



INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS

PROJETO PNUD BRA/10/G32

PRODUTO 2

Relatório descrevendo o clima presente 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

Consultor Técnico Produto – CT 018-2013 G32

Cachoeira Paulista

agosto de 2014

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	1
2. DADOS E METODOLOGIA	4
2.1. O Modelo Eta	4
2.2. O Modelo MIROC5	5
2.3. Metodologia	6
3. RESULTADOS	8
3.1. Precipitação	8
3.1.1. Análise Mensal	8
3.1.2. Análise Sazonal	11
3.2. Temperatura	14
3.2.1. Análise Mensal	14
3.2.2. Análise Sazonal	16
3.3. Ciclo Anual	18
3.4. Padrões de Circulação	21
3.5. Pressão ao Nível Médio do Mar	23
3.6. Distribuição de Frequência	24
3.7. Índices Extremos	26
4. DISCUSSÃO DE RESULTADOS E CONSIDERAÇÕES FINAIS	33
5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	35

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) e oceanos adjacentes no período 1961-1990, identificação dos erros sistemáticos na simulação, já que o conhecimento desses erros possibilita atribuir um grau de incerteza às projeções do clima futuro, além de identificar propriedades estatística do clima presente simulado pelo modelo em comparação com as observações.

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 (CO₂). 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 CO₂ 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 CO₂ 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).

2.3. Metodologia

A avaliação das simulações do modelo regional Eta envolveu uma análise detalhada das principais características observacionais do clima na escala de tempo sazonal sobre a AS e descritas em Satyamurty *et al.* (1998), Lima (1996), Cavalcanti *et al.*, (2002), e Marengo *et al.*, (2003). Para tanto, foram analisados campos médios mensais, sazonais (DJF, MAM, JJA, SON) e anuais climatológicos da precipitação, temperatura e vento em baixos e altos níveis (850 e 200 hPa) comparando-os com os dados observados (CRU e Reanálise). Esta avaliação teve por objetivo analisar a capacidade do Eta em reproduzir os principais padrões sazonais do clima da AS, tais como: o jato subtropical, no oceano Atlântico tropical, a Zona de Convergência Intertropical (ZCIT), a Zona de Convergência do Atlântico Sul (ZCAS), a Alta do Bolívia (AB), a Baixa do Chaco no verão e o Anticiclone subtropical do Atlântico Sul. Além disso, foi obtido mapas do erro médio da precipitação e temperatura, ou seja, a diferença dos campos médios das variáveis prognósticas em relação à seus valores médios climatológicos observados. O objetivo deste cálculo é avaliar e identificar os erros sistemáticos do modelo nos campos médios sazonais das variáveis representadas pelo MCR.

Outro aspecto analisado foi o ciclo anual da precipitação e temperatura sobre algumas regiões da AS. A Figura 1 mostra a localização das áreas que serão analisadas. Diversas regiões em torno do globo têm sido escolhidas para avaliações de simulação e previsibilidade de modelos climáticos (Marengo *et*

al., 2003). Para este estudo foram selecionadas regiões denominadas: Amazônia que inclui toda a Região Norte mais os estado 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.

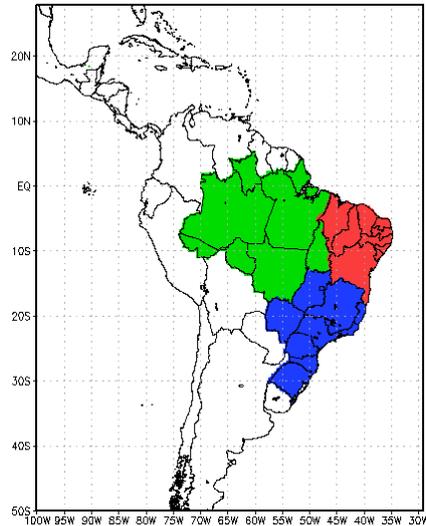


Figura 1 – Domínio do modelo Eta e os três subdomínios de estudo: Amazônia (AM) em verde, Nordeste (NEB) em vermelho e Centro-Sul do Brasil (CS) em azul.

3. RESULTADOS

Neste capítulo serão discutidos os resultados das simulações feitas com o modelo regional, Eta para o período de 1961 a 1990 sobre a América do Sul, através da comparação entre os campos climatológicos simulados e os dados observacionais (CRU e reanálises do ECMWF). As discussões destes resultados serão feitas com o intuito de examinar a destreza do modelo em simular os principais aspectos climatológicos sobre a América do Sul.

3.1. Precipitação

3.1.1. Análise Mensal

O regime de precipitação, 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 variabilidade mensal da precipitação sobre a AS simulada pelo modelo foi comparada com os dados observados (Figura 2) e pode ser vista na Figura 3. 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.

Os máximos de precipitação simulados pelo Modelo Eta entre os meses de dezembro e março sobre as áreas que se estende do noroeste da Amazônia até o sudeste do Brasil, relacionados à atuação da Zona de Convergência do Atlântico Sul (ZCAS) no período de verão apresentam uma pequena subestimativa (Figuras 3 a-d). A partir de maio e até o mês de setembro a banda de precipitação começa a recuar e deslocar o máximo de precipitação para o noroeste da Amazônia, Colômbia, Venezuela, e Guianas. Neste mesmo período observa-se início do período de poucas chuvas sobre a Região Central e interior da Região Nordeste do Brasil (Figuras 2 e-h). O Modelo Eta apresenta um padrão de evolução e de distribuição semelhante ao observado,

com os núcleos de máxima precipitação bem posicionados (Figuras 3 e-h). Verifica-se, neste período, que 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), nestas regiões o modelo subestima o máximo observado sobre a Região Sul do Brasil. A partir de Outubro é possível observar, sobre a região central do Brasil valores de precipitação em torno de 6 mm/dia (Figuras 2 j-k) caracterizando o início da atuação dos sistemas de verão, tais como a ZCAS e a Alta da Bolívia (AB). Nota-se, nas simulações com o Modelo Eta que o início da atuação dos sistemas de verão é antecipado (Figuras 3 j-k). Verifica-se também, que as simulações indicam superestimativa da precipitação sobre a Região Sudeste e uma subestimativa sobre a Região Sul do Brasil.

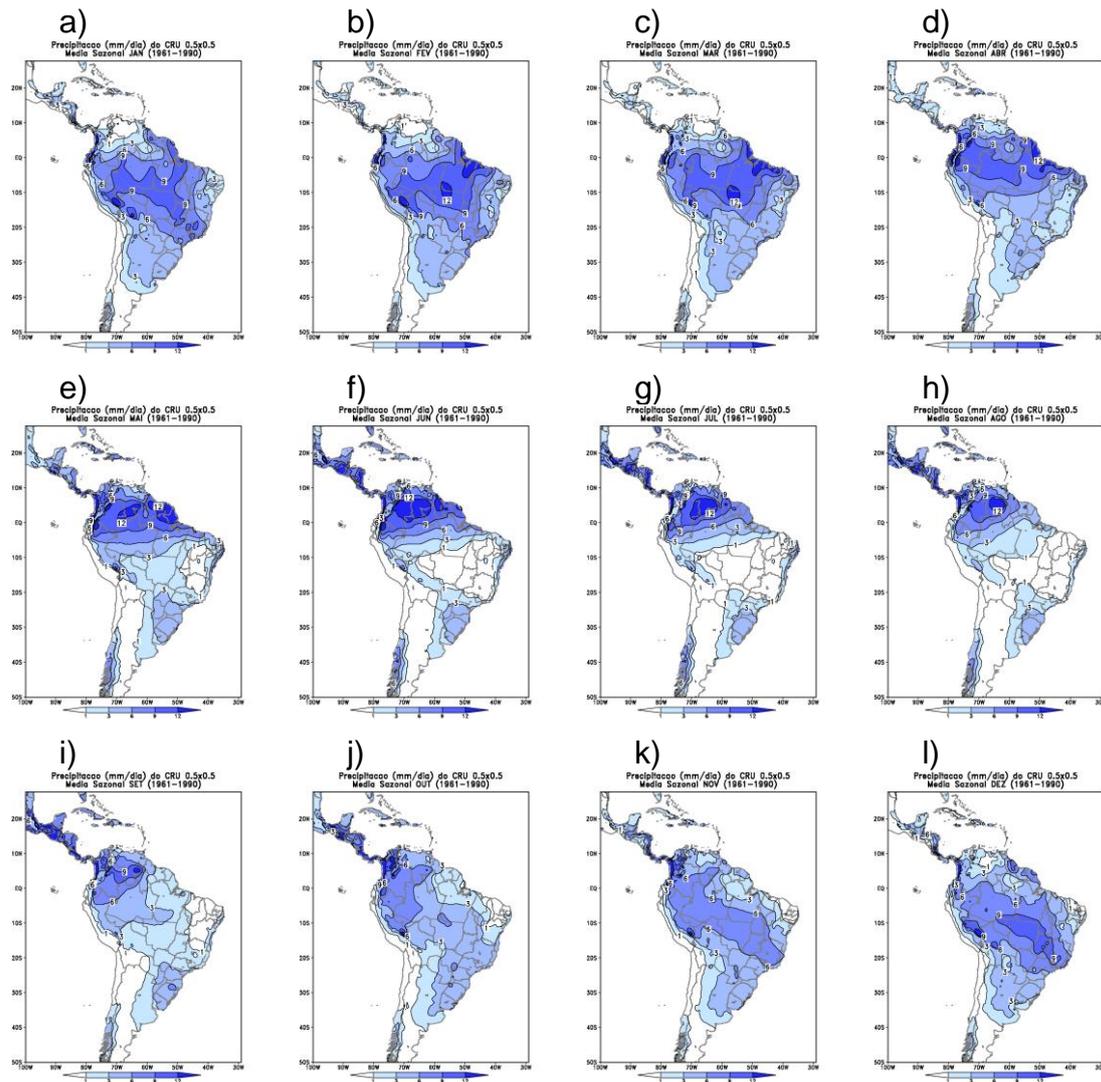


Figura 2 – Climatologia média mensal de precipitação (mm/dia) do período de 1961-1990 dos dados observados (CRU).

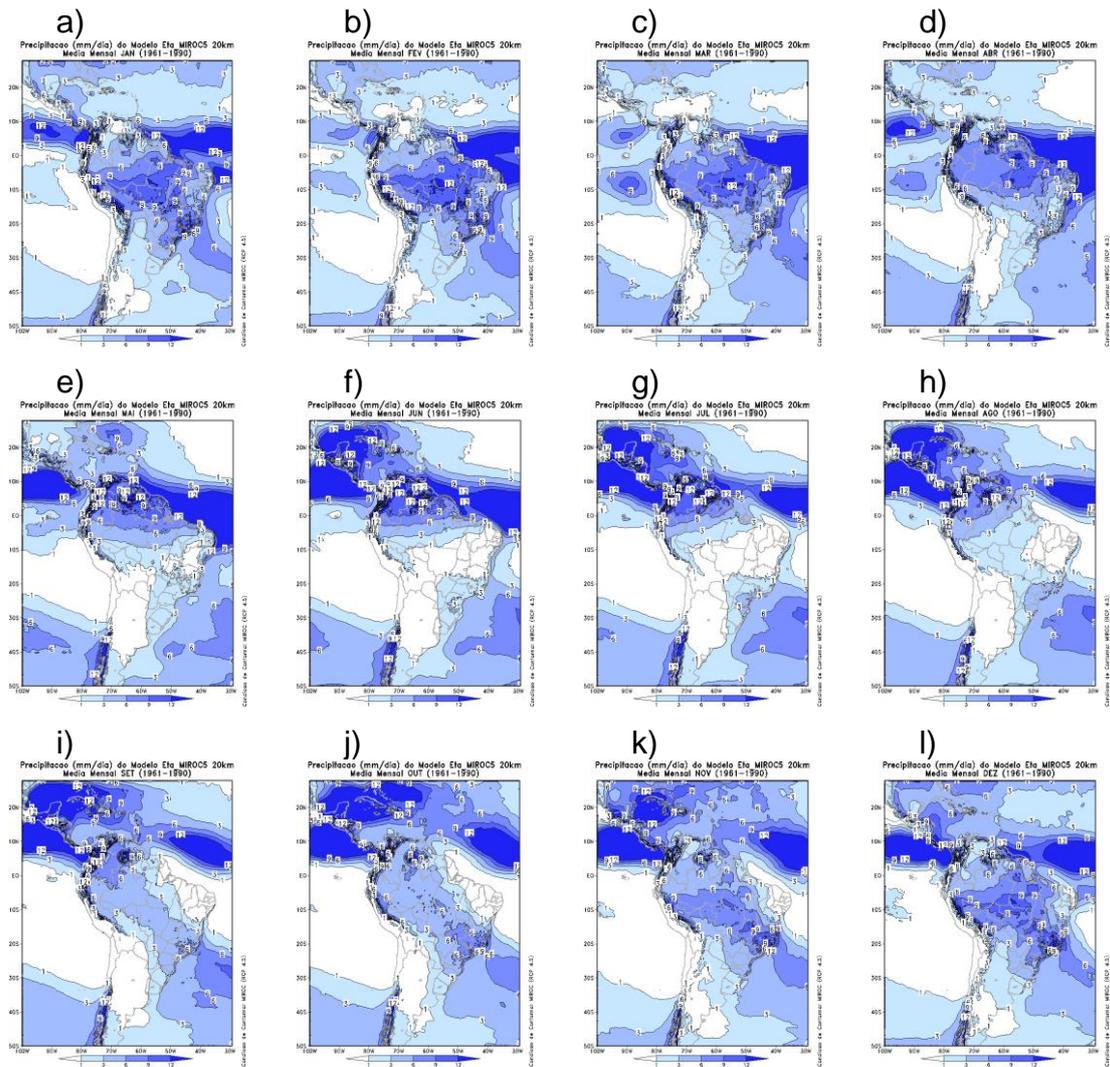


Figura 3 – Climatologia de Precipitação média mensal (mm/dia) do período de 1961-1990 simulada pelo modelo regional Eta.

3.1.2. Análise Sazonal

As figuras a seguir mostram a climatologia sazonal da precipitação observada (Figura 4) e simulada pelo modelo regional (Figura 5). A Figura 5a, que simula o verão, de forma geral, captura o padrão de precipitação para esta estação. No entanto, algumas diferenças são observadas entre o modelo e as observações. Por exemplo, a distribuição de chuvas ao longo da posição climatológica da Zona de Convergência do Atlântico Sul (ZCAS), em que o modelo subestima a chuva no norte da Região Amazônica. O modelo também apresenta um déficit de precipitação sobre o Estado do Rio Grande do Sul, Uruguai e nordeste da Argentina (Figura 6a). Essa imperfeição sobre a Região

da Amazônica foi identificada em vários estudos (Fernandez *et al.*, 2006; Souza, 2006; Oyama, 2006), nos quais relaciona esta divergência a má representação de alguns componentes do ciclo hidrológico (cobertura vegetal, umidade do solo, fluxos de superfície) e a parametrização de convecção. Na faixa leste do Brasil, desde o Estado de Minas Gerais até o Maranhão, a simulação do Modelo Eta indica uma tendência de superestimativa da precipitação.

No outono (Figura 4b), como características climáticas, a banda de precipitação na região da ZCAS começa a recuar para a o noroeste da Amazônia e ocorre a estação chuvosa sobre o norte e nordeste do Brasil. O modelo de forma geral consegue capturar esta variabilidade (Figura 5b), embora se mostre mais seco em parte da Região Norte em comparação com os observados (Figura 6b). Verificamos novamente que o Modelo Eta apresenta um padrão de subestimativa da precipitação sobre o Estado do Rio Grande do Sul, Uruguai e Nordeste da Argentina e uma superestimativa sobre o Estado de Minas Gerais e região Nordeste do Brasil.

O modelo tem um comportamento muito similar com as observações durante o inverno (Figura 5c). Características como ausência de precipitação na parte central e sudeste do Brasil, chuvas no sul e ao longo da costa nordeste brasileira, um padrão climatológico observado nesta época do ano e que está associado com a intensificação da alta subtropical do Atlântico e propagação de ondas de leste na região foram bem simulados pelo modelo. Os máximos de chuva sobre a Venezuela e Colômbia que em geral ocorrem neste período do ano também está presente nas simulações, porém são subestimados. Nota-se novamente que o modelo subestima a precipitação sobre o Rio Grande do Sul. Sobre o Estado do São Paulo e sul do estado de Minas o modelo indica um superestimativa da precipitação.

A primavera (Figura 4d) por constituir-se uma estação de transição entre o inverno e o verão, e onde as monções sul-americanas começam a se desenvolver, faz com que, em geral, os modelos tenham mais dificuldades em simular adequadamente várias de suas características climatológicas. Apesar de o modelo ter corretamente simulado a ausência de chuva na região

nordeste do Brasil, o Eta expandiu a área de seca sobre a Região Nordeste. O modelo simula corretamente a expansão da banda de precipitação do noroeste para o sudeste do Brasil, porém, subestima os máximos de chuva sobre a Região Sudeste do Brasil (Figura 6d). Assim como verificado nas estações anteriores, o modelo subestima a precipitação sobre o Rio Grande do Sul, Uruguai e nordeste da Argentina (Figura 6 a-d).

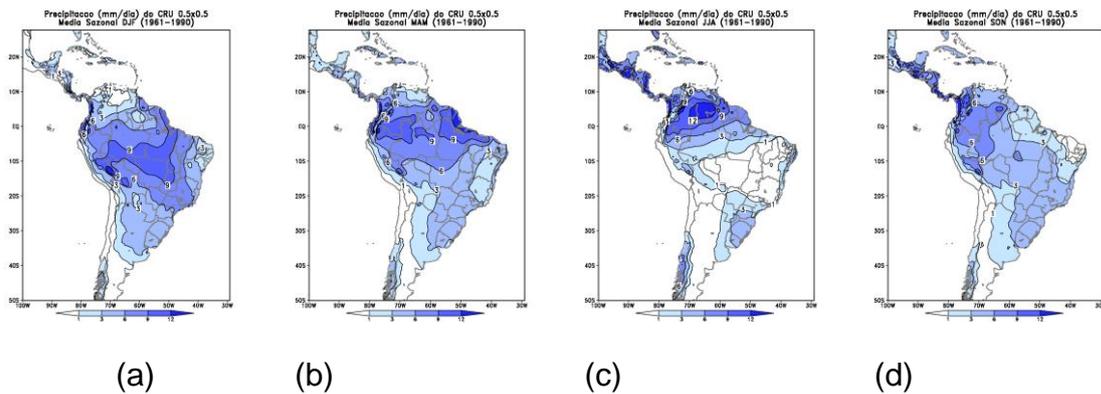


Figura 4 – Precipitação média sazonal (mm/dia) dos dados observados (CRU) para o período de 1961-1990 para os trimestres: verão (a); outono (b); inverno (c); primavera (d).

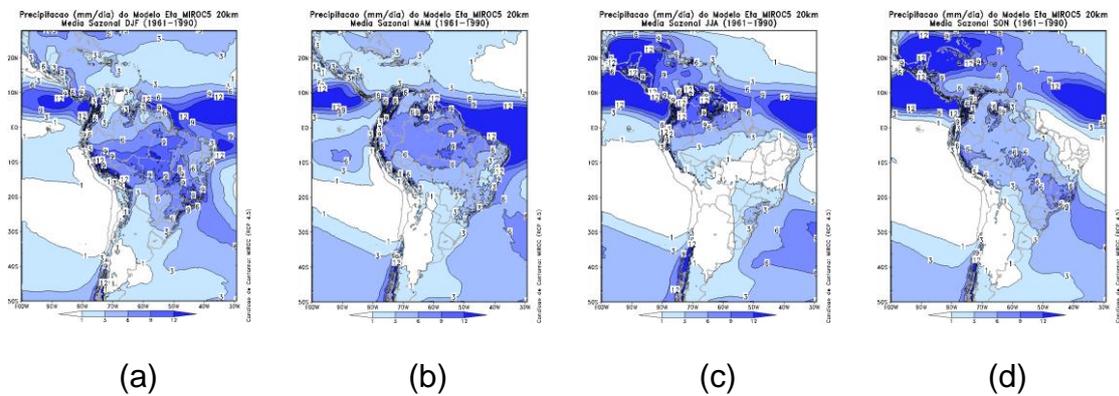


Figura 5 – Precipitação média sazonal (mm/dia) simulada pelo modelo Eta para o período de 1961-1990 para os trimestres: verão (a); outono (b); inverno (c); primavera (d).

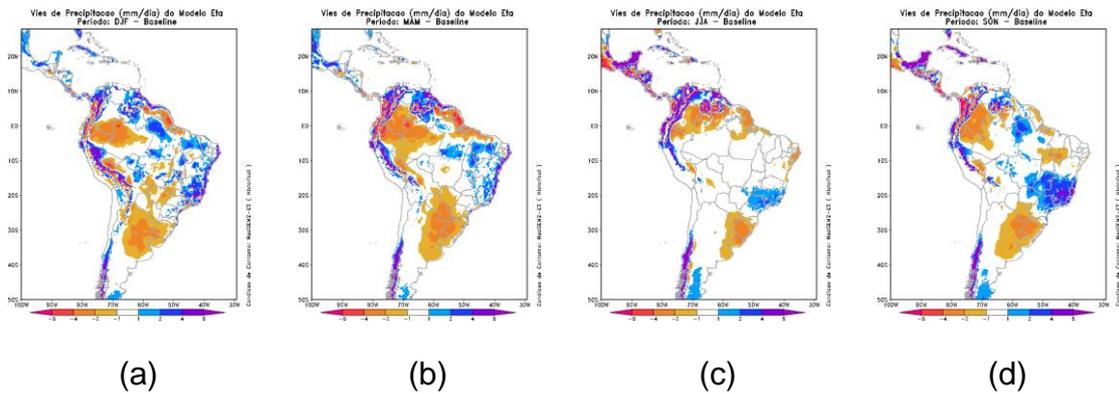


Figura 6 – Mapas sazonais do viés da precipitação (mm/dia) derivados do modelo do Eta em relação aos dados do CRU, para o período de 1961-1990 para os trimestres: verão (a); outono (b); inverno (c); primavera (d).

3.2. Temperatura

3.2.1. Análise Mensal

A distribuição espacial da temperatura média mensal (Figura 7) obtido pelos dados do CRU revela que na maior parte do continente sul-americano as temperaturas variam entre 24 e 26°C, exceto nos meses de inverno (junho a agosto) nas regiões ao sul da latitude 20°S onde se observa valores menores que 14°C. As áreas de máximos valores, acima de 28°C localizam-se principalmente sobre o Paraguai e região Norte.

Analisando os campos de temperatura do modelo (Figura 8) se observam temperaturas mais baixas que o dado observado em todos os meses. Sobre a Amazônia e Região Nordeste do Brasil as diferenças são superiores a 4°C, a mesma magnitude de bias é verificado sobre as Regiões Sudeste e Sul do Brasil.

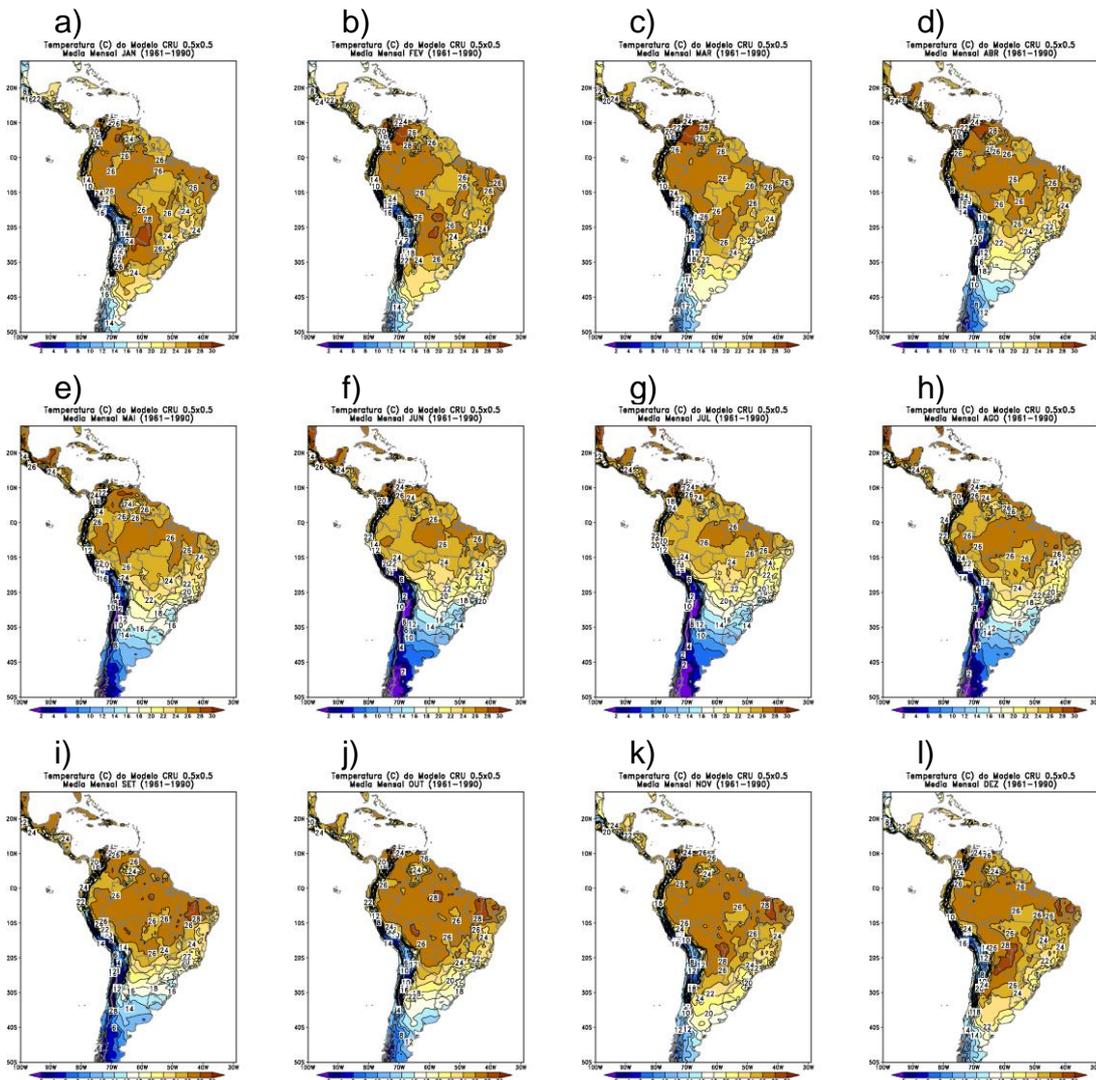


Figura 7 – Climatologia média mensal da temperatura (°C) do período de 1961-1990 dos dados observados (CRU).

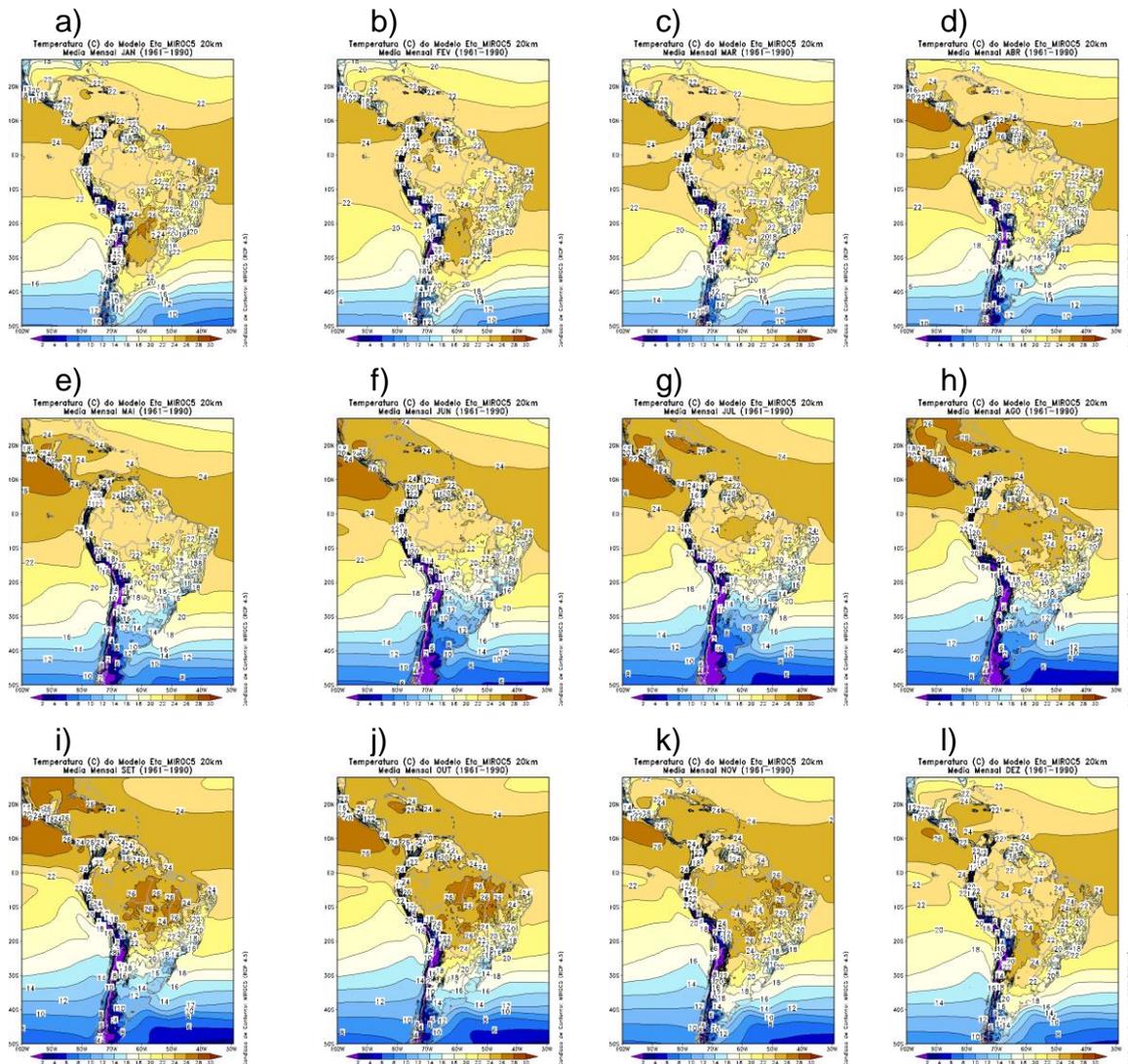


Figura 8 – Climatologia de Temperatura média mensal (°C) do período de 1961-1990 simulada pelo modelo regional Eta.

3.2.2. Análise Sazonal

Após analisar os campos mensais, é importante discutirmos também se o modelo representa as características climáticas da América do Sul em cada estação do ano. As Figuras 9 e 10 a seguir mostram a climatologia sazonal da temperatura relativo às observações do CRU e a simulação do modelo Eta, respectivamente. Já a Figura 11 representa o viés da temperatura em cada estação do ano. O viés do modelo em praticamente todas as estações e em todas as regiões é negativo e varia em torno de -1°C a -6°C . As Regiões

Centro-Oeste e Norte do Brasil os valores máximos de bias ocorrem nas estações de verão e outono, reduzindo nas estações de inverno e primavera, atingindo os menores valores, entre -1 e 1, no leste da região Amazônica na primavera (Figuras 11 c e d). Sobre a faixa leste do Brasil, a variação nos valores do bias é pequena, permanecendo aproximadamente constante entre -2 e -6 em todas as estações do ano.

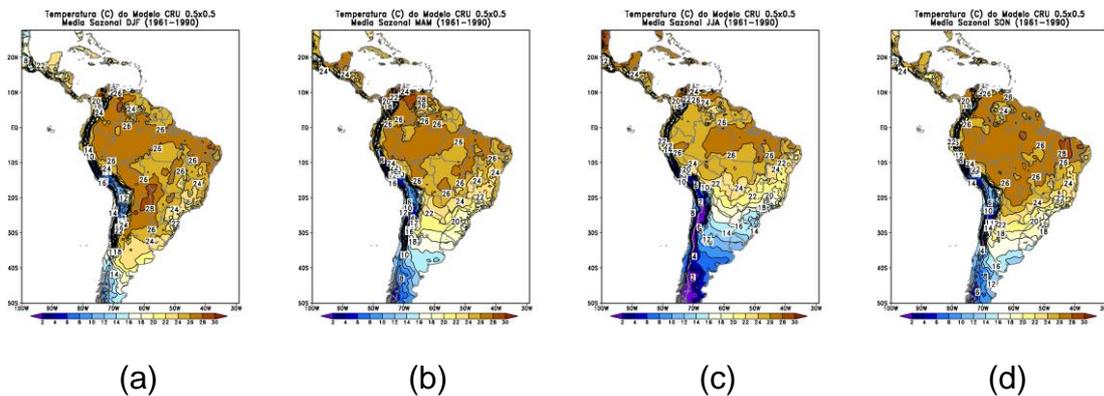


Figura 9 – Mapas sazonais do campo de temperatura (°C) derivados dos dados do CRU para o período de 1961-1990 para os trimestres: verão (a); outono (b); inverno (c); primavera (d).

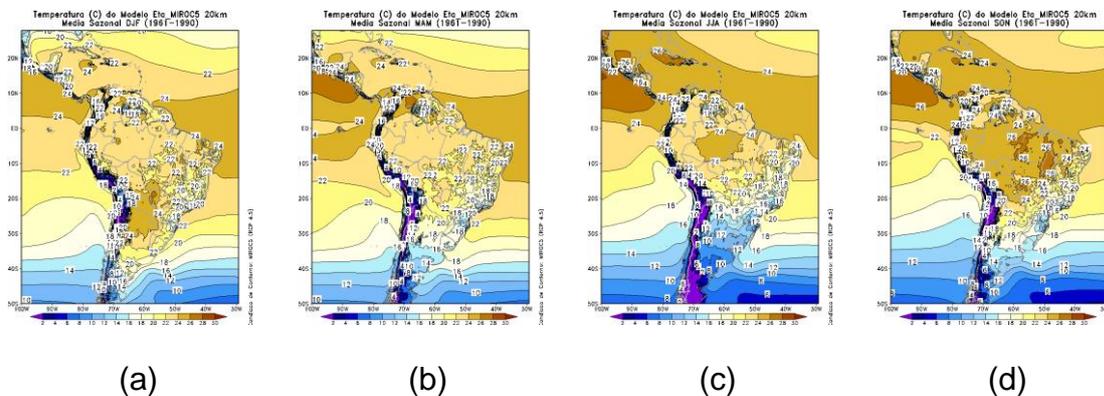


Figura 10 – Mapas sazonais do campo de temperatura (°C) derivados da simulação do modelo Eta para o período de 1961-1990 para os trimestres: verão (a); outono (b); inverno (c); primavera (d).

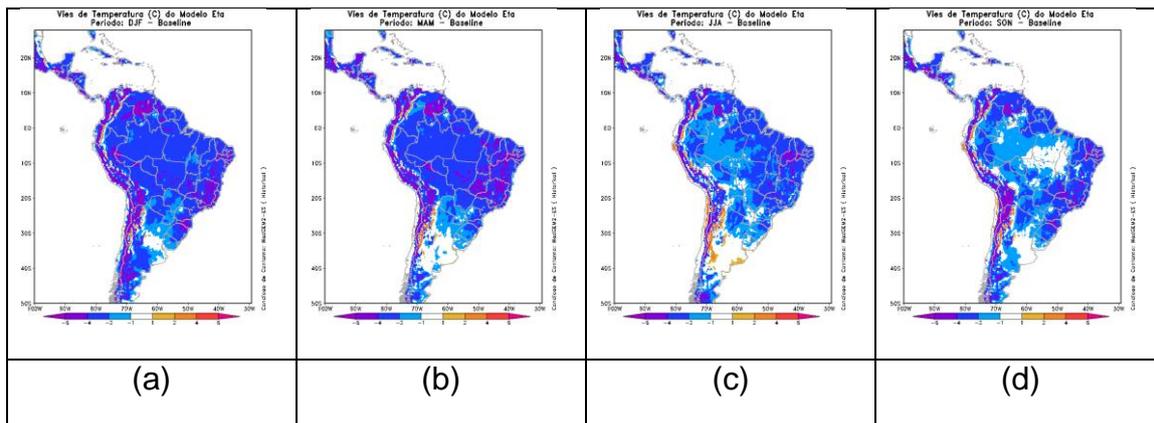


Figura 11 – Mapas sazonais do viés de temperatura (°C) derivados do modelo do Eta em relação aos dados do CRU, para o período de 1961-1990 para os trimestres: verão (a); outono (b); inverno (c); primavera (d).

3.3. Ciclo Anual

Nas seções anteriores foram analisados o padrão espacial da precipitação e temperatura simulada pelo modelo Eta e as observações. A seguir descreveremos as séries temporais do ciclo anual climatológico da precipitação (Figura 12) observada e simulada pelos modelos Eta e MIROC5, sobre as regiões indicadas pela Figura 1 (Amazônia, Nordeste do Brasil e Centro-Sul).

Uma característica marcante nas séries temporais simuladas pelos modelos, considerando as características locais de cada região, é uma concordância com o ciclo climatológico em praticamente todas as regiões, isto é, a variação sazonal está bem representada (pouca precipitação durante os meses secos e totais elevados durante os meses chuvosos) na maioria das áreas. Na Região Amazônica (Figura 12a) o modelo Eta representa bem o ciclo anual enquanto o MIROC5 apresenta uma subestimativa nos meses de junho a setembro. Para a Região Nordeste (Figura 12b) tanto o modelo o Eta quanto o MIROC5 indicam uma superestimativa nos meses de janeiro a abril, nos meses de maio a setembro ambos modelos possuem um ciclo semelhante e ligeiramente abaixo do observado. As curvas que representam as áreas da região Centro-Sul (Figura 12c) indicam que os modelos Eta e MIROC5 conseguem simular corretamente a uniformidade do ciclo anual da precipitação nestas regiões, ou seja, é observado um período chuvoso e seco bem definido

e simulado pelos modelos. Este comportamento está associado à variação sazonal da circulação atmosférica sobre a região e adjacências. Destaca-se nesta região a tendência do MIROC5 em superestimar a precipitação nos meses de outubro a março e uma tendência de superestimativa nos meses de maio a agosto, enquanto que o modelo Eta apresenta um ciclo mais próximo do observado pelos dados do CRU.

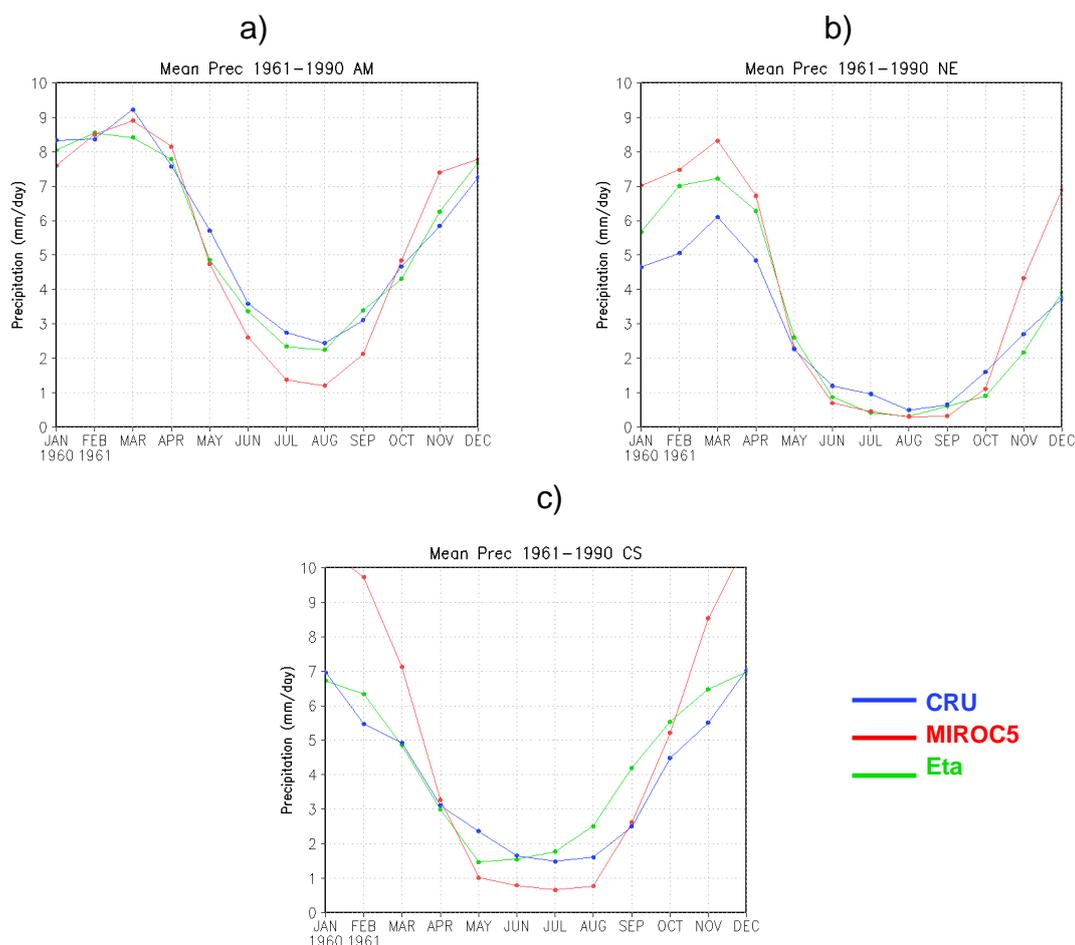


Figura 12 – Ciclo anual da precipitação (mm/dia) observada e simulada pelo modelo para as regiões Amazônia (a), Nordeste (b) e Centro-Sul (c) indicada na Figura 1. A linha azul representa a precipitação observada, a linha vermelha representa a precipitação simulada pelo modelo global MIROC5 e a linha verde representa a precipitação do Eta.

A Figura 13 apresenta a evolução temporal da temperatura simulada pelos modelos e a temperatura observada derivada do CRU, para as regiões indicadas na Figura 1. Sistemáticamente, observa-se uma tendência do modelo

Eta em subestimar as temperaturas em todas as regiões e em todos os meses do ano.

Na região da Amazônica verifica-se subestimativas, com valores em torno de 3°C no primeiro semestre do ano e valores em torno de 1°C, todavia, devido a uma cobertura inadequada de informações na base de dados do CRU esses valores devem ser analisados com cautela. Sobre a região Nordeste (Figura 13b), onde se observa que o modelo Eta apresentam um padrão de subestimativa semelhante à Região Amazônica, com uma subestimativa maior no primeiro semestre, em torno de 4°C e reduzindo essa subestimativa no segundo semestre, em torno de 2°C. Na Região Centro-Sul o modelo Eta apresenta, assim como nas demais regiões, uma subestimativa da temperatura, em torno de 3°C, quando se comparado aos dados do CRU.

A pesar do padrão de subestimativa apresentada pelo modelo Eta em todas as regiões e meses do ano, destaca-se o que modelo Eta consegue capturar os máximos e mínimos, associados às estações de inverno e verão.

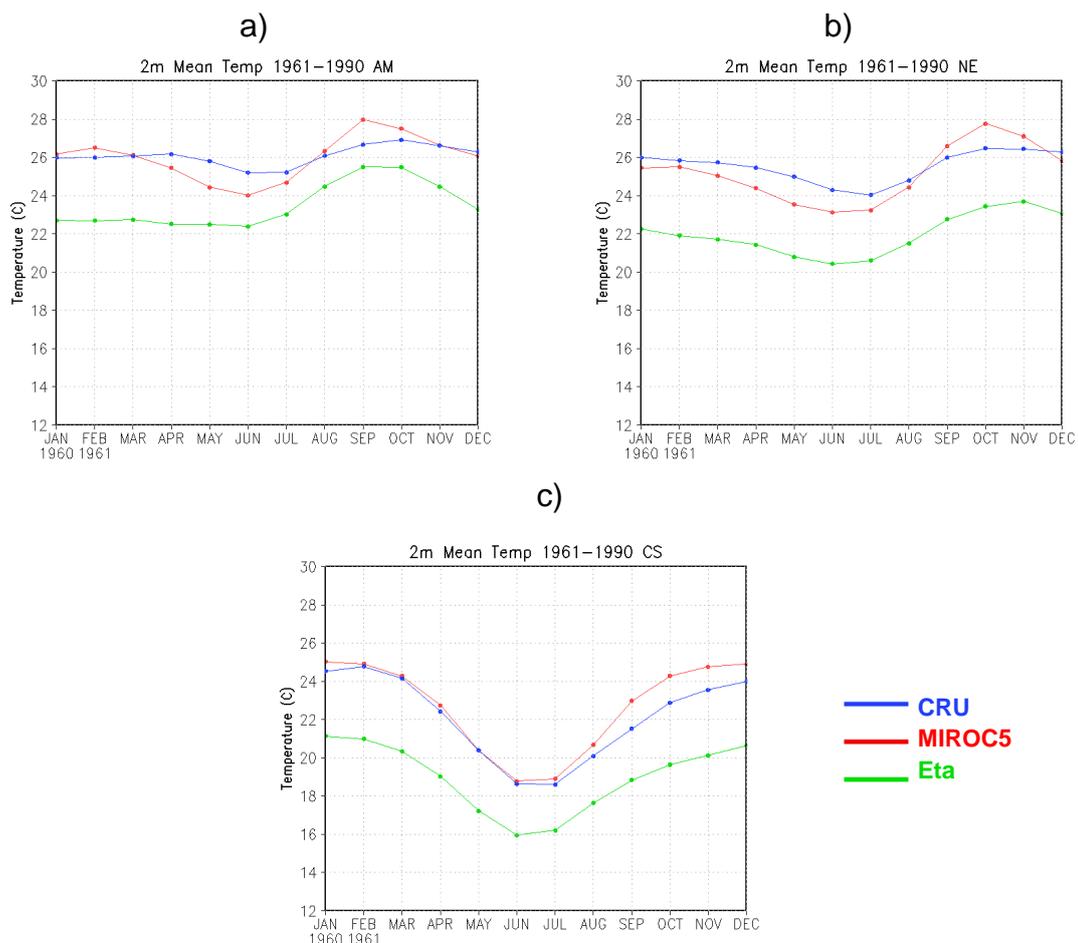


Figura 13 – Ciclo anual da temperatura (°C) observada e simulada pelo modelo para as regiões Amazônia (a), Nordeste (b) e Centro-Sul (c) indicadas na Figura 1. A linha azul representa a temperatura observada, a linha vermelha simulada pelo modelo global e a linha verde simulada pelo Eta.

3.4. Padrões de Circulação

São apresentados a seguir os campos sazonais da circulação em baixos níveis (850hPa) e altos níveis (200hPa) simulado pelo modelo e as observações com base nos dados de reanálise do ECMWF. De uma maneira geral, nota-se que a sazonalidade em baixos níveis é bem representada pelo modelo (Figura 15), ou seja, a circulação associada às altas subtropicais (Alta Pressão dos Oceanos Pacífico (APS) e Atlântico (AAS) subtropical) está presente e posicionada de acordo com os dados observados. Também em baixos níveis uma intensificação do fluxo (maior transporte de umidade) ao

longo do leste dos Andes, associado ao o Jato de Baixos Níveis, foi observado sobre a Bolívia/Paraguai no inverno (Figura 15c).

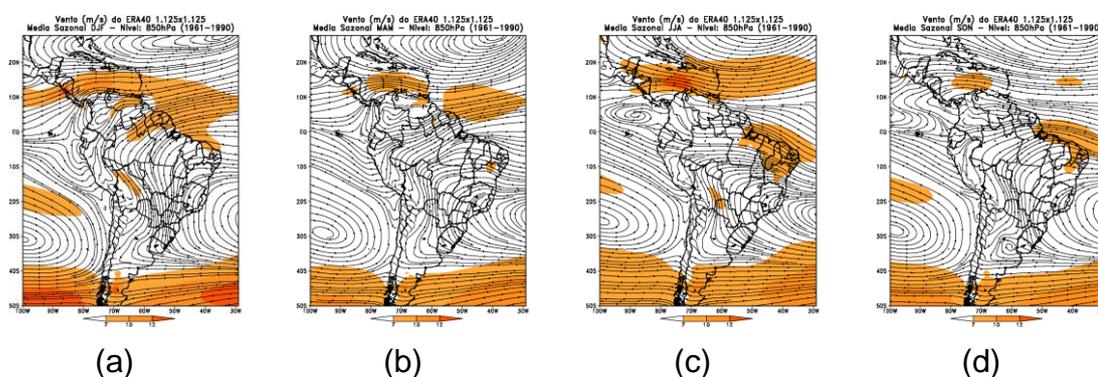


Figura 14 – Campos médios sazonais de linhas de corrente e isotacas ($m s^{-1}$) em 850 hPa das reanálise do ECMWF para o período de 1961-1990 para os trimestres: verão (a); outono (b); inverno (c); e primavera (d).

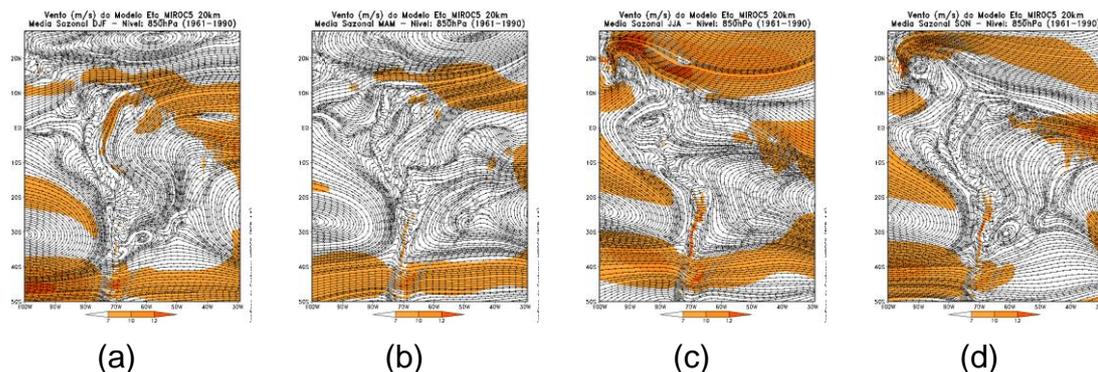


Figura 15 – Campos médios sazonais de linhas de corrente e isotacas em 850 hPa simulado pelo modelo Eta para o período de 1961-1990 para os trimestres: verão (a); outono (b); inverno (c); primavera (d).

Em altos níveis (200 hPa) observa-se no verão (Figura 17a) que a Alta da Bolívia tem uma inclinação na direção leste-oeste que não é observada na reanálise. No inverno (Figura 17c) o modelo Eta indica uma circulação anticiclônica anômala sobre a Bolívia não é observada nos dados de reanálise. Outra diferença clara é a presença da Alta da Bolívia sobre o sul da região Amazônica durante a primavera (SON) mostrada pelos dados da reanálise e simulada com maior intensidade e posicionada a sudoeste sobre o norte da Bolívia (Figura 17d).

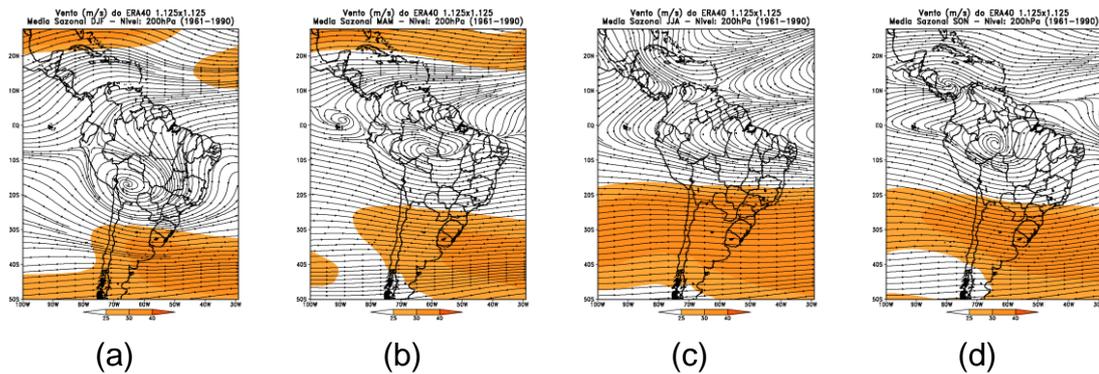


Figura 16 – Campos médios sazonais de linhas de corrente e isotacas em 200 hPa das reanálise do ECMWF para o período de 1961-1990 para os trimestres: verão (a); outono (b); inverno (c); primavera (d).

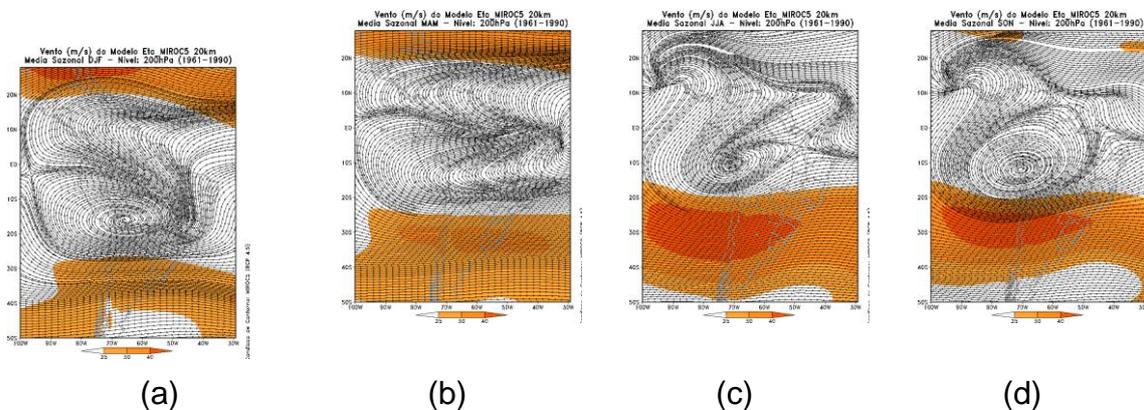


Figura 17 – Campos médios sazonais de linhas de corrente e isotacas em 200 hPa simulado pelo modelo Eta para o período de 1961-1990 para os trimestres: verão (a); outono (b); inverno (c); primavera (d).

3.5. Pressão ao Nível Médio do Mar

A seguir serão analisados os campos de pressão ao nível médio do mar derivados dos dados de reanálises do ECMWF (ERA40) (Figura 18) e simulados pelo Modelo Eta (Figura 19). O campo médio sazonal de pressão ao nível médio do mar do modelo Eta apresenta-se semelhante entre as reanálises, algumas diferenças maiores podem ser visualizadas nos Altiplanos do Andes.

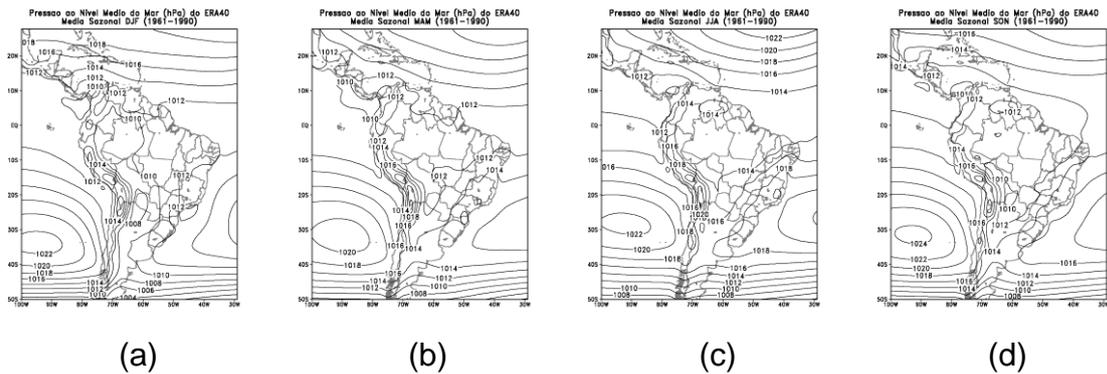


Figura 18 – Mapas sazonais do campo de pressão ao nível médio do mar (hPa) derivados dos dados de reanálise do ECMWF para o período de 1961-1990 para os trimestres: verão (a); outono (b); inverno (c); primavera (d).

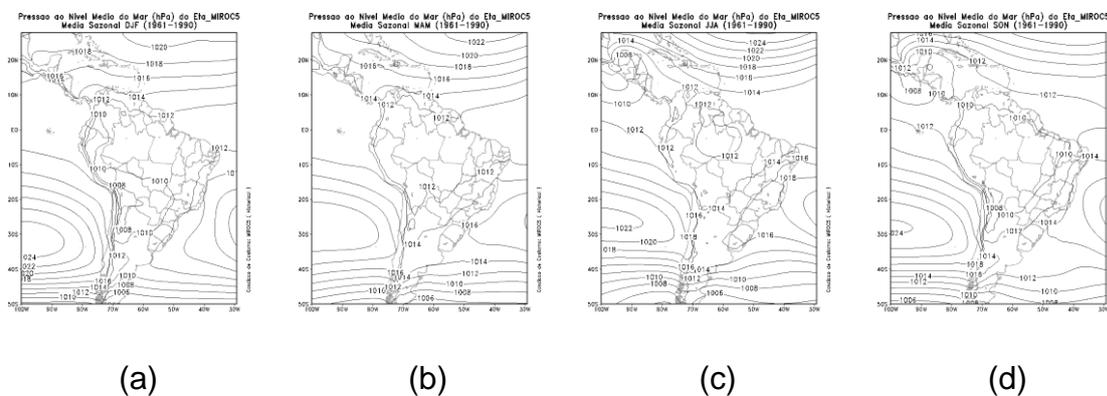


Figura 19 – Mapas sazonais do campo de pressão ao nível médio do mar (hPa) simulado pelo modelo Eta para o período de 1961-1990 para os trimestres: verão (a); outono (b); inverno (c); primavera (d).

3.6. Distribuição de Frequência

A seguir são apresentadas os gráficos de distribuição de frequência para dados mensais de precipitação e temperatura a 2 metros do modelo Eta para as regiões da Figura 1. Para isso, os dados destas duas variáveis foram agrupados em classes de modo a fornecer a quantidade de ocorrência em cada classe. Devido a diferença de resolução entre os dados observados, modelo MIROC5 e modelo Eta, os valores de ocorrência foram transformados em porcentagem considerando o número total de ocorrências em cada dado e cada região. No caso da precipitação (Figura 20) os valores foram plotados em

escala logarítmica a fim de favorecer a visualização dos valores extremos. Na Figura 20a observa-se que a distribuição de frequência de precipitação na Região da Amazônica onde o modelo Eta indica uma subestimativa para intervalos de classe de 10 a 24 mm/dia e superestima os intervalos de classe de chuvas intensas (>24mm/dia). Na região Nordeste (Figura 20b) o modelo Eta apresenta o padrão da distribuição bastante semelhante ao padrão do dado observado. Sobre a Região Centro-Sul o modelo Eta apresenta uma tendência de subestimar a precipitação acima de 10 mm/dia. A concordância na distribuição de frequência, entre o modelo Eta e as observações, indicam que o modelo Eta simula bem o padrão de distribuição horizontal da precipitação.

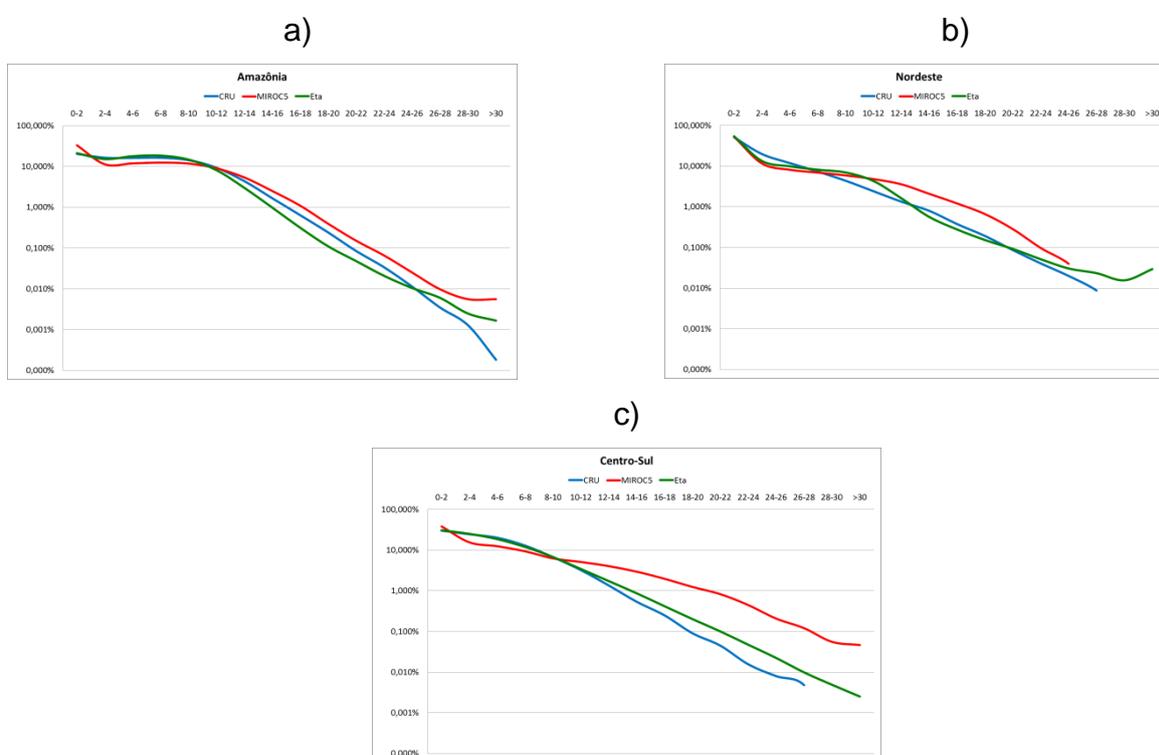


Figura 20 – Distribuição de frequência da precipitação mensal (mm/dia) observada (linha azul), simulada pelo modelo MIROC5 (linha vermelha) e simulada pelo modelo Eta (linha verde) para as regiões Amazônia (a), Nordeste (b) e Centro-Sul (c).

A Figura 21 mostra a distribuição de frequência da temperatura em 2 metros para o modelo Eta, MIROC5 e CRU. Verifica-se, assim como na observação, os modelos apresentam uma distribuição de frequência que se aproxima de uma distribuição normal, porém os modelos indicam um deslocamento do pico

de máxima temperatura, sendo que o modelo Eta apresenta o maior deslocamento para todas as regiões analisadas.

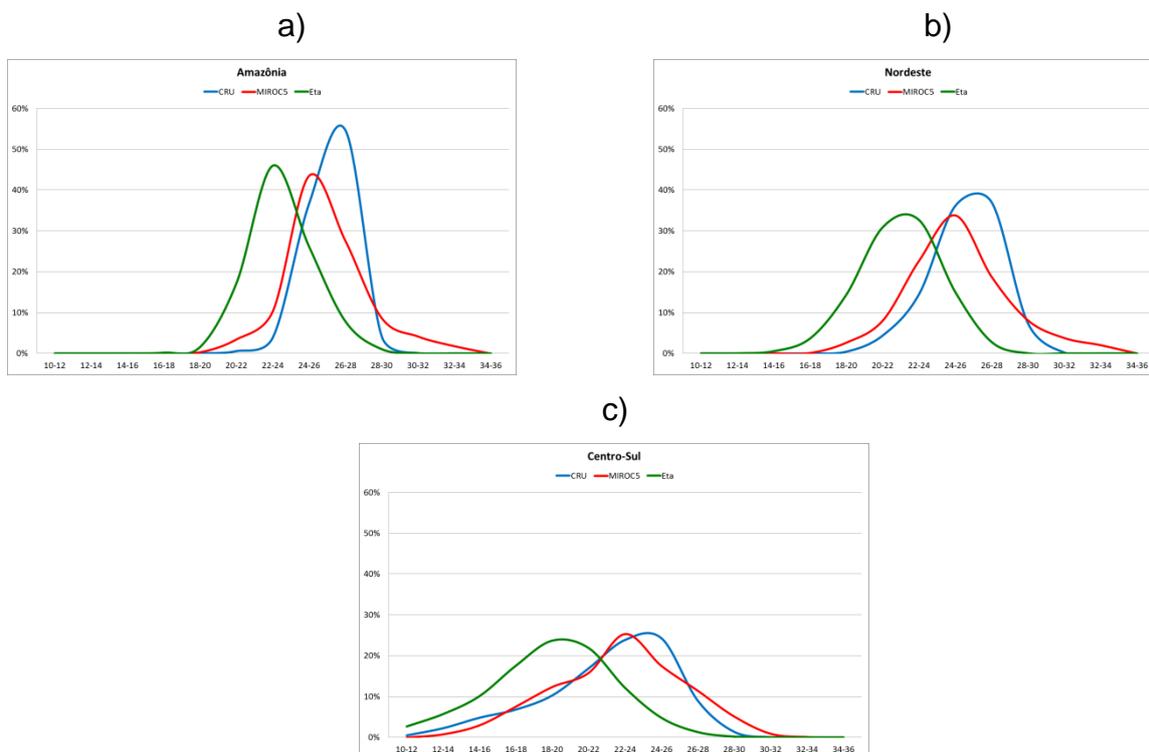


Figura 21 – Distribuição de frequência da temperatura mensal (°C) observada (linha azul), simulada pelo modelo MIROC5 (linha vermelha) e simulada pelo modelo Eta (linha verde) para as regiões Amazônia (a), Nordeste (b) e Centro-Sul (c).

3.7. Índices Extremos

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), que foram 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 \geq 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 \geq 10mm	dias
R20mm	Precipitação de um dia superior a 20mm	Número de dias no ano com precipitação \geq 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 \geq 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 $T_{min} < 10^{\text{o}}$ percentil	% de dias
TX10p	Dias Frios	Porcentagem de dias com $T_{max} < 10^{\text{o}}$ percentil	% de dias
TN90p	Noites Quentes	Porcentagem de dias com $T_{min} > 90^{\text{o}}$ percentil	% de dias
TX90p	Dias Quentes	Porcentagem de dias com $T_{max} > 90^{\text{o}}$ percentil	% de dias
WSDI	Ondas de Calor	Numero de dias anuais com pelo menos 6 dias consecutivos em que $TX > 90^{\text{o}}$ percentil	dias
CSDI	Ondas de Frio	Numero de dias anuais com pelo menos 6 dias consecutivos em que $TN < 10^{\text{o}}$ percentil	dias

A Figura 22 apresenta a tendência para cada índice extremo de precipitação para o período entre 1961 e 1990. 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 à diminuição da precipitação ou dias secos. Desta maneira, a legenda do índice CDD é contrária aos outros índices.

Observa-se uma tendência positiva sobre a Região Sul e negativa sobre a Região Nordeste índices PRCPTOT e R95p que relaciona a quantidade de precipitação ao longo do período de 1961-1990.

Os índices de precipitação relacionados ao número de dias úmidos ou de intensidade de chuva de moderada a forte (CWD, R10mm, R20mm) também apresentaram uma tendência positiva no aumento de dias com chuva forte, sobre as mesmas regiões, relacionada obviamente com o aumento na intensidade da chuva observada. O índice CDD relacionado ao número de dias secos consecutivos sem chuva mostrou uma tendência para de diminuição do

numero de dias secos consecutivos sobre parte Central do Brasil e uma diminuição na costa norte da Região Nordeste.

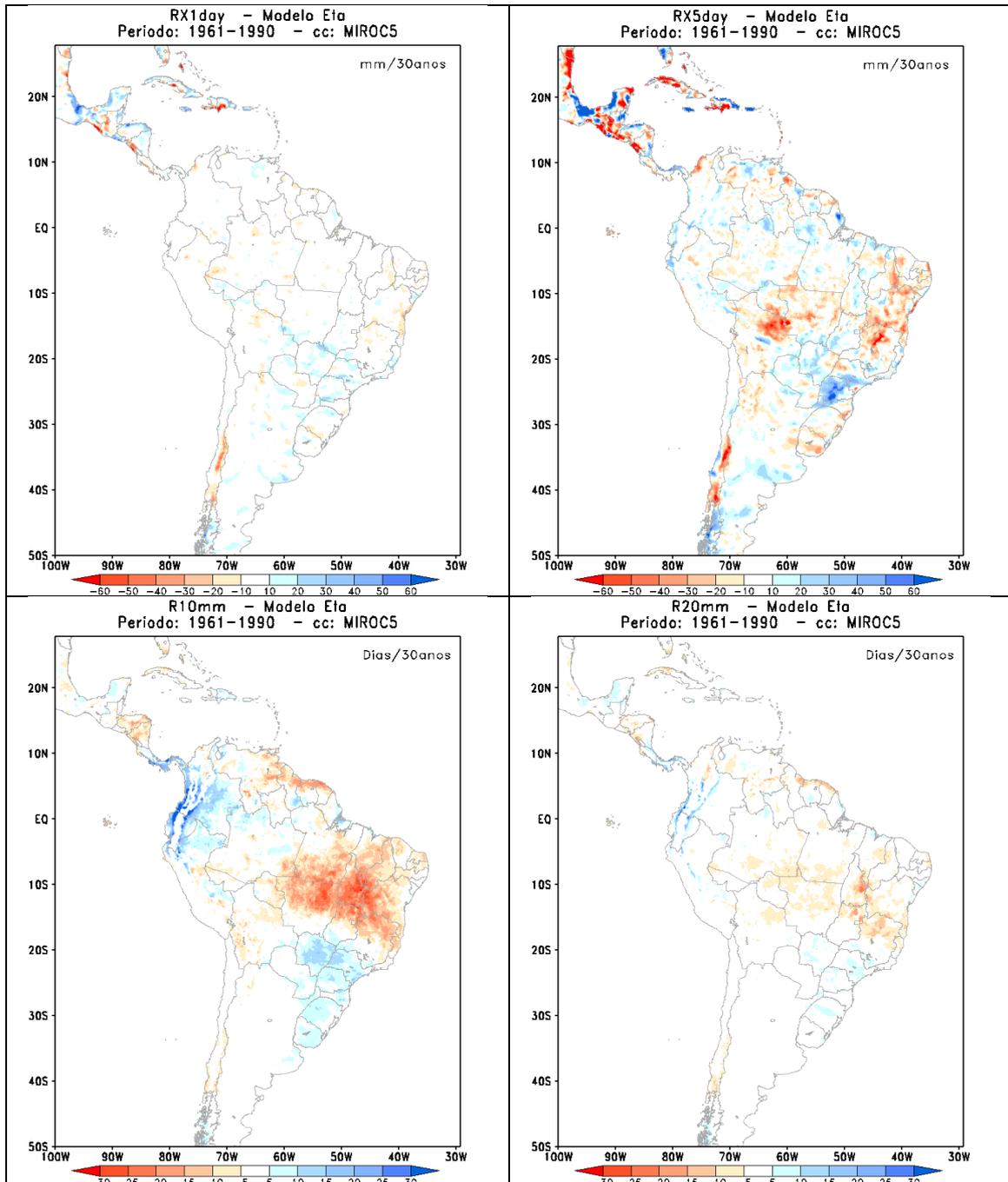


Figura 22 – Tendência dos Índices Climáticos Extremos de Precipitação para o período de 1961-1990 simulados pelo modelo Eta-MIROC5: RX1day, RX5dat, R10mm, R20mm, CDD, CWD, PCPTOT e R95p.

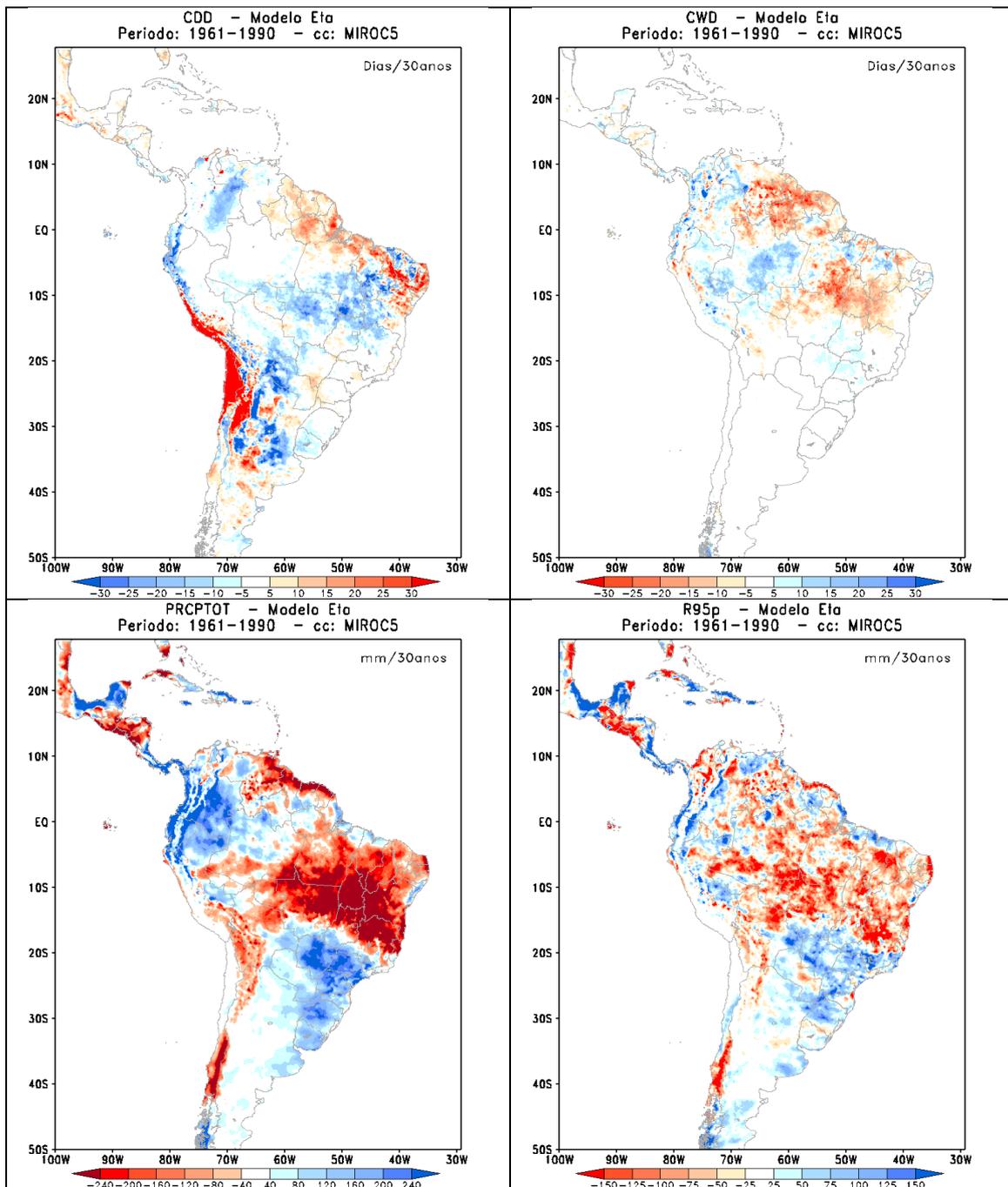


Figura 22 - Continuação.

No que se refere aos índices extremos de temperatura (Figura 23) o modelo Eta simulou, para os últimos trinta anos, tendências negativas para a porcentagem de dias e noites frias (TN10p e TX10p) e tendências positivas para porcentagem de dias e noites quentes (TN90p e TX90p). Nos índices CSDI e WSDI observa-se um comportamento, correspondendo a um aumento

nas ondas de frio sobre a Região Nordeste e uma diminuição nas outras regiões do Brasil. Com relação a valores de máximos de temperatura (TNx e TXx) o modelo Eta apresenta aumento sobre a Região Nordeste e uma diminuição sobre o Estado do Rio Grande do Sul.

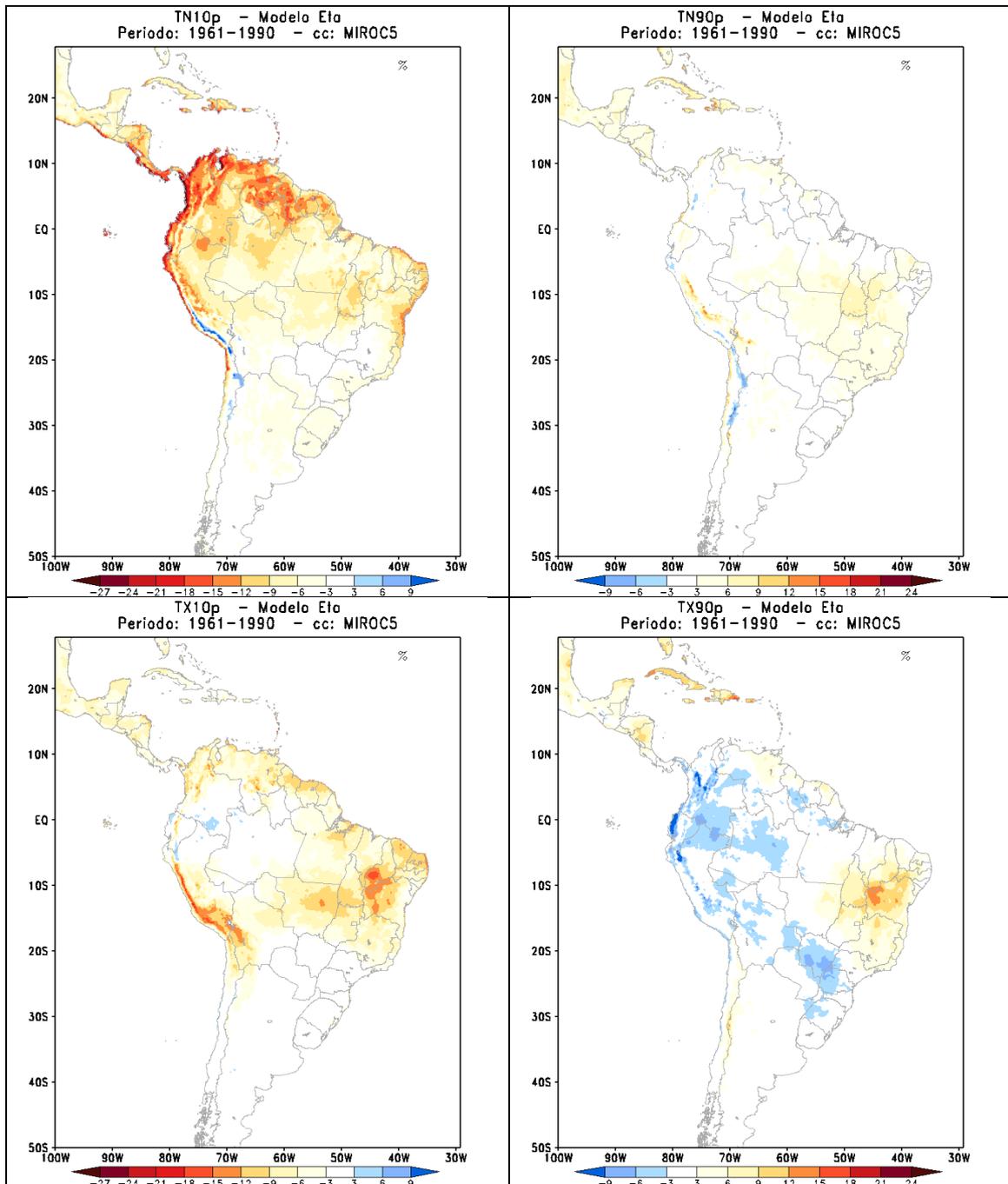


Figura 23 – Tendência dos Índices Climáticos Extremos de Temperatura para o período de 1961-1990 simulados pelo modelo Eta-MIROC5: TN10p, TN90p, TX10p, TX90p, TNx, TXx, CSDI e WSDI.

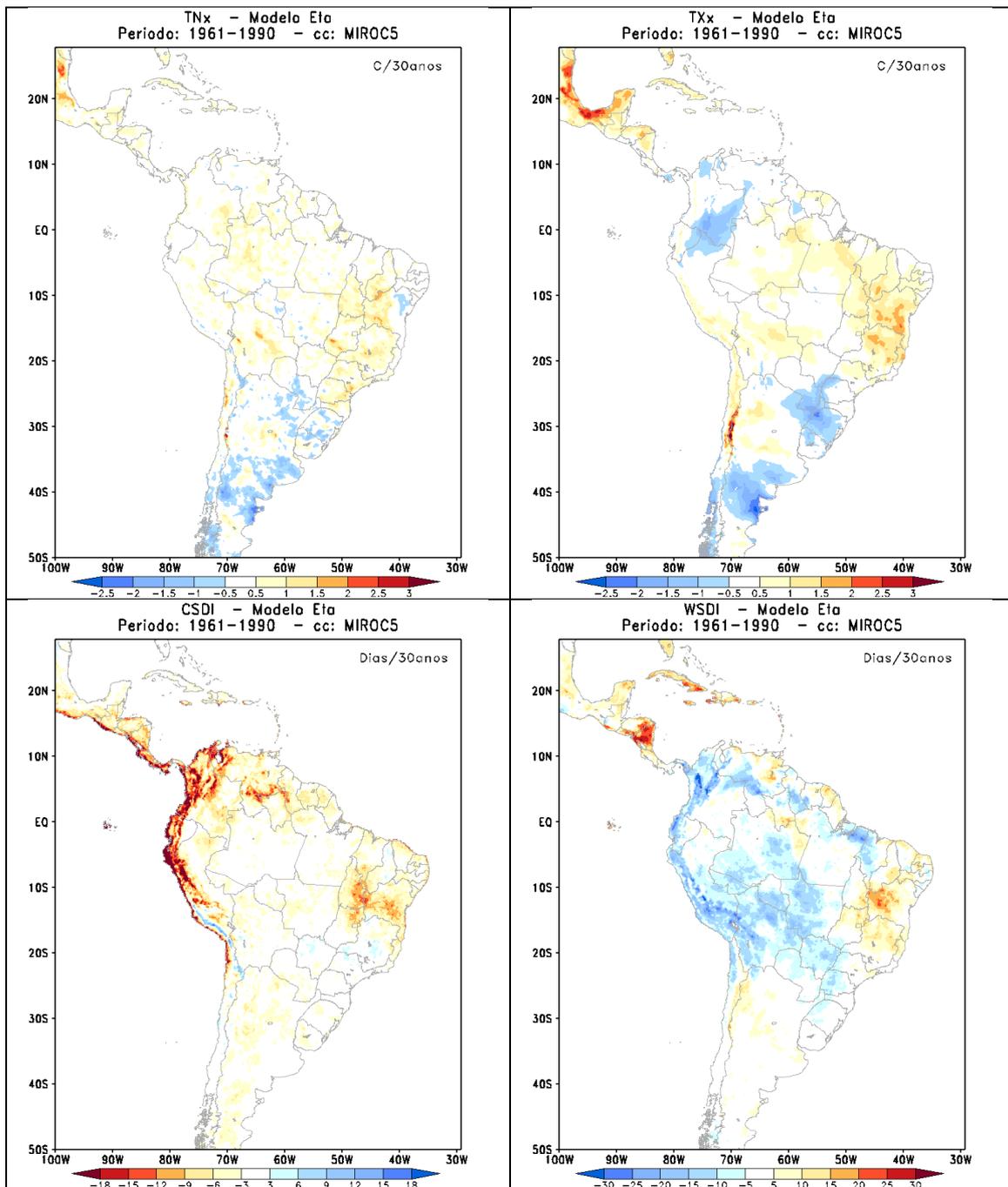


Figura 23 - Continuação.

4. DISCUSSÃO DE RESULTADOS E CONSIDERAÇÕES FINAIS

Neste trabalho foi avaliada a destreza do modelo regional Eta utilizando as condições de contorno do MIROC5 em simular a variabilidade sazonal dos principais padrões climatológicos sobre a região da América do Sul e oceanos adjacentes, através de simulações numéricas de longo prazo para o clima presente.

Assim, com base nos resultados apresentados, algumas conclusões podem ser tiradas desse trabalho:

Na avaliação da sazonalidade, verifica-se que o modelo regional consegue representar relativamente bem o padrão espacial e temporal da precipitação e temperatura, como também as principais características da circulação atmosférica de grande escala em baixos níveis. Em altos nível o modelo Eta apresenta um padrão de circulação anômalo nos meses de inverno. O modelo Eta subestima a temperatura sobre o região continental em todos os meses do ano. Apesar de o modelo simular o padrão de precipitação associado à ZCAS durante a estação chuvosa (DJF), observa-se uma subestimativa da precipitação sobre o norte da região Amazônica e superestima sobre o Estado de Minas Gerais. O modelo Eta apresenta também um padrão de subestimativa da precipitação sobre a Região Sul do Brasil e superestima sobre o Estado de Minas Gerais em todas as estações do ano. Destaca-se também que o modelo superestima a precipitação sobre a Região Nordeste no verão e outono.

O escoamento próximo à superfície (850 hPa) mostrou a circulação associada com as altas subtropicais bem representadas sazonalmente pelo modelo. Nos altos níveis (200 hPa) o modelo consegue representar razoavelmente bem as principais características da circulação, exceto no inverno onde verifica-se um núcleo de circulação anômalo. Em geral o modelo Eta-MIROC5 apresenta um padrão do escoamento mais intenso que o observado.

A análise das séries temporais do ciclo anual climatológico da precipitação e temperatura mostra que o modelo, considerando as particularidades locais de cada região, apresenta um ciclo anual bem definido, isto é, pouca precipitação durante os meses secos e totais elevados durante os meses chuvosos, e temperatura altas no verão e mínimas no inverno.

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

Chou SC, Marengo JA, Lyra A, Sueiro G, Pesquero J, Alves LM, Kay G, Betts R, Chagas D, Gomes JL, Bustamante J, Tavares P. Downscaling of South America present climate driven by 4-member HadCM3 runs. *Climate Dynamics*. Vol. 38 n. 3-4, 635-653. DOI 10.1007/s00382-011-1002-8, 2012.

Collins, W. J., Bellouin, N., Doutriaux-Boucher, M., Gedney, N., Halloran, P., Hinton, T., Hughes, J., Jones, C. D., Joshi, M., Liddicoat, S., Martin, G., O'Connor, F., Rae, J., Senior, C., Sitch, S., Totterdell, I., Wiltshire, A., and Woodward, S.: Development and evaluation of an Earth-system model HadGEM2, *Geosci. Model Dev. Discuss.*, 4, 997–1062, doi:10.5194/gmdd-4-997-2011, 2011.

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.

Dee, D. P., Uppala, S. M., Simmons, A. J., Berrisford, P., Poli, P., Kobayashi, S., Andrae, U., Balmaseda, M. A., Balsamo, G., Bauer, P., Bechtold, P., Beljaars, A. C. M., van de Berg, L., Bidlot, J., Bormann, N., Delsol, C., Dragani, R., Fuentes, M., Geer, A. J., Haimberger, L., Healy, S. B., Hersbach, H., Hólm, E. V., Isaksen, L., Kållberg, P., Köhler, M., Matricardi, M., McNally, A. P., Monge-Sanz, B. M., Morcrette, J.-J., Park, B.-K., Peubey, C., de

Rosnay, P., Tavolato, C., Thépaut, J.-N. and Vitart, F. (2011), The ERA-Interim reanalysis: configuration and performance of the data assimilation system. *Q.J.R. Meteorol. Soc.*, 137: 553–597. doi: 10.1002/qj.828

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.

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.

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

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.

Marengo, J. A.; Chou, S. C; Kay G.; Alves, L.; 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.; 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*. Vol 38, n9-10, 1829-1848. DOI 10.1007/s00382-011-1155-5, 2012.

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.

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.

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.

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.