



Brasil 2040: Cenários e Alternativas de Adaptação à Mudança do Clima

**Programa das Nações Unidas para o Desenvolvimento (PNUD),
Edital 002/2014/BRASIL/06/032 – Modelagem Climática**

PRODUTO 5

Relatório descrevendo o clima futuro de 2071-2099 simulado pela integração do modelo Eta usando as condições do MIROC5, anexando mídia contendo arquivos de médias mensais, sazonais e anuais de variáveis bidimensionais, tendência de indicadores de extremos climáticos e distribuição de frequência de temperatura e precipitação para pelo menos 3 regiões: Amazônia, Nordeste e Centro-Sul do Brasil.

Jorge Luís Gomes

**Cachoeira Paulista
Setembro de 2014**

SUMÁRIO

| | | |
|-------|---|----|
| 1. | INTRODUÇÃO | 1 |
| 2. | DADOS E METODOLOGIA | 3 |
| 2.1 | O Modelo Eta | 3 |
| 2.2 | O Modelo MIROC5 | 5 |
| 2.3 | Cenários de Emissão (RCP's) | 5 |
| 2.4 | Metodologia | 7 |
| 3. | RESULTADOS | 7 |
| 3.1 | Precipitação | 8 |
| 3.1.1 | Análise Mensal | 8 |
| 3.1.2 | Análise Sazonal | 9 |
| 3.1.3 | Análise do Ciclo Anual | 11 |
| 3.1.4 | Análise da Distribuição de Frequência | 12 |
| 3.2 | Temperatura | 12 |
| 3.2.1 | Análise Mensal | 12 |
| 3.2.2 | Análise Sazonal | 13 |
| 3.2.3 | Análise do Ciclo Anual | 14 |
| 3.2.4 | Análise da Distribuição de Frequência | 15 |
| 3.3 | Análise das Tendências de Indicadores de Extremos Climáticos | 16 |
| 4. | CONSIDERAÇÕES FINAIS | 23 |
| 5. | REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS | 25 |

1. INTRODUÇÃO

Nas últimas três décadas a temperatura da superfície da Terra tem sido sucessivamente mais quente do que qualquer década anterior a 1850 (AR5/IPCC 2013, Climate Change 2013: The Physical Science Basis). Baseado nessa e outras constatações, como diminuição da quantidade da neve e do gelo, aumento do nível do mar e aumento das concentrações de gases de efeito estufa, o quinto relatório do IPCC confirma que o aquecimento do sistema climático é inequívoco. Neste contexto, é essencial gerar informação de alta qualidade e relevantes conhecimentos científicos a fim de: compreender os riscos das mudanças climáticas para a sociedade, prever os impactos das mudanças climáticas a curto e longo prazo, fornecer subsídios aos tomadores de decisão e a sociedade para escolha de caminhos sustentáveis e escolha de medidas de adaptação.

Diante desse desafio, a formulação de políticas de adaptação em resposta a essas mudanças tem mostrado que o nível de detalhamento fornecido pela maioria dos cenários de mudanças climáticas para o futuro, em particular os modelos globais de clima (MCGs) ainda não estão consolidados, ainda que, forneçam simulações adequadas da circulação atmosférica em escala global (Camargo et al., 2001; Cavalcanti et al., 2002; Marengo et al., 2003).

As Projeções de mudanças no sistema climático são feitas usando uma hierarquia de modelos climáticos que vão desde modelos climáticos simples, para modelos de média complexidade, para os modelos climáticos abrangentes, e modelos do Sistema Terra. Estes modelos simulam mudanças com base em um conjunto de cenários de forçantes antropogênicas. Um novo conjunto de cenários, os Caminhos de concentração Representante (Representative Concentration Pathways - RCPs), foi utilizado para as novas simulações de modelos climáticos desenvolvidas no âmbito do Projeto de Intercomparação de Modelos Acoplados - Fase 5 (Coupled Model Intercomparison Project Phase 5 - CMIP5) do World Climate Research Programme.

A técnica mais aceita para transformar a relativamente baixa resolução espacial dos modelos climáticos globais para escalas mais refinadas é obtida com a regionalização (“downscaling”) das projeções destes modelos usando modelos climáticos regionais de mais alta resolução sobre a área de interesse e tendo como condições de fronteira (ou de contorno) nas fronteiras laterais do domínio geográfico do mesmo, dados provenientes do modelo climático global. Uma revisão comparando vários métodos de downscaling aplicados à saída dos MCGs é visto em Wilby and Wigley (1997) e Giorgi et al. (2001).

A técnica de regionalização (“downscaling”) tem sido usada intensivamente para previsões sazonais sobre a América do Sul, todavia, para projeções climáticas futuras ainda existe um número limitado de estudos. Dentre eles podemos mencionar Marengo et al., 2007 que utilizaram um conjunto de vários modelos regionais em modo “multimodel ensemble” forçados com as mesmas condições de contorno.

O Projeto “BRASIL 3 TEMPOS” (BRA/06/032) executado pela Secretaria de Assuntos Estratégicos da Presidência da República (SAE/PR), tem como objetivo desenvolver estratégias e ações nacionais que subsidiem o governo na formação e implementação de políticas públicas de longo prazo que promovam o crescimento econômico do país, acompanhado de inclusão social. Essas ações serão realizadas por meio de estudos, produtos e eventos sobre temas de grande importância para o planejamento estratégico brasileiro. A SAE, por intermédio da Subsecretaria de Desenvolvimento Sustentável, está conduzindo um estudo estratégico que avaliará os potenciais impactos e as estratégias adaptativas necessárias para fazer frente aos riscos da mudança do clima para o Brasil. Tal estudo, denominado “Brasil 2040: cenários e alternativas de adaptação à mudança do clima”, será realizado em parceria com diversas instituições e órgãos de governo, entre eles o Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovação (MCTI) e o Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), que cooperarão tecnicamente com a SAE, visando à compatibilização do desenvolvimento econômico-social com a proteção do sistema climático, conforme disposto na Lei nº 12.187, 29 de dezembro de 2009.

O Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE) estuda as mudanças do clima e coordena a modelagem regional do clima e de cenários da mudança

do clima para o futuro, bem como coordena a relação entre estes resultados e as pesquisas e estudos de vulnerabilidade e adaptação relativos a setores estratégicos que são vulneráveis aos impactos associados à mudança do clima no Brasil.

Diante das considerações aqui discutidas, este segundo relatório tem como objetivo avaliar a destreza do modelo regional Eta, forçado com as condições do modelo global MIROC5, em simular os principais padrões atmosféricos dominantes sobre a região da América do Sul (AS) no período 2011 a 2040.

2. DADOS E METODOLOGIA

2.1 O Modelo Eta

O modelo regional Eta foi desenvolvido na Universidade de Belgrado (Mesinger et al., 1988), foi utilizado operacionalmente no NCEP (Black, 1994) e, atualmente, é usado no CPTEC (Chou et al. 2000) na previsão de tempo. Tal modelo foi modificado para simulações climáticas (Bustamante et al. 2002) e foi utilizado anteriormente em estudos de previsão sazonal sobre a América do Sul (Bustamante et al., 2006; Alves et al., 2004; Chou et al., 2005) apresentando melhores resultados, isto é, mais próximos das observações do que o modelo global T062, usado como condições iniciais e de contorno. Recentemente, o modelo foi adaptado para realizar integrações de escala de décadas para estudos de cenários de mudanças climáticas (PESQUERO *et al.*, 2009). Os primeiros cenários de mudanças climáticas foram produzidos sobre a América do Sul para o clima presente, período de 1961-1990, e clima futuro de 2010-2100, cenário A1B, com resolução de 40km e condições de contorno do modelo HadCM3 (CHOU *et al.*, 2012; MARENGO *et al.*, 2012).

O esquema do cálculo de radiação de onda longa baseia-se no modelo de Fels e Schwarzkopf (1975), enquanto a radiação de onda curta segue o modelo de Lacis e Hansen (1974). Os dois esquemas são chamados a cada uma hora de integração. As tendências de temperatura da atmosfera associadas aos efeitos radiativos são aplicadas após cada passo de tempo. O modelo Eta usa um esquema de convecção cumulus desenvolvido por Betts e Miller (1986).

Esta parametrização trata tanto a convecção rasa (não precipitante) quanto a profunda (precipitante). Este esquema é fundamentado no ajuste dos perfis de temperatura e umidade específica termodinamicamente instável na direção de um perfil de referência, com um tempo de relaxação prescrito. A microfísica de nuvens é produzida pelo esquema de Zhao (Zhao et al., 1997).

A grade horizontal do modelo é a grade E de Arakawa, mas na projeção de uma grade regular ela tem resolução de 20 km na latitude e longitude. Neste trabalho são utilizados 38 níveis na vertical. As condições iniciais e as condições de contorno são provenientes dos modelos do MIROC5 e são atualizadas a cada 6 horas (temperatura e vento, por exemplo), a cada mês (temperatura da superfície do mar - TSM) ou até a cada 3 anos (CO_2). A versão para previsão de tempo do modelo Eta lê o arquivo de TSM observado no início da integração e o mantém fixo durante todo o período da integração. Entretanto para integrações longas com o modelo Eta a TSM deve ser atualizada já que o modelo MIROC5 é um modelo acoplado e calcula sua própria TSM. Desta forma foi necessária uma modificação no código do modelo Eta para que a leitura da TSM fosse mensal. Uma forma de não haver modificações abruptas no campo de TSM durante a troca dos meses, é o uso também de uma interpolação linear entre dois meses seguidos de forma a se obter 30 diferentes campos entre estes (modificação diária). As condições inferiores de albedo são climatológicas. A água no solo segue o esquema Chen et al. (1997) possuindo 4 camadas de solo e um mapa com 12 tipos de cobertura vegetal.

As reanálises do ERA-Interim (Dee et al., 2011) foram utilizadas como condições iniciais de superfície com 4 camadas de solo (temperatura e umidade de solo). Do mesmo modo que a constante de TSM, a constante de CO_2 é lida no começo do programa e depois seu valor permanece inalterado durante todo o período de integração. Desta forma, é necessária mais uma alteração no código do modelo para que as simulações do modelo Eta tenham perfis de CO_2 próximas aos do modelo global utilizado como condição de contorno.

2.2 O Modelo MIROC5

A condição de contorno utilizada nas simulações com o Modelo Eta foram provenientes do “Model for Interdisciplinary Research on Climate” (MIROC5). Esse modelo é composto pelos modelos atmosférico de circulação global da atmosfera (CCSR–NIES–Frontier Research Center for Global Change - Numaguti et al. 1997), modelo oceânico CCSR Ocean Component Model (COCO; Hasumi 2006), que inclui um modelo de gelo oceânico global, e de um modelo de superfície que possui um módulo de rios acoplado. O MIROC5 (Watanabe et al. 2010) é uma versão melhorada do modelo MIROC3.2 utilizado no IPCC AR4 (2007). Os núcleos dinâmicos do modelo atmosférico e os esquemas de parametrização de radiação, convecção cumulus, turbulência, e aerossóis foram atualizados na versão MIROC5. Nos modelos oceânicos e de superfície continental do MIROC5, a componente do gelo marinho foi melhorada, e uma avançada versão do módulo de rios (Oki e Sud 1998) foi incorporada. Para informações mais detalhadas sobre o MIROC5 Uma descrição mais detalhada do modelo MIROC5 pode ser obtida em Watanabe e outros (2010).

A análise das projeções foram feitas a partir do processamento dos dados de saída do modelo regional Eta/CPTEC para os anos de 2011 a 2040 comparados com os dados da simulação do clima presente. As variáveis de interesse neste trabalho são: temperatura a 2 metros e precipitação.

2.3 Cenários de Emissão (RCP's)

As emissões futuras de gases de efeito estufa (GEE) são o produto de sistemas dinâmicos complexos, determinados por forças motrizes tais como crescimento demográfico, desenvolvimento sócio–econômico e mudança tecnológica. As escolhas sociais que definem as forçantes climáticas para o futuro são cercadas por grande incerteza. Os Cenários de emissão representam vários caminhos de desenvolvimento de como o futuro poderá se desdobrar. Estes cenários auxiliam nas análises de mudanças climáticas, incluindo modelagem do clima e avaliação de impactos, adaptação e mitigação. De acordo com o AR5, em relatórios anteriores (TAR e AR4), os cenários de emissões do SRES (“Special Report on Emission Scenarios” - IPCC, 2000)

foram usados como a principal forma de explorar a incerteza da contribuição antropica no clima futuro. No entanto, pesquisas recentes têm feito uso de RCP's ("Representative Concentration Pathways" - RCP) (Van Vuuren et al., 2011a, 2011b).

RCP's são novos cenários que especificam concentrações e emissões correspondentes, mas não estão diretamente baseados na evolução sócio-econômica, como os cenários SRES. Os cenários de RCP são baseados em uma abordagem diferente e incluem gases de vida curta mais consistentes e mudanças de uso do solo. Eles não são, necessariamente, mais capazes de representar a evolução futura do que os cenários SRES. Os quatro cenários RCP's (Figura 1) são identificados pelo pico ou estabilização, no século 21, do valor da forçante radiativa (RF – "Radiative Forcing"). Neste trabalho foi utilizado o cenário intermediário RCP4.5.

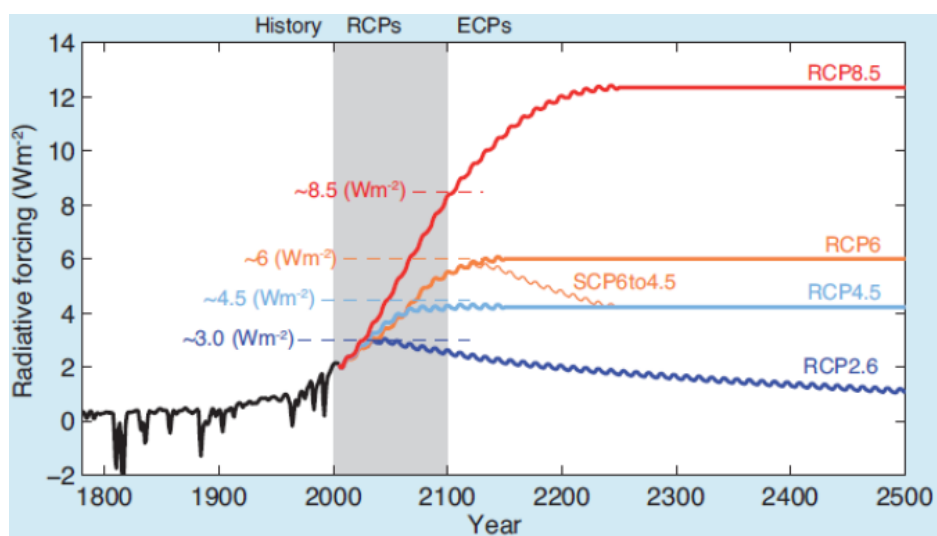


Figura 1 – RF total (antropogênico mais natural) para RCP's e ECP (Extended Concentration Pathways) - para RCP2.6, RCP4.5, RCP6 e RCP8.5, assim como uma extensão complementar RCP6to4.5 com um ajuste das emissões após 2100 para atingir os níveis de concentração do RCP4.5 em 2250. As variações de curto prazo na RF são devido às forçantes vulcânicas no passado (1800-2000) e ao ciclo solar, assumindo um ciclo solar constante de 11 anos (seguindo a recomendação do CMIP5), exceto em momentos de estabilização (CUBASCH et al., 2013).

2.4 Metodologia

A avaliação das projeções do clima futuro do modelo regional Eta envolveu uma análise detalhada das mudanças nas características do clima na escala de tempo sazonal sobre a AS. Para tanto, foram analisados campos médios mensais, sazonais (DJF, MAM, JJA, SON) da precipitação, temperatura e vento em baixos e altos níveis (850 e 200 hPa) comparando-os com os dados da simulação do clima presente. Outro aspecto analisado foi o ciclo anual da precipitação e temperatura sobre algumas regiões da AS. A Figura 2 mostra a localização das áreas que serão analisadas. Para este estudo foram selecionadas regiões denominadas: Amazônia que inclui toda a Região Norte mais os estados do Mato Grosso; Região Nordeste do Brasil; e Centro-sul que compreende as Regiões Sul, Sudeste e os estados de Goiás e do Mato Grosso do Sul.

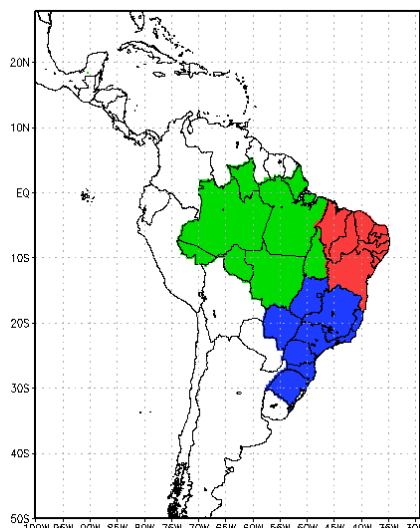


Figura 2 – Domínio do modelo Eta e os três subdomínios de estudo: Amazônia (AM) em verde, Nordeste (NEB) em vermelho e Centro-Sul do Brasil (CS) em azul.

3. RESULTADOS

Neste capítulo serão discutidos os resultados das integrações realizadas com o modelo regional Eta para o período de 2071 a 2099 sobre a América do Sul utilizando as condições de contorno do MIROC5 para o cenário 4.5. As análises serão feitas através da comparação com o período 1961-1990, com o intuito de examinar as mudanças no período futuro.

3.1 Precipitação

O regime de precipitação climatológico, na maior parte da AS, possui o ciclo anual bem definido, com máximo no verão (DJF) e mínimo durante o inverno (JJA) (Rao e Hada, 1990). Esta característica está associada à variação anual da circulação atmosférica sobre AS e adjacências (Satyamurty *et al.* 1998; Grimm *et al.*, 2004a), que é fortemente relacionada com o aquecimento solar sazonal. A seguir serão apresentados os campos espaciais mensais e sazonais da precipitação para o período de 2071 a 2099, além do ciclo anual e da distribuição de Frequência para as regiões apresentadas na Figura 2.

3.1.1 Análise Mensal

No clima presente (1961-1990), de maneira geral, a distribuição espacial e temporal simulada pelo modelo se aproxima do padrão climatológico observado, permitindo identificar os diferentes regimes pluviométricos observados durante aos meses do ano. A Figura 4 mostra a variabilidade mensal da precipitação (mm/dia) simulada pelo modelo Eta sobre a AS para o período de 2071 a 2099. Climatologicamente a distribuição espacial e temporal simulada pelo modelo Eta neste período segue o padrão encontrado na simulação do clima presente. Assim como nos períodos de 2011 a 2040 e 2041 a 2071, o modelo indica uma redução da precipitação sobre os oceanos e uma intensificação sobre o continente. Nota-se também para esse período uma faixa de precipitação excessiva sobre a costa brasileira.

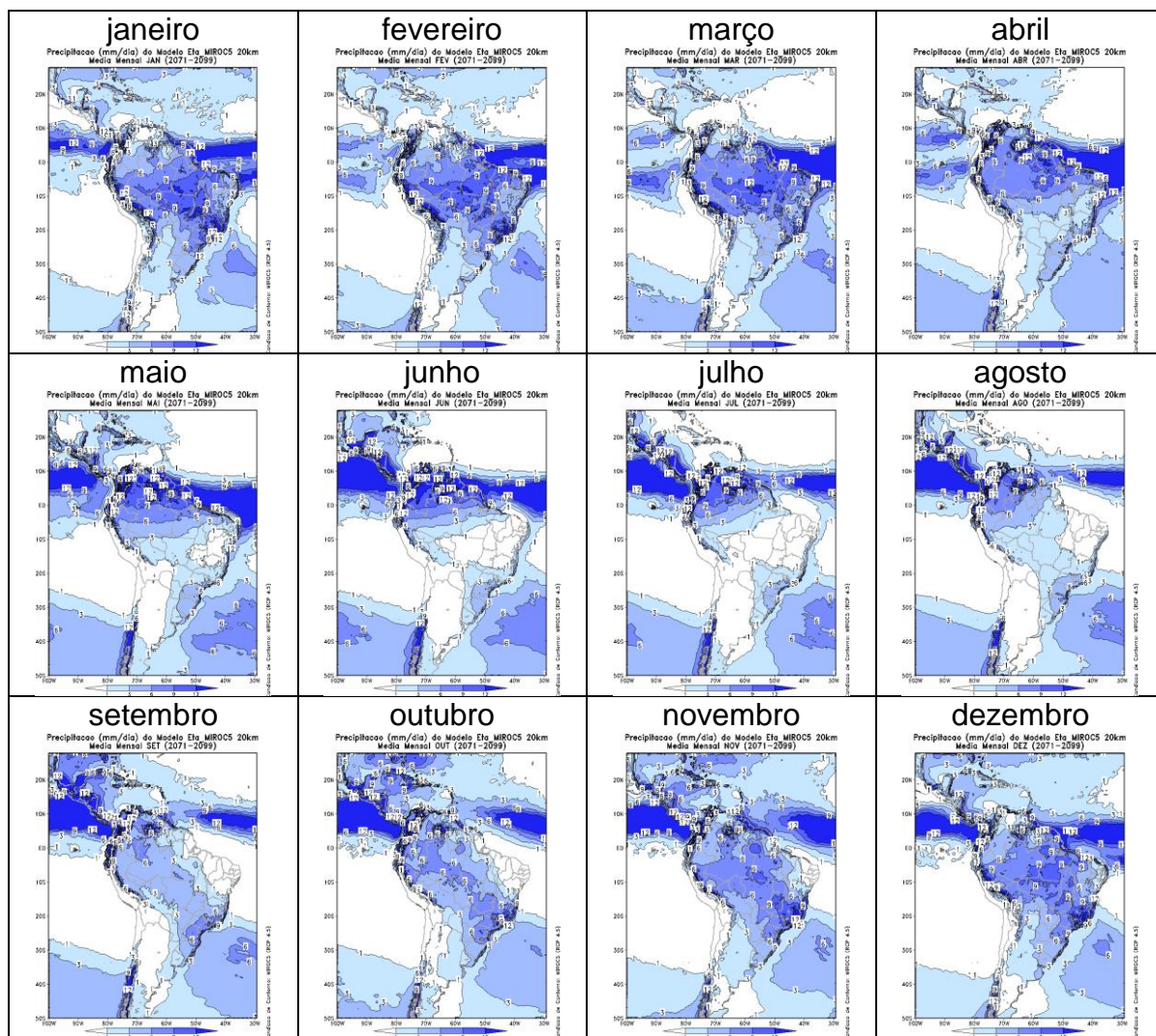


Figura 3 – Média mensal da precipitação (mm/dia) do período de 2071-2099 simulada pelo modelo regional Eta-MIROC5 RCP4.5.

3.1.2 Análise Sazonal

Na figura 4 são apresentados os campos sazonais de precipitação para o período de 2071 a 2099. Observa-se uma banda de precipitação se estendendo do noroeste da Amazônia até o sudeste do Brasil, relacionados à atuação da ZCAS no período de verão (DJF). Durante o período de inverno (JJA) é possível observar uma redução da precipitação sobre o Brasil-Central, no entanto, neste mesmo período, as chuvas permanecem sobre a região sul do Brasil, Paraguai, Uruguai e sul do Chile e Argentina, resultado da atuação de sistemas frontais característicos desta época (Andrade, 2005). O deslocamento sazonal da ZCIT também pode ser observado na Figura 4, onde se nota um aumento da precipitação no norte da região Nordeste do Brasil em MAM, que está relacionado ao posicionamento mais ao Sul da ZCIT (Hastenrath e Heller 1977).

A Figura 5 mostra a média da diferença da precipitação sazonal entre o período de 2071-2099 e o período de 1961-1990 (esta diferença é chamada aqui de anomalia). No verão (DJF) é possível observar anomalias positivas sobre as regiões Sul, leste da região Sudeste e toda faixa norte da América do Sul. Enquanto que anomalias negativas são verificadas sobre o sul do Estado do Amazonas. No outono (MAM) se destaca as anomalias negativas sobre a região central do Brasil e o aumento das anomalias positivas na faixa norte da América do Sul. No trimestre JJA destaca-se a anomalia positiva sobre a região Sul do Brasil. No outono (SON) a área de as anomalias positivas sobre a região Sul aumenta a sua abrangência cobrindo toda região Sul e parte da região Sudeste. Anomalias positivas também são observadas sobre toda região Norte. Similar ao observado nos períodos de 2011-2040 e 2041-2070, um aumento significativo da precipitação ocorre ao longo da conta brasileira.

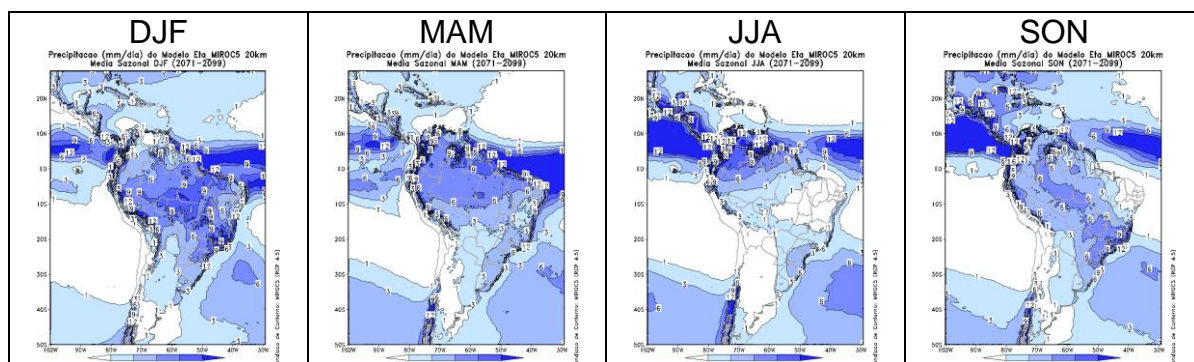


Figura 4 – Média sazonal precipitação (mm/dia) do período de 2011-2040 simulada pelo modelo regional Eta-MIROC5 RCP4.5.

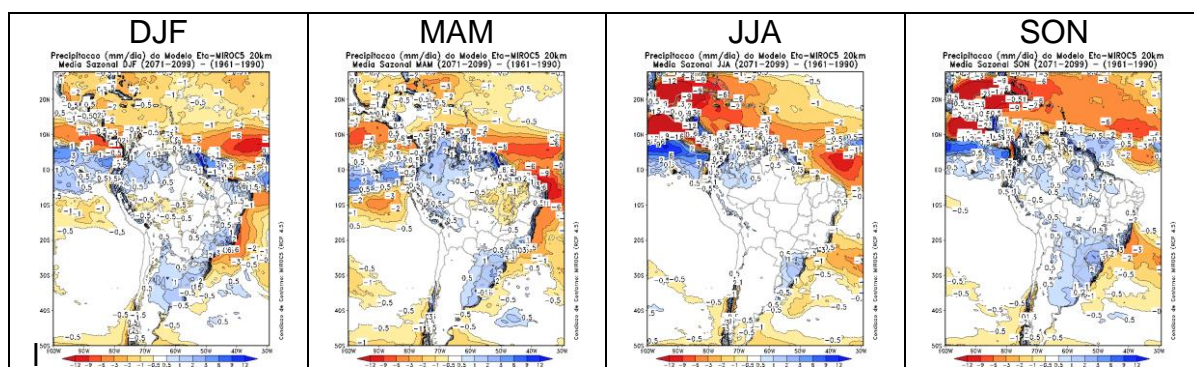


Figura 5 – Média sazonal da anomalia de precipitação (mm/dia), para o período de 2011-2040 referente ao período de 1961-1990.

3.1.3 Análise do Ciclo Anual

A seguir serão apresentadas as séries temporais do ciclo anual climatológico da precipitação (Figura 6) simulada para o período 1961-1990 e projetada para o período 2071-2099 pelo modelos Eta, sobre as regiões indicadas pela Figura 2 (Amazônia, Nordeste do Brasil e Centro-Sul). Assim como nos observado nos períodos anteriores (2011-2040 e 2041-2070) as séries temporais o modelo Eta simula bem as características do ciclo hidrológico de cada região, isto é, a variação sazonal está bem representada (pouca precipitação durante os meses secos e totais elevados durante os meses chuvosos). Na Figura 6 nota-se que nas três regiões analisadas o modelo Eta mostra uma tendência de aumento da precipitação em 2071-2099. As anomalias negativas mais intensas ocorrem no verão, que é o período chuvoso, chegando a quase 2 mm/dia na região Centro-Sul do Brasil.

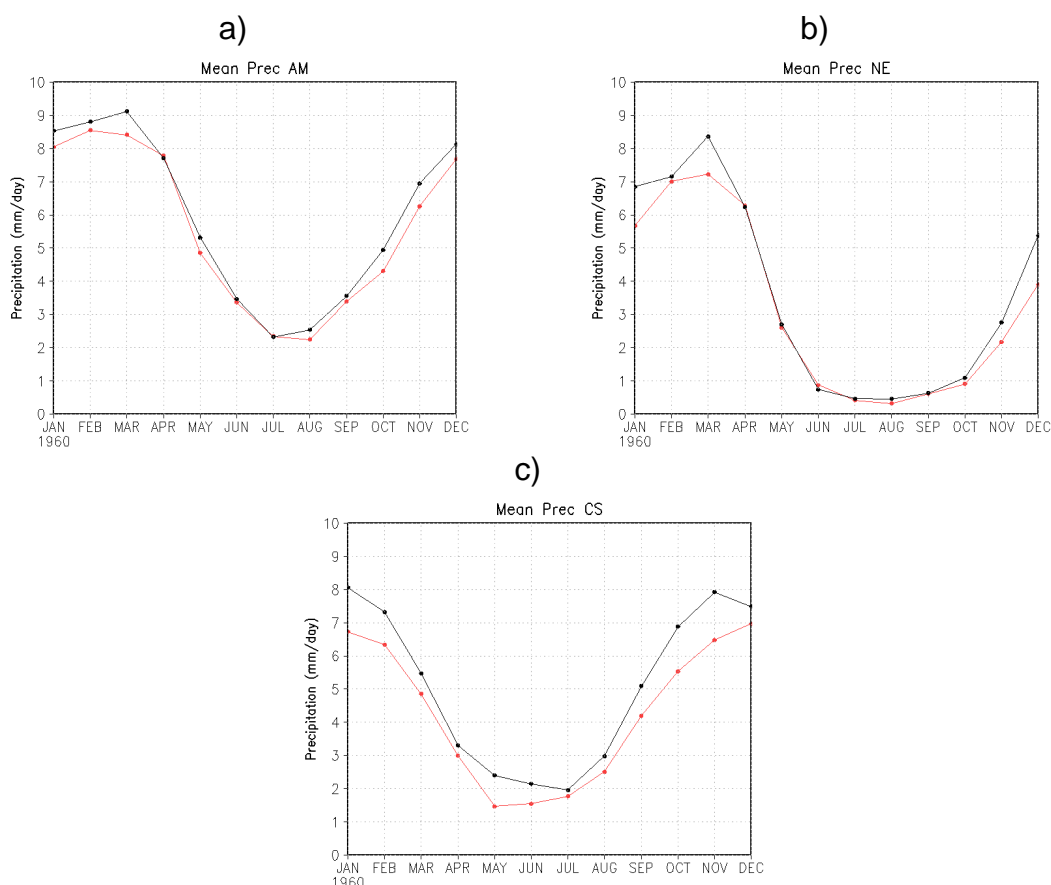


Figura 6 – Ciclo anual de precipitação (mm/dia) simulado pelo modelo Eta, para as regiões: Amazônia (a), Nordeste (b) e Centro-Sul (c) indicada na Figura 2. Em preto a simulação para o clima presente (1961-1990) e em vermelho a projeção para o clima futuro (2071-2099).

3.1.4 Análise da Distribuição de Frequência

A Figura 7 mostra a distribuição de frequência da precipitação mensal para as mesmas regiões do ciclo anual. Observa-se que há uma tendência de aumento na frequência de precipitação mensal acima de 14 mm/dia na Amazônia, acima de 12 mm/dia na região Nordeste e acima de 6 mm/dia na Centro Sul. Verifica-se em todas as regiões, assim como nos períodos de 2011-2040 e 2041-2070, um aumento significativo na frequência de eventos acima de 30mm/dia, esse padrão de aumento se deve novamente ao aumento da precipitação ao longo da costa. As projeções para o clima futuro indicam um aumento dos eventos extremos de precipitação.

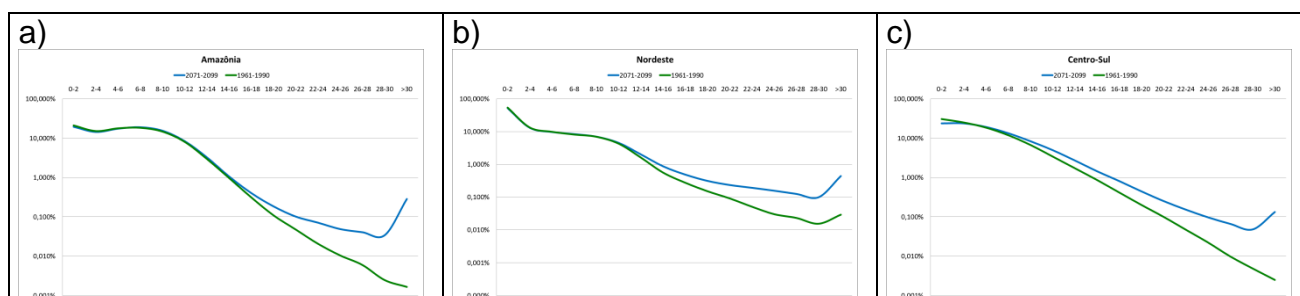


Figura 7 – Distribuição de frequência da precipitação média mensal (mm/dia) simulada pelo modelo Eta, para as regiões Amazônia (a), Nordeste (b) e Centro-Sul (c) referenciadas na figura 2. Em verde a simulação para o clima presente (1961-1990) e em azul a projeção para o clima futuro (2011-2040).

3.2 Temperatura

A seguir serão apresentados os campos espaciais mensais e sazonais da precipitação para o período de 2041 a 2070, além do ciclo anual e da distribuição de Frequência para as regiões apresentadas na Figura 2.

3.2.1 Análise Mensal

No clima presente, em geral, o modelo representa bem o padrão espacial da temperatura ao longo do ano. Para o clima futuro esse padrão se repete com a temperatura variando sazonalmente de acordo com a incidência solar. A Figura 8 mostra os campos médios mensais da temperatura a 2 metros, simulado pelo modelo Eta para o período 2041-2070. Valores mais altos de temperatura são encontrados próximo ao equador, diminuindo em direção aos polos. É possível também observar uma incursão de ar mais frio no

sul da América do Sul de maio a setembro, que é o período quando a Alta Subtropical do Atlântico Sul (ASAS) está mais deslocada para norte, possibilitando um aumento na entrada de sistemas frontais nessa região.

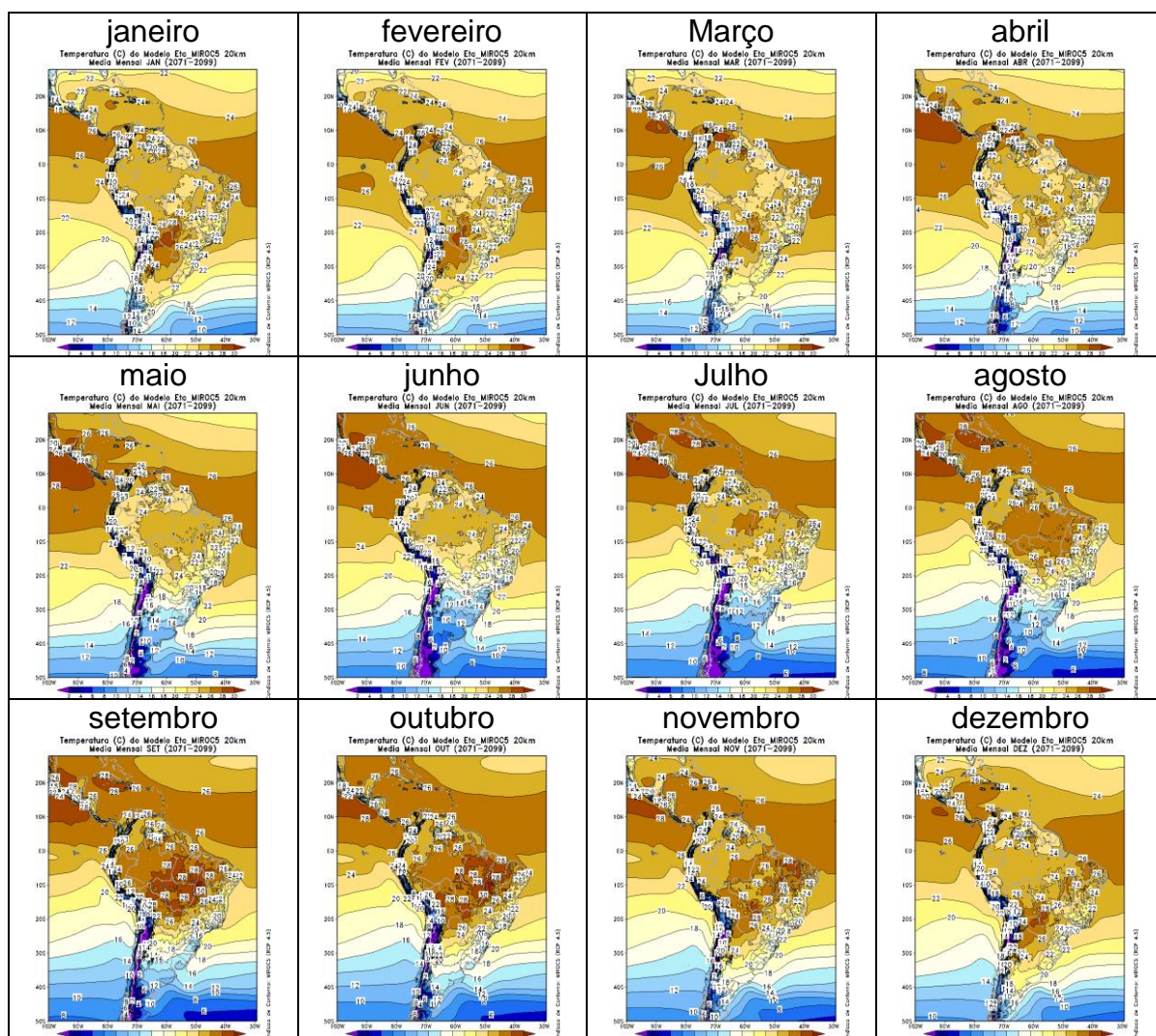


Figura 8 – Média mensal da temperatura (°C) do período de 2011-2040 simulada pelo modelo regional Eta-MIROC5 RCP4.5.

3.2.2 Análise Sazonal

A Figura 9 mostra os campos médios sazonais de temperatura simulados pelo modelo Eta para o período de 2041-2070. Nesta figura é possível observar a variação sazonal da temperatura, com valores maiores na primavera e verão e temperaturas mais baixas no outono e inverno sobre o continente. No outono e inverno é possível observar o avanço de baixas temperaturas vindas do sul e as temperaturas maiores na parte norte do Brasil, em concordância com o padrão climatológico para estas estações. As

diferenças em relação ao clima presente são apresentadas na Figura 10, onde se observa um aumento da temperatura sobre todo o domínio em todas as estações do ano. Os maiores valores de anomalia chegam a 3 °C sobre a região central do Brasil.

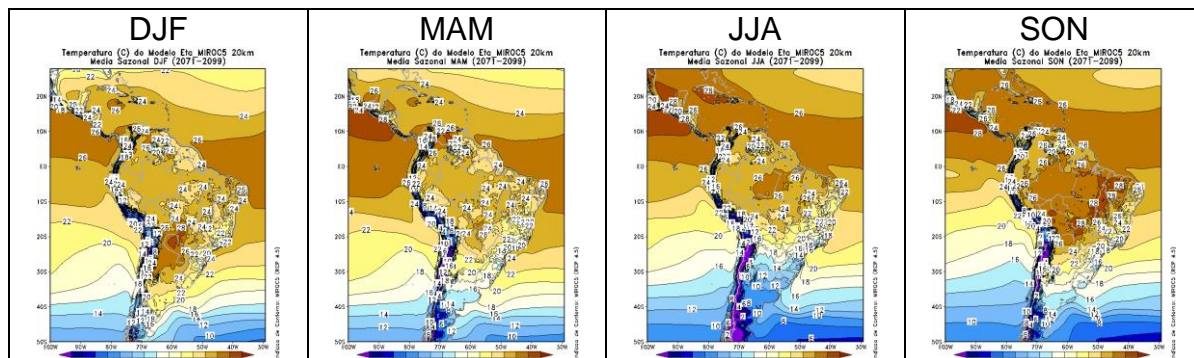


Figura 9 – Média sazonal da temperatura (°C) do período de 2011-2040 simulada pelo modelo regional Eta-MIROC5 RCP4.5.

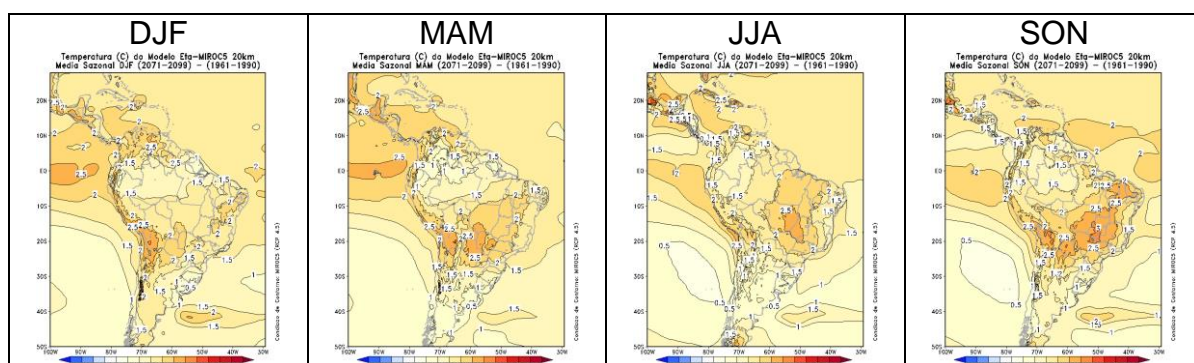


Figura 10 – Média sazonal da anomalia de temperatura (°C), para o período de 2011-2040 referente ao período de 1961-1990.

3.2.3 Análise do Ciclo Anual

A Figura 11 mostra a variação anual da temperatura (°C) para as áreas definidas na Figura 2. Observa-se uma tendência de aumento da temperatura, para todas as regiões analisadas, durante todo o ano quando comparado com o clima presente. O ciclo anual para o clima futuro apresenta-se em fase com o ciclo anual do clima presente, porém com um aumento das temperaturas em todos os meses do ano e regiões de aproximadamente 1,5°C.

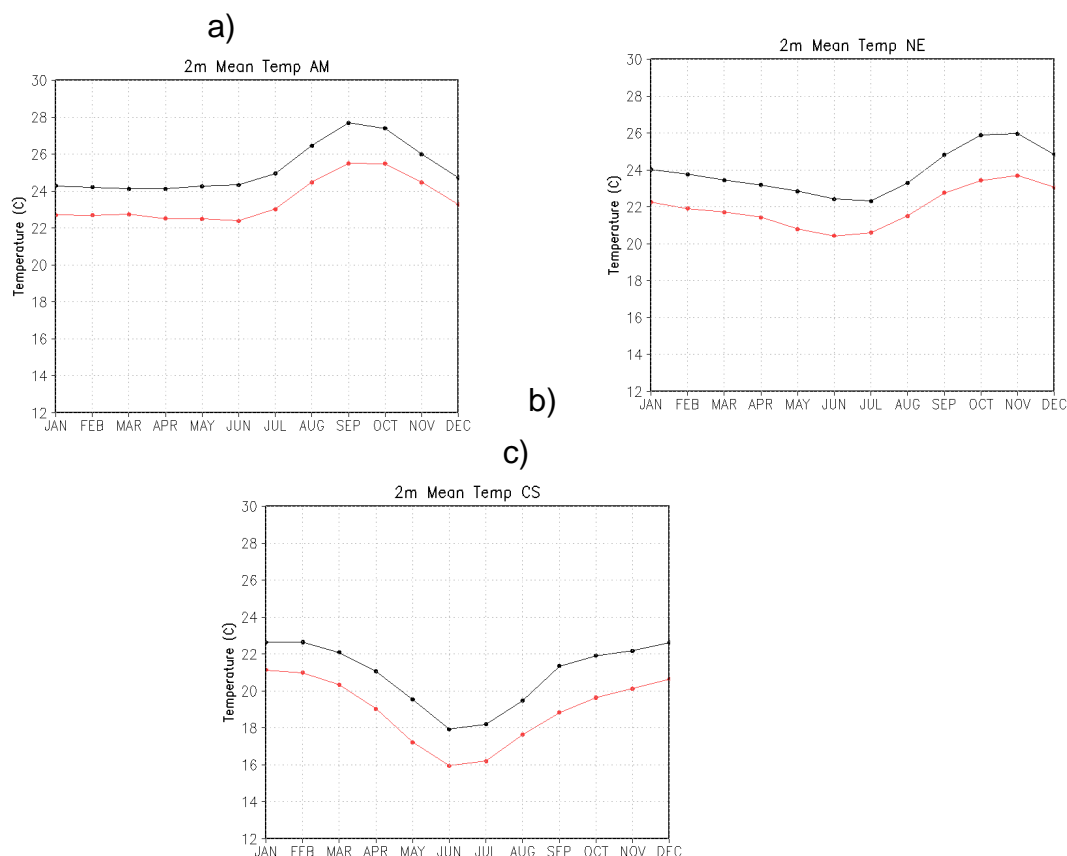


Figura 11 – Ciclo anual da temperatura (°C) simulado pelo modelo Eta, para as regiões: Amazônia (a), Nordeste (b) e Centro-Sul (c) indicada na Figura 2. Em preto a simulação para o clima presente (1961-1990) e em vermelho a projeção para o clima futuro (2011-2040).

3.2.4 Análise da Distribuição de Frequência

A Figura 14 apresenta distribuição de frequência da temperatura, observa-se um aumento na frequência de temperaturas mais altas para o clima futuro (linha vermelha), em relação ao clima presente (linha preta), para as regiões Amazônia e Centro-Sul.

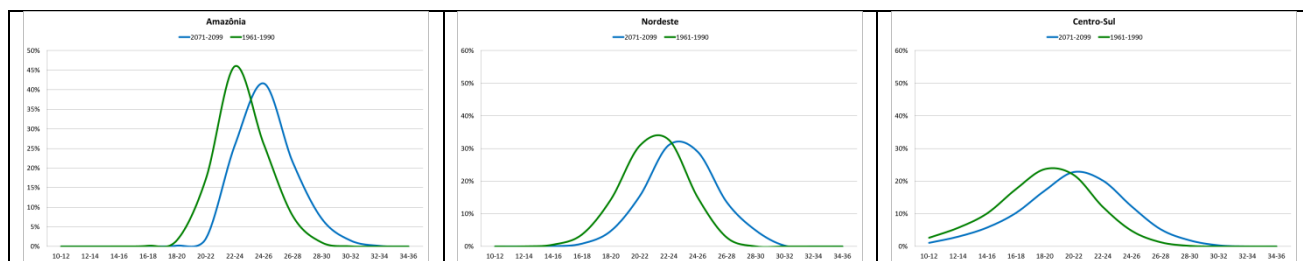


Figura 12 – Distribuição de frequência da temperatura média mensal simulada pelo modelo Eta, para as regiões Amazônia (a), Nordeste (b) e Centro-Sul (c) referenciadas na figura 2. Em verde a simulação para o clima presente (1961-1990) e em azul a projeção para o clima futuro (2011-2040).

3.3 Análise das Tendências de Indicadores de Extremos Climáticos

Um evento extremo de chuva ou temperatura caracteriza-se por ter um desvio padrão muito pronunciado em relação a sua média climatológica. Um evento extremo pode estar associado à variabilidade climatológica ou também a uma mudança climática natural ou antropogênica. Porém, fazer essa diferenciação não é trivial, em princípio, é necessário de um estudo estatístico consistente baseado numa série de dados longos e confiáveis e de parâmetros quantitativos de mudanças climáticas. O grupo de pesquisadores de detecção de mudança climáticas do *Climate Variability and Predictability* (CCI/CLIVAR) desenvolveu diversos índices extremos baseados nos dados diários de precipitação e temperatura mínima permitindo fazer avaliações e comparações dos eventos extremos que estão acontecendo atualmente e que podem acontecer no futuro. Nesta seção serão apresentados os principais índices extremos climáticos, sendo 8 índices para precipitação (Tabela 1) e 8 índices para temperatura (Tabela 2), calculados a partir das saídas do modelo Eta.

Tabela 1 – Índices extremos para precipitação

| ID | Descrição | Definição | Unidade |
|----------------|---|---|-----------|
| PRCPTOT | Precipitação total anual nos dias úmidos | Precipitação total anual nos dias úmidos (RR≥1mm) | mm/dia |
| Rx1day | Quantidade máxima de precipitação em um dia | Máximo anual de precipitação em 1 dia | mm/dia |
| Rx5day | Quantidade máxima de precipitação em cinco dias | Máximo anual de precipitação em 5 dias consecutivos | mm/5 dias |
| R10mm | Precipitação de um dia superior a 10mm | Número de dias no ano com precipitação≥10mm | dias |
| R20mm | Precipitação de um dia superior a 20mm | Número de dias no ano com precipitação≥20mm | dias |
| CDD | Dias consecutivos secos | Número máximo de dias consecutivos com RR<1mm | dias |
| CWD | Dias consecutivos úmidos | Número máximo de dias consecutivos com RR≥1mm | dias |
| R95p | Dias muito úmidos | Precipitação anual total em que RR>95 percentil | mm/dia |

Tabela 2 – Índices extremos para temperatura

| ID | Descrição | Definição | Unidade |
|--------------|------------------------------|--|-----------|
| TXx | Máximo de Temperatura Máxima | Valor mensal máximo da temperatura máxima diária | °C |
| TNx | Máximo de Temperatura Mínima | Valor mensal máximo da temperatura mínima diária | °C |
| TN10p | Noites Frias | Porcentagem de dias com Tmin<10º percentil | % de dias |
| TX10p | Dias Frios | Porcentagem de dias com Tmax<10º percentil | % de dias |
| TN90p | Noites Quentes | Porcentagem de dias com Tmin>90º percentil | % de dias |
| TX90p | Dias Quentes | Porcentagem de dias com Tmax>90º percentil | % de dias |
| WSDI | Ondas de Calor | Numero de dias anuais com pelo menos 6 dias consecutivos em que TX>90º percentil | dias |
| CSDI | Ondas de Frio | Numero de dias anuais com pelo menos 6 dias consecutivos em que TN<10º percentil | dias |

A Figura 13 apresenta as tendências no período 2071-2099 dos oito índices de extremos climáticos de precipitação. As legendas de cada índice extremo foram elaboradas de forma que os tons de azuis estejam relacionados com aumento de precipitação ou dias úmidos e os tons vermelhos relacionados a diminuição da precipitação ou dias secos. Desta maneira, a legenda do índice CDD é contrária aos outros índices.

Os índices relacionado a quantidade anual e intensidade (PRCPTOT, R95p, RX1day, RX5day, R10mm e R20mm) apresentam um padrão espacial semelhante. Na região da ZCAS e América Central, observa-se uma tendência negativa destes índices. Sobre a Região sul do Brasil e Argentina exibem tendências positivas para esses índices.

O índice de precipitação relacionado ao número de dias úmidos (CWD) também apresentou tendência de redução sobre praticamente todo território brasileiro, exceto sobre a faixa oeste da Região Norte onde se verifica um aumento dos dias úmidos. O índice de dias secos consecutivos (CDD) mostrou um aumento sobre parte da região central do continente e uma tendência de diminuição sobre o interior da Região Nordeste e região norte da Argentina.

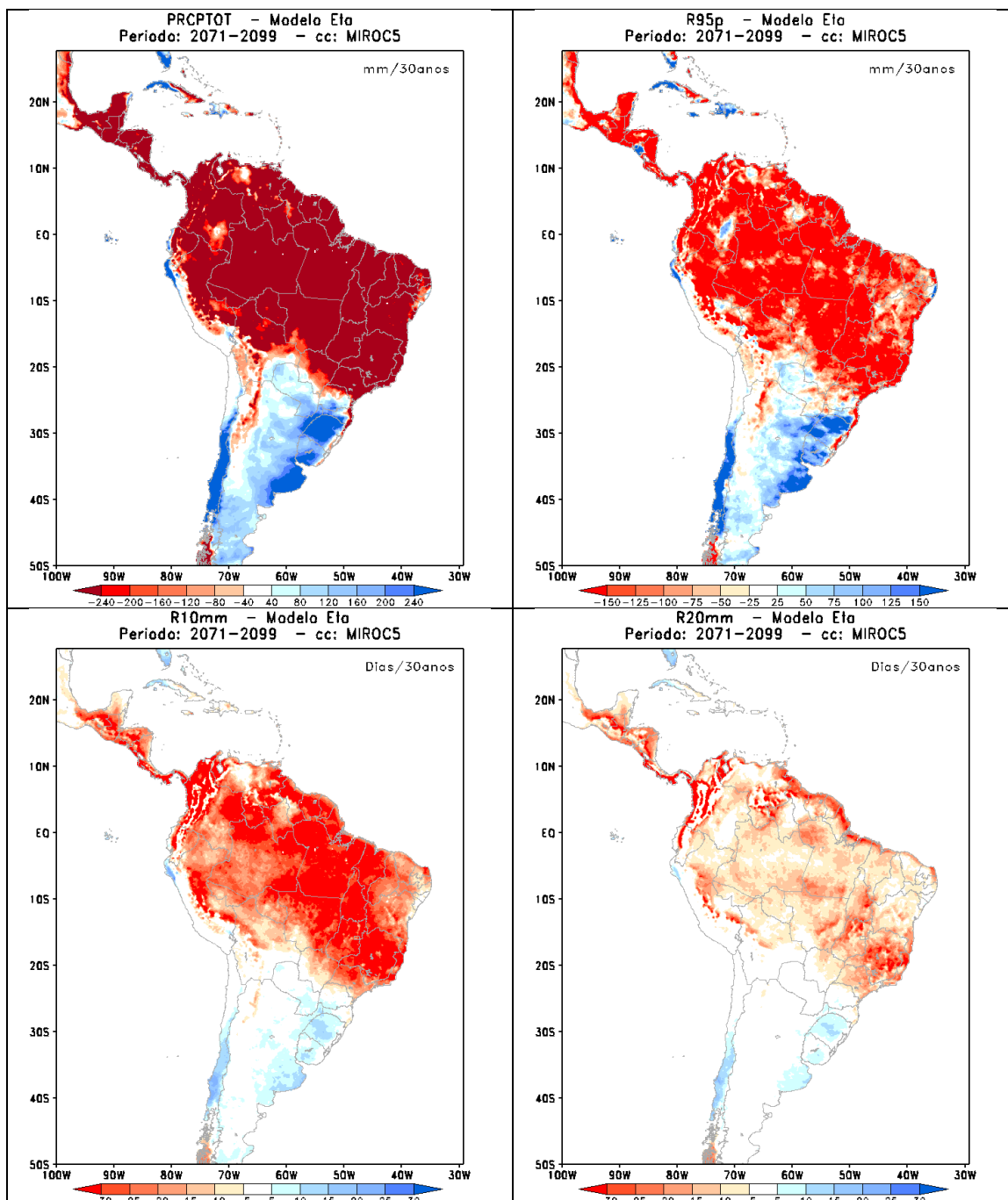


Figura 13 – Tendência dos Índices Climáticos Extremos de Precipitação para o período de 2011-2040 simulados pelo modelo Eta-MIROC5: RX1day, RX5day, R10mm, R20mm, CDD, CWD, PCPTOT e R95p.

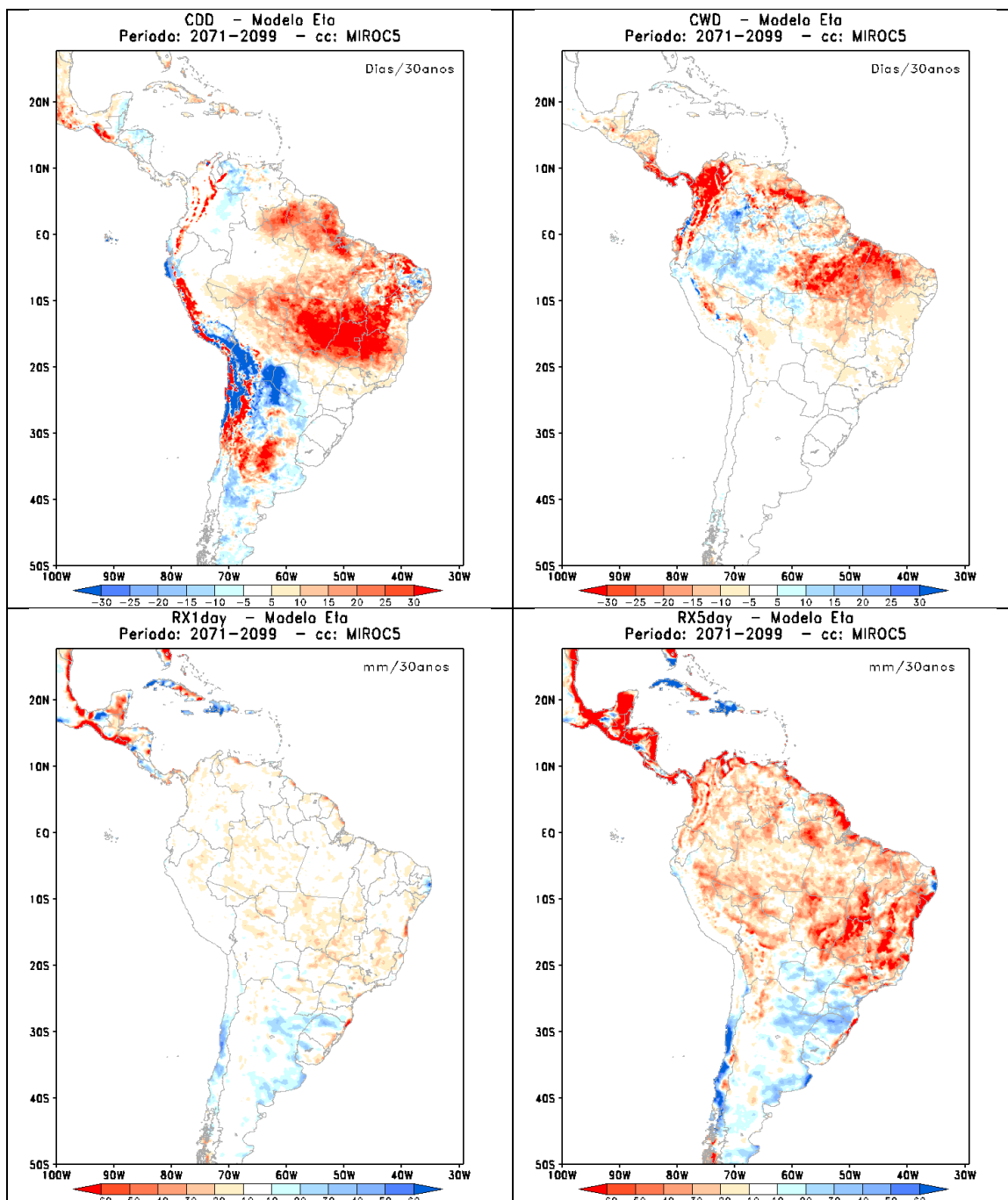


Figura 13 - Continuação.

No que se refere aos índices extremos de temperatura (Figura 14) o modelo Eta simulou, para o período , tendências positivas para a porcentagem de noites frias (TN10p) sobre a região Nordeste e tendências positivas para a porcentagem de dias frios (TX10p) sobre a Argentina. Para as tendências de porcentagens de dias e noites quentes (TN90p e TX90p), destaca-se a redução dos dias quentes na faixa leste da região Nordeste e um aumento dos dias quentes sobre a região central do Brasil (valores superiores a 24%). Sobre a

Argentina observa-se uma diminuição dos dias quentes. Para os índices CSDI e WSDI, que representam, respectivamente, o numero de ondas de frio e de calor destaca-se o aumento das ondas de calor sobre o Brasil central, com valores que excedem a 30dias/30anos.

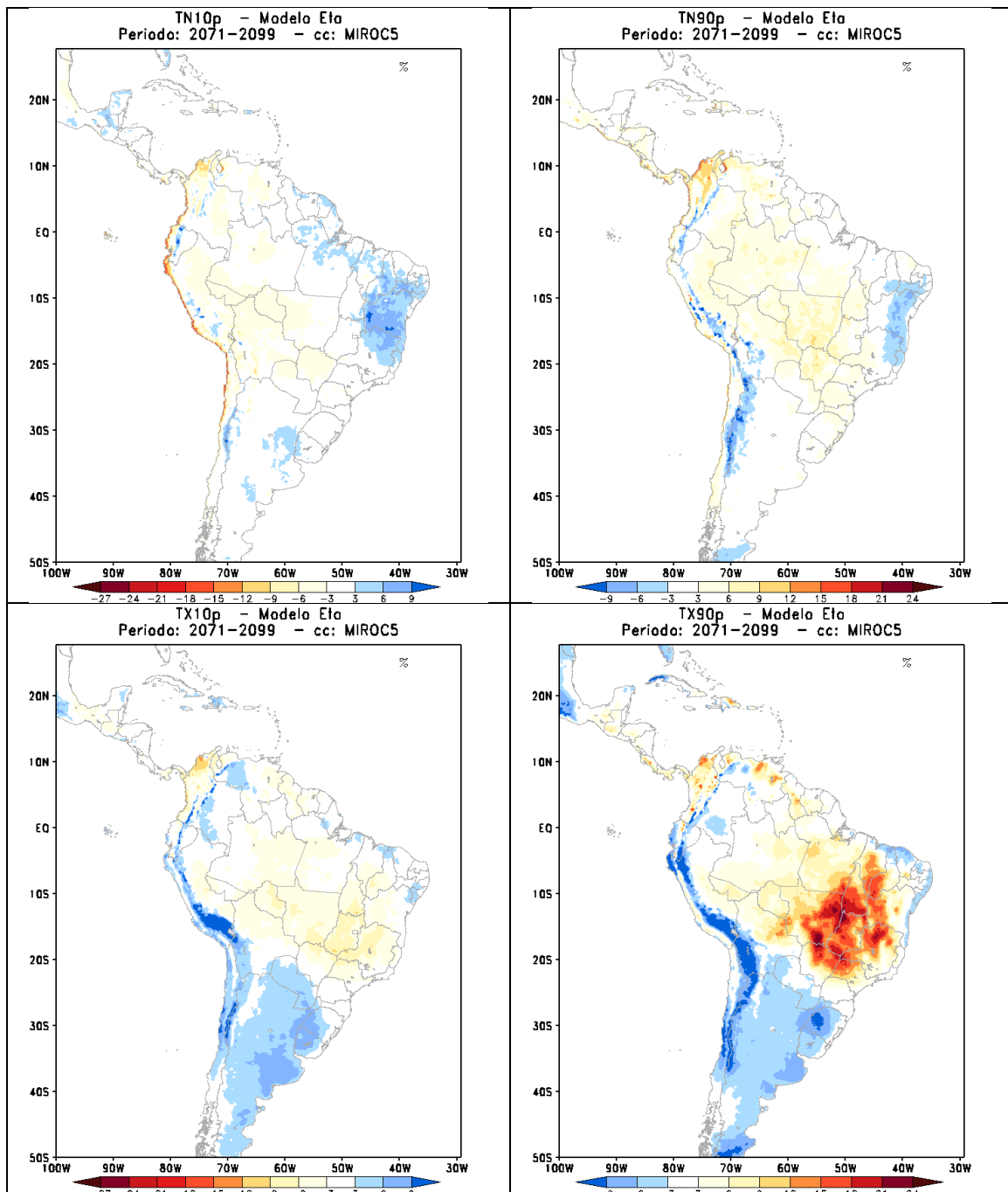


Figura 14 – Tendência dos Índices Climáticos Extremos de Temperatura para o período de 2011-2040 simulados pelo modelo MIROC5: TN10p, TN90p, TX10p, TX90p, TNx, TXx, CSDI e WSDI.

Os índices TXx e TNx indicam o valor anual máximo de temperatura máxima e mínima diárias, respectivamente. Estes índices mostram uma tendência de elevação das temperaturas máximas e mínimas sobre as regiões Sudeste, Centro-Oeste e Norte do Brasil. Tendências negativas na parte sul do continente, com destaque para a faixa leste que indicou valores maiores que 2,5°C. Áreas esparsas de tendências negativas foram observadas sobre região Nordeste e litoral da região Norte.

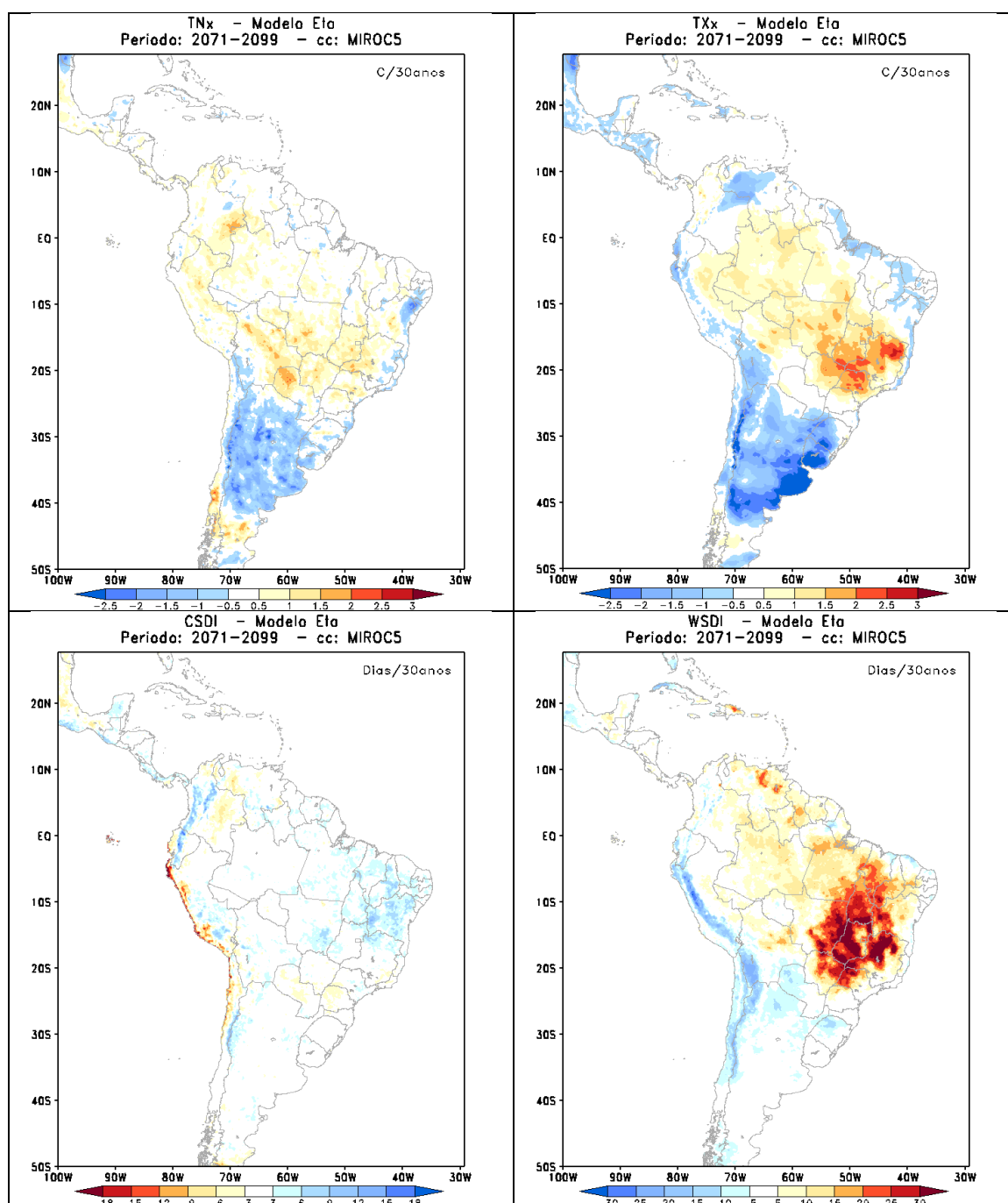


Figura 14 - Continuação.

4. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Neste segundo relatório foi realizada uma análise do clima futuro, para o período de 2071-2099, simulado pelo modelo regional Eta utilizando as condições iniciais e de contorno do modelo MIROC5, com o cenário de emissão de CO₂ RCP 4.5. Esta análise foi feita a partir da distribuição espacial das médias mensais e sazonais dos campos de precipitação e temperatura; do ciclo anual e distribuição de frequência da precipitação e temperatura, para a Amazônia e regiões Centro-Sul e Nordeste do Brasil; e da análise espacial da tendência de alguns índices indicadores de extremos climáticos. Assim, com base nos resultados apresentados, algumas conclusões podem ser tiradas desse trabalho:

Climatologicamente, a distribuição espacial e temporal das variáveis analisadas, está de acordo com o padrão encontrado na literatura. No entanto, foi possível observar algumas mudanças, em relação ao clima presente, na intensidade de determinados sistemas meteorológicos. Uma tendência de anomalia positiva de precipitação foi detectada sobre a região Sul do Brasil e uma anomalia negativa sobre a região Amazônica no verão (DJF) que migra para oeste no outono (MAM). Destaca-se neste período, assim como nos períodos de 2011-2040 e 2041-2070, a redução da precipitação sobre o oceano Atlântico e a presença de uma faixa de anomalia positiva ao longo da costa.

Quanto à temperatura, comparando com o clima presente, o período de 2071-2099 se apresentou mais quente sobre a maior parte do domínio, com a diferença chegando aos 3°C na região Centro-Sul.

A análise das séries temporais do ciclo anual da precipitação mostra que o modelo apresenta um aumento da temperatura média mensal durante todo o ano em relação ao clima presente.

Com relação à distribuição de frequência observa-se um aumento na frequência de eventos de precipitação com altos índices pluviométricos em todas as regiões estudadas. Assim como nos períodos de 2011-2040 e 2071-2070 verificou-se um aumento anômalo para o último intervalo de classe (>30mm/dia). Esse aumento ocorre devido aos valores anômalos e intensos de precipitação ao longo de toda a costa do continente.

A tendência dos indicadores de extremos climáticos apresentou tendência de redução da precipitação total na região de atuação da ZCAS para o período. Os índices de temperatura mostraram tendências positivas para a porcentagem de noites frias em toda região Nordeste. A porcentagem dos dias frios indicou tendências negativas sobre o Brasil central e tendências positivas sobre a Argentina. As tendências de porcentagens de dias quentes indicou aumento sobre a região central do Brasil, com valores superiores a 24%, e diminuição sobre a Argentina e região Nordeste do Brasil. O WSDI indicou aumento das ondas de calor sobre o Brasil central.

A redução da precipitação de forma generalizada sobre o Oceano Atlântico e o aumento ao longo da costa indica que há a necessidade de ajuste nos esquemas de produção de precipitação do modelo. É recomendável executar esse ajuste e produzir um novo conjunto de previsões para o período de 2070 a 2099.

5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Alves, L.M.; Marengo, J.A.; Chou, S.C. Avaliação das previsões de chuvas sazonais do modelo ETA climático sobre o Brasil. *In: Congresso Brasileiro de Meteorologia*, 13. 29 Agosto – 13 setembro, 2004, Fortaleza, (CE)

Andrade, K.M. **Climatologia e comportamento dos sistemas frontais sobre a América do Sul. Dissertação de Mestrado em Meteorologia.** INPE-14056-TDI/1067, 2005.

Black, T. L. NMC Notes, 1994: The New NMC mesoscale Eta model: description and forecast samples. *Weather Forecasting*, 9, 256-278, 1994

Betts, A. K. e Miller, M.J. A new convective adjustment scheme. Part II: Single column tests using GATE wave, BOMEX and arctic air-mass data sets. *Quarterly Journal Royal Meteorological Society*, 112, 693-709, 1986.

Bustamante, J.F.; Gomes, J.L.; Chou, S.C. Influência da temperatura da superfície do mar sobre as previsões climáticas sazonais do modelo regional ETA. *In: Congresso Brasileiro de Meteorologia*, 12. 4-9 agosto 2002, Foz do Iguaçu (PR). p. 2145-2152.

Bustamante, J.F.; Gomes, J.L.; Chou, S.C. 5-year Eta Model seasonal forecast climatology over South America. *In: International Conference on Southern Hemisphere Meteorology and Oceanography*, 08. 24-28 abril 2006, Foz do Iguaçu (PR). p. 503-506.

Camargo, J. S.; Zebiak, S. E.; DeWitt, D. G.; Goddard, L. **Seasonal Comparison of the Response of CCM3.6, ECHAM4.5 and COLA2.0 Atmospheric Models to Observed SSTs.** New York: IRI, 2001. p. (01-01)

Cavalcanti, I. F.; Marengo, J. ; Satymurty, et al. Global Climatological Feature in a simulation using CPTEC/COLA AGCM. *Journal of Climate*, v.15, p. 2965-2988, 2002.

Cavalcanti, I.F.A. e Gan, M.A. Anomalous precipitation in Southern Brazil and ENSO events. Apresentado no *Workshop sobre o fenômeno ENOS e a variabilidade climática nas escalas sazonal a interanual: Impactos*

socioeconômicos, previsão e aplicações ao processo de tomada de decisão. Florianópolis, 1992.

Chen, F.; Jnjjic, Z. I.; e Mitchell, K. Impact of atmospheric surface-layer parametrization in the new land-surface scheme of the NCEP mesoescala Eta model. *Boundary layer Meteorology*, 85, 391-421, 1997

Chou, S. C., Nunes, A. M. B., and Cavalcanti, I. F. A.: Extended range forecasts over South America using the regional Eta Model, *J. Geophys. Res.*, 105, D8, 10 147–10 160, 2000.

Chou, S. C.; Bustamante, J. F.; Gomes, J. L. Evaluation of Eta model seasonal precipitation forecasts over South America. **Nonlinear Processes in Geophysics**, v. 12, p. 537-555, 2005

Cox, P., R. Betts, C. Bunton, R. Essery, P.R. Rowntree, and J. Smith, 1999: The impact of new land surface physics on the GCM simulation of climate and climate sensitivity. *Climate Dynamics* 15: 183-203.

Cusack, S., J. M. Edwards and J. M. Crowther. Investigating k-distribution methods for parametrizing gaseous absorption in the Hadley Centre climate model. *J. Geophys. Res.*, 104, 2051-2057, 1999.

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

Cubasch, U., D. Wuebbles, D. Chen, M.C. Facchini, D. Frame, N. Mahowald, and J.-G. Winther, 2013: Introduction. In: *Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Stocker, T.F., D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S.K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex and P.M. Midgley (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.

Doty, B.E. **Using the Grid Analysis and Display System Center for Ocean-Land-Atmosphere Interactions (COLA).** Maryland , university of Maryland, jan 1992.

Fels, S. B. e Schwarzkopf, M. D. The simplified exchange approximation. A new method for radiative transfer calculations. **Journal of Atmosphere Science**, 32, 1475-1488, 1975.

Fernandez, J. P. R.; Franchito, S. H; Rao, V. B Simulation of the summer circulation over South America by two regional climate models. Part I: Mean climatology. **Theoretical and Applied Climatology**, v. 86, p. 243-256, 2006.

Giorgi, F.; B. Hewitson, J. Christensen, C. Fu, R. Jones, M. Hulme, L. Mearns, H. Von Storch and P. Whetton. **Regional climate information - evaluation and projections**. 2001. p. (IPCC WG1 TAR)

Grimm, A. M.; Vera, C. S.; Mechoso, C. R. The South American Monsoon System. In: International Workshop on Monsoons, 2004a. Hangzhou, China. **Proceeding...** Hangzhou: World Meteorological Organization, 2004a, p. 111-129.

Hastenrath S.; Heller. L.; Dynamics of climatic hazards in Northeast Brazil. Quarterly. **Journal of the Royal Meteorological Society**, 103(435): 77-92, 1977.

Intergovernmental Panel on Change Climate IPCC 2007a: **Climate Change 2007: The Physical Science Basis-Working Group I Contribution to the IPCC Fourth Assessment Report. Brussels**, February 2007.

Kalnay, E, et al., NCAR 40-year reanalysis project. *Bulletin of the American Meteorological Society*, v.77, n.3, p.437-471, 1996.

Kousky, V. E. ; Kayano, M. T. ; Cavalcanti, I. F. A. , 1984. A review of the southern oscillation oceanic atmospheric circulation changes and related rainfall anomalies. *Tellus*, 36 A: 490-504.

Lacis, A. A. e Hansen, J. E. A parametrization of the absorption dissipation in the atmosphere from large-scale balance requirements. *Monthly Weather Review*, 49, 608-627, 1974

Lima, Marley Cavalcante de. **Manutenção da Circulação Atmosférica sobre a América do Sul**. São José dos Campos. Tese (Doutorado em Meteorologia) - INPE, 1996.

Marengo, J. A.; Tomasella J, Uvo CR (1998). Trends in streamflow and rainfall in tropical South America: Amazonia, eastern Brazil, and northwestern Peru. *Journal of Geophysical Research-Atmospheres*, 103: (D2) 1775-1783.

Marengo, J.A. e coautores. Assesment of regional seasonal rainfall predicatbility using the CPTEC/COLA atmospheric GCM. *Climate Dynamics* 21:459-475, 2003.

Marengo J., 2007: Mudanças climáticas globais e seus efeitos sobre a biodiversidade - Caracterização do clima atual e definição das alterações climáticas para o território brasileiro ao longo do Século XXI (Segunda Edição). Brasília: Ministério do Meio Ambiente, 2007, v.1. p.214.

Mearns, L. O., F. Giorgi, P. Whetton, D. Pabon, M. Hulme, M. Lal, 2003. Guidelines for use of climate scenarios developed from regional climate model experiments, IPCC. <http://ipcc-ddc.cru.uea.ac.uk/guidelines/RCM6.Guidelines.October03.pdf>

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. *Monthly Weather Review*, 116, 1493-1518, 1988.

Mckee, T.B.; Doesken, N. J.; Kleist, J. The relationnships of drought frequency and duration to time scales. 8th Conference on Applied Climatology, Anaheim, CA. Preprints, American Meteorological Society, Boston, p. 233-236, 1993.

New, M.; Hulme, M.; Jones, P. Representing Twentieth-Century Space-Time Climate Variability. Part I: Development of a 1961-1990 Mean Monthly Terrestrial Climatology. *Journal of Climate* , vol 12 , 829-856, 1999.

Numaguti, A., M. Takahashi, T. Nakajima, and A. Sumi. Description of CCSR/NIES atmospheric general circulation model. National Institute for Environmental Studies, Center for Global Environmental Research Supercomputer Monograph Rep. 3, 1–48, 1997.

Oyama, D. M. Erros sistemáticos no clima da região tropical da América do Sul simulado pelo modelo regional MM5 em baixa resolução horizontal. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 21, n. 1, p. 118-133, 2006.

Rayner, N. A.; D. E. Parker, E. B. Horton, C. K. Folland, L. V. Alexander, and D. P. Rowell. Global analyses of sea surface temperature, sea ice and night marine air temperature since the late nineteenth century. **Journal of Geophysical Research**, v. 108, n. D14, 2003.

Rasmuson E. M. e Carpenter T. H. (1983). The relationship between eastern equatorial Pacific sea surface temperatures and rainfall over Índia and Sri Lanka. *Monthly Weather Review*, 11, 517-528

Satyamurty, P.; Nobre, C. A.; Dias, P. L. S. South America. In: Karoly, D. J.; Vincent, D. G. **Meteorology of the Southern Hemisphere**. Boston: American Meteorology Society, 1998. v. , Cap. 3, p. 243-282.

Souza, Solange Silva de. **Impactos Climáticos Regionais da Mudança de Vegetação no Semi-árido do Nordeste Brasileiro** . São José dos Campos .Tese (Doutorado em Meteorologia) - INPE, 2006.

Stern, W., Mikayoda, K. Feasibility of seasonal forecast inferred from multiple GCM simulation. *Journal Climate*, 8, 1071-1085, 1995.

Uppala, S. M. Kalberg, P. W., Simmons, A. J. et al. The ERA-40 re-analysis. *Quart. J. R. Meteorol. Soc.*, 131, 2961-3012. Doi:10.1256/qj18.176, 2005.

Watanabe, M., T. Suzuki, R. O'Ishi, Y. Komuro, S. Watanabe, S. Emori, T. Takemura, M. Chikira, T. Ogura, M. Sekiguchi, K. Takata, D. Yamazaki, T. Yokohata, T. Nozawa, H. Hasumi, H. Tatebe and M. Kimoto. Improved Climate Simulation by MIROC5: Mean States, Variability, and Climate Sensitivity. *Journal of Climate*, 23, 6312-6335, 2010

Wilby, R. L., and Wigley, T. M. L. Downscaling general circulation model output: A review of methods and limitations. **Prog. Phys. Geogr.**, v. 21, p. 530-548, 1997.

Van Vuuren, D. P., et al., 2011a: RCP2.6: Exploring the possibility to keep global mean temperature increase below 2°C. **Clim. Change**, 109, 95–116.

Van Vuuren, D. P., et al., 2011b: The representative concentration pathways: An overview. **Clim. Change**, 109, 5–31.

Zhao, Q.; T.L. Black; M.E. Baldwin. Implementation of the Cloud Prediction Scheme in the Eta Model at NCEP. **Wea. Forecasting**, v. 12, p. 697–712, 1997.