al.*, 2000). A atmosfera do HadCM3 possui uma resolução horizontal de latitude $2,5^\circ$ x longitude $3,75^\circ$, com 19 níveis na vertical (Pope *et al.*, 2000). O modelo HadCM3 tem se mostrado bastante favorável dentre os demais modelos

climáticos do conjunto do IPCC-AR4 para a simulação do clima no Brasil (Marengo *et al.*, 2010).

Experimentos com conjunto (*ensemble*) fornecem os meios pelos quais as incertezas nas projeções de mudanças climáticas podem ser exploradas. O *ensemble* do modelo HadCM3 utiliza uma aproximação em que a estrutura de um simples modelo é usada com perturbações introduzidas aos esquemas de parametrizações físicas do mesmo. Este “*ensemble* de perturbações físicas” (EPF) é muito caro em termos computacionais, contudo é um método capaz de examinar sistematicamente as incertezas nos diferentes componentes do modelo. Isto é feito inicialmente através da identificação de parâmetros no modelo que são tanto incertos quanto importantes para a resposta final do mesmo e, assim, torna-se viável utilizar um *ensemble* de vários membros para explorar as implicações destes parâmetros incertos (Collins *et al.*, 2006). Assim, uma variedade de parâmetros incertos foi identificada na atmosfera e na superfície terrestre. Estes parâmetros foram modificados dentro de um *ensemble* de grande extensão (mais de 300 membros), e então foram rodados a partir de um eficiente sistema computacional. Deste *ensemble*, um subconjunto de 16 modelos variantes, cada um com uma combinação diferente de configurações de parâmetros, foi selecionado de acordo com seu desempenho na simulação real do clima atual (Murphy *et al.*, 2007). Juntamente com o modelo HadCM3 padrão, os 16 modelos variantes foram rodados em modo transiente totalmente acoplado, forçados com o cenário SRES-A1B gerado pelas concentrações de CO₂ no final do século XXI. Apesar de cada membro do *ensemble* ser forçado com as mesmas concentrações de CO₂, o efeito das diferentes combinações de configurações de parâmetros altera o grau de medida dos padrões de mudanças climáticas. A maior amplitude da temperatura média global no final do século XXI através dos membros do modelo possui magnitude similar à faixa gerada pelo *ensemble* do AR4 (Collins *et al.*, 2006).

4.2.2 Modelo Regional Eta (CPTEC)

O clima regional é simulado utilizando-se o modelo regional Eta do CPTEC, que é procedente do modelo Eta (Mesinger *et al.*, 1988) desenvolvido na Universidade de Belgrado (Sérvia) e implementado operacionalmente pelo NCAR (Black, 1994). O modelo Eta foi escolhido pelo fato de haver poucas investigações utilizando-o para longas integrações para a América do Sul. Além disso, o sistema de coordenada vertical η utilizado neste modelo é

recomendado sobre o continente devido à presença da Cordilheira dos Andes. A coordenada η é definida como:

$$\eta = \left[\frac{(p - p_t)}{(p_{sfc} - p_t)} \right] * \left[\frac{(p_{ref}(Z_{sfc}) - p_t)}{(p_{ref}(0) - p_t)} \right],$$

onde p é a pressão e Z é a altura. Os índices t e sfc indicam o topo e a superfície do modelo, respectivamente. O índice ref é relativo aos valores de uma referência atmosférica, ou seja, $p_{ref}(0)$ é a pressão na altura 0 e $p_{ref}(Z_{sfc})$ é a pressão à superfície.

Este modelo tem sido utilizado em estudos de previsões sazonais para a América do Sul (Bustamante *et al.*, 2006), onde as previsões foram melhoradas com respeito a um modelo global, que possui uma resolução T62. O modelo é estabelecido com 38 níveis na vertical, com topo em 25 hPa através da coordenada vertical η (Mesinger, 1984). O tratamento da turbulência é baseado no procedimento de nível 2,5 de Mellor – Yamada (Mellor e Yamada, 1974); o balanço de radiação foi desenvolvido pelo *Geophysical Fluid Dynamics Laboratory* (GFDL), com onda longa e radiação solar parametrizadas de acordo com Fels e Schwarzkopf (1975) e Lacis e Hansen (1974), respectivamente.

O modelo Eta utiliza o esquema de Betts – Miller (Betts e Miller, 1986) modificado por Janjic (Janjic, 1994) para parametrizar convecção de cúmulos rasos e profundos; a microfísica das nuvens é parametrizada utilizando o esquema de Zhao (Zhao e Carr, 1997). Os processos de transferência de energia na superfície terrestre são parametrizados pelo esquema de NOAH (Ek *et al.*, 2003). Uma descrição mais detalhada da dinâmica do modelo pode ser encontrada em Mesinger *et al.* (1988).

Algumas modificações foram feitas no modelo Eta do CPTEC para adaptá-lo às rodadas de mudanças climáticas através da utilização da TSM procedente da média mensal do modelo HadCM3. O modelo atualiza a TSM diária através de métodos de interpolação linear. A principal modificação no modelo Eta é o calendário de 360 dias, que é necessário a fim de se utilizar as condições de contorno do HadCM3. A inclusão do CO₂ no modelo Eta do CPTEC se fez possível através do desenvolvimento de novos perfis verticais de temperatura compatíveis com 2xCO₂ e 4xCO₂. Alterações no código original do modelo Eta do CPTEC foram feitas de modo que a concentração de CO₂ pudesse variar de acordo com o modelo HadCM3. Em escalas de tempo decadais, uma interpolação linear foi desenvolvida de tal maneira que os valores anuais de CO₂ fossem gerados de forma a evitar saltos repentinos.

4.2.3 Integração do Modelo Climático Regional Eta-HadCM3

Como descrito na seção 4.2.1, o EPF do modelo HadCM3 com a forçante do efeito estufa atmosférico do cenário SRES-A1B é composto pelo modelo padrão mais 16 membros do mesmo, cada um com uma diferente sensibilidade climática. Espera-se que a grande variação na resposta da temperatura global no final do século XXI produza alguma grande variação também na resposta da temperatura do clima regional através de uma regionalização dinâmica (*downscaling*). Três membros mais o controle foram selecionados para rodar o modelo regional Eta do CPTEC para medir o grau de incerteza no modelo global, uma vez que os mesmos simulam razoavelmente bem o clima sobre a América do Sul. Desta forma, uma maior gama possível de simulações de modelos regionais de plausíveis climas futuros pode ser gerada.

Os conjuntos das condições de contorno do modelo HadCM3 passados ao modelo Eta do CPTEC são os seguintes: aenwh/aenwl; aexso/aejjo; aexsj/aejjj e aexsb/aejyb. Os pares de experimentos se referem às partes histórica (presente) e futura das rodadas. O primeiro par é o membro não perturbado (controle, “*CNTRL*”), o segundo é um membro com alta sensibilidade (“*HIGH*”), o terceiro é um membro com média sensibilidade (“*MIDP*”) e o quarto é um membro com baixa sensibilidade (“*LOW*”). O membro não perturbado está entre os membros de baixa e média sensibilidade. Apesar de somente um cenário de emissões (SRES-A1B) estar disponível, as diferenças na sensibilidade dos modelos podem fornecer a ideia representativa de climas futuros plausíveis através de diferentes caminhos de emissões. O modelo de alta sensibilidade (aexso/aejjo) provê mudanças possíveis diante dos cenários SRES-A2 ou SRES-A1FI. Da mesma maneira, as alterações vistas no modelo de baixa sensibilidade (aexsb/aejyb) podem fornecer uma ilustração qualitativa de um cenário de baixas emissões, como o SRES-B1 (Marengo *et al.*, 2011).

O modelo Eta do CPTEC aninhado às condições de fronteira do modelo HadCM3 (modelo climático regional Eta-HadCM3) foi rodado no INPE para o clima presente (1961 – 1990) e para o clima futuro (2011-2040; 2041-2070 e 2071-2100), forçado pela TSM fornecida pelo modelo HadCM3, como descrito anteriormente. As condições de contorno do modelo HadCM3 terminam, na realidade, em 2099, mas por consistência e simplicidade com os demais intervalos de tempo, este último período é nomeado 2071 – 2100. Análises das simulações do clima presente são apresentadas em Chou *et al.* (2011) e das projeções do clima futuro são mostradas em Marengo *et al.* (2011). No presente trabalho, análises das

mudanças presentes e futuras na precipitação e na temperatura são feitas para os intervalos de tempo 1961-1990 e 2011-2100 em relação à climatologia do primeiro período.

4.2.4 Dados do Modelo Eta-HadCM3

Na Figura 4.2 são apresentados os pontos de grade do modelo Eta-HadCM3 referentes ao Estado do Rio de Janeiro. O ponto considerado como representativo da cidade do Rio de Janeiro corresponde à latitude de 23,00°S e longitude de 43,40°W, localizado a uma altura de 62,9 m. Tal ponto foi selecionado por estar mais próximo e entre as duas estações meteorológicas utilizadas neste trabalho. Os dados do modelo foram extraídos através do *Grid Analysis and Display System* (GrADS).

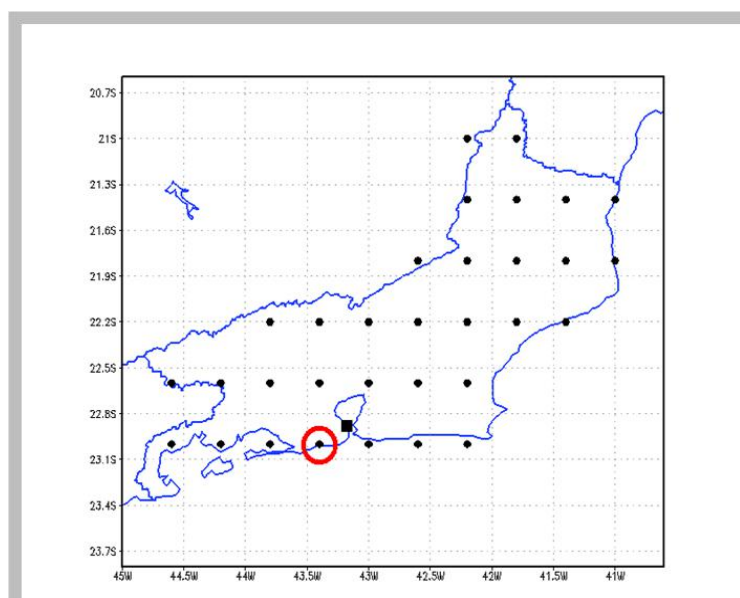


Figura 4.2 – Pontos de grade do modelo Eta-HadCM3 sobre o Estado do Rio de Janeiro. O quadrado representa a capital fluminense e o círculo vermelho envolve o ponto utilizado neste trabalho.

Como as rodadas do modelo Eta-HadCM3 são a cada 4 horas (0, 6, 12 e 18 Z), considerou-se como temperatura máxima (mínima) diária o maior (menor) valor dentre as quatro saídas. Para a chuva diária estabeleceu-se o total pluviométrico acumulado entre 18 Z do dia anterior até 12 Z do dia em questão, assim como é feito no INMET.

Na Figura 4.3 é mostrada a localização geral dos pontos sobre o município do Rio de Janeiro onde as séries de dados foram extraídas e analisadas.

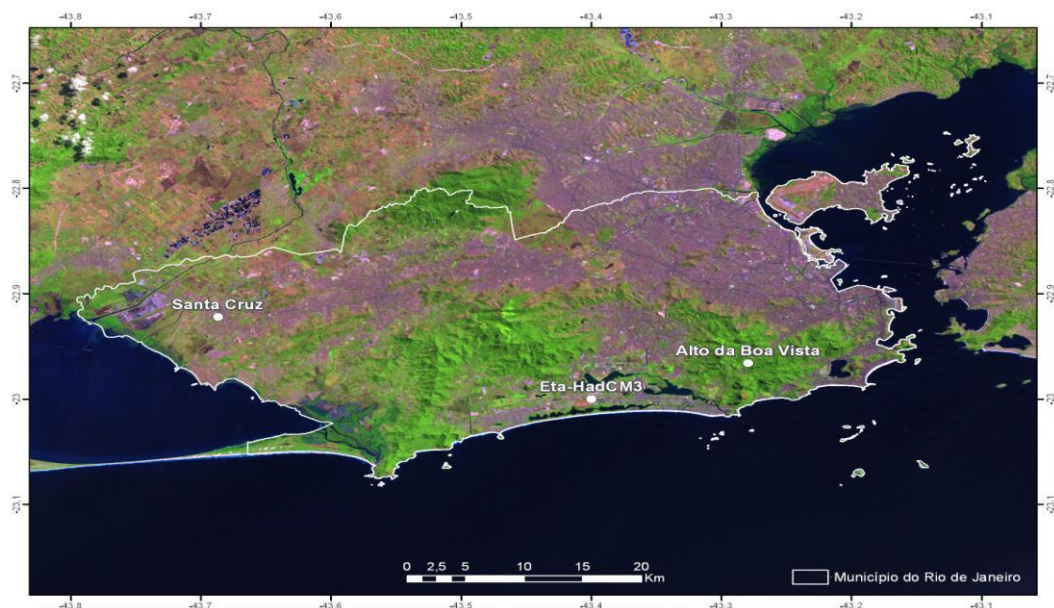


Figura 4.3 – Mapa da Cidade do Rio de Janeiro com a localização das estações meteorológicas do INMET (Alto da Boa Vista e Santa Cruz) e do ponto de grade do modelo Eta-HadCM3.

4.3 Software RCLimDex

O programa R é um conjunto integrado de facilidades de software para manipulação de dados, cálculos e exibições gráficas. Entre outras coisas, ele possui: um manuseio eficiente de dados e aptidão de armazenamento; um conjunto de operadores para cálculos com matrizes; uma grande coleção coerente e integrada de ferramentas intermediárias para análise dos dados; facilidades gráficas para avaliação dos dados e apresentação direta no computador ou em cópia impressa; uma linguagem de programação bem desenvolvida, simples e eficaz (chamada ‘S’), que inclui condições, loops, funções recursivas definidas pelo usuário e aptidões para entrada e saída de dados. O programa R é um meio para se desenvolver novos métodos de análise de dados de forma interativa.

Inicialmente, para fins de detecção e monitoramento de mudanças climáticas, foi criado o programa ClimDex. Tal software é baseado no Microsoft Excel e fornece um fácil pacote para cálculo de indicadores de extremos climáticos. Este programa foi desenvolvido por Byron Gleason do *National Climatic Data Center (NCDC)* da *National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA)* e tem sido utilizado em workshops sobre índices climáticos desde 2001.

O objetivo inicial era colocar o ClimDex num ambiente que não dependesse de um sistema operacional específico. O programa R foi então usado como plataforma, já que o mesmo é livre, mas ao mesmo tempo é um software muito robusto e poderoso para gráficos e

análises estatísticas. Tal programa pode ser executado tanto em ambiente Unix quanto Windows. Em 2003, foi descoberto que o método utilizado pelo ClimDex e outros programas para calcular indicadores de temperatura baseados em percentis resultava em séries não homogêneas dos índices. Uma solução para este problema seria o procedimento “*bootstrap*”, impossível de se implementar em um ambiente Excel. Isto tornou ainda mais urgente a necessidade de se desenvolver este pacote baseado no software R.

Assim foi desenvolvido o software RCLimdex (Zhang e Yang, 2004), que é projetado para fornecer uma interface amigável para o cálculo de indicadores de extremos climáticos (Figura 4.4) e foi aperfeiçoado pelo Serviço Meteorológico Canadense. Tal programa calcula os índices básicos recomendados pelo ETCCDMI, disponível no sítio <http://cccma.seos.uvic.ca/ETCCDMI/index.shtml>, assim como também outros indicadores de precipitação e temperatura com limites definidos pelo usuário.

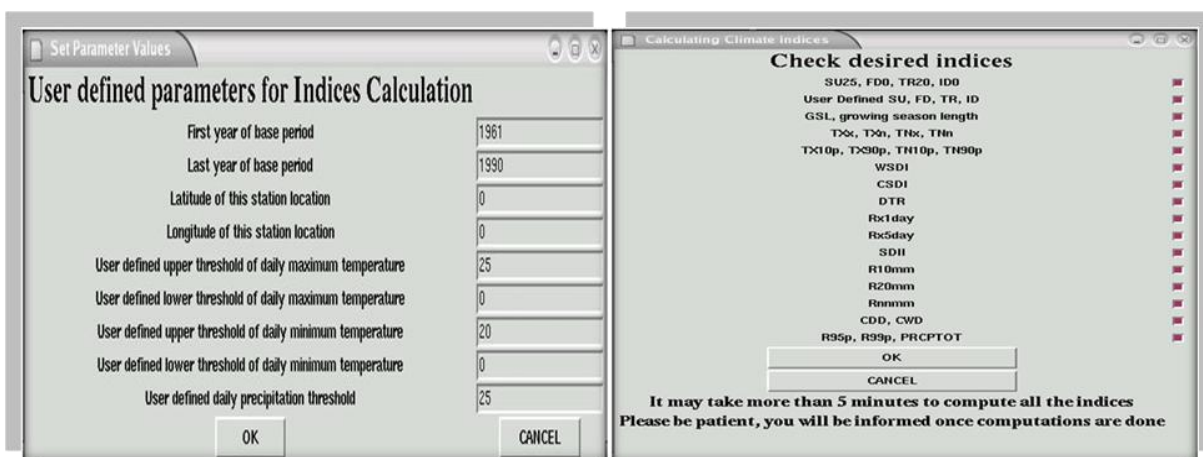


Figura 4.4 – Interface do software RCLimDex.

Um dos principais objetivos da construção de indicadores de extremos climáticos é a investigação de possíveis alterações climáticas. Isto exige que os índices sejam homogeneizados. A homogeneização dos dados foi planejada, mas não implementada nesta versão. O RCLimDex inclui atualmente apenas um procedimento simples de controle de qualidade de dados que foi fornecido pelo ClimDex, sendo necessário que os dados tenham um controle de qualidade antes dos indicadores serem calculados.

Os indicadores podem ser divididos em 5 diferentes categorias:

- a) Índices baseados em percentis, incluindo a ocorrência anual de noites frias (TN10p), noites quentes (TN90p), dias frios (TX10p), dias quentes (TX90p), chuvas fortes

(R95p) e chuvas intensas (R99p); todos os indicadores associados a percentis foram calculados com base numa climatologia de 1961-1990;

- b) Índices absolutos que representam os valores máximo e mínimo anuais. Eles incluem a maior temperatura máxima anual (TXx), maior temperatura mínima anual (TNx), menor temperatura máxima anual (TXn), menor temperatura mínima anual (TNn), máxima precipitação anual em 1 dia (RX1day) e máxima precipitação anual em 5 dias consecutivos (RX5day);
- c) Índices em que os limiares são definidos pelo número de dias em que a temperatura ou a precipitação ficaram abaixo ou acima de um valor fixo, incluindo a ocorrência anual de dias com temperatura máxima acima de 25°C (SU25), temperatura mínima acima de 20°C (TR20) e número de dias no ano com precipitação acima de 30 mm (R30mm);
- d) Índices com duração definida por períodos excessivos de calor, frio, chuva ou seca. Eles incluem a duração de ondas de calor (WSDI), ondas de frio (CSDI), períodos úmidos (CDW) e secos (CDD);
- e) Outros índices incluem a precipitação anual total (PRCPTOT), distribuição média da precipitação anual total (SDII), temperaturas mínima (TMINmean) e máxima (TMAXmean) anuais médias e a amplitude térmica anual média (DTR).

Tabela 4.3 – Índices de extremos climáticos de precipitação calculados e analisados neste trabalho.

Indicador - Precipitação	<i>Definição</i>	<i>Unidade</i>
CDD	Número máximo de dias secos consecutivos no ano (PRCP < 1 mm)	dias
CWD	Número máximo de dias úmidos consecutivos no ano (PRCP >= 1 mm)	dias
PRCPTOT	Precipitação anual total	mm
R30mm	Número de dias no ano com PRCP >= 30 mm	dias
R95p	Precipitação anual total dos dias em que PRCP > percentil 95	mm
R99p	Precipitação anual total dos dias em que PRCP > percentil 99	mm
RX1day	Máxima precipitação anual em 1 dia	mm
RX5day	Máxima precipitação anual em 5 dias consecutivos	mm
SDII	Distribuição média da precipitação anual total (PRCPTOT / número de dias no ano com PRCP >= 1 mm)	mm/dia

Tabela 4.4 – Índices de extremos climáticos de temperatura mínima calculados e analisados neste estudo.

Indicador – Temperatura Mínima	<i>Definição</i>	<i>Unidade</i>
CSDI	Número máximo de dias consecutivos no ano com TN < percentil 10	dias
TMINmean	Temperatura mínima anual média	°C
TN10p	Porcentagem anual de dias em que TN < percentil 10	%
TN90p	Porcentagem anual de dias em que TN > percentil 90	%
TNn	Menor temperatura mínima anual	°C
TNx	Maior temperatura mínima anual	°C
TR20	Número de dias no ano em que TN > 20°C	dias

Tabela 4.5 – Índices de extremos climáticos de temperatura máxima calculados e analisados neste trabalho.

Indicador – Temperatura Máxima	<i>Definição</i>	<i>Unidade</i>
WSDI	Número máximo de dias consecutivos no ano com TX > percentil 90	dias
TMAXmean	Temperatura máxima anual média	°C
TX10p	Porcentagem anual de dias em que TX < percentil 10	%
TX90p	Porcentagem anual de dias em que TX > percentil 90	%
TXn	Menor temperatura máxima anual	°C
TXx	Maior temperatura máxima anual	°C
SU25	Número de dias no ano em que TX > 25°C	dias
DTR	Amplitude anual média da temperatura diurna	°C

4.3.1 Análises das Séries de Indicadores Climáticos geradas pelo RCLimdex

Como dito anteriormente, os totais pluviométricos diários e temperaturas mínima e máxima diárias (do Alto da Boa Vista e de Santa Cruz) e simulados (pelo modelo Eta-HadCM3) serviram como insumo para o cálculo de cada um dos índices de extremos climáticos anuais pelo software RCLimDex, apresentados nas Tabelas 4.3 a 4.5. Os testes estatísticos de Mann-Kendall e Curvatura de Sen foram aplicados a cada uma das novas séries geradas pelo RCLimdex, como será visto na seção 4.4.

Para as saídas do modelo Eta-HadCM3 no clima presente verificou-se que as quatro séries (relativas aos membros CNTRL, LOW, MIDI e HIGH) de cada indicador apresentavam valores muito próximos e as mesmas tendências. Desta forma decidiu-se apresentar nos gráficos do Capítulo 5 do clima presente apenas as análises da série formada pela média do conjunto (*ensemble*), calculando-se apenas um valor de tendência para esta nova série gerada.

Para as saídas do modelo regional no clima futuro foram analisadas também as séries média dos índices para a precipitação, por não haver muita dispersão entre os membros, e separadamente para os quatro membros do conjunto no caso dos indicadores relacionados às temperaturas mínima e máxima.

Em todos os gráficos apresentados no Capítulo 5, as curvas de regressão (linhas de tendências lineares) são utilizadas somente para efeito de visualização.

4.4 Testes Estatísticos

Para a avaliação de tendências climáticas foi utilizado o teste estatístico não paramétrico de Mann-Kendall (Sneyers, 1975). Este teste considera que, na hipótese de estabilidade de uma série temporal, a sucessão de valores ocorre de forma independente e a distribuição de probabilidade deve permanecer sempre a mesma (série aleatória simples). O teste de Mann-Kendall é o método mais apropriado para analisar a significância de possíveis mudanças climáticas em séries climatológicas (Goossens e Berger, 1986).

Um dos benefícios deste teste é que os dados não precisam pertencer a uma distribuição particular. Outro benefício é que seu resultado é menos afetado por valores *outliers*, pois seu cálculo é baseado no sinal das diferenças, e não diretamente nos valores da variável. As fórmulas para o cálculo do teste estatístico de Mann-Kendall são apresentadas nas Equações 4.1, 4.2 e 4.3.

$$Z = \frac{S+u}{\sqrt{V(S)}} \quad (\text{Equação 4.1})$$

onde: $u = -1$ se $S > 0$, $u = 0$ se $S = 0$ e $u = +1$ se $S < 0$

sendo:

$$S = \sum_{k=1}^{n-1} \sum_{j=k+1}^n \text{sig}(x_j - x_k) \quad (\text{Equação 4.2})$$

$$\text{onde: } \text{sig}(x_j - x_k) = \begin{cases} 1 & \text{se } x_j - x_k > 0 \\ 0 & \text{se } x_j - x_k = 0 \\ -1 & \text{se } x_j - x_k < 0 \end{cases}$$

$$V(S) = \frac{n(n-1)(2n+5)S^2 + 3n(n-1)}{18} \quad (\text{Equação 4.3})$$

A tendência é indicada pelo valor de Z , onde um Z positivo significa uma tendência crescente e um Z negativo indica uma tendência decrescente. Se a probabilidade p do teste de Mann-Kendall for menor que o nível de significância α , uma tendência estatisticamente

expressiva existe, enquanto que um valor de p maior que α confirma uma tendência não significativa. Para amostras onde não há tendência, o valor de Z é próximo de 0 e o valor de p é próximo de α .

Um método não-paramétrico (assumindo uma tendência linear) utilizado para estimar a magnitude de tendência é a Curvatura de Sen (Sen, 1968). Para o cálculo da Curvatura de Sen b (Equação 4.4), computam-se todas as curvaturas de todos os pares de valores usando uma série temporal. Como a Curvatura de Sen é insensível a valores *outliers* e dados ausentes, tal teste é mais rigoroso que a usual curvatura de regressão e provê uma medida realística das tendências numa série temporal.

$$b = \frac{\sum_{j=1}^{n-1} (x_j - x_{j+1})}{\sum_{j=1}^{n-1} (j - (j+1))}$$

(Equação 4.4)

Tanto o teste estatístico de Mann-Kendall quanto a Curvatura de Sen foram calculados utilizando-se o software MatLab®. Para o modelo Eta-HadCM3, os testes foram computados separadamente para os climas presente e futuro.

5. RESULTADOS

Neste capítulo apresenta-se uma análise detalhada do comportamento dos indicadores de extremos climáticos obtidos a partir de dados observacionais e das simulações do modelo Eta-HadCM3 para o Rio de Janeiro. As tendências dos índices, suas magnitudes e significâncias estatísticas são analisadas separadamente para o clima presente (1961-1990) e para o clima futuro (2011-2099).

5.1 Clima Presente (1961 – 1990)

Nesta seção são apresentados os resultados referentes às tendências presentes associadas aos índices de extremos climáticos no município do Rio de Janeiro, de acordo com os dados observacionais de duas estações meteorológicas convencionais do INMET (Alto da Boa Vista e Santa Cruz) e também com base nas simulações do *ensemble* (4 membros) do modelo Eta-HadCM3.

5.1.1 Precipitação

Os totais pluviométricos anuais (PRCPTOT) nas estações meteorológicas do Alto da Boa Vista e de Santa Cruz e no modelo Eta-HadCM3 são apresentados na Figura 5.1. Nota-se grande diferença nos valores de PRCPTOT do Alto da Boa Vista em comparação ao de Santa Cruz, como mencionado no Capítulo 3. Até mesmo os anos mais secos no Alto da Boa Vista apresentam precipitações totais superiores aos maiores valores registrados em Santa Cruz. Observa-se também uma elevada variabilidade interanual nas séries de dados observacionais, principalmente no Alto da Boa Vista. Nesta localidade, o primeiro pico ressaltado na série de dados corresponde ao ano de 1967, e o evento mais intenso daquele ano foi responsável por uma catástrofe na cidade do Rio de Janeiro, com mais de 200 mortos (Jornal do Brasil, 24/01/1967), totalizando-se 328,4 mm de chuvas em 3 dias (23 a 25/01/1967). No segundo pico (ano de 1998), um evento de chuvas severas foi provocado pela aproximação e passagem de um sistema frontal, com formação de diversos SCMs, gerando chuvas que atingiram em apenas dois dias (08 e 09/01/1998) 298,2 mm no Alto da Boa Vista e 349,7 mm no posto pluviométrico da Geo-Rio na Tijuca (Dereczynski *et al.*, 2009).

Considerando-se os dados de precipitação de 30 anos no Alto da Boa Vista e de 33 anos em Santa Cruz, conforme a Curvatura de Sen, as tendências mostraram magnitudes de +7,83 mm/ano e +2,54 mm/ano, respectivamente, ambas não significativas ao nível de

confiança de 5%. O modelo Eta não captura bem tal configuração e aponta para uma diminuição (-6,23 mm/ano) no total pluviométrico anual.

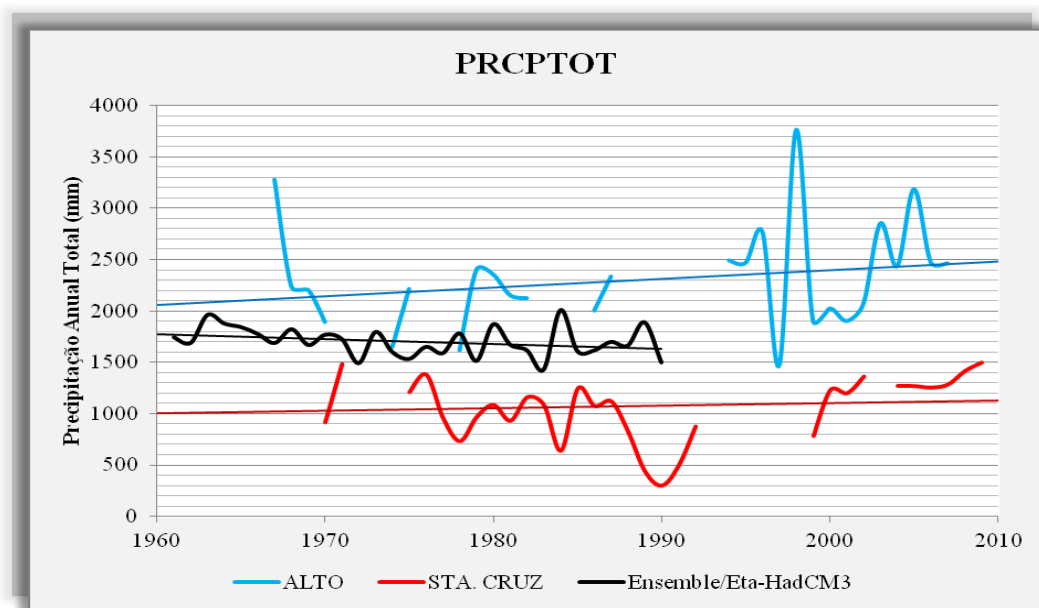


Figura 5.1 – Gráfico de tendências observadas no indicador de extremo climático de precipitação PRCPTOT (precipitação anual total) para as estações do INMET e *ensemble* do modelo Eta-HadCM3, referentes à cidade do Rio de Janeiro.

Os resultados dos poucos trabalhos para o Estado do Rio de Janeiro indicam tendências negativas nos totais pluviométricos anuais: Obregón e Marengo (2007) para Nova Friburgo no período de 1951 a 2001; Figueiró (2005) para Resende no período de 1932 a 2000; e mesmo Figueiró e Coellho Netto (2003) para Estação Capela Mayrink, no período de 1977 a 2002, localizada também no Alto da Boa Vista. Isto demonstra que o comportamento desta variável no tempo e no espaço é bastante sensível às condições locais, pois duas estações muito próximas, contudo sujeitas à diferentes aspectos de circulação em microescala, apresentam tendências opostas para o índice PRCPTOT.

No indicador R30mm (Figura 5.2), que ilustra o número de dias no ano em que o total pluviométrico diário ficou acima de 30 mm, verifica-se a mesma discrepância observada no índice PRCPTOT entre as duas estações, ou seja, valores muito maiores no Alto da Boa Vista do que em Santa Cruz. Tais valores oscilam entre 16 e 39 dias/ano no Alto da Boa Vista, enquanto que em Santa Cruz ocorrem valores entre 0 e 14 dias/ano. A Curvatura de Sen aponta para tendências com magnitudes não expressivas em torno de +0,05 dia/ano para ambas as estações. O modelo não consegue reproduzir estas mesmas características, indicando uma tendência negativa (-0,06 dia/ano).

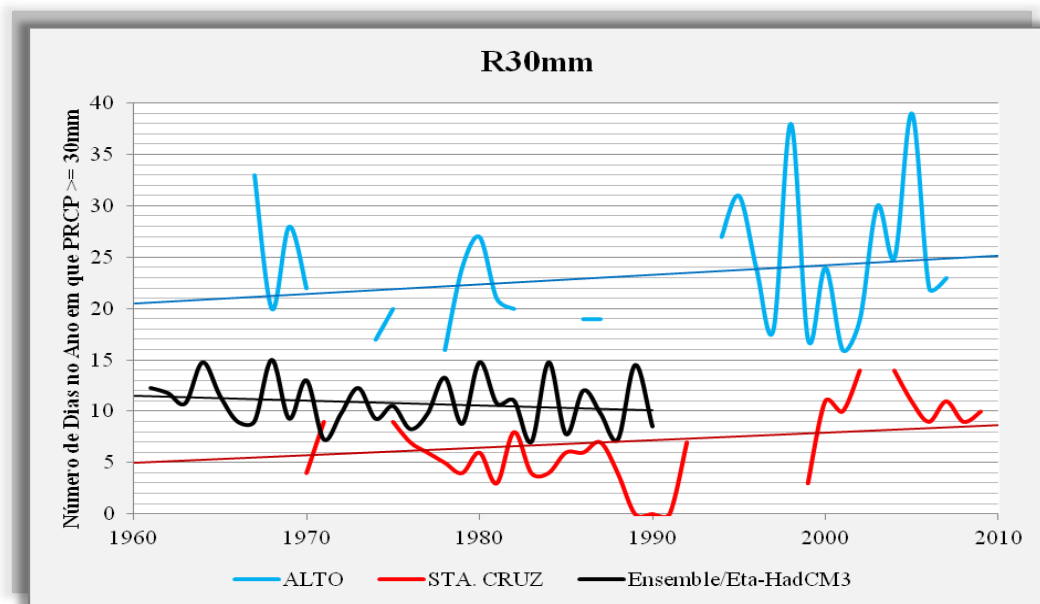


Figura 5.2 – Gráfico de tendências observadas no índice de extremo climático de precipitação R30mm para as estações do INMET e *ensemble* do modelo Eta-HadCM3, referentes ao município do Rio de Janeiro.

Com relação à frequência de eventos extremos, existe consenso entre os resultados encontrados neste trabalho e outras pesquisas para o Rio de Janeiro. Em Coelho Netto *et al.* (2008) ressalta-se que a frequência de ocorrência das chuvas diárias extremas (>100 mm/dia) se elevou na Estação Capela Mayrink no período de 1977 a 2002 e também na estação de Resende, onde a série é mais longa (1937-2000). Isto confirma que os eventos de chuvas moderadas a fortes estão se tornando mais comuns a cada ano.

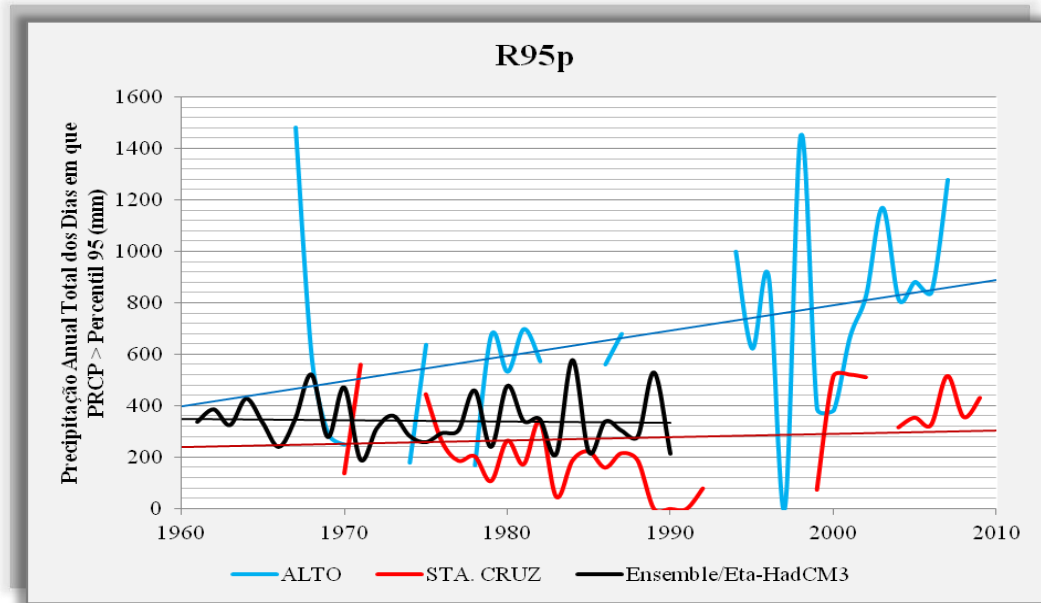
O índice R95p (Figura 5.3a), que mostra o total pluviométrico anual dos dias em que a precipitação ficou acima do percentil 95 (chuvas fortes), apresenta um aumento significativo para o Alto da Boa Vista com tendência de aumento de +11,77 mm/ano, entretanto Santa Cruz não mostra tendência alguma, segundo o teste da Curvatura de Sen. O mesmo comportamento é observado quanto ao indicador R99p (Figura 5.3b), que ilustra o total pluviométrico anual dos dias em que a precipitação ficou acima do percentil 99 (chuvas intensas), com uma taxa de +3,40 mm/ano para o Alto da Boa Vista, porém com tendência não expressiva de acordo com o teste de Mann-Kendall. As configurações do *ensemble* do modelo Eta-HadCM3 mostram tendências de -1,63 mm/ano para R95p e +0,05 mm/ano para R99p, conforme a Curvatura de Sen. A Tabela 5.1 apresenta os valores referentes aos percentis 95 e 99 associados aos totais pluviométricos diários das estações do Alto da Boa Vista e de Santa Cruz e do modelo Eta no período climatológico de 1961-1990. Nota-se que os limiares do Alto da Boa Vista são praticamente o dobro dos demais pontos, ressaltando a

importância de se analisar individualmente as tendências de extremos de precipitação para cada região.

Tabela 5.1 – Valores referentes aos percentis 95 e 99 associados aos totais pluviométricos diários das estações do Alto da Boa Vista e de Santa Cruz e do modelo Eta-HadCM3 no período climatológico de 1961-1990.

Precipitação (mm)	Alto da Boa Vista	Santa Cruz	Eta-HadCM3 (Ensemble)
Percentil 95	36,1	17,8	23,7
Percentil 99	82,2	41,6	40,6

(a)



(b)

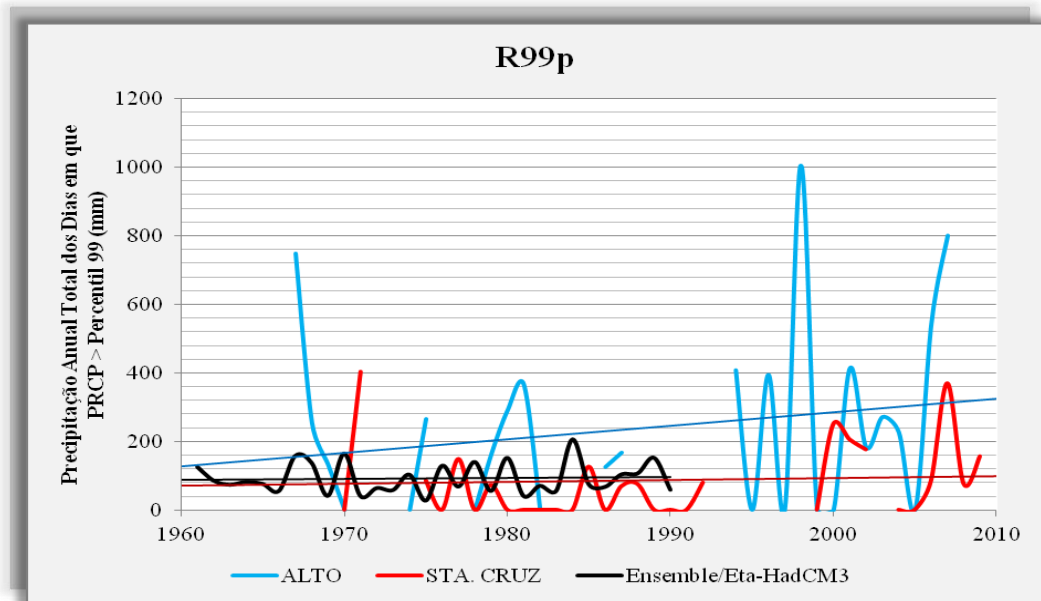


Figura 5.3 – Gráficos de tendências observadas nos indicadores de extremos climáticos de precipitação (a) R95p (chuvas fortes) e (b) R99p (chuvas intensas) para as estações do INMET e *ensemble* do modelo Eta-HadCM3, referentes à cidade do Rio de Janeiro.

O indicador RX1day (Figura 5.4a), que apresenta a máxima precipitação anual em um dia (chuvas extremas), mostra tendências opostas e não significativas nas estações do Alto da Boa Vista (+1,04 mm/ano) e Santa Cruz (-0,86 mm/ano). Uma situação idêntica é ilustrada pelo índice RX5day (Figura 5.4b), que apresenta a máxima precipitação anual em cinco dias consecutivos (chuvas severas), com uma taxa de +1,54 mm/ano para o Alto da Boa Vista e -0,47 mm/ano para Santa Cruz, de acordo com a Curvatura de Sen. O modelo Eta aponta para uma magnitude de +0,12 mm/ano para RX1day e -0,11 mm/ano para RX5day.

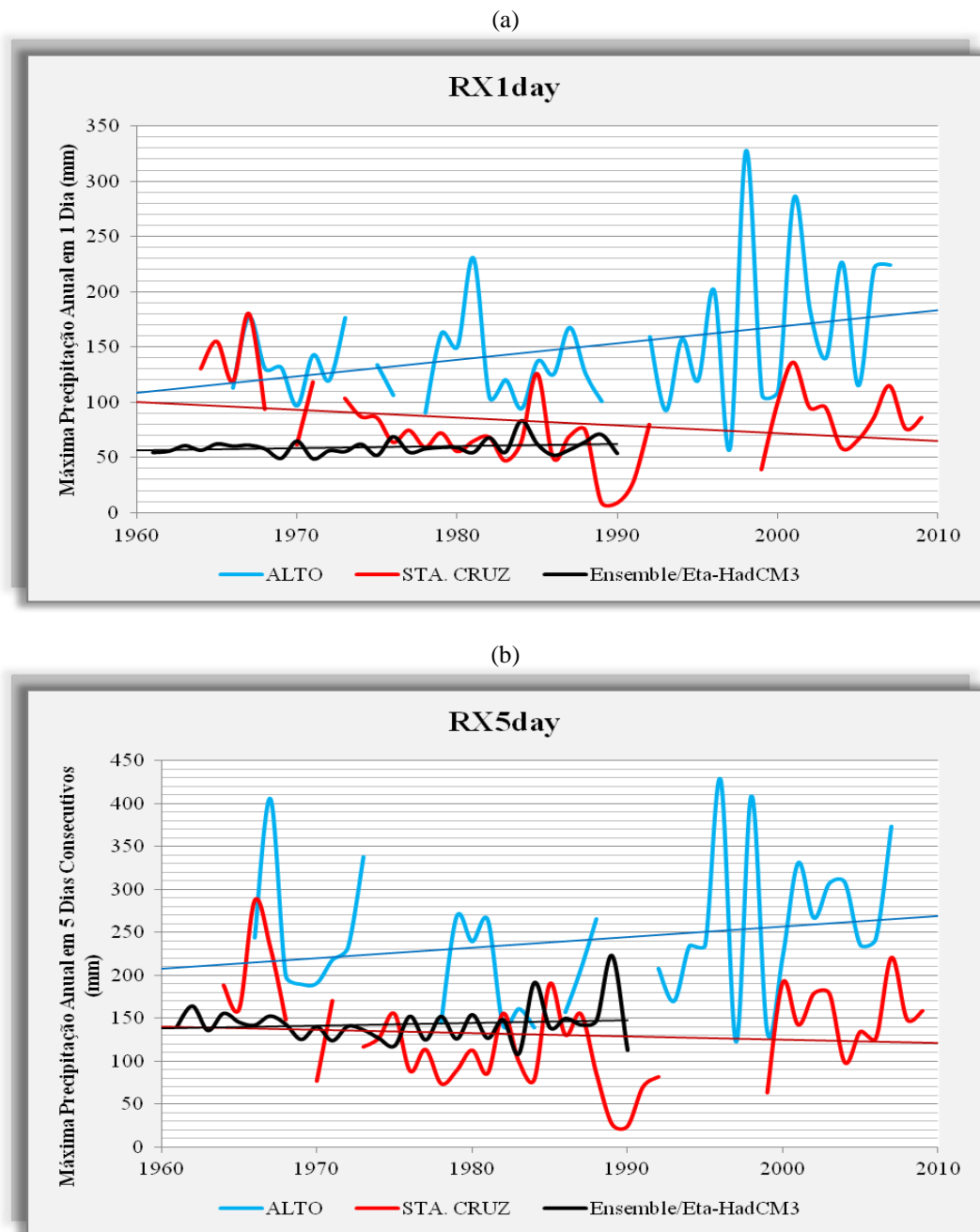


Figura 5.4 – Gráficos de tendências observadas nos índices de extremos climáticos de precipitação (a) RX1day (chuvas extremas) e (b) RX5day (chuvas severas) para as estações do INMET e *ensemble* do modelo Eta-HadCM3, referentes ao município do Rio de Janeiro.

O índice SDII (Figura 5.5), que apresenta o valor de PRCPTOT dividido pelo número de dias úmidos no ano ($PRCP > 1$ mm), indica pouquíssima tendência com grandeza de $+0,01$ mm/dia ao ano para ambas as estações, e o modelo também exibe fraca tendência, porém negativa ($-0,01$ mm/dia ao ano). Mais uma vez, a estação do Alto da Boa Vista se destaca com seus resultados mais elevados, enquanto que os valores de Santa Cruz são próximos ao *ensemble* do modelo Eta-HadCM3, que apresenta a mesma magnitude da estação.

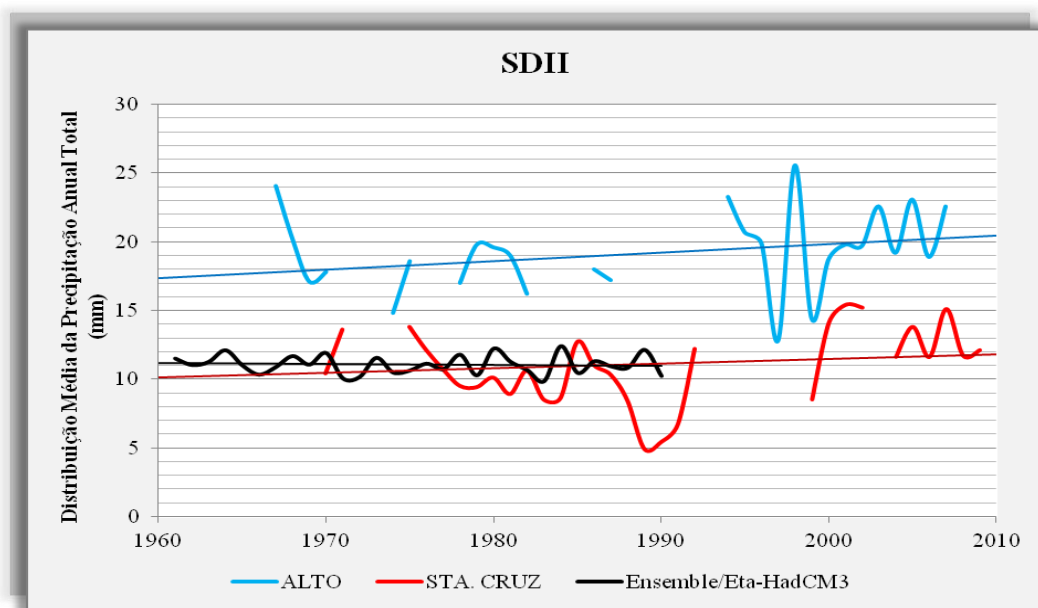


Figura 5.5 – Gráfico de tendências observadas no indicador de extremo climático de precipitação SDII para as estações do INMET e *ensemble* do modelo Eta-HadCM3, referentes à cidade do Rio de Janeiro.

O indicador CDD (Figura 5.6a), que ilustra o número máximo de dias secos consecutivos (total pluviométrico diário menor que 1 mm), está com tendência nula no Alto da Boa Vista e com magnitude de $+0,08$ dia/ano em Santa Cruz, segundo o teste da Curvatura de Sen. O *ensemble* do modelo Eta-HadCM3 apresenta uma leve tendência de elevação, com magnitude de $+0,02$ dia/ano. Nota-se uma elevada variabilidade interanual em Santa Cruz, onde CDD chega a 59 dias (ocorrido no período de 24/01 a 23/03/1990). Em relação ao índice CWD (Figura 5.6b), que mostra o número máximo de dias úmidos consecutivos (total pluviométrico diário maior que 1 mm), não há tendências para ambas as estações, inclusive para o modelo. Observa-se que Santa Cruz possui períodos secos mais longos que o Alto da Boa Vista, enquanto que o inverso ocorre em relação aos períodos úmidos. Este aspecto pode estar associado com características da topografia e com a proximidade do oceano, onde regiões de maior altitude e a sotavento das montanhas recebem chuvas com maior frequência.

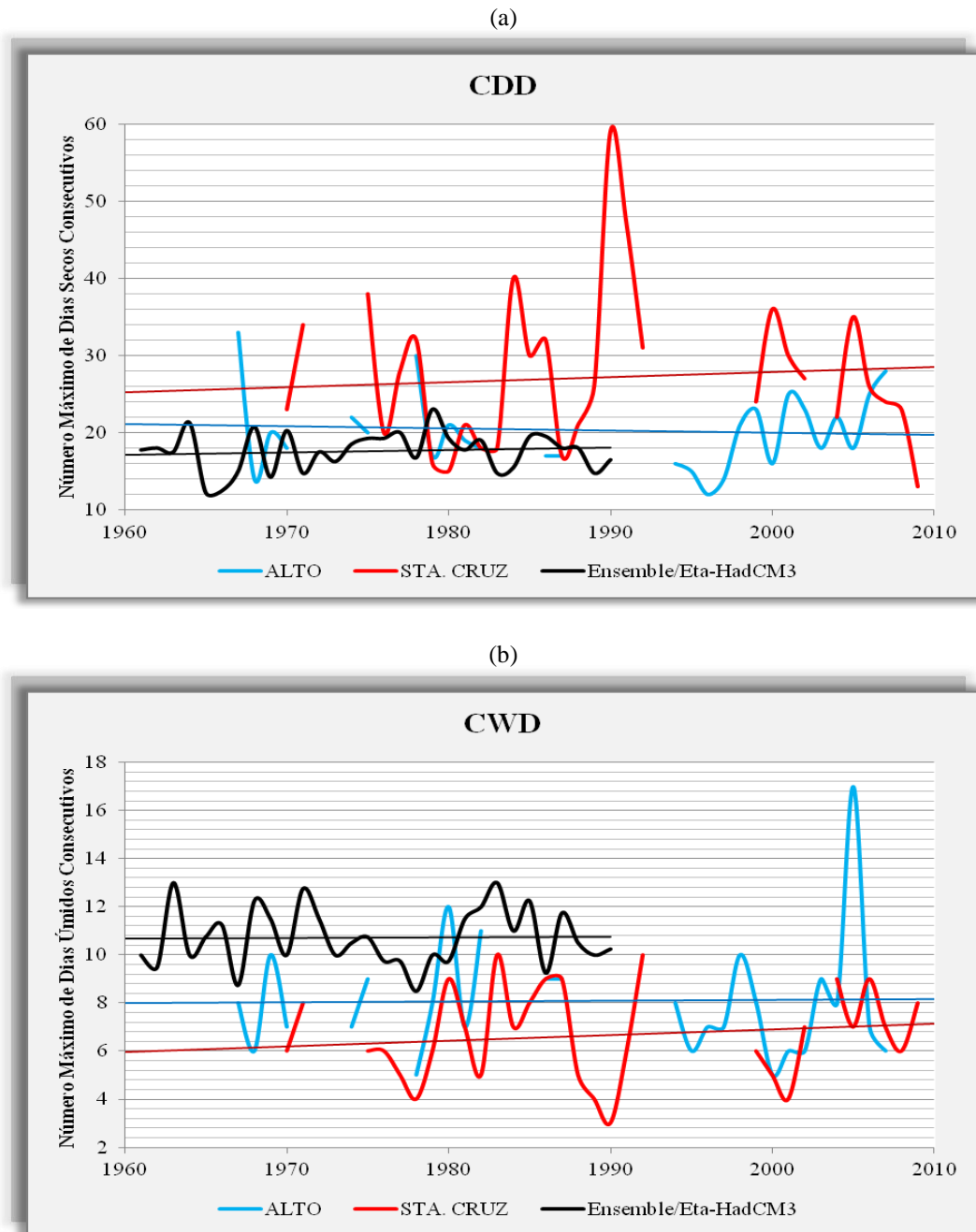


Figura 5.6 – Gráficos de tendências observadas nos índices de extremos climáticos de precipitação (a) CDD (períodos secos) e (b) CWD (períodos úmidos) para as estações do INMET e *ensemble* do modelo Eta-HadCM3, referentes ao município do Rio de Janeiro.

As simulações do modelo regional, com 40 km de resolução horizontal, não conseguem reproduzir a elevada variabilidade interanual dos extremos nos índices associados à precipitação. Nos modelos globais, e mesmo nos regionais, a precipitação é mediada na área e, portanto, a magnitude dos extremos é reduzida em relação aos valores pontuais observados nas estações (Haylock *et al.*, 2006). Apesar disso, para a maior parte dos índices calculados, a

magnitude dos indicadores ficou limitada entre os valores observados no Alto da Boa Vista e em Santa Cruz, o que aumenta a confiança na utilização de suas projeções futuras. Com relação às tendências simuladas, apesar da maior parte delas apresentar sinais opostos às tendências observadas, deve-se ressaltar que diferenças existem até mesmo em séries de dados observacionais de estações relativamente próximas, como foi o caso de PRCPTOT no Alto da Boa Vista e Capela Mayrink (Figueiró e Coelho Netto, 2003) e também para o caso de RX1day e RX5day, com tendências positivas para Alto da Boa Vista e negativas para Santa Cruz.

A Tabela 5.2 apresenta um sumário das tendências observadas para os indicadores de extremos climáticos relacionados à chuva. Os resultados indicam que o clima no município do Rio de Janeiro está se tornando mais úmido, principalmente na região florestada, com totais pluviométricos anuais em elevação, eventos de chuvas intensas ocorrendo com maior frequência e produzindo maior quantidade de chuvas (apenas na área de floresta). As diferenças encontradas nos indicadores de precipitação no Alto da Boa Vista e em Santa Cruz, com tendências mais marcadas na primeira estação meteorológica do que na segunda, sugere alterações nos padrões de ventos, na circulação das brisas marítima e terrestre, e no transporte de umidade para o interior do município, o que precisa ser investigado com maior detalhe. A tendência no tempo de atuação e na frequência de ocorrência de sistemas frontais, principais responsáveis por eventos de chuvas intensas, também necessita ser investigada.

Tabela 5.2 – Magnitudes dos indicadores de extremos climáticos relacionados à precipitação nas estações meteorológicas do Alto da Boa Vista e de Santa Cruz e no modelo Eta-HadCM3. Os valores em negrito são considerados estatisticamente significativos ao nível de confiança de 5%.

INDICADOR	<i>Alto da Boa Vista</i>	<i>Santa Cruz</i>	<i>Modelo Eta-HadCM3 (Ensemble)</i>
PRCPTOT	↗ + 7,83 mm/ano	↗ + 2,54 mm/ano	↘ - 6,23 mm/ano
R30mm	↗ + 0,07 dia/ano	↗ + 0,03 dia/ano	↘ - 0,06 dia/ano
R95p	↗ + 11,77 mm/ano	Sem tendência	↘ - 1,63 mm/ano
R99p	↗ + 3,40 mm/ano	Sem tendência	↗ + 0,05 mm/ano
RX1day	↗ + 1,04 mm/ano	↘ - 0,86 mm/ano	↗ + 0,12 mm/ano
RX5day	↗ + 1,54 mm/ano	↘ - 0,47 mm/ano	↘ - 0,11 mm/ano
SDII	↗ + 0,01 (mm/dia)/ano	↗ + 0,01 (mm/dia)/ano	↘ - 0,01 (mm/dia)/ano
CDD	Sem tendência	↗ + 0,08 dia/ano	↗ + 0,02 dia/ano
CWD	Sem tendência	Sem tendência	Sem tendência

5.1.2 Temperatura Mínima

O índice TMINmean (Figura 5.7), que retrata a temperatura mínima anual média, apresenta um aumento expressivo para Santa Cruz de $+0,01^{\circ}\text{C}/\text{ano}$. Para o modelo Eta, também há uma tendência significativa de $+0,03^{\circ}\text{C}/\text{ano}$. Contudo, não há tendência alguma constatada na estação do Alto da Boa Vista. Nota-se, como ressaltado no Capítulo 3, que os valores de temperatura são menores na estação do Alto da Boa Vista do que em Santa Cruz, em função da primeira estar situada em uma área elevada e florestada, enquanto que a última está localizada em uma região mais baixa e urbanizada.

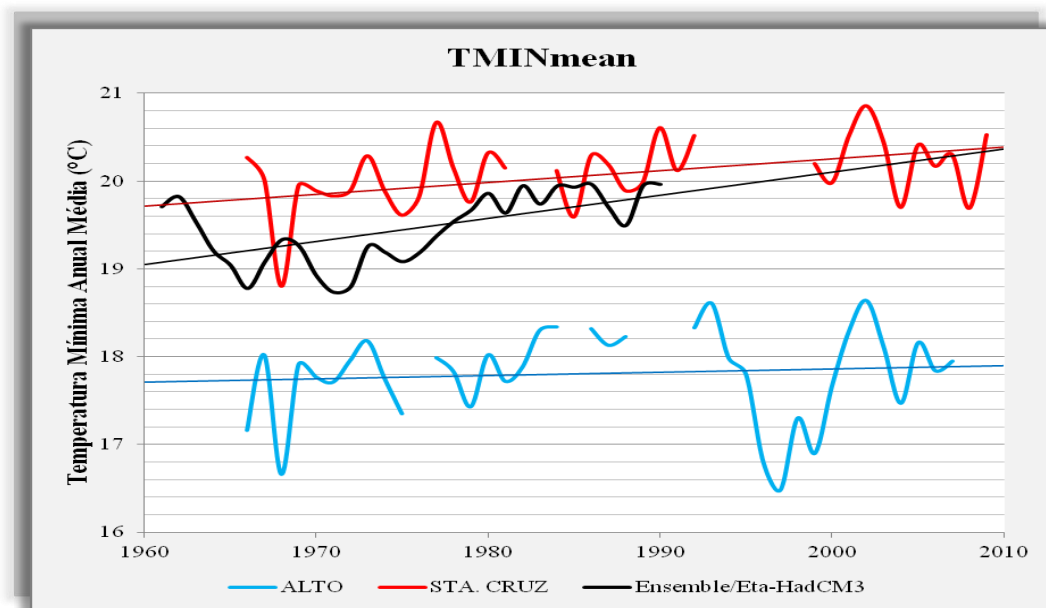


Figura 5.7 – Gráfico de tendências observadas no indicador TMINmean para as estações do INMET e *ensemble* do modelo Eta-HadCM3, referentes à cidade do Rio de Janeiro.

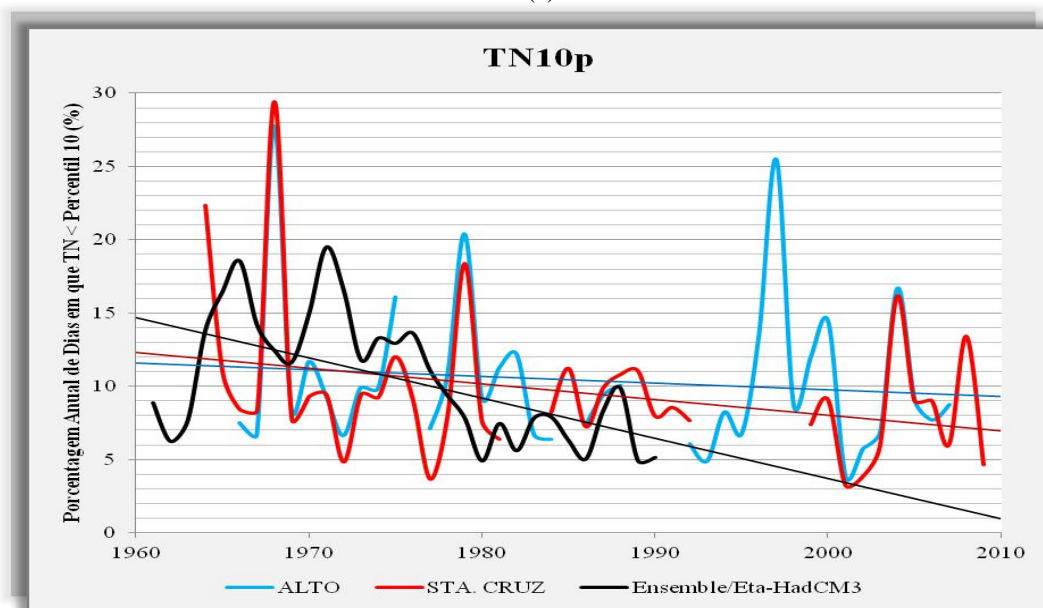
O indicador TN10p (Figura 5.8a), que mostra a porcentagem de dias no ano em que a temperatura mínima ficou abaixo do percentil 10 (noites frias), apresenta tendências de diminuição de $-0,03\%/ano$ para o Alto da Boa Vista e de $-0,06\%/ano$ para Santa Cruz, entretanto não são significativas ao nível de confiança de 5%, segundo o teste estatístico de Mann-Kendall. Esta característica é bem representada pelo modelo, que evidencia uma taxa de $-0,35\%/ano$ para tal indicador, sendo esta expressiva ao nível de 5%. O índice TN90p (Figura 5.8b), que ilustra a porcentagem de dias no ano em que a temperatura mínima ficou acima do percentil 90 (noites quentes), mostra tendências de elevação de $+0,03\%/ano$ para o Alto da Boa Vista e de $+0,17\%/ano$ para Santa Cruz, sendo que a magnitude desta última estação foi classificada como sendo significativa. Uma grandeza de $+0,32\%/ano$ foi verificada pelo modelo, sendo a mesma também expressiva pelo teste estatístico. A Tabela 5.3 apresenta

os valores referentes aos percentis 10 e 90 associados aos dados diários de temperatura mínima das estações do Alto da Boa Vista e de Santa Cruz e do modelo Eta no período climatológico de 1961-1990. Nota-se que os limiares do Alto da Boa Vista são menores que os de Santa Cruz, com uma diferença de cerca de 2°C e que o modelo regional apresenta valores mais próximos aos encontrados para Santa Cruz do que para o Alto da Boa Vista.

Tabela 5.3 – Valores referentes aos percentis 10 e 90 associados aos dados diários de temperatura mínima das estações do Alto da Boa Vista e de Santa Cruz e do modelo Eta-HadCM3 no período climatológico de 1961-1990.

Temp. Mínima (°C)	<i>Alto da Boa Vista</i>	<i>Santa Cruz</i>	<i>Eta-HadCM3 (Ensemble)</i>
Percentil 10	14,0	16,2	16,4
Percentil 90	21,5	23,4	22,6

(a)



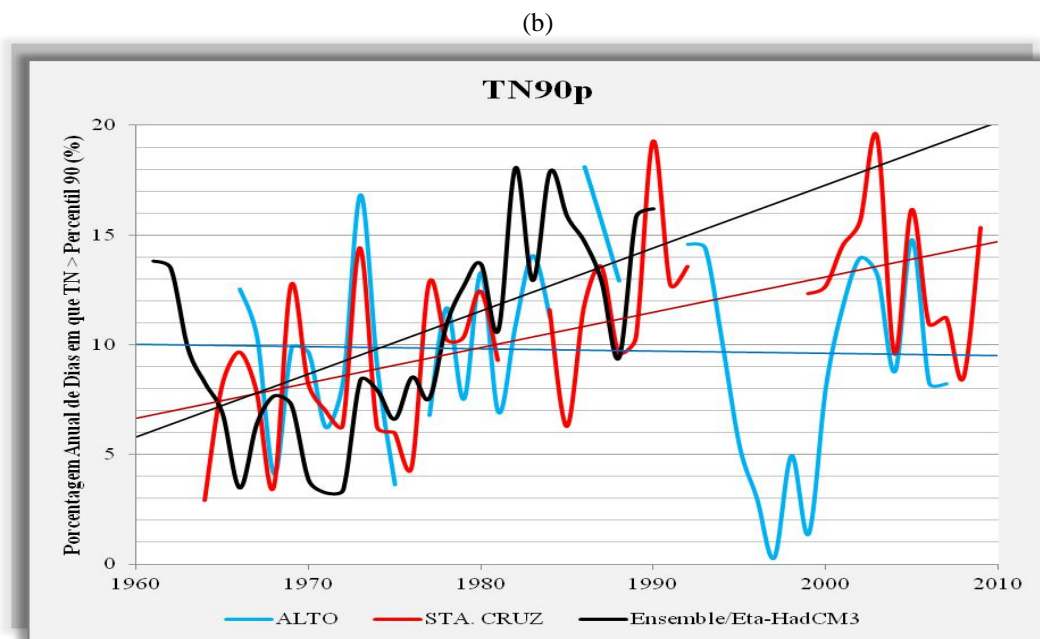


Figura 5.8 – Gráficos de tendências observadas nos índices de extremos climáticos de temperatura mínima (a) TN10p (noites frias) e (b) TN90p (noites quentes) para as estações do INMET e *ensemble* do modelo Eta-HadCM3, referentes ao município do Rio de Janeiro.

O indicador CSDI (Figura 5.9), que representa o número máximo de dias consecutivos no ano em que a temperatura mínima ficou abaixo do percentil 10 (ondas de frio), mostra tendência nula para ambas as estações meteorológicas, conforme os testes estatísticos aplicados. Já para o *ensemble* do modelo Eta-HadCM3, há uma tendência não significativa de $-0,06$ dia/ano, de acordo com a Curvatura de Sen.

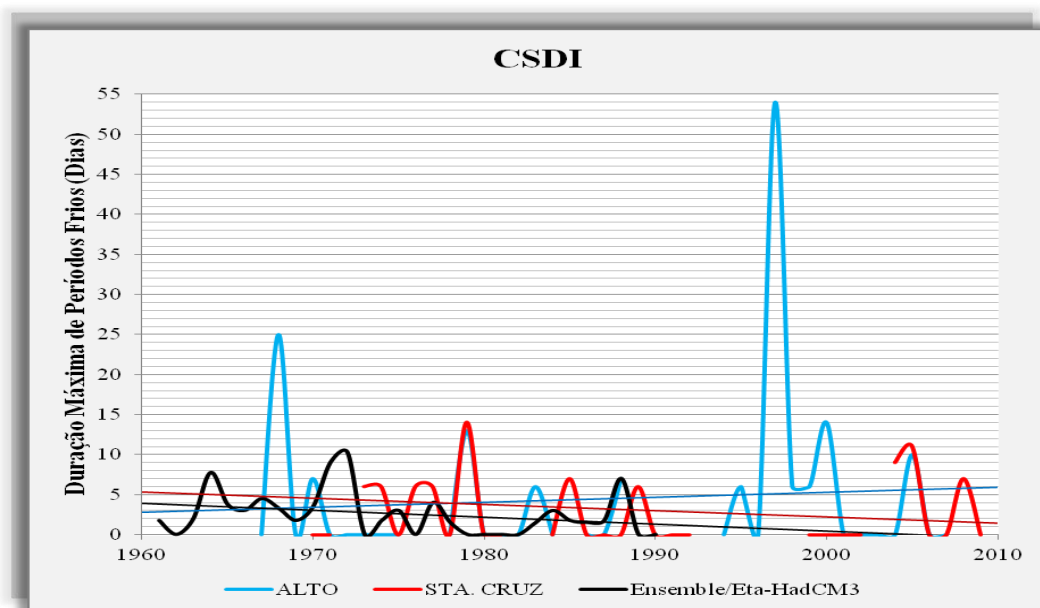
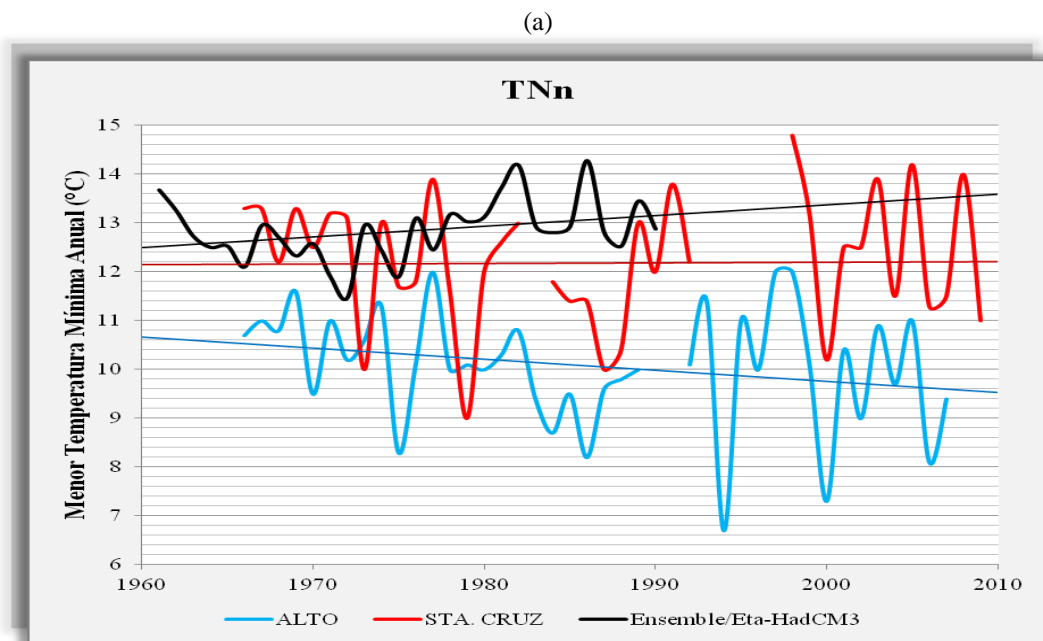


Figura 5.9 – Gráficos de tendências observadas no indicador CSDI (ondas de frio) para as estações do INMET e *ensemble* do modelo Eta-HadCM3, referentes à cidade do Rio de Janeiro.

O índice TNn (Figura 5.10a), que apresenta a menor temperatura mínima anual, mostra tendências de redução para o Alto da Boa Vista ($-0,02^{\circ}\text{C}/\text{ano}$) e Santa Cruz ($-0,01^{\circ}\text{C}/\text{ano}$), contrário ao esperado numa situação de aquecimento. O *ensemble* do modelo Eta-HadCM3 apresenta uma magnitude de $+0,02^{\circ}\text{C}/\text{ano}$. Todas estas tendências não foram classificadas como sendo significativas ao nível de confiança 5%, segundo o teste estatístico de Mann-Kendall. Já o indicador TNx (Figura 5.10b), que mostra a maior temperatura mínima anual, apresenta tendências pequenas e não expressivas com grandezas inversas para as estações meteorológicas observadas. O Alto da Boa Vista aponta para uma redução, enquanto que Santa Cruz indica uma elevação de $+0,01^{\circ}\text{C}/\text{ano}$ para tal índice. O modelo Eta simula um aumento de $+0,04^{\circ}\text{C}/\text{ano}$, que pode ser considerado como sendo significativo pelo teste estatístico.



(b)

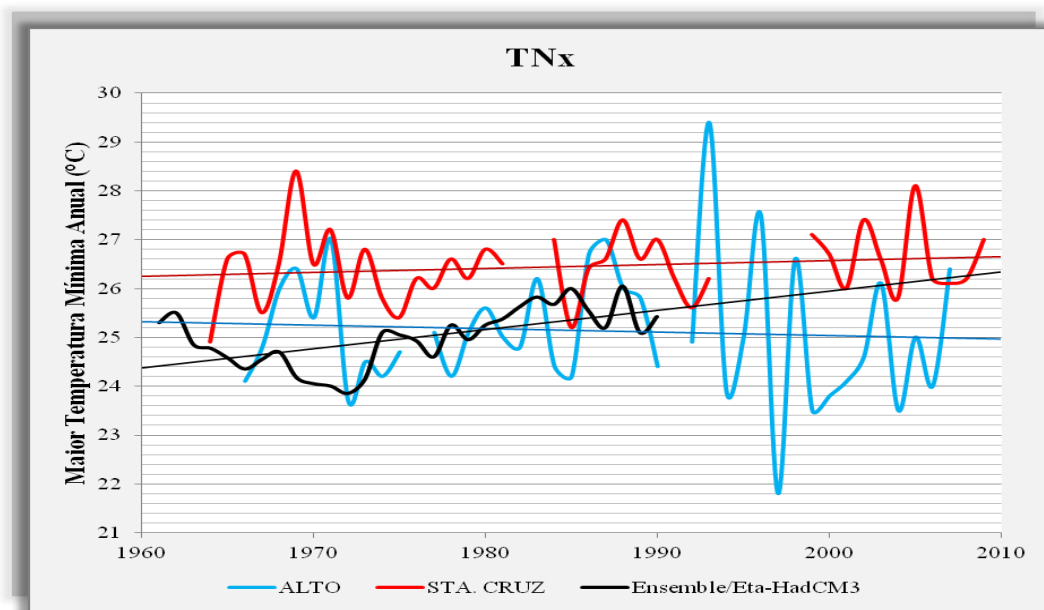


Figura 5.10 – Gráficos de tendências observadas nos índices de extremos climáticos de temperatura mínima (a) TNn e (b) TNx para as estações do INMET e *ensemble* do modelo Eta-HadCM3, referentes ao município do Rio de Janeiro.

O indicador TR20 (Figura 5.11), que exhibe o número de dias no ano em que a temperatura mínima ficou acima de 20°C, aponta para uma tendência de elevação nos três conjuntos de dados, sendo que a taxa é de +0,29 dia/ano para o Alto da Boa Vista, +0,88 dia/ano para Santa Cruz e +1,68 dia/ano para o modelo, sendo estas duas últimas estatisticamente expressivas. Os valores anuais do índice obtido nas simulações estão próximos aos dados da estação meteorológica de Santa Cruz.

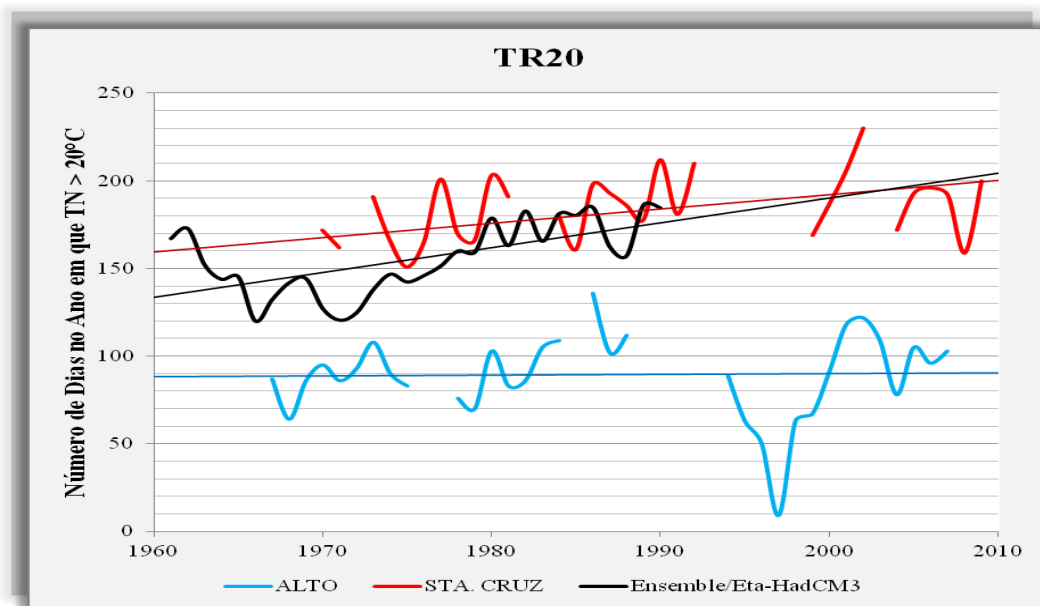


Figura 5.11 – Gráfico de tendências observadas no indicador de extremo climático de temperatura mínima TR20 para as estações do INMET e *ensemble* do modelo Eta-HadCM3, referentes à cidade do Rio de Janeiro.

A Tabela 5.4 apresenta um sumário das tendências observadas para os indicadores de extremos climáticos relacionados à temperatura mínima. Nota-se que as tendências de aquecimento são mais pronunciadas em Santa Cruz do que no Alto da Boa Vista.

Tabela 5.4 – Magnitudes dos indicadores de extremos climáticos relacionados à temperatura mínima nas estações meteorológicas do Alto da Boa Vista e de Santa Cruz e no modelo Eta-HadCM3. Os valores em negrito são considerados estatisticamente significativos ao nível de confiança de 5%.

INDICADOR	<i>Alto da Boa Vista</i>	<i>Santa Cruz</i>	<i>Modelo Eta-HadCM3 (Ensemble)</i>
TMINmean	Sem tendência	↗ + 0,01°C/ano	↗ + 0,03°C/ano
TN10p	↘ - 0,03 %/ano	↘ - 0,06 %/ano	↘ - 0,35 %/ano
TN90p	↗ + 0,03 %/ano	↗ + 0,17 %/ano	↗ + 0,32 %/ano
CSDI	Sem tendência	Sem tendência	↘ - 0,06 dia/ano
TNn	↘ - 0,02°C/ano	↘ - 0,01°C/ano	↗ + 0,02°C/ano
TNx	↘ - 0,01°C/ano	↗ + 0,01°C/ano	↗ + 0,04°C/ano
TR20	↗ + 0,29 dia/ano	↗ + 0,88 dia/ano	↗ + 1,68 dia/ano

5.1.3 Temperatura Máxima

O índice TMAXmean (Figura 5.12), que retrata a temperatura máxima anual média, aponta para uma tendência de elevação bastante expressiva de +0,04°C/ano no Alto da Boa Vista e de +0,03°C/ano para Santa Cruz. Esta característica de aumento é relativamente bem

reproduzida pelo modelo Eta, que indica uma tendência de $+0,01^{\circ}\text{C}/\text{ano}$, porém não significativa ao nível de 5%. Ressalta-se mais uma vez a diferença nos valores de temperatura máxima das duas estações meteorológicas.

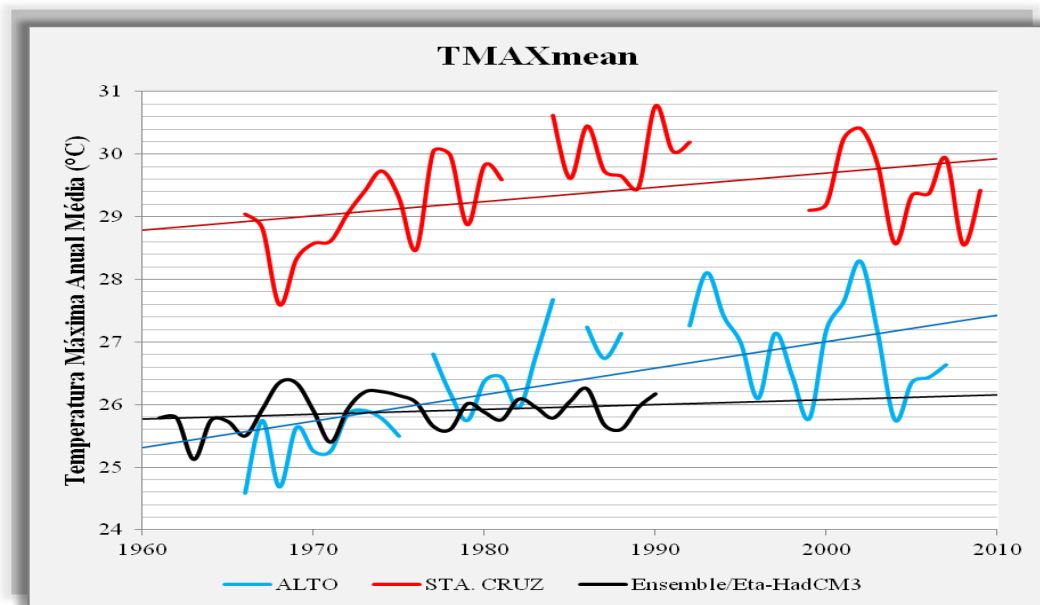


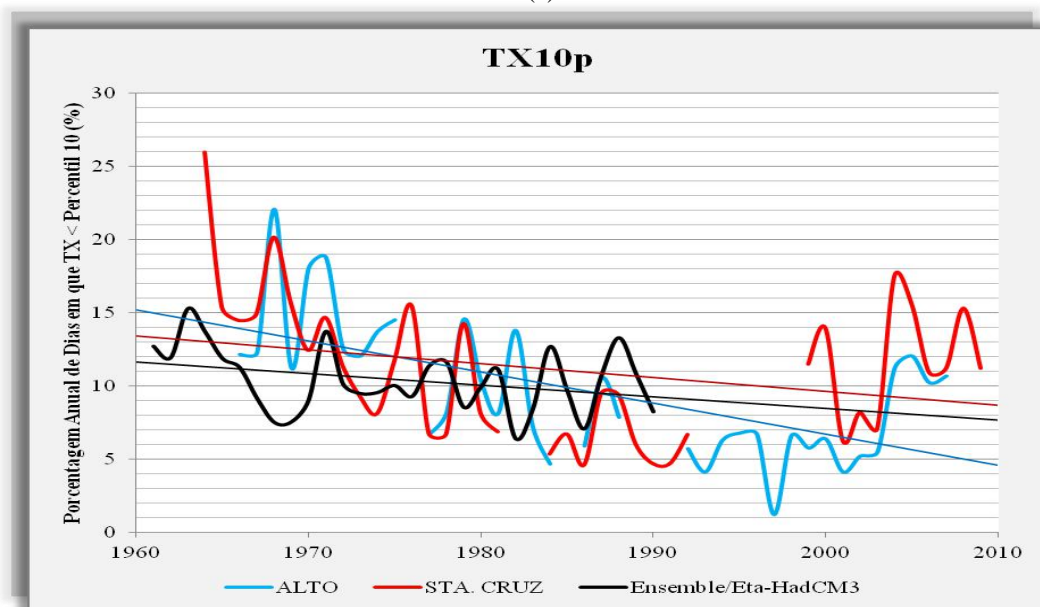
Figura 5.12 – Gráfico de tendências observadas no índice de extremo climático de temperatura máxima TMAXmean para as estações do INMET e *ensemble* do modelo Eta-HadCM3, referentes ao município do Rio de Janeiro.

O indicador TX10p (Figura 5.13a), que apresenta a porcentagem de dias no ano em que a temperatura máxima ficou abaixo do percentil 10 (dias frios), mostra tendências significativas de diminuição de $-0,20\%/ano$ para o Alto da Boa Vista e de $-0,11\%/ano$ para Santa Cruz. Coerentemente, o índice TX90p (Figura 5.13b), que apresenta a porcentagem de dias no ano em que a temperatura máxima ficou acima do percentil 90 (dias quentes), aponta para tendências expressivas de aumento de $+0,15\%/ano$ para ambas as estações meteorológicas analisadas. O modelo conseguiu capturar os comportamentos de tais indicadores, gerando valores de $-0,07\%/ano$ para TX10p e de $+0,07\%/ano$ para TX90p, porém não foram considerados significativos pelo teste estatístico. A Tabela 5.5 apresenta os valores referentes aos percentis 10 e 90 associados aos dados diários de temperatura máxima das estações do Alto da Boa Vista e de Santa Cruz e do modelo Eta no período climatológico de 1961-1990. Nota-se que os limiares de Santa Cruz são maiores que os do Alto da Boa Vista, com uma diferença em torno de 3°C .

Tabela 5.5 – Valores referentes aos percentis 10 e 90 associados aos dados diários de temperatura máxima das estações do Alto da Boa Vista e de Santa Cruz e do modelo Eta-HadCM3 no período climatológico de 1961-1990.

Temp. Máxima (°C)	Alto da Boa Vista	Santa Cruz	Eta-HadCM3 (Ensemble)
Percentil 10	20,3	23,4	21,3
Percentil 90	32,0	35,0	29,7

(a)



(b)

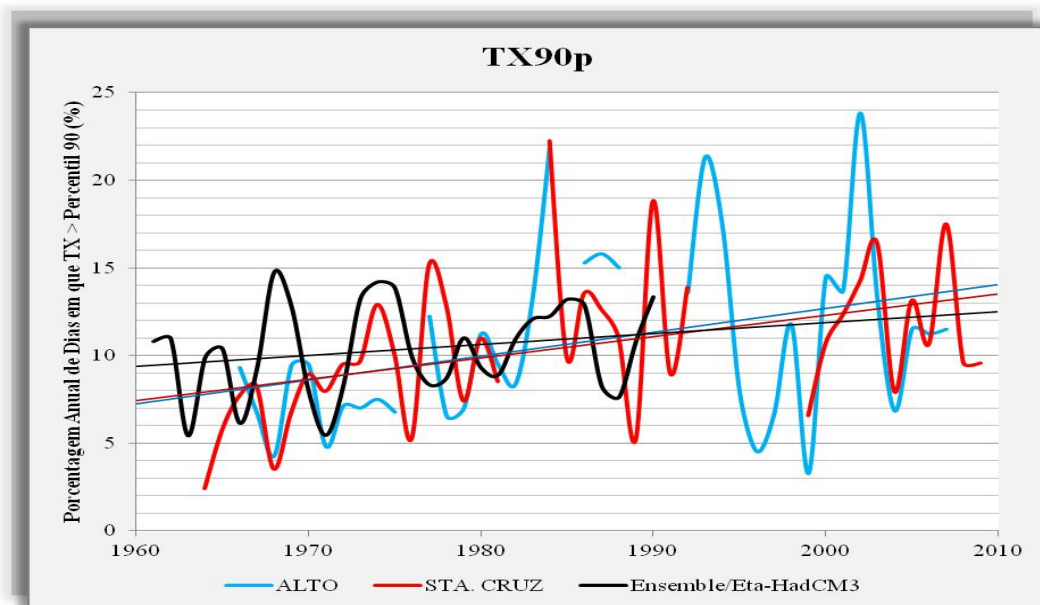


Figura 5.13 – Gráficos de tendências observadas nos indicadores de extremos climáticos de temperatura máxima (a) TX10p (dias frios) e (b) TX90p (dias quentes) para as estações do INMET e *ensemble* do modelo Eta-HadCM3, referentes à cidade do Rio de Janeiro.

O indicador WSDI (Figura 5.14), que representa o número máximo de dias consecutivos no ano em que a temperatura máxima ficou acima do percentil 90 (ondas de calor), apresenta tendência de aumento expressivo para o Alto da Boa Vista (+0,17 dia/ano) e fraca tendência para Santa Cruz (+0,02 dia/ano). O *ensemble* do modelo Eta-HadCM3 gera um resultado com magnitude contrária (-0,03 dia/ano), contudo o mesmo não é significativo segundo o teste estatístico de Mann-Kendall.

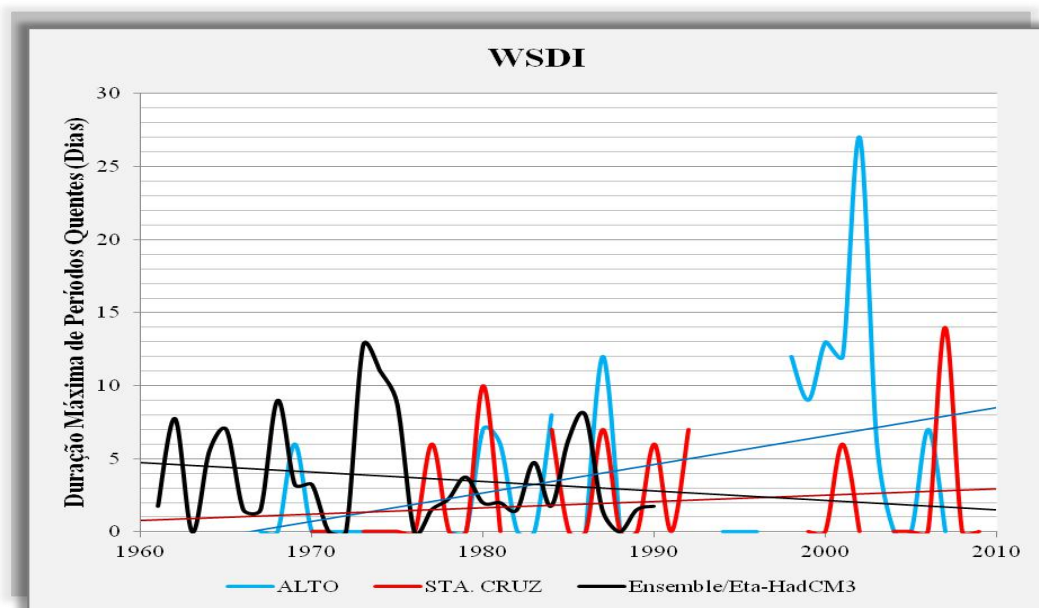


Figura 5.14 – Gráfico de tendências observadas no índice de extremo climático de temperatura máxima WSDI (ondas de calor) para as estações do INMET e *ensemble* do modelo Eta-HadCM3, referentes ao município do Rio de Janeiro.

O índice TXn (Figura 5.15a), que apresenta a menor temperatura máxima anual, aponta para uma tendência de elevação de +0,01°C/ano para o Alto da Boa Vista e tendência nula para Santa Cruz, conforme o teste da Curvatura de Sen. Já o indicador TXx (Figura 5.15b), que mostra a maior temperatura máxima anual, indica tendências de aumento da mesma grandeza para ambas as estações (+0,01°C/ano). O *ensemble* do modelo Eta-HadCM3 não mostrou tendência para o indicador TXn e simulou uma magnitude de +0,02°C/ano para o índice TXx. Todos os resultados referentes a estes indicadores não foram classificados com sendo expressivos pelo teste estatístico de Mann-Kendall.

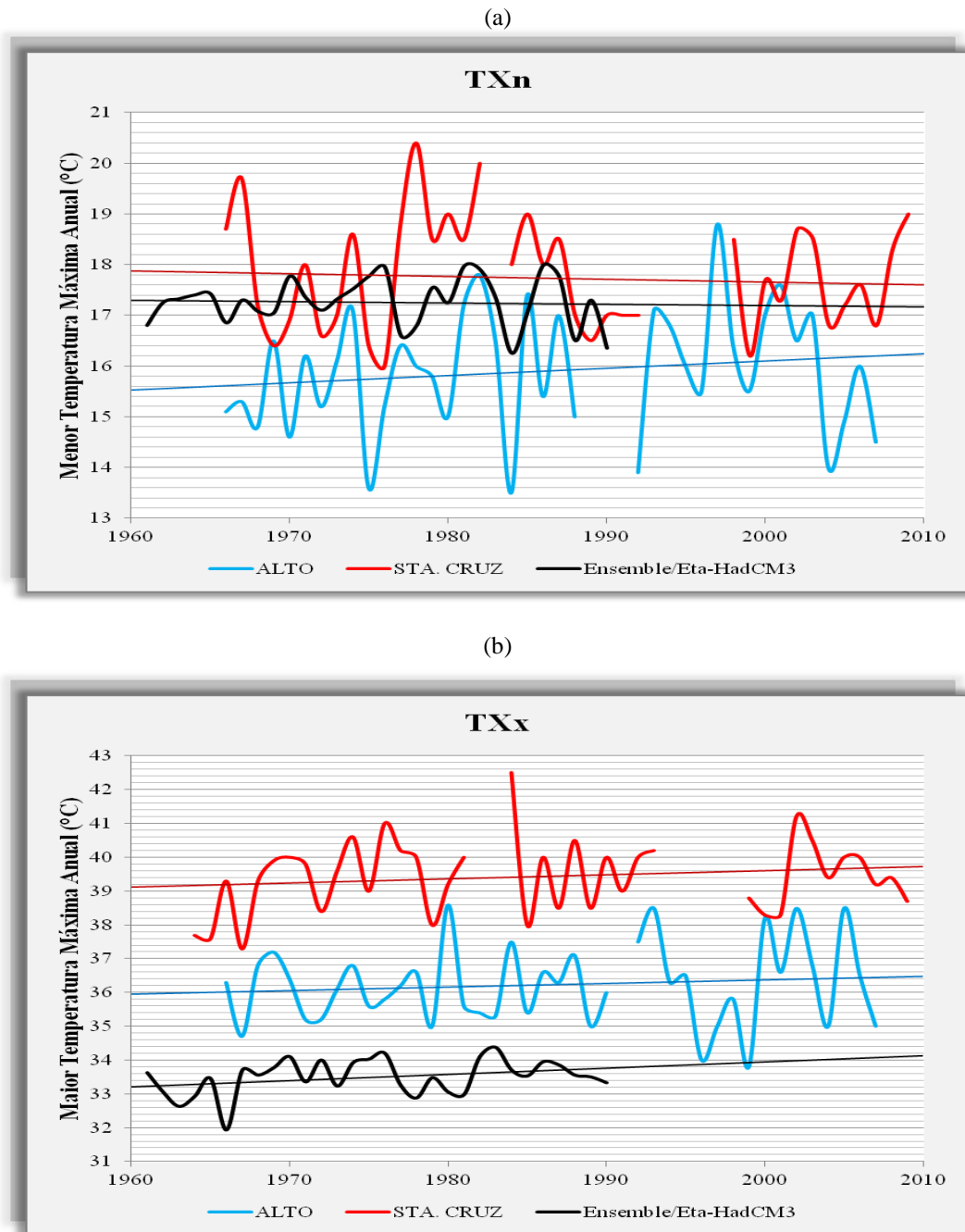


Figura 5.15 – Gráficos de tendências observadas nos indicadores de extremos climáticos de temperatura máxima (a) TXn e (b) TXx para as estações do INMET e *ensemble* do modelo Eta-HadCM3, referentes à cidade do Rio de Janeiro.

O indicador SU25 (Figura 5.16), que exhibe o número de dias no ano em que a temperatura máxima ficou acima de 25°C, ilustra tendências significativas de elevação para ambas as estações meteorológicas. A taxa de aumento é de cerca de +1,42 dia/ano para o Alto da Boa Vista, já em Santa Cruz este valor é de +0,44 dia/ano, e para o modelo, +0,38 dia/ano, sendo este último não expressivo. Os valores anuais obtidos do índice SU25 nas simulações são semelhantes aos dados observados na estação do Alto da Boa Vista.

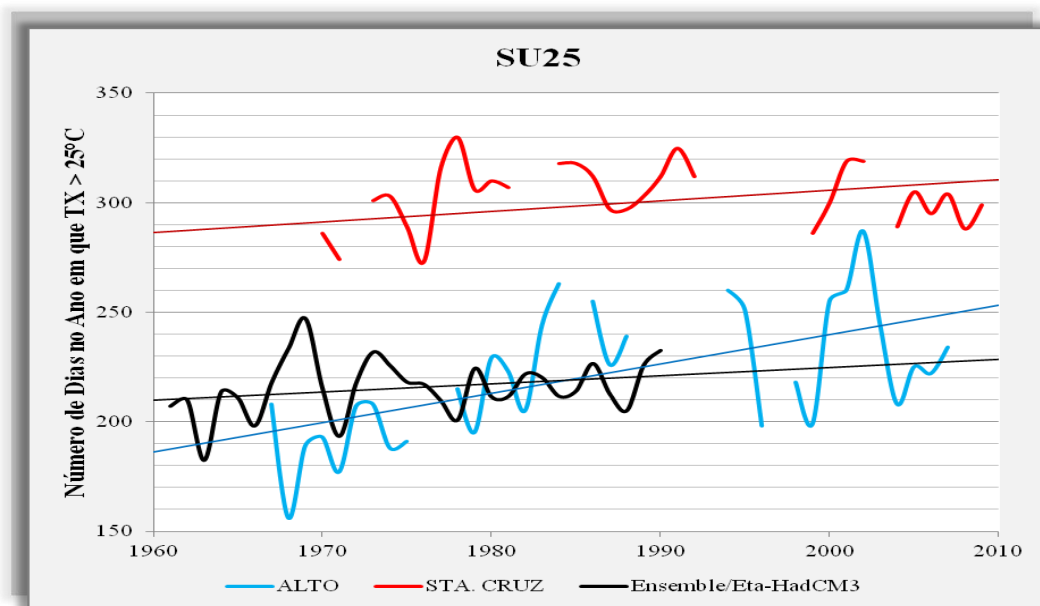


Figura 5.16 – Gráfico de tendências observadas no índice de extremo climático de temperatura máxima SU25 para as estações do INMET e *ensemble* do modelo Eta-HadCM3, referentes ao município do Rio de Janeiro.

Para a cidade do Rio de Janeiro, os índices de extremos associados à temperatura máxima apresentam tendências mais expressivas de elevação do que aqueles associados à temperatura mínima, diferentemente do que é observado para a maior parte dos estudos sobre detecção de mudanças climáticas no globo (Alexander *et al.*, 2006 e Tebaldi *et al.*, 2006) e na América do Sul (Vincent *et al.*, 2005; Marengo e Valverde, 2007; Obregón e Marengo, 2007; Marengo *et al.*, 2009 e 2010). Desta forma o índice DTR, representando a amplitude térmica diária, que deveria estar decrescendo como na maior parte do mundo, está se elevando na cidade do Rio de Janeiro, ou seja, a temperatura máxima aumenta a uma taxa superior à temperatura mínima (Figura 5.17). Este índice é significativo para o Alto da Boa Vista (+0,05°C/ano), mas não para Santa Cruz (+0,01°C/ano) e nem para o modelo, que apresentou uma tendência contrária de -0,02°C/ano, assim como observado em grande parte do planeta. Os valores simulados de amplitude da temperatura são menores que o observado, provavelmente devido ao fato do modelo simular um clima mais ameno para o ponto de grade do Rio de Janeiro, com temperaturas máximas (mínimas) próximas aos valores observados no Alto da Boa Vista (em Santa Cruz).

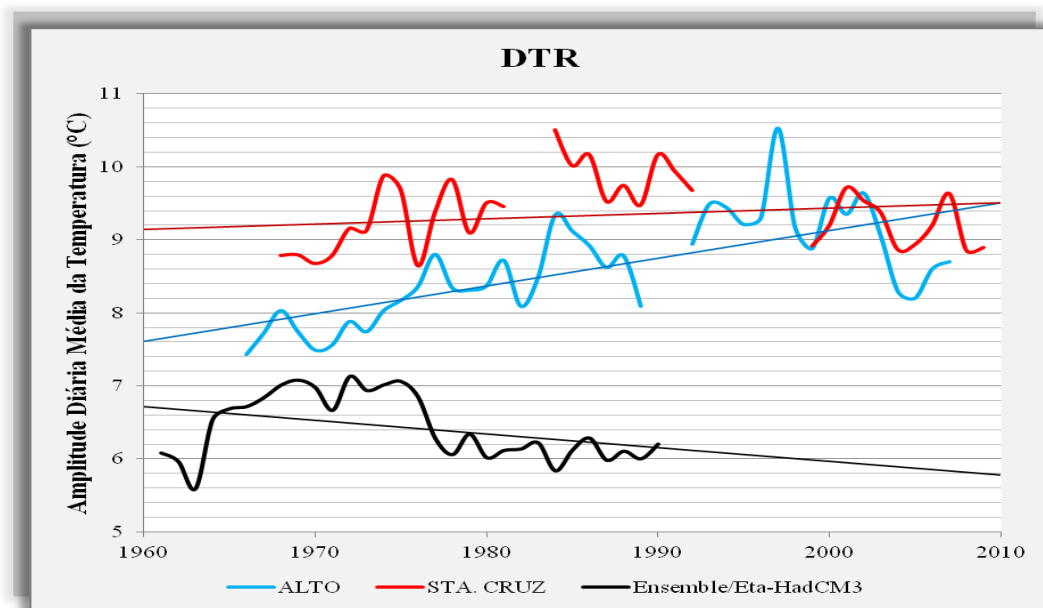


Figura 5.17 – Gráfico de tendências observadas no indicador de extremo climático de temperatura DTR (amplitude térmica) para as estações do INMET e *ensemble* do modelo Eta-HadCM3, referentes à cidade do Rio de Janeiro.

A Tabela 5.6 apresenta um sumário das tendências observadas para os indicadores de extremos climáticos relacionados à temperatura máxima. Neste caso, notam-se tendências de aquecimento mais pronunciadas no Alto da Boa Vista do que em Santa Cruz.

Tabela 5.6 – Magnitudes dos indicadores de extremos climáticos relacionados à temperatura máxima nas estações meteorológicas do Alto da Boa Vista e de Santa Cruz e no modelo Eta-HadCM3. Os valores em negrito são considerados estatisticamente significativos ao nível de confiança de 5%.

INDICADOR	<i>Alto da Boa Vista</i>	<i>Santa Cruz</i>	<i>Modelo Eta-HadCM3 (Ensemble)</i>
TMAXmean	➔ + 0,04°C/ano	➔ + 0,03°C/ano	➔ + 0,01°C/ano
TX10p	➔ - 0,20 %/ano	➔ - 0,11 %/ano	➔ - 0,07 %/ano
TX90p	➔ + 0,15 %/ano	➔ + 0,15 %/ano	➔ + 0,07 %/ano
WSDI	➔ + 0,17 dia/ano	➔ + 0,02 dia/ano	➔ - 0,03 dia/ano
TXn	➔ + 0,01°C/ano	Sem tendência	Sem tendência
TXx	➔ + 0,01°C/ano	➔ + 0,01°C/ano	➔ + 0,02°C/ano
SU25	➔ + 1,42 dia/ano	➔ + 0,44 dia/ano	➔ + 0,38 dia/ano
DTR	➔ + 0,05°C/ano	➔ + 0,01°C/ano	➔ - 0,02°C/ano

Com relação aos resultados expostos para a temperatura, nota-se, como esperado, uma tendência de aquecimento no município do Rio de Janeiro, contudo as tendências mais expressivas ocorrem para os índices associados à temperatura máxima, em oposição aos resultados para a maior parte do planeta, nos quais a temperatura mínima eleva-se a uma taxa superior à temperatura máxima. Os dias quentes (frios) estão mais (menos) frequentes. As ondas de calor, ou seja, os períodos com temperaturas máximas elevadas estão se tornando mais longos. As diferenças encontradas nas duas regiões (urbana e florestada) podem estar associadas com mudanças na circulação em escala sinótica e também em escala local devido ao efeito de ilha de calor urbana.

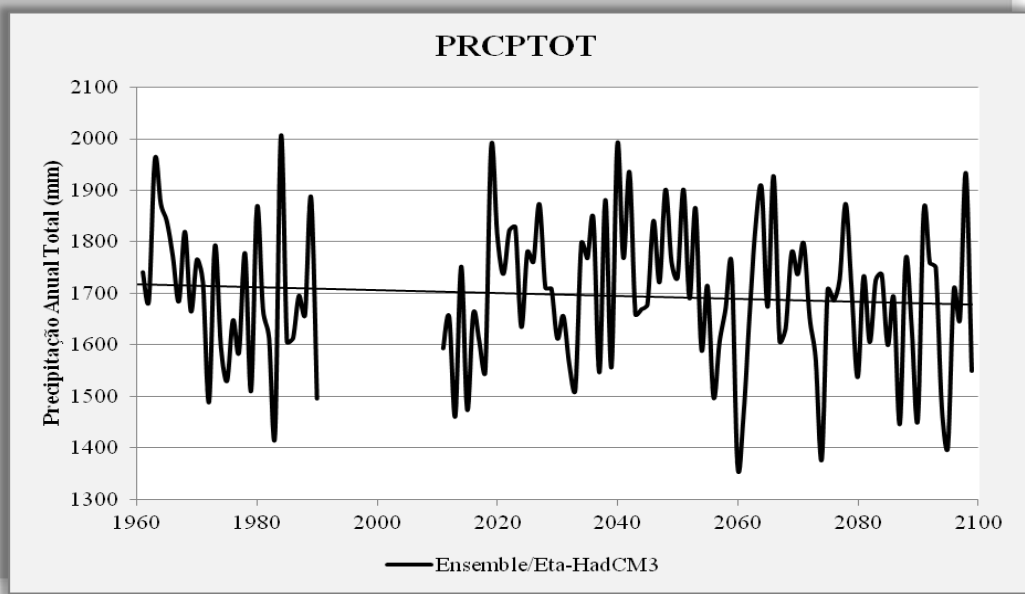
5.2 Clima Futuro (2011 – 2100)

Nesta seção, são apresentados os resultados referentes às projeções futuras associadas aos principais indicadores de extremos climáticos na cidade do Rio de Janeiro, de acordo as simulações dos quatro membros do modelo Eta-HadCM3.

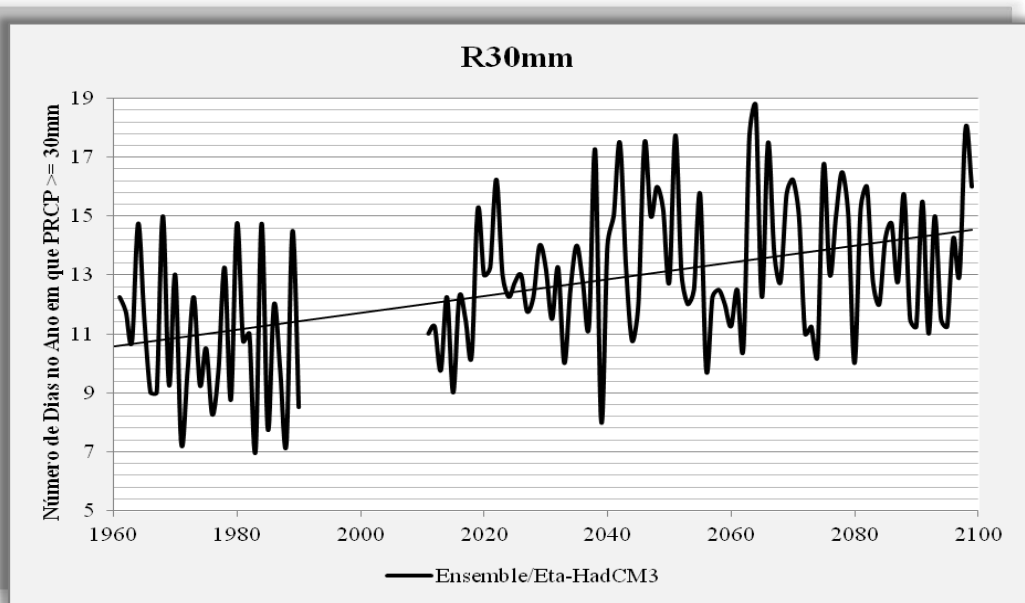
5.2.1 Precipitação

Como visto anteriormente, os indicadores de extremos climáticos associados à precipitação simulados pelo *ensemble* do modelo Eta-HadCM3 no município do Rio de Janeiro durante o clima presente apresentaram tendências de um clima ligeiramente mais seco. A média das simulações futuras dos quatro membros do modelo persiste em retratar uma diminuição não significativa dos totais pluviométricos anuais na cidade (-0,56 mm/ano, Figura 5.18a). Entretanto, o modelo projeta um aumento expressivo ao nível de 5% dos indicadores R30mm (+0,02 dia/ano, Figura 5.18b), R95p (+1,17 mm/ano, Figura 5.18c) e RX1day (+0,08 mm/ano, Figura 5.18d) até o final do século XXI na cidade. No clima presente, os indicadores PRCPTOT e R30mm apresentaram elevação em ambas as estações meteorológicas analisadas, enquanto que os índices R95p e RX1day mostraram aumento significativo no Alto da Boa Vista, como observado na seção anterior. As projeções futuras médias dos quatro membros do modelo Eta-HadCM3 apontam para um aumento de cerca de 150 mm no R95p na cidade do Rio de Janeiro até 2100.

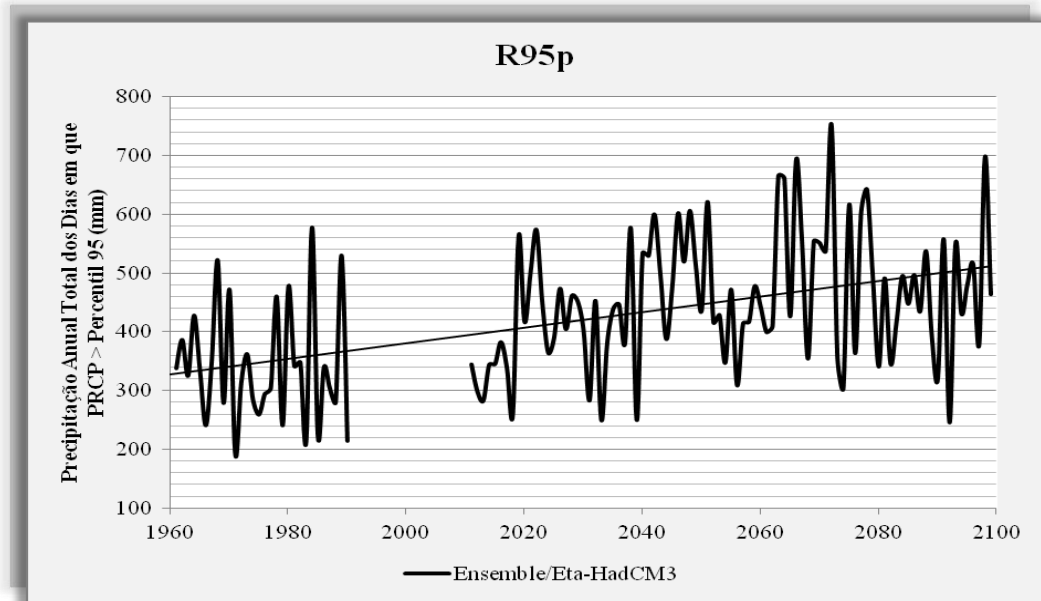
(a)



(b)



(c)



(d)

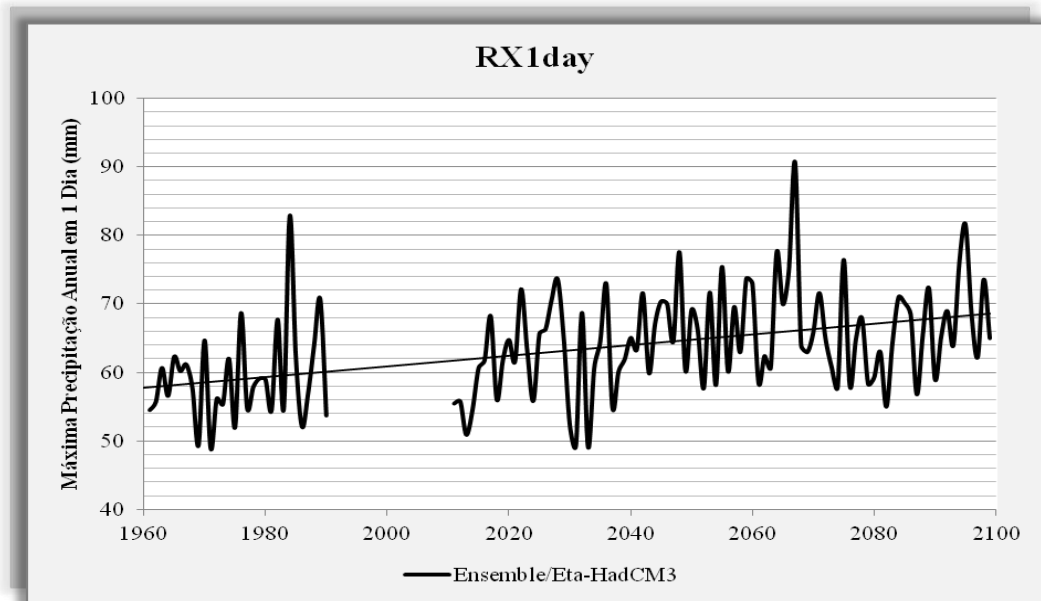


Figura 5.18 – Gráficos de projeções futuras para os índices de extremos climáticos de precipitação (a) PRCPTOT (precipitação anual total), (b) R30mm, (c) R95p (chuvas fortes) e (d) RX1day (chuvas extremas), conforme o *ensemble* do modelo Eta-HadCM3, referentes ao município do Rio de Janeiro.

Verificando as simulações futuras do indicador CDD (Figura 5.19), nota-se que a média dos quatro membros apresenta uma elevação na duração de períodos secos (+0,04 dia/ano), sendo tal tendência estatisticamente significativa ao nível de 5%. Esta característica nos leva a inferir que a redução nos totais pluviométricos anuais no futuro pode estar associada ao aumento dos períodos de estiagem no município. Portanto, a elevação da

precipitação total nos casos de chuvas fortes deve ser analisada como um aumento na frequência de ocorrência de eventos extremos de precipitação de curta durabilidade, responsáveis por alagamentos e enchentes isoladas na capital fluminense.

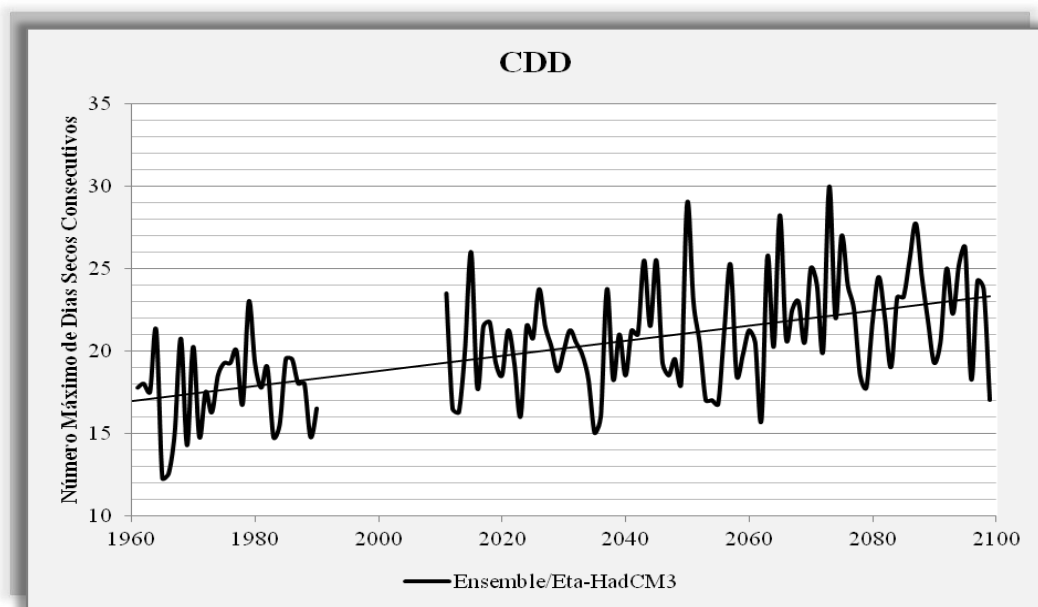
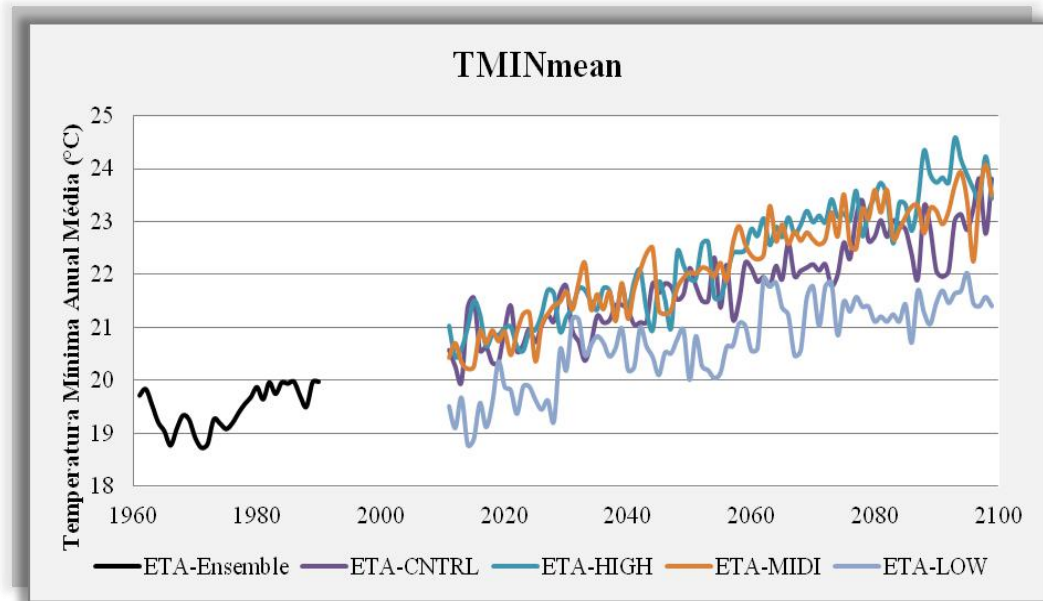


Figura 5.19 – Gráfico de tendências observadas no indicador de extremo climático de precipitação CDD (períodos secos), conforme o *ensemble* do modelo Eta-HadCM3, referentes à cidade do Rio de Janeiro.

5.2.2 Temperatura Mínima

As projeções futuras dos indicadores de extremos climáticos associados à temperatura mínima apresentam tendências altamente expressivas para todos os membros do modelo Eta-HadCM3. A temperatura mínima anual média (TMINmean) continua apresentando um aumento acentuado na cidade do Rio de Janeiro para o clima futuro (Figura 5.20a), como já notado no clima presente, conforme os quatro membros do modelo Eta-HadCM3. Analisando o gráfico das anomalias de temperatura mínima média para o município em relação ao período de 1961-1990 (Figura 5.20b), observa-se que a tendência é de desvios expressivamente positivos até 2100, com valores em torno de +2°C acima da média climatológica para o membro de baixa sensibilidade, +3,0°C para o membro controle, +4°C para o membro de média sensibilidade e +5°C para o membro de alta sensibilidade.

(a)



(b)

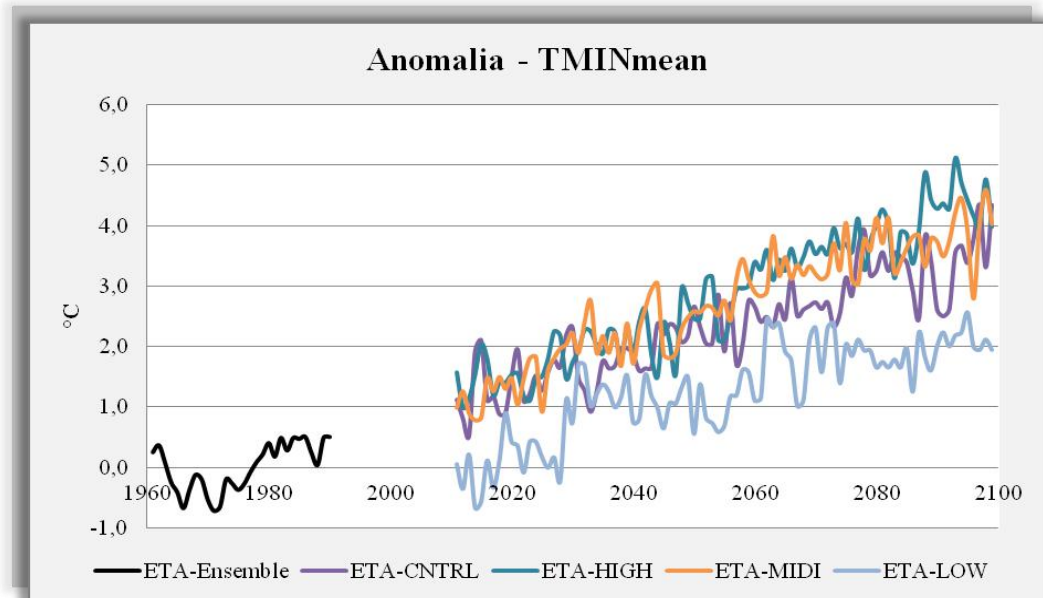
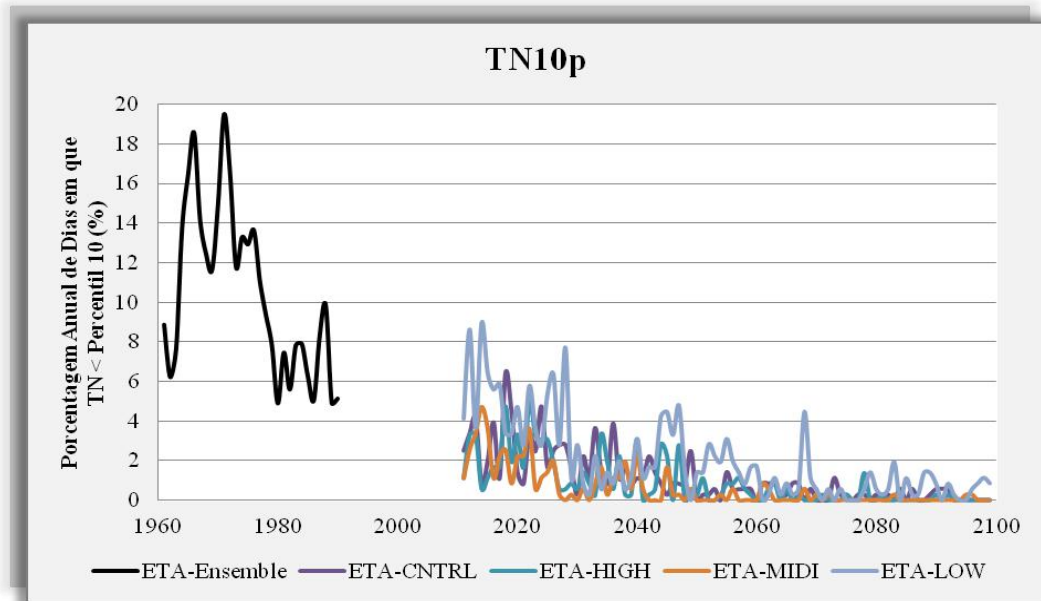


Figura 5.20 – Gráfico de projeções futuras para o índice de extremo climático de temperatura mínima (a) TMINmean, conforme os quatro membros do modelo Eta-HadCM3 e (b) anomalias do indicador em relação ao período de 1961-1990, referentes ao município do Rio de Janeiro.

Os indicadores de extremos climáticos de temperatura mínima associados a noites frias (TN10p, Figura 5.21a) e noites quentes (TN90p, Figura 5.21b) seguem mostrando expressivas redução (em torno de 1% até 2100) e elevação (entre 60 e 90% até o final do século XXI), respectivamente, na cidade do Rio de Janeiro, como já verificado no clima presente, de acordo os quatro membros do modelo Eta-HadCM3.

(a)



(b)

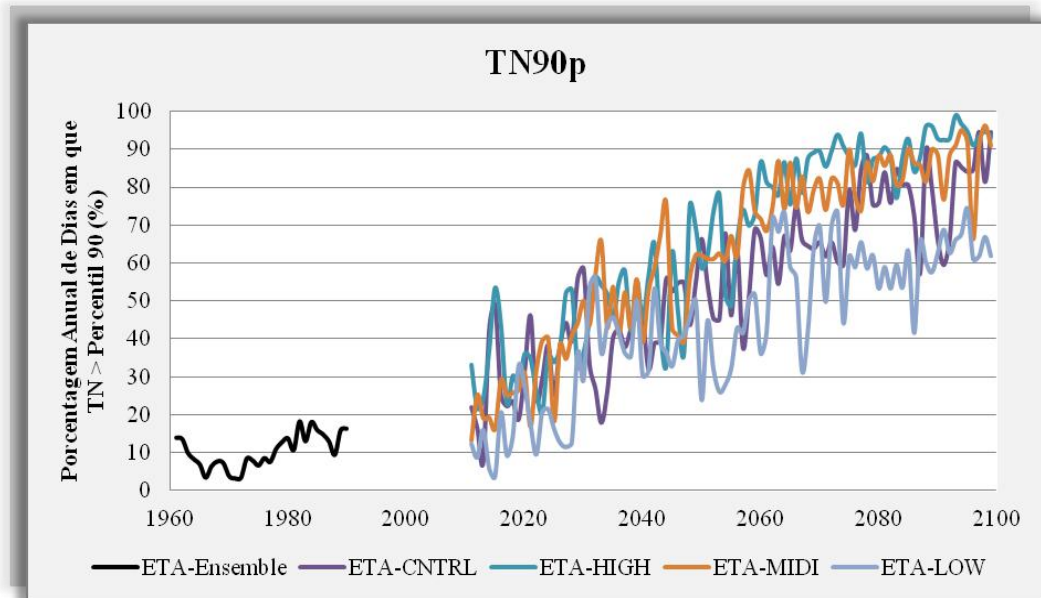


Figura 5.21 – Gráficos de projeções futuras para os índices de extremos climáticos de temperatura mínima (a) TN10p (noites frias) e (b) TN90p (noites quentes), conforme os quatro membros do modelo Eta-HadCM3, referentes à cidade do Rio de Janeiro.

Os índices que indicam a maior temperatura mínima anual (TN_x, Figura 5.22a) e o número de dias no ano em que a temperatura mínima ficou acima de 20°C (TR20, Figura 5.22b) permanecem apontando para um enfático aumento na cidade do Rio de Janeiro nos próximos 90 anos, como já verificado no clima presente, de acordo os quatro membros do modelo Eta-HadCM3. A tendência é de desvios expressivamente positivos até 2100 para o indicador TN_x, com anomalias em torno de +2°C acima da média climatológica do *ensemble*

(1961-1990) para o membro de baixa sensibilidade, +3,5°C para o membro controle e +4°C para os membros de média e alta sensibilidade. Os cenários mais pessimistas projetam TNx de até 31°C no município do Rio de Janeiro no final do século XXI.

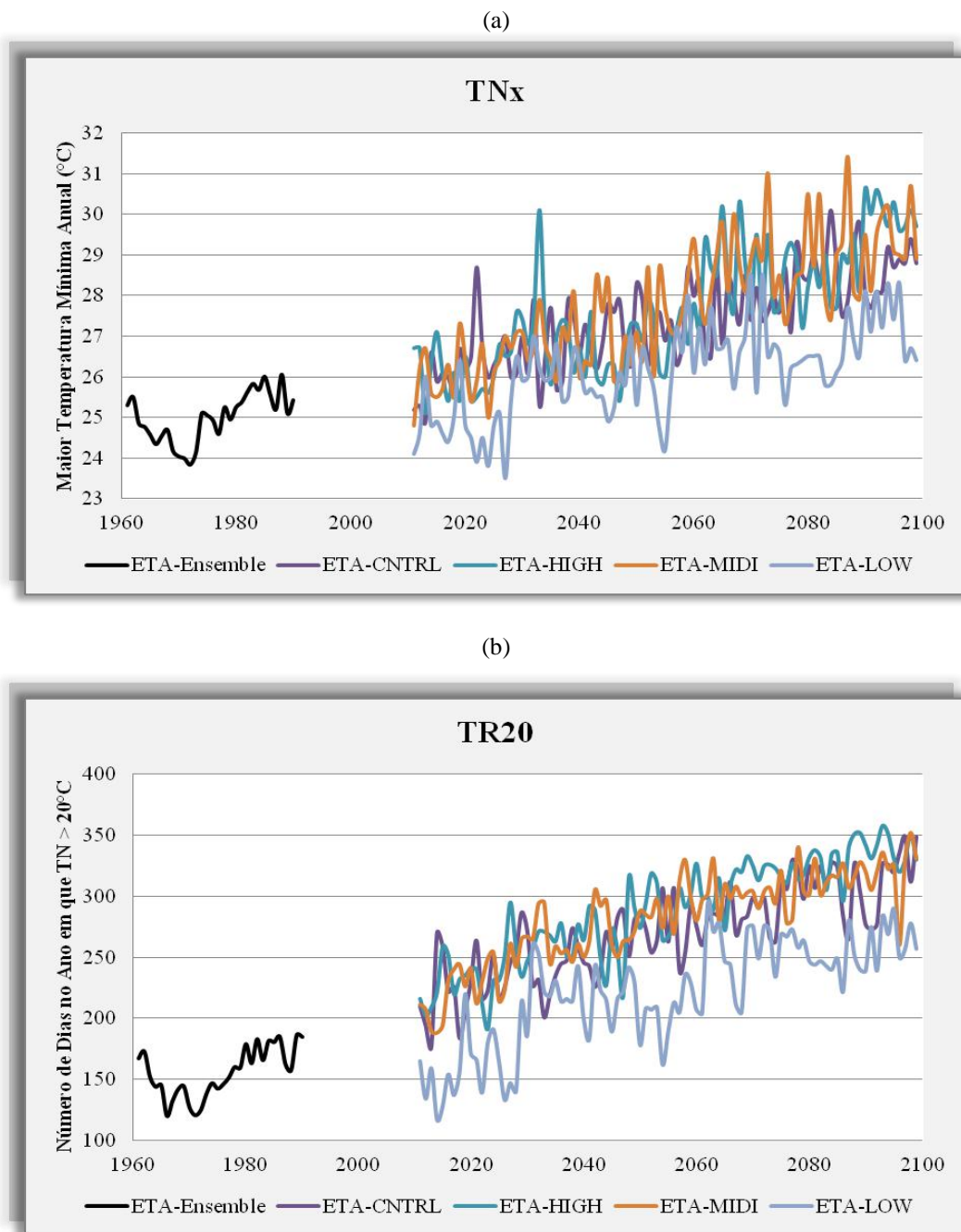


Figura 5.22 – Gráficos de projeções futuras para os indicadores de extremos climáticos de temperatura mínima (a) TNx e (b) TR20, conforme os quatro membros do modelo Eta-HadCM3, referentes ao município do Rio de Janeiro.

A Figura 5.23 apresenta o comportamento do indicador TR20 de forma mais detalhada sobre a RMRJ, Baía de Guanabara e oceano Atlântico adjacente nos climas presente e futuro, conforme o membro controle do modelo Eta-HadCM3. O número no centro de cada quadrado

equivale ao valor do índice para o respectivo ponto de grade do modelo. Os resultados mostram que possivelmente a RMRJ, que hoje possui cerca de 120 dias no ano com temperatura mínima acima de 20°C, terá mais de 280 dias no período 2071-2100. O índice TR20 sobre a área oceânica adjacente também tende a aumentar, contudo a uma taxa inferior à do continente.

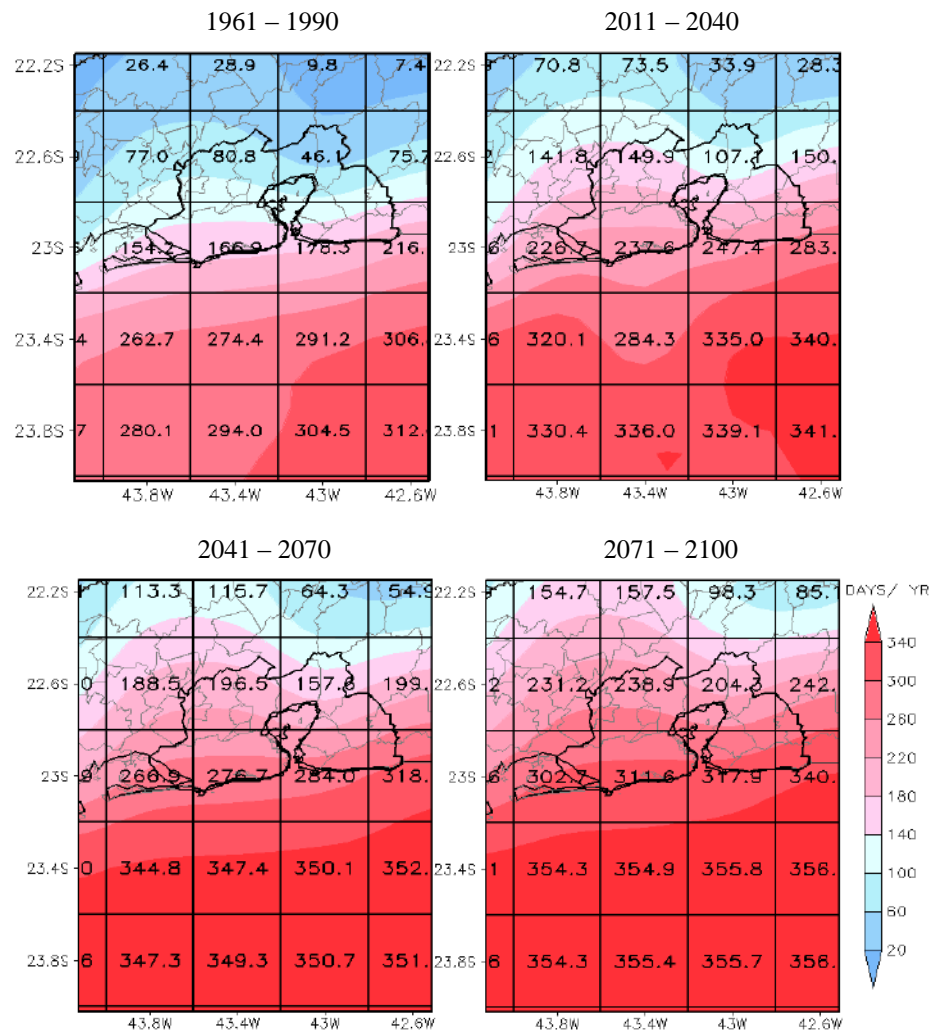


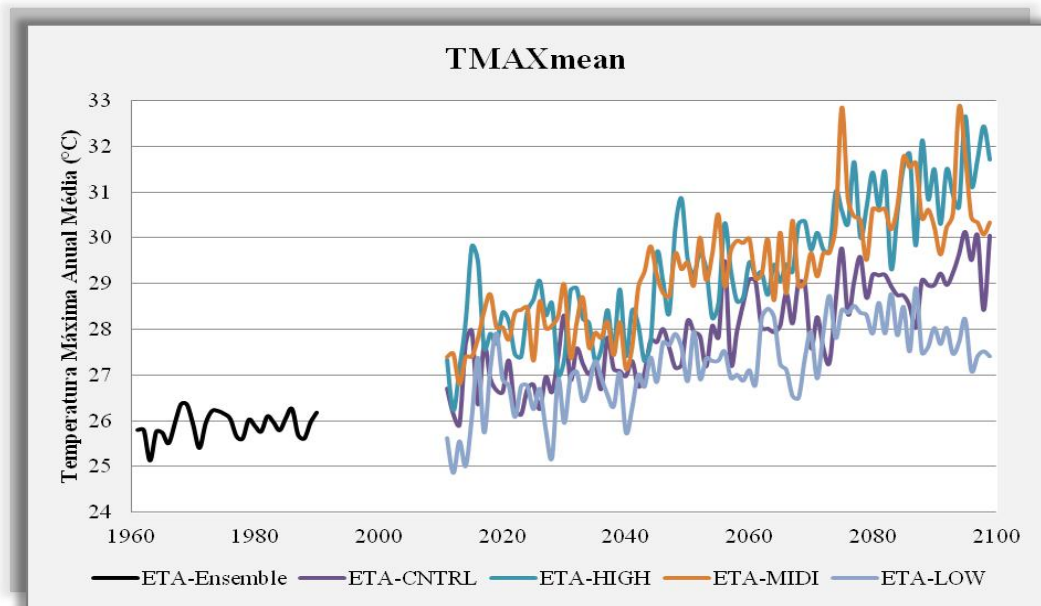
Figura 5.23 – Tendências e projeções futuras para o índice de extremo climático de temperatura mínima TR20 na RMRJ, segundo o membro controle do modelo Eta-HadCM3. O número no centro de cada quadrado equivale ao valor do índice para o respectivo ponto de grade do modelo (Análise: *María Valverde*, INPE).

5.2.3 Temperatura Máxima

As simulações futuras dos indicadores de extremos climáticos relacionados à temperatura máxima mostram tendências bastante significativas para todos os membros do modelo Eta-HadCM3. A temperatura máxima anual média (TMAXmean) segue mostrando uma significativa elevação no município do Rio de Janeiro até 2100 (Figura 5.24a), como já verificado no clima presente, segundo os quatro membros do modelo Eta-HadCM3.

Avaliando o gráfico das anomalias de temperatura máxima média para a cidade em relação ao período de 1961-1990 (Figura 5.24b), nota-se que a tendência é de desvios acentuadamente positivos até o final do século XXI, com valores por volta de +2°C acima da média climatológica para o membro de baixa sensibilidade, +3,5°C para o membro controle, +5°C para o membro de média sensibilidade e +6°C para o membro de alta sensibilidade. A suscetibilidade a mudanças na temperatura máxima é maior do que na temperatura mínima.

(a)



(b)

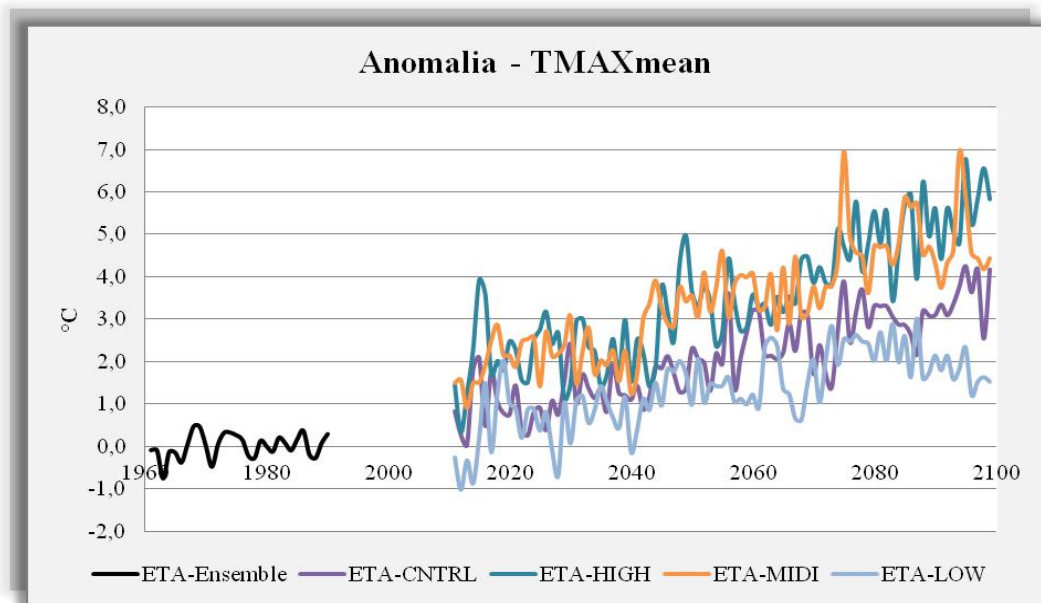


Figura 5.24 – Gráfico de projeções futuras para o indicador de extremo climático de temperatura máxima (a) TMAXmean, conforme os quatro membros do modelo Eta-HadCM3 e (b) anomalias do índice em relação ao período de 1961-1990, referentes à cidade do Rio de Janeiro.

Os índices de extremos climáticos de temperatura máxima relacionados a dias frios (TX10p, Figura 5.25a) e dias quentes (TX90p, Figura 5.25b) continuam apresentando, respectivamente, uma diminuição (entre 2 e 4% até 2100) e um aumento (entre 40 e 80% até o final do século XXI) acentuados, para o município do Rio de Janeiro, como já notado no clima presente, conforme os quatro membros do modelo Eta-HadCM3.

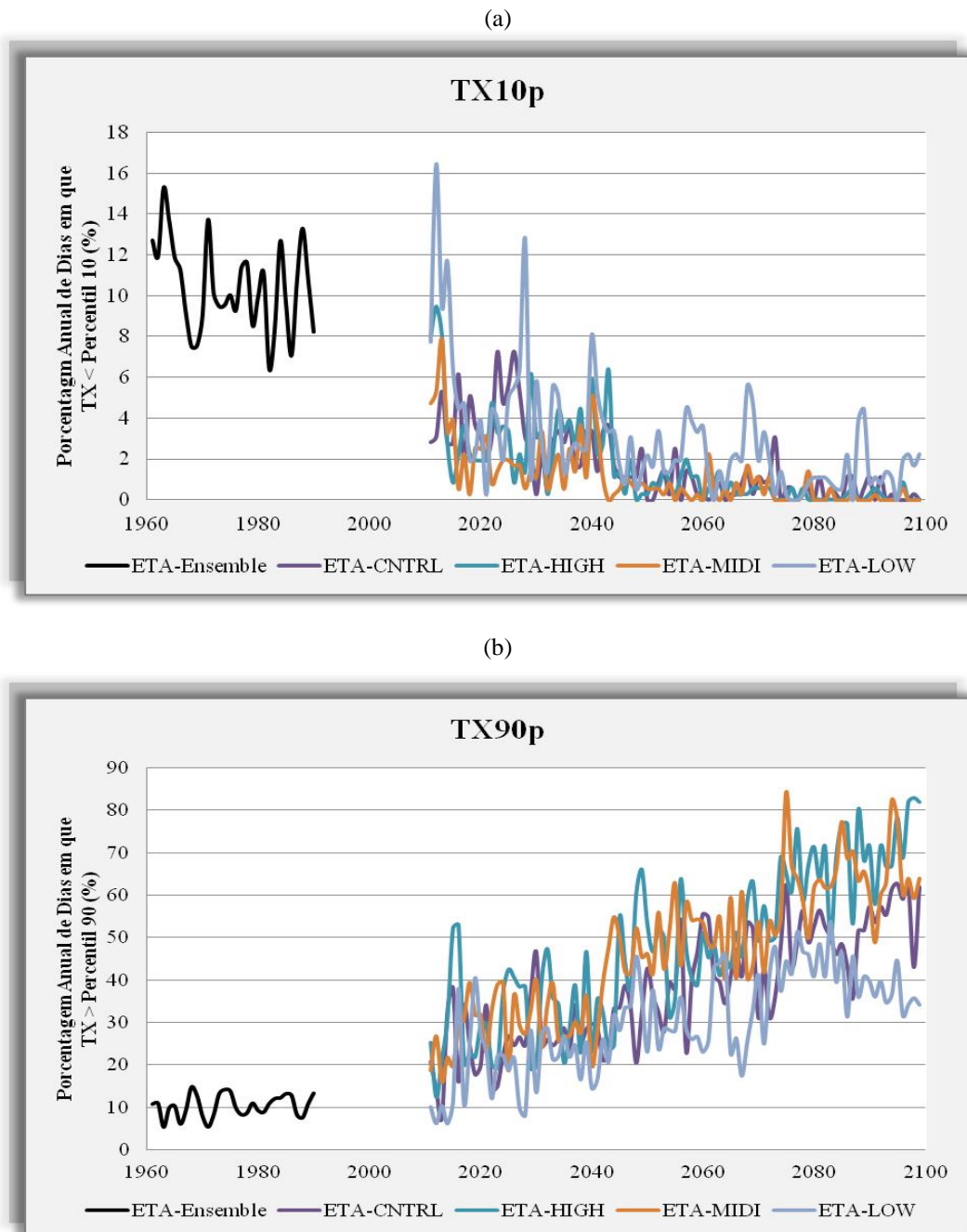


Figura 5.25 – Gráficos de projeções futuras para os indicadores de extremos climáticos de temperatura máxima (a) TX10p (dias frios) e (b) TX90p (dias quentes), conforme os quatro membros do modelo Eta-HadCM3, referentes ao município do Rio de Janeiro.

As ondas de calor (WSDI) tendem a ficar mais duradouras até o final do século XXI, conforme os quatro membros do modelo Eta-HadCM3 (Figura 5.26). Os membros de baixa sensibilidade e controle projetam ondas de calor com algo em torno de 80 dias consecutivos com temperaturas máximas acima do percentil 90 (ou seja, acima de 29,7°C) na cidade do Rio de Janeiro até 2100. Já os membros mais pessimistas (média e alta sensibilidade) simulam mais de 200 dias quentes sucessivos.

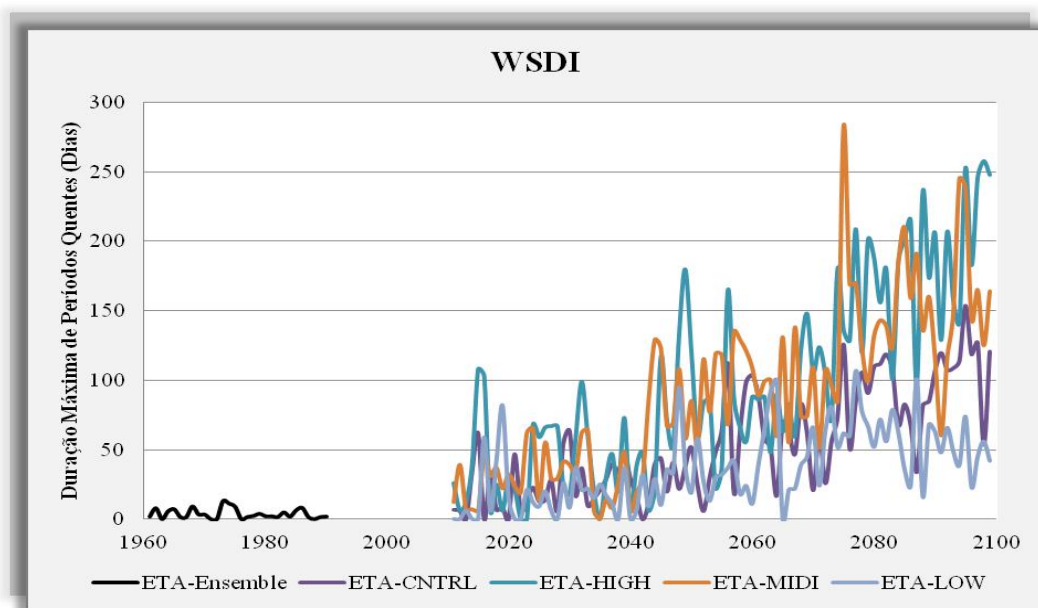


Figura 5.26 – Gráfico de projeções futuras para o índice de extremo climático de temperatura máxima WSDI (ondas de calor), conforme os quatro membros do modelo Eta-HadCM3, referentes à cidade do Rio de Janeiro.

Os indicadores que representam a maior temperatura máxima anual (TXx, Figura 5.27a) e o número de dias no ano em que a temperatura máxima ficou acima de 25°C (SU25, Figura 5.27b) continuam indicando uma significativa elevação no município do Rio de Janeiro até o final do século XXI, como já verificado no clima presente, de acordo os quatro membros do modelo Eta-HadCM3. A tendência é de desvios expressivamente positivos até 2100 para o indicador TXx, com anomalias em torno de +2,5°C acima da média climatológica (1961-1990) para o membro de baixa sensibilidade, +5,0°C para o membro controle, +7,0°C para o membro de alta sensibilidade e +8,0°C para o membro de média sensibilidade. Os cenários mais pessimistas projetam TXx de até 47°C no município do Rio de Janeiro no final do século XXI.

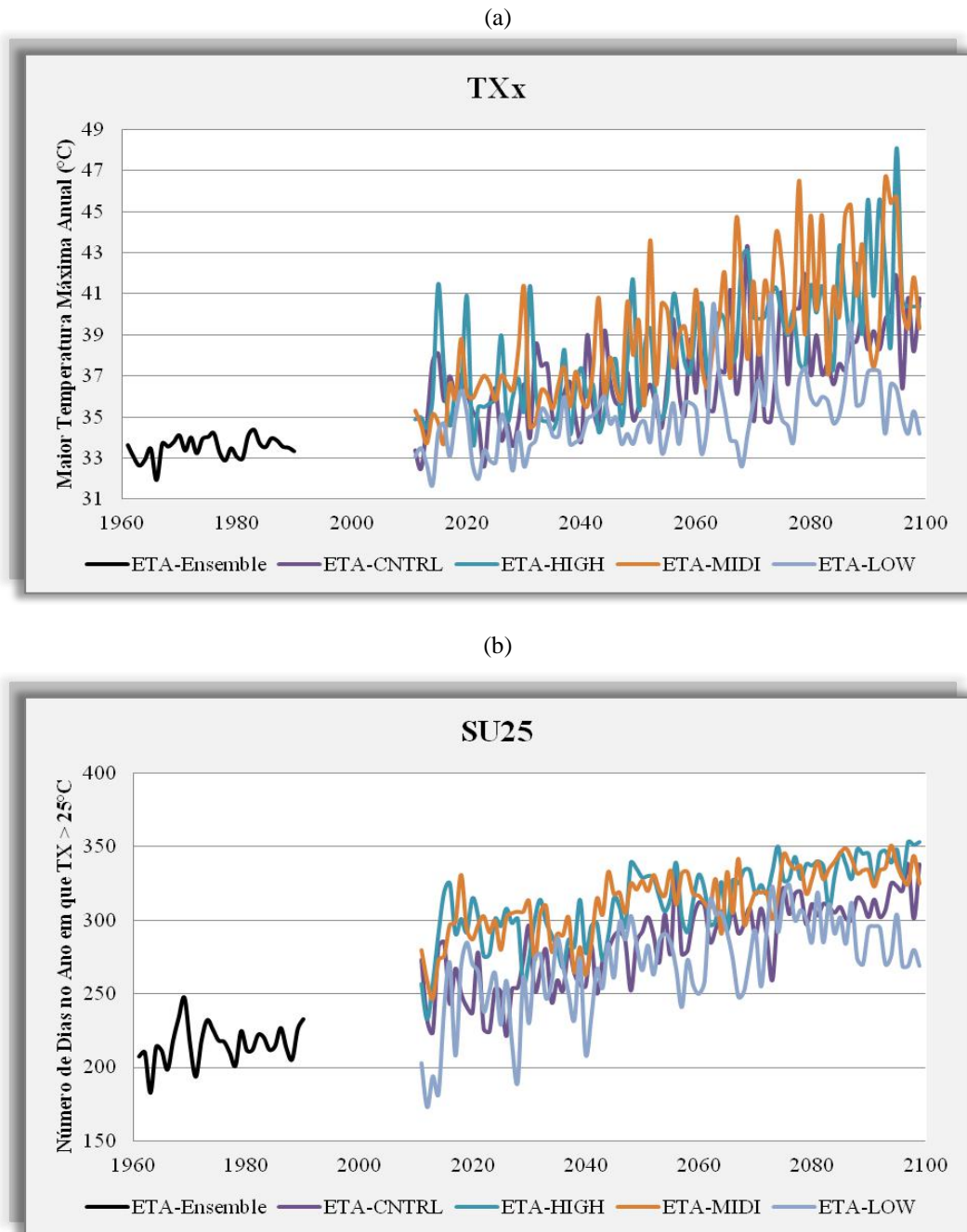


Figura 5.27 – Gráficos de projeções futuras para os indicadores de extremos climáticos de temperatura máxima (a) TXx e (b) SU25, conforme os quatro membros do modelo Eta-HadCM3, referentes ao município do Rio de Janeiro.

A Figura 5.28 mostra a distribuição espacial do índice SU25 sobre a RMRJ, Baía de Guanabara e oceano Atlântico adjacente ao longo do final do século XX e no decorrer do século XXI, segundo o membro controle do modelo Eta-HadCM3. Os resultados indicam que provavelmente a RMRJ, que hoje possui em torno de 200 dias no ano com temperatura máxima acima de 25°C, terá mais de 300 dias no final do século XXI. O indicador SU25

sobre a região oceânica adjacente também tende a se elevar, entretanto a uma taxa superior à do continente.

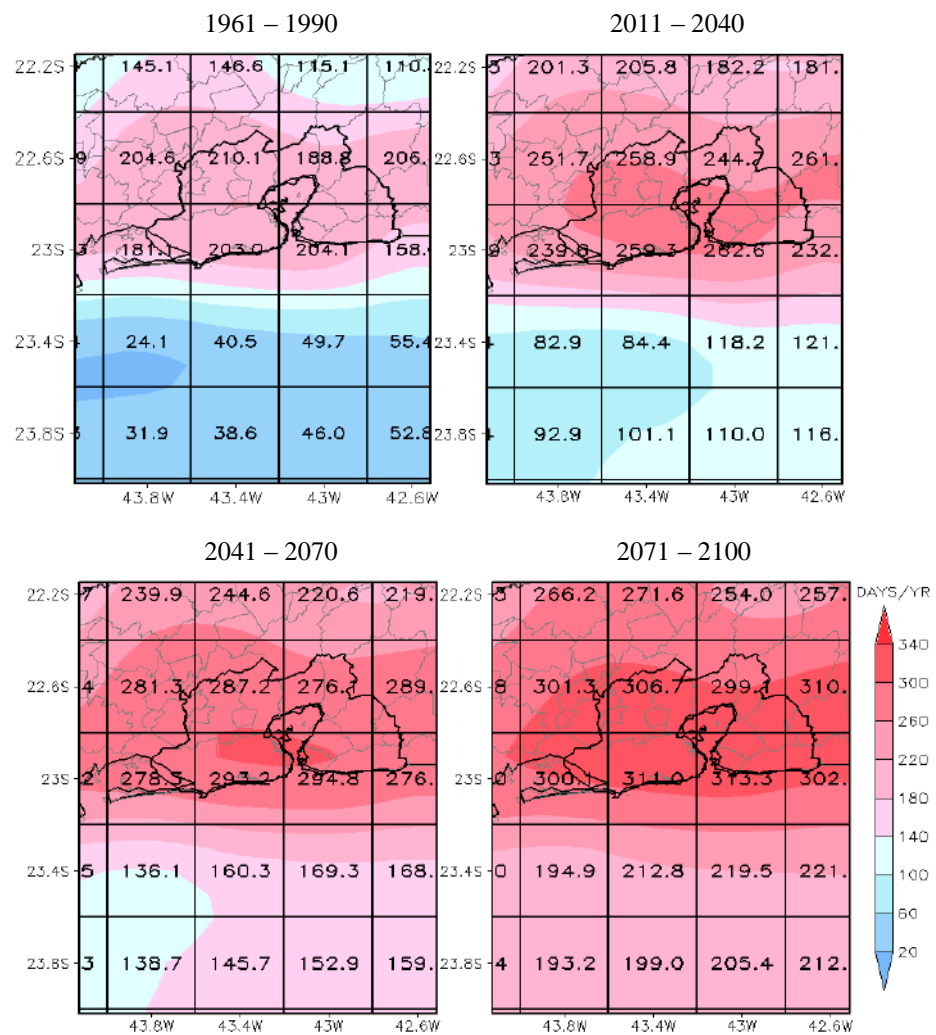


Figura 5.28 – Tendências e projeções futuras para o índice de extremo climático de temperatura máxima SU25 na RMRJ, segundo o membro controle do modelo Eta-HadCM3. O número no centro de cada quadrado equivale ao valor do indicador para o respectivo ponto de grade do modelo (Análise: *María Valverde*, INPE).

6. CONCLUSÕES

Neste trabalho elabora-se uma análise de detecção da mudança climática para a cidade do Rio de Janeiro através de séries de dados observacionais de totais pluviométricos diários e de temperaturas mínima e máxima diárias para duas estações do INMET: Alto da Boa Vista e Santa Cruz. Os indicadores de extremos climáticos são calculados, como definidos em Frich *et al.* (2002). As simulações do modelo climático regional Eta-HadCM3 são utilizadas para analisar as projeções futuras (2011-2100) de tais índices, considerando-se o cenário SRES-A1B de emissões. A avaliação do modelo no clima presente (1961-1990) é efetuada como passo prévio para investigação de suas projeções futuras.

Os resultados indicam que o clima na cidade do Rio de Janeiro está se tornando mais úmido, principalmente na região florestada, com totais pluviométricos anuais em elevação, eventos de chuvas intensas ocorrendo com maior frequência e produzindo maior quantidade de chuvas (somente na área do maciço da Tijuca). As diferenças encontradas nos indicadores de precipitação no Alto da Boa Vista e em Santa Cruz, com tendências mais marcadas na primeira estação meteorológica do que na segunda, sugere alterações nos padrões de ventos, na circulação das brisas marítima e terrestre e no transporte de umidade para o interior do município, o que precisa ser investigado com maior detalhe. As tendências na frequência de ocorrência de sistemas frontais e no tempo de permanência de tais sistemas sobre a região em estudo, principais responsáveis por eventos de chuvas intensas, também necessitam ser investigadas. Para o futuro projeta-se uma discreta redução nos totais pluviométricos anuais, uma expressiva elevação na frequência de ocorrência e na intensidade dos eventos de chuvas intensas e, por outro lado, aumento estatisticamente significativo na duração dos períodos secos e diminuição na duração dos períodos úmidos. Isto indica uma tendência de chuvas mal distribuídas para o futuro, com períodos secos mais longos, entretanto com eventos de chuvas severas mais frequentes.

Com relação à temperatura, nota-se, como esperado, uma tendência de aquecimento na cidade do Rio de Janeiro, contudo as tendências mais expressivas ocorrem para os índices associados à temperatura máxima, em contraste com os resultados para a maior parte do globo nos quais a temperatura mínima eleva-se a uma taxa superior à temperatura máxima. Os dias quentes (frios) estão mais (menos) frequentes. As ondas de calor, ou seja, os períodos com temperaturas máximas elevadas estão se tornando mais longos. As tendências associadas às temperaturas mínimas são mais pronunciadas em Santa Cruz do que no Alto da Boa Vista. As

diferenças encontradas nas duas regiões (urbana e florestada) podem estar associadas com mudanças na circulação em escala sinótica e também em escala local devido ao efeito de ilha de calor urbana. As noites quentes estão também mais frequentes e as noites frias estão em declínio. De acordo com as projeções do modelo regional as anomalias das médias anuais das temperaturas máximas (mínimas) podem atingir entre 2 e 6°C (2 e 5°C) acima dos valores atuais. Projeta-se que cerca de 40% a 80% dos dias no ano serão quentes e que não haverá dias frios. Comportamento semelhante ocorre para noites quentes, com uma frequência entre 60% e 90% no ano e praticamente sem ocorrência de noites frias.

No clima presente o modelo regional apresenta para temperatura do ar resultados bastante coerentes com as observações do Alto da Boa Vista e Santa Cruz, principalmente para os índices baseados em percentis (TN10p, TN90p, TX10p, TX90p). As TMAXmean (TMINmean) do modelo são próximas aos valores observados no Alto da Boa Vista (em Santa Cruz), o que sugere que o modelo simula um clima mais ameno para o município do Rio de Janeiro, gerando valores de DTR cerca de 2°C (3°C) inferiores aos observados no Alto da Boa Vista (Santa Cruz). Com relação à precipitação simulada pelo modelo no clima presente a maior parte das tendências é oposta ao observado, contudo não existe consenso até mesmo entre as observações apresentadas neste trabalho, possivelmente devido à dependência da precipitação a sistemas locais, tais como as brisas marítima e terrestre, ou a própria limitação dos dados observacionais, com algumas falhas.

Sobre as projeções futuras do modelo é importante ressaltar que as simulações levam em conta apenas o aumento na concentração dos gases de efeito estufa e não mudanças no uso do solo e efeito de ilha de calor devido à expansão urbana. Além disso, quando se trata dos modelos regionais, a confiabilidade das simulações em alta resolução depende da qualidade da condição de contorno lateral, que é fornecida pelo modelo global, e também da própria capacidade do modelo (regional) de desenvolver características regionais realísticas do clima presente.

Estudos mais detalhados de detecção da possível intensificação (enfraquecimento) das brisas marítimas (terrestres), além de análises a nível sazonal, com utilização de outras séries de dados observacionais poderiam contribuir para ampliar o conhecimento a respeito das mudanças climáticas na cidade do Rio de Janeiro.

7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALEXANDER, L. V.; ZHANG, X.; PETERSON, T. C.; CAESAR, J.; GLEASON, B.; KLEIN TANK, A. M. G.; HAYLOCK, M.; COLLINS, D.; TREWIN, B.; RAHIMZADEH, F.; TAGIPOUR, A.; KUMAR, K. R.; REVADEKAR, J.; GRIFFITHS, G.; VINCENT, L.; STEPHENSON, D. B.; BURN, J.; AGUILAR, E.; BRUNET, M.; TAYLOR, M.; NEW, M.; ZHAI, P.; RUSTICUCCI, M. e VAZQUEZ-AGUIRRE, J. L. Global Observed Changes in Daily Climate Extremes of Temperature and Precipitation. *Journal of Geophysical Research*, v. 111, D05109, doi: 10.1029/2005JD006290, 2006.

ALVES L. e MARENGO, J. A. Assessment of Regional Seasonal Predictability using the PRECIS Regional Climate Modeling System over South America. *Theoretical and Applied Climatology*, doi:10.1007/s00704-009-0165-2, 2009.

AMBRIZZI, T.; ROCHA, R.; MARENGO, J. A.; PISNITCHENKO, I. e ALVES, L. M. Cenários Regionalizados de Clima no Brasil para o Século XXI: Projeções de Clima usando Três Modelos Regionais. Relatório 3, Ministério do Meio Ambiente (MMA), 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, 2007.

BETTS, A. K. e MILLER, M. T. A New Convective Adjustment Scheme. Part II: Single Column Tests using GATE Wave, BOMEX, ATEX and Arctic Air-mass Data Sets. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, v. 112, p. 693-703, doi: 10.1002/qj.49711247308, 1986.

BLACK, T. L. The New NMC Mesoscale Eta Model: Description and Forecast Examples. *Weather Analysis and Forecasting*, v. 9, p. 256–278, 1994.

BUSTAMANTE, J.; GOMES, J. L. e CHOU, S. C. 5-year Eta Model Seasonal Forecast Climatology over South America. 8th Inter Conference on Southern Hemisphere Meteorology and Oceanography. Foz do Iguaçu, 2006.

CABRÉ, M. F.; SOLMAN, S. A. e NUÑEZ, M. N. Creating Regional Climate Change Scenarios over Southern South America for the 2020's and 2050's using the Pattern Scaling Technique: Validity and Limitations. *Climatic Change*, v. 98, n. 3-4, p. 449-469, doi: 10.1007/s10584-009-9737-5, 2010.

CHOU, S. C.; MARENGO, J. A.; LYRA, A. A.; SUEIRO, G.; PESQUERO, J. F.; ALVES, L. M.; KAY, G.; BETTS, R.; CHAGAS, D. J.; GOMES, J. L.; BUSTAMANTE, J. F. e TAVARES, P. Downscaling of South America Present Climate driven by 4-member HadCM3 Runs. *Climate Dynamics*, 2011.

COELHO NETTO, A. L.; AVELAR, A. S. e D'ORSI, R.. Domínio do Ecossistema da Floresta Atlântica de Encostas. Rio Próximos 100 anos. O Aquecimento Global e a Cidade. Rio de Janeiro, Instituto Municipal de Urbanismo Pereira Passos, 2008.

COLLINS, M.; BOOTH, B. B. B.; HARRIS, G. R.; MURPHY, J. M.; SEXTON, D. M. H. e WEBB, M. J. Towards Quantifying Uncertainty in Transient Climate Change. *Climate Dynamics*, v. 27, p. 127-147, doi: 10.1007/s00382-006-0121-0, 2006.

DERECZYNSKI, C. P.; OLIVEIRA, J. S. e MACHADO, C. O. Climatologia da Precipitação no Município do Rio de Janeiro. *Revista Brasileira de Meteorologia*, v. 24, n. 1, p. 24-38, 2009.

DICKINSON, R. E.; ERRICO, R. M.; GIORGI, F. e BATES, G. T. A Regional Climate Model for the Western U. S. *Climate Change*, v. 15, p. 383-422, 1989.

DUURSMA, E. K. Rainfall, River Flow and Temperature Profile Trends; Consequences for Water Resources. Heineken N.V.: Amsterdam. ISBN 90-9016054-X. v. 32, cd-rom PP, 2002.

EASTERLING, D.; MEEHL, G.; PARMESAN, C.; CHANGNON, S.; KARL, T. e MEARNNS, L. Climate Extremes: Observations, Modeling and Impacts. *Science*, v. 289, p. 2068-2074, 2000.

EK, M. B.; MITCHELL, K. E.; LIN, Y.; ROGERS, E.; GRUMMEN, P.; KOREN, V.; GAYNO, G. e TARPLEY, J. D. Implementation of NOAA Land Surface Advances in the National Centers for Environmental Prediction Operational Mesoscale Eta Model. *J. Geophys. Res.*, 108:8851, doi: 10.1029/2002JD003246, 2003.

FELS, S. B. e SCHWARZKOPF, M. D. The Simplified Exchange Approximation: A New Method for Radiative Transfer Calculations. *J. Atmos. Sci.*, v. 32, p. 1475-1488, 1975.

FIGUEIRÓ, A. S. e COELHO NETTO, A. L. Do Local ao Regional: Análise Comparativa de Transectos Pluviométricos em Diferentes Escalas. V Encontro Nacional da Associação Nacional de Pós Graduação em Geografia/ANPEGE, Florianópolis, 2003.

FIGUEIRÓ, A. S. Mudanças Ambientais na Interface Floresta-Cidade e Propagação de Efeito de Borda no Maciço da Tijuca, Rio de Janeiro: Um Modelo de Vizinhança. Tese de Doutorado em Geografia, UFRJ, 2005.

FRICH, P.; ALEXANDER, L. V.; DELLA-MARTA, P.; GLEASON, B.; HAYLOCK, M.; KLEIN TANK, A. M. G. e PETERSON, T. Observed Coherent Changes in Climatic Extremes during the Second Half of the Twentieth Century. *Climate Research.*, v. 19, p. 193–212, 2002.

GARREAUD, R. D. e FALVEY, M. The Coastal Winds Off Western Subtropical South America in Future Climate Scenarios. *International Journal of Climatology*, doi: 10.1002/joc.1716, 2008.

GIORGI, F. e BATES, G. T. The Climatological Skill of a Regional Model over Complex Terrain. *Mon Wea*, v. 117, p. 2325–2347, 1989.

GIORGI, F. On the Simulation of Regional Climate using a Limited Area Model nested in a General Circulation Model. *J. Climate*, v. 3, p. 941–963, 1990.

GOOSSENS, C. e BERGER, A. Annual and Seasonal Climatic Variations over the Northern Hemisphere and Europe during the Last Century. *Annales Geophysicae*, Berlin, v. 4, n. B4, p. 385-400, 1986.

GORDON, C.; COOPER, C.; SENIOR, C. A.; BANKS, H.; GREGORY, J. M.; JOHNS, T. C.; MITCHELL, J. F. B. e WOOD, R. A. Simulation of SST, Sea Ice Extents and Ocean Heat Transport in a Version of the Hadley Centre Coupled Model without Flux Adjustments, *Clim. Dyn.*, v. 16, p. 147–168, 2000.

GRIMM, A. M. e NATORI, A. Climate Change and Interannual Variability of Precipitation in South America. *Geophysical Research Letters*, v. 33, L19706, doi 10.1029/2006GL026821, 2006.

HAYLOCK, M. R.; PETERSON, T. C.; ALVES, L. M.; AMBRIZZI, T.; ANUNCIÇÃO, Y. M. T.; BAEZ, J.; BARROS, V. R.; BERLATO, M. A.; BIDEGAIN, M.; CORONEL, G.; CORRADI, V.; GARCIA, V. J.; GRIMM, A. M.; KAROLY, D.; MARENGO, J. A.; MARINO, M. B.; MONCUNILL, D. F.; NECHET, D.; QUINTANA, J.; REBELLO, E.; RUSTICUCCI, M.; SANTOS, J. L.; TREBEJO, I. e VINCENT, L. A. Trends in Total and Extreme South American Rainfall in 1960-2000 and Links with Sea Surface Temperature. *Journal of Climate*, v. 19, p. 1490-1512, 2005.

INSTITUTO NACIONAL DE METEOROLOGIA – INMET. Normais Climatológicas do Brasil 1961-1990. Organizadores: Andrea Malheiros Ramos, Luiz André Rodrigues dos Santos, Lauro Tadeu Guimarães Fortes. Brasília, DF. INMET, p. 465, 2009.

INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE – IPCC. Summary for Policymakers, Special Reports on Emission Scenarios – SRES: A Special Report of Working Group III. Cambridge Univ. Press., New York, 2000.

INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE – IPCC. Climate Change 2007: The Physical Science Basis – Working Group I Contribution to the IPCC Fourth Assessment Report. Brussels, 2007.

JANJIC, Z. I. The Step-mountain Eta Coordinate Model: Further Developments of the Convection, Viscous Sublayer and Turbulence Closure Schemes. *Mon. Wea. Rev.*, v. 122, p. 927–945, 1994.

JOURDAN, P.; MARTON, E.; PIMENTEL, L. C. G. e SILVA, M. S. Caracterização do Regime de Vento em Superfície na Região Metropolitana do Rio de Janeiro: Influência dos Aspectos Fisiográficos e do Ciclo Diário. Submetido à *Revista Brasileira de Geofísica*, 2010.

KARL, T.; NICHOLLS, N. e GREGORY, J. The Coming Climate. *Sci. Am.*, v. 276, p. 54–59, 1997.

KIDA, H.; KOIDE, T.; SASAKI, H. e CHIBA, M. A New Approach to Coupling a Limited Area Model with a GCM for Regional Climate Simulations. *J. Meteor. Soc. Japan*, v. 69, p. 723–728, 1991.

LACIS, A. A. e HANSEN, J. E. A Parameterization of the Absorption of Solar Radiation in Earth's Atmosphere. *J. Atmos. Sci.*, v. 31, p. 118–133, 1974.

LE TREUT, H. e SOMERVILLE, R. Historical Overview of Climate Change Science. Cap. 1, p. 93-127, 2007.

LIN, J-L.; KILADIS, G. N.; MAPES, B. E.; WEICKMANN, K. M.; SPERBER, K. R.; LIN, W.; WHEELER, M. C.; SCHUBERT, S. D.; DEL GENIO, A.; DONNER, L. J.; EMORI, S.; GUEREMY, J-F.; HOURDIN, F.; RASCH, P. J.; ROECKNER, E. e SCINOCICA, J. F. Tropical Intraseasonal Variability in 14 IPCC AR4 Climate Models. Part I: Convective Signals. *Journal of Climate*, v. 19, n. 12, p. 2665–2690, 2006.

MAIA, L. Micro-clima e Eventos Climáticos Extremos. Rio Próximos 100 anos. O Aquecimento Global e a Cidade. Rio de Janeiro. Instituto Municipal de Urbanismo Pereira Passos. Rio de Janeiro, 2008.

MANTON, M. J.; HEATH, L.; SALINGER, J. e STEVENSON, L. A. Climate in Asia and the Pacific: a Synthesis of APN Activities. Asia-Pacific Network for Global Change Research, v. 6, p. 78, 2011.

MARENGO J. e AMBRIZZI, T. Use of Regional Climate Models in Impacts Assessments and Adaptations Studies from Continental to Regional and Local Scales: The CREAS (Regional Climate Change Scenarios for South America) Initiative in South America. Proceedings of 8 ICSHMO, Foz do Iguaçu, Brazil, p. 291-296, 2006.

MARENGO, J. A.; ALVES, L.; VALVERDE, M.; ROCHA, R. e LABORBE, R. Eventos Extremos em Cenários Regionalizados de Clima no Brasil e América do Sul para o Século XXI: Projeções de Clima Futuro usando Três Modelos Regionais. Relatório 5, Ministério do Meio Ambiente (MMA) – 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, 2007.

MARENGO, J. A. e CAMARGO, C. G. C. Surface Air Temperature Trends in Southern Brazil for 1960–2002. International Journal of Climatology, v. 28, issue 7, p. 893–904, doi: 10.1002/joc.1584, 2007.

MARENGO, J. A. e VALVERDE, M. C. Caracterização do Clima no Século XX e Cenário de Mudanças de Clima para o Brasil no século XXI usando Modelos do IPCC-AR4. Revista Multiciência, Campinas, Edição nº 8, Mudanças Climáticas, 2007.

MARENGO J. A.; JONES, R; ALVES, L. M. e VALVERDE, M. Future Change of Temperature and Precipitation Extremes in South America as derived from the PRECIS Regional Climate Modeling System. Int. J. Climatol., doi: 10.1002/joc.1863, 2009.

MARENGO, J. A.; RUSTICUCCI, M.; PENALBA, O. e RENOM, M. An Intercomparison of Observed and Simulated Extreme Rainfall and Temperature Events during the Last Half of the Twentieth Century: part 2: Historical Trends. Climatic Change, v. 98, p. 509–529, doi: 10.1007/s10584-009-9743-7, 2010.

MARENGO, J. A.; CHOU, S. C.; KAY, G.; ALVES, L. M.; PESQUERO, J. F.; SOARES, W. R.; SANTOS, D. C.; LYRA, A. A.; SUEIRO, G.; BETTS, R.; CHAGAS, D. J.; GOMES, J. L.; BUSTAMANTE, J. F. e TAVARES, P. Development of Regional Future Climate Change Scenarios in South America using the Eta CPTEC/HadCM3 Climate Change Projections: Climatology and Regional Analyses for the Amazon, São Francisco and the Parana River Basins. *Climate Dynamics*, 2011.

MEEHL, G.; KARL T.; EASTERLING, D.; CHANGNON, S.; PIELKE, R.; CHANGNON, D.; EVANS, J.; GROISMAN, P.; KNUTSON, T.; KUNKEL, K.; MEARN, L.; PARMESAN, C.; PULWARTY, R.; ROOT, T.; SYLVES, R.; WHETTON, P. e ZWIERS, F. An Introduction to Trends in Extreme Weather and Climate Events: Observations, Socioeconomic Impacts, Terrestrial Ecological Impacts and Model Projections. *Bull. Am. Meteor. Soc.*, v. 81, p. 413–416, 2000.

MELLOR, G. L. e YAMADA, T. A Hierarchy of Turbulence Closure Models for Boundary Layers. *J. Atmos. Sci.*, v. 31, p. 1791-1806, doi: 10.1175/1520-0469(1974)031, 1974.

MESINGER, F. A Blocking Technique for Representation of Mountains in Atmospheric Models. *Rivista di Meteorologia Aeronautica*, v. 44, p. 195–202, 1984.

MESINGER, F.; JANJIC, Z. I.; NICKOVIC, S.; GAVRILOV, D. e DEAVEN, D. G. The Step-mountain Coordinate: Model Description and Performance for Cases of Alpine Lee Cyclogenesis and for a Case of an Appalachian Redevelopment. *Mon. Wea. Rev.*, v. 116, p. 1493-1518, doi: 10.1175/1520-0493(1988)116, 1988.

MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE – MMA. Relatório Ambiental Urbano Integrado. Disponível em <http://www.mma.gov.br/port/sqa/urbana/>, 2002.

MURPHY, J. M. B.; BOOTH, B. B. B.; COLLINS, M.; HARRIS, G. R.; SEXTON, D. M. H. e WEBB, M. J. A Methodology for Probabilistic Predictions of Regional Climate Change from Perturbed Physics Ensembles, *Philos. Trans. Soc., R., Ser. A.*, v. 365, p. 1993-2028, 2007.

NEW, M.; HULME, M. e JONES, P. Representing Twentieth-Century Space Time Climate Variability. Part II: Development of 1901–1996 Monthly Grids of Terrestrial Surface Climate. *J. Clim.*, v. 13, p. 2217–2238, 2000.

NOBRE, C. A.; YOUNG, A. F.; SALDIVA, P.; MARENGO, J. A.; NOBRE, A. D.; JUNIOR, S. A.; SILVA, G. C. M. e LOMBARDO, M. Vulnerabilidade das Megacidades Brasileiras às Mudanças Climáticas: Região Metropolitana de São Paulo. Sumário Executivo, 2010.

NUÑEZ, M. N.; SOLMAN, S. A. e CABRÉ, M. F. Regional climate change experiments over southern South América. II: Climate Change Scenarios in the Late Twenty-first Century. *Climate Dynamics*, doi: 10.1007/s00382-008-0449-8, 2008.

OBREGÓN, G. e MARENGO, J. A. Mudanças Climáticas Globais e seus Efeitos sobre a Biodiversidade: Caracterização do Clima no Século XX no Brasil: Tendências de Chuvas e Temperaturas Médias e Extremas. Relatório nº 2, MMA, 2007.

PINTO, H. S.; ASSAD, E.; ZULLO, J.; BRUNINI, O. e EVANGELISTA, B. A. O Aquecimento Global e a Agricultura. Anais do XII Congresso Brasileiro de Agrometeorologia. Fortaleza, 2001.

POPE, V.; GALLANI, M.; ROWTREE, P. e STRATTON, R. The Impact of New Physical Parameterizations in the Hadley Centre Climate Model. *Clim. Dyn.*, v. 16, p. 123–146, 2000.

RANDALL, D. A.; WOOD, R. A.; BONY, S.; COLMAN, R.; FICHEFET, T.; FYFE, J.; KATTSOV, V.; PITMAN, A.; SHUKLA, J.; SRINIVASAN, J.; STOUFFER, R. J.; SUMI, A. e TAYLOR, K. E. Climate Models and Their Evaluation. In: *Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [SOLOMON, S.; QIN, D.; MANNING, M.; CHEN, Z.; MARQUIS, M.; AVERYT, K. B.; TIGNOR, M. e MILLER, H. L. (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 2007.

RUSTICUCCI, M.; MARENGO, J. A.; PENALBA, O e RENOM, M. An Intercomparison of Model-Simulated in Extreme Rainfall and Temperature Events during the Last Half of the Twentieth Century. Part 1: Mean Values and Variability. *Climatic Change*, v. 98, p. 493–508, doi: 10.1007/s10584-009-9742-8, 2010.

SANGIGOLO, C. A.; RODRIGUES, R. C. M. e ETCHICHURY, P. C. Tendências nas Temperaturas Médias do Brasil. *Anais do VII Congresso Brasileiro de Meteorologia*, v. 1, p. 367-371, 1992.

SEN, P. K. Estimates of the Regression Coefficient based on Kendall's Tau. *Journal of American Statistics Association*, v. 63, p. 1379-1389, 1968.

SNEYERS, R. Sur L'analyse Statistique des Series D'observations. Gênevè: Organisation Météorologique Mondial, p. 192, 1975.

SOARES, W. R. e MARENGO, J. A. Assessments of Moisture Fluxes East of the Andes in South América in a Global Warming Scenario. *International Journal of Climatology*. Publicado online em Wiley InterScience. <http://www.interscience.wiley.com>, doi: 10.1002/joc.1800, 2008.

SOLMAN, S. A.; NUÑEZ, M. N. e CABRÉ, M. F. Regional Climate Change Experiments over Southern South America. I: Present Climate. *Clim. Dyn.*, v. 30, p. 533–552, 2007.

TEBALDI, C.; HAYHOE, K.; ARBLASTER, J. e MEEHL, G. Going to the Extremes: An Intercomparison of Model-simulated Historical and Future Changes in Extreme Events. *Climatic Change*, v. 79, p. 185-211, 2006.

TORRES, R. R.; MARENGO, J. A. e VALVERDE, M. C. Projeções de Extremos Climáticos nas Regiões Metropolitanas de São Paulo e Rio de Janeiro para o Final do Século XXI. *Anais do III Simpósio Internacional de Climatologia*. Canela, 2009.

VALVERDE, M. C.; ANDRADE, E. e MARENGO, J. A. Chuvas Extremas sobre o Nordeste e Norte do Brasil no Outono de 2009: Uma Análise Local, Presente e Futura. Anais do III Simpósio Internacional de Climatologia. Canela, 2009.

VALVERDE, M. C. e MARENGO, J. A. Mudanças na Circulação Atmosférica sobre a América do Sul para Cenários Futuros de Clima Projetados pelos Modelos Globais do IPCC AR4. Revista Brasileira de Meteorologia, v. 25, n. 1, p. 125-145, 2010.

VERA, C.; SILVESTRI, G.; LIEBMANN, B. e GONZÁLEZ, P. Climate Change Scenarios for Seasonal Precipitation in South America from IPCC-AR4 Models. Geophysical Research Letters, v. 33, doi: 10.1029/2006GL025759, 2006.

VINCENT, L. A.; PETERSON, T. C.; BARROS, V. R.; MARINO, M. B.; RUSTICUCCI, M.; CARRASCO, G.; RAMIREZ, E.; ALVES, L. M.; AMBRIZZI, T.; BERLATO, M. A.; GRIMM, A. M.; MARENGO, J. A.; MOLION, L.; MONCUNILL, D. F.; REBELLO, E.; ANUNCIACÃO, Y. M. T.; QUINTANA, J.; SANTOS, J. L.; BAEZ, J.; CORONEL, G.; GARCIA, J.; TREBEJO, I.; BIDEGAIN, M.; HAYLOCK, M. R.; KAROLY, D. Observed Trends in Indices of Daily Temperature Extremes in South America 1960-2000. Bulletin of the American Meteorological Society, v. 18, p. 5011-5023, 2005.

ZHANG, X. e YANG, F. RCLimDex (1.0) – User Manual. Climate Research Branch Environment Canada Downsview, Ontario, Canada, 2004.

ZHAO, Q. e CARR, F. H. A Prognostic Cloud Scheme for Operational NWP Models. Mon. Wea. Rev., v. 125, p. 1931–1953, 1997.