



CENÁRIOS DE MUDANÇAS CLIMÁTICAS PARA O BRASIL EM 2100

José Marengo

Os modelos gerados a partir do terceiro e quarto relatórios do Painel Intergovernamental de Mudanças Climáticas (*Intergovernmental Panel on Climate Change* – IPCC) projetam o clima até o fim do século XXI. O terceiro relatório concluiu que a temperatura média da atmosfera em escala global poderá alcançar, até 2100, valores superiores aos atuais, entre 1,4 e 5,8°C, dependendo das emissões de gases de efeito estufa. No Brasil, o aquecimento chegaria a valores maiores, de até 6 a 8°C na Amazônia e no Pantanal, e de até 4 a 5°C no Nordeste e na Bacia do Prata. As projeções de anomalias de chuva para a América do Sul contêm mais incertezas, pois dos cinco modelos climáticos considerados, um deles mostra que o nordeste amazônico experimentará secas a partir de 2060, enquanto que outro modelo aponta chuvas acima do normal para a mesma região. A média dos cinco modelos prevê, para o norte e o centro da Amazônia, sensível redução de chuva, que entretanto será mais abundante no sul do país. Tais previsões ajustam-se com as simulações de vazão de rios, constantes do quarto relatório, no qual o Paraná e o Prata apresentaram aumentos de vazão, ao contrário do que sucederá no nordeste da Amazônia.

Introdução

O Painel Intergovernamental de Mudanças Climáticas (*Intergovernmental Panel on Climate Change* – IPCC) concluiu, no seu terceiro relatório, em 2001, que a temperatura média da atmosfera aumentou entre 0,2 e 0,6°C durante o século XX. Os modelos climáticos do IPCC mostram ainda, a partir de 1900, que até 2.100 a temperatura global poderá subir entre 1,4 e 5,8°C, o que representa um aquecimento mais rápido do que aquele detectado no século XX e que, aparentemente, não possui precedentes durante, pelo menos, os últimos 10.000 anos. Além da variabilidade natural do clima, esse fenômeno é consequência também do aumento na concentração de gases de efeito estufa, que, por sua vez, derivam de atividades antropogênicas – como a indústria ou o uso da terra.

O aquecimento global recente traz consigo impactos ambientais intensos, como o derretimento das geleiras e calotas polares, impactos que se manifestam também em processos biológicos, como por exemplo as alterações de períodos de floração das plantas.

As ferramentas comumente adotadas para se obter e avaliar medições climáticas passadas e futuras são os modelos de clima, ou seja, os modelos globais atmosféricos (GCMs) ou os modelos globais acoplados oceano-atmosfera (AOGCMs), que são produtos de uma visão tridimensional do sistema climático, descrevendo os principais processos físicos e dinâmicos, assim como as interações entre os componentes do sistema climático e os mecanismos de retro-alimentação (*feedbacks*) entre os processos físicos. Tais instrumentos podem simular climas futuros em nível global e regional, como resposta às mudanças na concentração de gases de efeito estufa e de aerossóis derivados da indústria e da queima de combustível e da biomassa.

A habilidade dos AOGMs em simular climas regionais vai depender de sua escala horizontal (ou resolução); as respostas seriam mais restritas se fossem utilizados modelos globais com resolução da ordem de 300 a 400km em relação ao uso de modelos regionais, cuja resolução é da ordem de 10 a 50km. Ainda assim, podem oferecer informações sobre mudanças de clima de grande utilidade para a escala continental, e considerando a extensão do Brasil, certamente contribuem para detectar as características gerais do clima futuro.

Este artigo apresenta uma avaliação de projeções do clima para a América do Sul, servindo-se das saídas geradas por cinco modelos incluídos no terceiro relatório do IPCC para

¹ CARTER, T. & HULME, M. *Interim characterizations of Regional Climate Related Changes up to 2100 associated with the Provisional SRES Marker Emissions Scenarios*. Geneva, Switzerland: IPCC Secretariat, 2000.

dois tipos de cenários: um de alta emissão de gases de efeito estufa ou “pessimista” (A2), outro de baixa emissão dos mesmos gases ou “otimista” (B2). Ambos os cenários são conhecidos como SRES (*Special Report Emission Scenarios*) e aparecem detalhados e explicados em Carter e Hulme¹. A análise, realizada em nível anual e sazonal para mudanças nos padrões continentais de precipitação e temperatura do ar, simulados por AOGCMs, não contempla a grande variedade de cenários, referindo-se apenas aos cenários ditos pessimistas e otimistas. Adicionalmente, são previstas tendências futuras de vazões de rios, considerando-se os modelos do IPCC que serviram para a preparação do seu quarto relatório de avaliação.

O clima do presente

Na década de 1990, registraram-se as mais altas temperaturas desde as primeiras medições feitas em meados do século XIX. Esse aumento de calor nas décadas recentes corresponde ao aumento no uso de combustível fóssil durante o período. Até finais do século XX, o ano de 1998 foi o mais quente desde o início das observações meteorológicas em 1861, com $+0,54^{\circ}\text{C}$ acima da média histórica de 1961 a 90. Já no século XXI, a temperatura do ar em âmbito global foi de $+0,48^{\circ}\text{C}$ acima da média, em 2005, ano avaliado como o segundo mais quente do período observado, como afirma a *Climate Research Unit* da Universidade de East Anglia, Reino Unido. Enfim, 2003 foi o terceiro mais quente ($+0,44^{\circ}\text{C}$ acima do normal) dentre os últimos 11 anos (1995 a 2004, com exceção de 1996), considerados os de maior calor no período instrumental (figura 1).

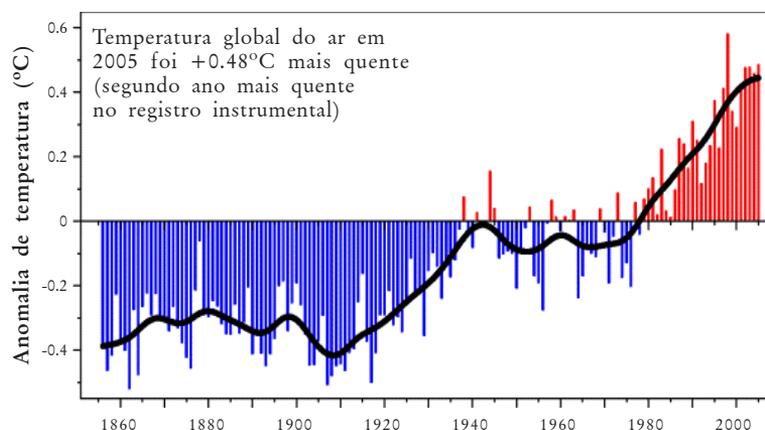


Figura 1: Anomalias de temperatura do ar global (em relação a 1961-90) desde o período industrial. A linha preta representa a média móvel de 10 anos (Fonte: Climate Research Unit, 2006).

Ao longo dos primeiros séculos da revolução industrial, de 1760 a 1960, os níveis de concentração de CO₂ cresceram de uma estimativa de 277 partes por milhão (ppm) para 317 ppm, portanto, um aumento de 40 ppm. Durante as recentes quatro décadas, de 1960 até 2001, as concentrações de CO₂ passaram de 317 ppm para 371 ppm. O aumento de quase 0,6°C durante o último século é pequeno, comparado às projeções de aquecimento para o próximo século, que poderá ficar entre os limites de 1,4 e 5,8°C em 2100.²

O que se espera dos modelos climáticos para projetar o clima do futuro

Os modelos climáticos globais dos centros mundiais de meteorologia da Europa, do Japão, da Austrália e América do Norte, utilizados na elaboração do terceiro relatório do IPCC, mostram que o aquecimento dos últimos 100 anos provavelmente não é devido apenas à variabilidade interna do clima. Avaliações baseadas em princípios físicos indicam que a forçante natural não pode explicar sozinho a mudança do clima observada na estrutura vertical da temperatura na atmosfera. Os resultados de estudos oriundos de modelos climáticos estão sujeitos a incertezas associadas: a) às emissões futuras de gases de efeito estufa e aerossóis; b) à inclusão de efeitos diretos do aumento na concentração de CO₂ atmosférico nas plantas e do efeito do comportamento das mesmas no clima futuro; c) à sensibilidade do clima global e nos padrões regionais do clima futuro simulado pelos modelos. Tais incertezas se devem também às diferentes formas com que cada modelo representa os processos físicos e os mecanismos do sistema climático. Cada um simula um clima global e regional com algumas diferenças nos campos de temperatura do ar, chuva, nebulosidade e circulação atmosférica.

No passado, os primeiros experimentos de mudanças climáticas assumiram situações de desmatamento total na Amazônia e outras regiões tropicais, ou aumentos de concentração de CO₂ na ordem de 100%. Os resultados projetaram climas quentes e secos na América do Sul tropical e outras mudanças no resto do mundo. As respostas têm sido distintas e dependem do tipo de modelo utilizado.

Um sumário dos experimentos de desmatamento na Amazônia realizados desde meados de 1980³ sugere que, devido à erradicação das florestas na região, a temperatura aumentará, do mesmo modo que a evaporação, enquanto

² IPCC. Intergovernmental Panel on Climate Change. *Climate Change 2001: The Scientific Basis-Contribution of Working Group 1 to the IPCC Third Assessment Report*. Cambridge: Cambridge University Press, 2001a.

MARENGO, J. A. *Caracterização do clima no século XX e cenários climáticos no Brasil e na América do Sul para o século XXI derivados dos Modelos Globais de Clima do IPCC*. Brasília: Ministério do Meio Ambiente (MMA), Secretaria de Biodiversidade e Florestas (SBF), Diretoria de Conservação da Biodiversidade, setembro de 2006.

MARENGO, J. A. & AMBRIZZI, T. Use of Regional Climate Models in impact assessments and adaptation studies from continental to regional and local scales: The CREAS (Regional Climate Change Scenarios for South America) initiative in South America. *Proceedings of 8 ICSHMO...* Foz do Iguaçu, Brazil: INPE, abril 24-28, 2006. p. 291-296.

³ MARENGO, J. A. *Caracterização do clima no século XX e cenários climáticos no Brasil e na América do Sul para o século XXI derivados dos Modelos Globais de Clima do IPCC*. *Op. cit.*

MARENGO, J. A. & AMBRIZZI, T. Use of Regional Climate Models in impact assessments and adaptation studies from continental to regional and local scales. *Op. cit.*

⁴ COSTA, M. H. & FOLEY, J. A. Combined effects of deforestation and doubled atmospheric CO₂ concentrations on the climate of Amazonia. *Journal of Climate*, 13:18-34, 2002.

⁵ ZHANG, H.; HENDERSON-SELLERS, A. & MCGUFFIE, K. The compounding effects of tropical deforestation and greenhouse warming on climate. *Climatic Change*, 49:309-338, 2001.

⁶ MARENGO, J. A. *Mudanças climáticas globais e efeitos sobre a biodiversidade* – Caracterização do clima atual e definição das alterações climáticas para o território brasileiro ao longo do século XXI: CREAS (Cenários Regionalizados de Clima para América do Sul). Encontro dos coordenadores dos subprojetos apoiados pelo PROBIO, Brasília, DF, 27 a 29 de outubro de 2004.

⁷ MARENGO, J. A. & AMBRIZZI, T. Use of Regional Climate Models in impact assessments and adaptation studies from continental to regional and local scales. *Op. cit.*

que a chuva e o escoamento superficial diminuirão. Por outro lado, a maioria desses experimentos não muda a concentração de gases de efeito estufa ou de aerossóis na atmosfera. Os realizados por Costa e Foley⁴ e Zhang *et alii*⁵ também usaram 2xCO₂ e desmatamento simultaneamente, gerando reduções de vazões e chuva na Amazônia, bem como um aquecimento que poderia chegar até +1,4°C.

Diante do exposto, a motivação deste artigo foi a avaliação dos cenários climáticos do futuro (até 2100) criados por cinco modelos citados no terceiro relatório e por 16 modelos descritos no quarto relatório do IPCC, para a América do Sul. A informação de mudanças de temperatura e de precipitação em nível anual e sazonal para cada fatia de tempo ou *time slice* – 2010-2040, 2041-2070 e 2070-2100 – é apresentada em forma de mapas continentais e séries de tempo. Muitas dessas avaliações de clima e hidrologia são baseadas no exame dos cenários extremos SRES A2 e B2 dos modelos globais do terceiro relatório em questão. Tais simulações são produtos dos projetos PROBIO, do Ministério do Meio Ambiente (Brasil)⁶ e do GOF-UK (Reino Unido)⁷. Outras análises consideraram resultados de pesquisas recentes, preparadas para elaborar o quarto relatório do IPCC para mudanças na hidrologia dos grandes rios do Brasil.

Modelos globais para projeções de clima no Brasil e na América do Sul

Uma análise das saídas dos modelos climáticos incluídos no terceiro relatório do IPCC para os cenários (SRES) A2 e B2, os quais serão avaliados para o Brasil, permitirá obter uma primeira aproximação do clima futuro para a totalidade do país, porém sem muito detalhamento regional. O estudo toma como referência os cinco modelos listados a seguir:

1. Hadley Centre for Climate Prediction and Research, da Inglaterra (HadCM3);
2. Australia's Commonwealth Scientific and Industrial Research Organization, da Austrália (CSIRO-Mk2);
3. Canadian Center for Climate Modeling and Analysis, do Canadá (CCCMA);
4. National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA) – Geophysical Fluids Dynamic Laboratory, dos Estados Unidos (GFDL-CM2);
5. Center for Climatic Studies and Research (CCSR) National Institute for Environmental Studies (NIES), do Japão (CCSR-NIES).

A partir do exame da variabilidade dos modelos, poder-se-ia tentar reduzir as incertezas das previsões, considerando não só um, mas vários cenários de vários modelos. Os cenários climáticos definidos pelo IPCC, em 2001, fundamentam-se em quatro projeções diferentes de emissões de gases de efeito estufa para os anos vindouros e são utilizados para analisar o clima futuro em três fatias de tempo (*time slices*), centradas respectivamente em 2020, 2050 e 2080. Também servem de base para as projeções até 2100.

Os cenários utilizados neste artigo são A2 e B2, assim conceituados:

A2 (pessimista) é o cenário que descreve um mundo futuro muito heterogêneo, onde a regionalização é dominante. Existiria um fortalecimento de identidades culturais regionais, com ênfase em valores da família e tradições locais. Outras características seriam crescimento populacional alto e menor preocupação em relação ao desenvolvimento econômico rápido.

*B2 (otimista) é o cenário que descreve um mundo no qual a ênfase está em soluções locais, sustentabilidade econômica, social e ambiental. A mudança tecnológica apresenta-se mais diversa, com forte acento em iniciativas comunitárias e inovação social, em lugar de soluções globais.*⁸

⁸ Todos os cinco modelos e os dois cenários em questão são discutidos no relatório de MARENGO, J. A. *Caracterização do clima no século XX e cenários climáticos no Brasil e na América do Sul para o século XXI...* *Op. cit.* e no website do IPCC – Data Distribution Center DDCC (<http://www.ipcc-wg2.org/index.html>), sediados na University of East Anglia no Reino Unido e no Max Planck Institute for Meteorology da Alemanha.

Análises regionais de cenários climáticos do futuro para o Brasil

As séries temporais das anomalias de chuva e temperatura geradas por seis modelos do IPCC para o período 2000–2001, derivadas das observações de quatro regiões brasileiras de interesse (Amazônia, Nordeste, Pantanal e Bacia do Prata) podem ser visualizadas nas figuras 2 e 3. As anomalias são calculadas em relação à média de 1961–90, sendo que as curvas mostradas representam a média móvel de 11 anos.

1. Amazônia

Em geral, as anomalias são maiores no cenário A2. O modelo GFDL prevê aumentos de chuva de até 2mm dia⁻¹ em 2100, simulando anomalias negativas de chuva de até 0,7mm dia⁻¹ a partir de 2060 (figura 2). No cenário A2, ligeiros aumentos de pluviosidade até o final do século XXI estão configurados no modelo CSIRO. Quanto aos modelos HadCM3 e GFDI, são talvez aqueles que apontam as maiores e mais contrastantes diferenças nos cenários A2 e B2.

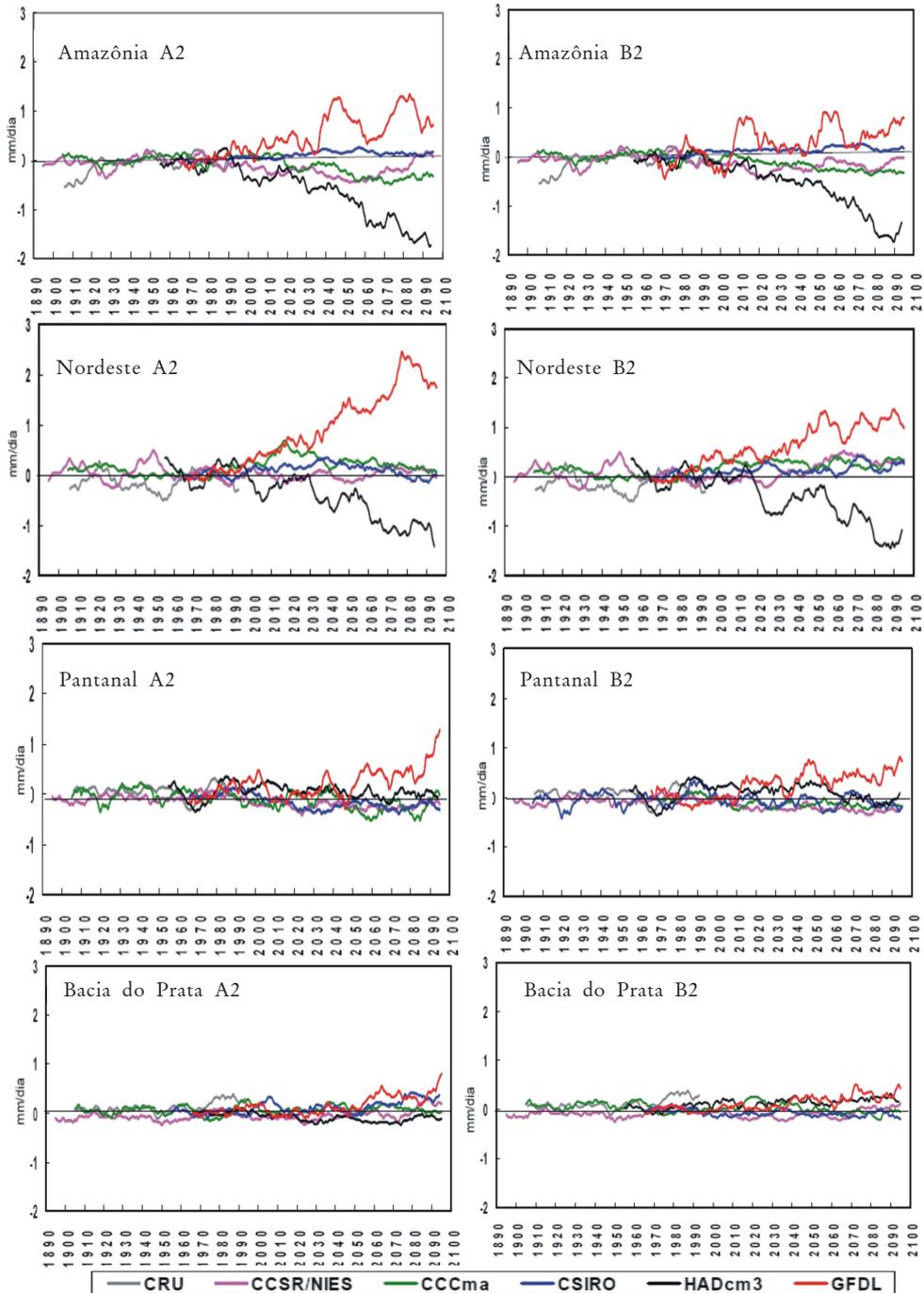


Figura 2: Séries de tempo de anomalias de chuva anual para a Amazônia, Nordeste, Pantanal e Bacia do Prata, durante 2000-2100 geradas pelos modelos acoplados oceano-atmosfera do terceiro relatório do IPCC – CCCMA, CCSR/NIES, CSIRO, GFDL e HadCM3. As anomalias foram calculadas em relação à climatologia de 1961-90 de cada modelo. As séries foram suavizadas usando uma média móvel de 11 anos. As observações são da Climate Research Unit (CRU).

Os modelos HadCM3 e GFDL simulam, no cenário B2, anomalias de chuva de -2 e $+1,5\text{mm dia}^{-1}$, respectivamente. A figura 3 ilustra as séries de tempo de anomalias de temperatura geradas pelos cinco modelos do IPCC para os dois cenários em exame. Todos os modelos atestam para 2100 um sensível aquecimento, que chegaria a $2-6^{\circ}\text{C}$ no cenário A2 e $2-5^{\circ}\text{C}$ no B2, mas variando entre modelos. O maior aquecimento é gerado pelo HadCM3, atingindo 8°C no A2 e 6°C no B2.

2. Nordeste

Para o cenário B2, os modelos CSIRO, GFDL, CCMA desde 2000, e o modelo CCSR-NIES desde 2060, mostram anomalias positivas de chuva, que chegam até 2mm dia^{-1} no GFDL para 2100. No cenário A2, o modelo CCSR-NIES apresenta anomalias positivas, porém menos intensas que no cenário B2. No A2, a maior diferença em relação ao B2 está no modelo GFDL, cujas tendências positivas de chuva vão até 2 a 3mm dia^{-1} em 2080 num cenário pessimista, em contraste com 2mm dia^{-1} num cenário otimista (figura 2). Nos dois cenários, o modelo HadCM3 contém anomalias de chuva negativas, chegando até $-1,5\text{mm dia}^{-1}$ em 2100. A figura 3 esclarece as séries de anomalias de temperatura geradas pelos cinco modelos. Todos prevêem aquecimento até 2100, entre 3 e $5,5^{\circ}\text{C}$ em cenário pessimista, e entre $1,5$ e $2,5^{\circ}\text{C}$ em cenário otimista, com variações entre os modelos.

3. Pantanal

Os modelos apresentam para o cenário A2 uma redução de precipitações da ordem de $-0,5\text{mm dia}^{-1}$, exceto o modelo GFDL, que antecipa um aumento de até 1mm dia^{-1} para o ano de 2100. No cenário B2, os modelos HadCM3 sustentam anomalias positivas de no máximo $0,5\text{mm dia}^{-1}$ até 2060, seguidas de anomalias negativas (figura 3). Na figura 4, percebe-se o aquecimento chegando a 6°C em 2100, no cenário A2 dos modelos NIES-CCSR e HadCM3, enquanto que no B2 este aquecimento alcança $4,5^{\circ}\text{C}$ em ambos os modelos. O aumento de temperatura entre modelos varia de 3 a 6°C em A2 e de 2 a $4,5^{\circ}\text{C}$ em B2.

4. Bacia do Prata

Os modelos HadCM3 e GFDL configuram no cenário B2 uma tendência positiva de precipitações pluviométricas, que chegam até $0,5\text{mm dia}^{-1}$ (figura 2). Os modelos CSIRO e CCSR-NEIS, registrando períodos relativamente chuvosos, com anomalias que ficam entre $+0,5\text{mm dia}^{-1}$ e

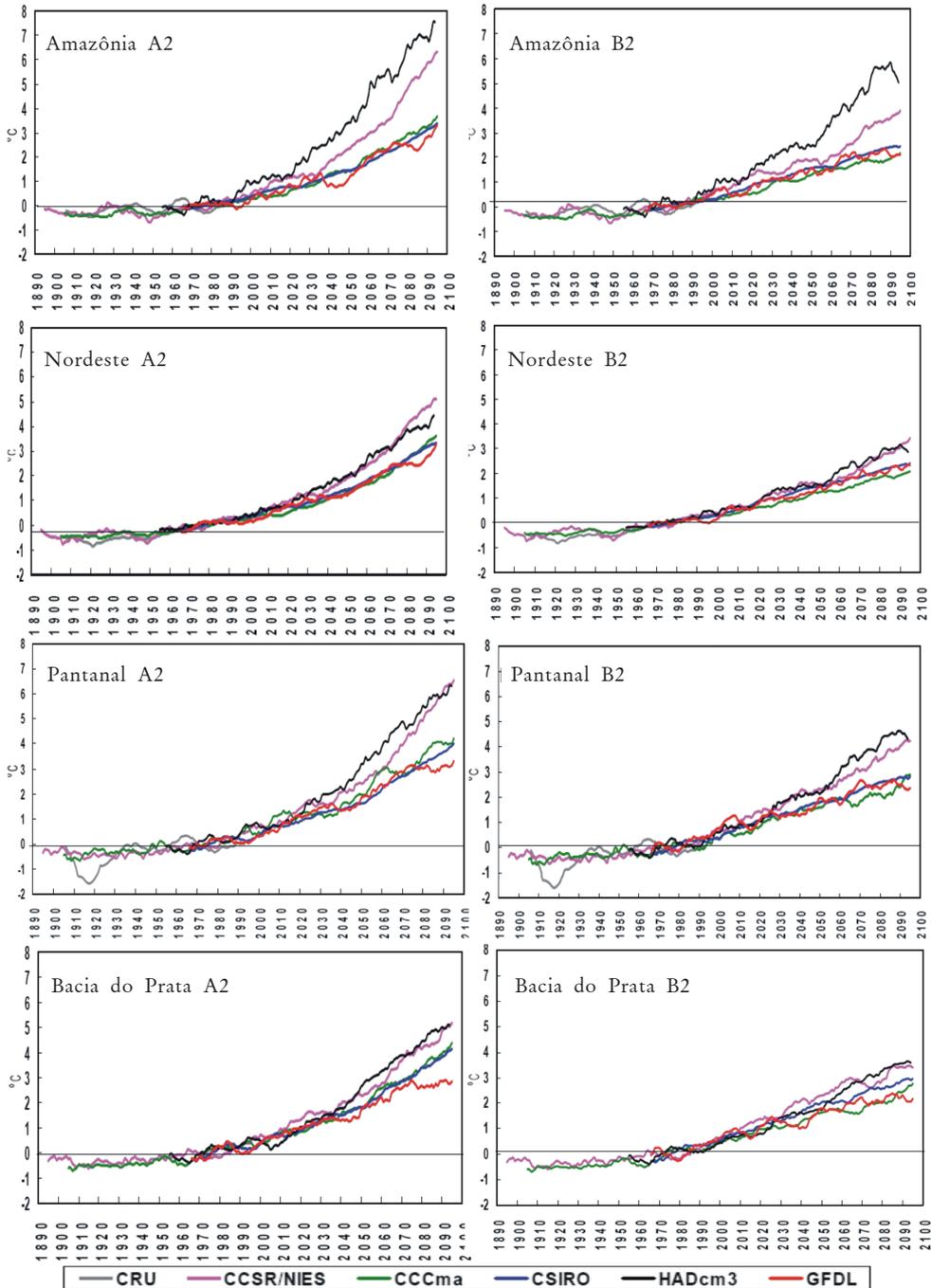


Figura 3: Séries de tempo de anomalias de temperatura anual para a Amazônia, Nordeste, Pantanal e Bacia do Prata durante 2000-2100, geradas pelos modelos acoplados oceano-atmosfera de IPCC-TAR CCCMA, CCSR/NIES, CSIRO, GFDL e HadCM3. As anomalias foram calculadas em relação à climatologia de 1961-90 de cada modelo. As séries foram suavizadas usando uma média móvel de 11 anos. As observações são da Climate Research Unit (CRU).

-0,5mm dia⁻¹, apontam uma variabilidade contrastante. O modelo CCSR-NIES apresenta anomalias positivas no cenário A2 entre 2060 e 2080, mas não ultrapassam 1mm dia⁻¹. A figura 4 mostra o maior aquecimento, de até 5°C no cenário A2, e de 3°C no cenário B2, com variações, entre os modelos, da ordem de 2 a 5°C no A2 e de 2 a 3°C no B2. Os modelos HadCM3 e CCSR-NIES registram, em 2100, anomalias positivas de até 5°C para o cenário pessimista, e de 3 a 4°C para o cenário otimista.

Cenários climáticos do futuro para a América do Sul

Uma revisão de alguns dos cenários climáticos previstos no terceiro relatório do IPCC para a América do Sul é apresentada a seguir, utilizando-se mapas de anomalias de chuva e temperatura do ar relativos ao período de 1960-90, e para os cenários extremos de alta emissão (A2) e de baixa emissão de gases de efeito estufa (B2) já referidos. A ênfase recairá na média dos cinco modelos (ou *multimodel ensemble*) utilizados até aqui, para os períodos (*time slices*) centrados em 2020, 2050 e 2080.⁹

1. Precipitação

Na análise do modelo HadCM3, o período DJF (Dezembro/Janeiro/Fevereiro) representa a estação chuvosa em boa parte das regiões sudeste e centro-oeste, assim como no sul da Amazônia, enquanto que o período MAM (Março/Abril/Maio) designa a estação chuvosa do norte da Amazônia e do nordeste brasileiro, onde as chuvas de verão aparecem reduzidas, porém mais fortes no cenário A2 que no cenário B2. A Zona de Convergência do Atlântico Sul (ZCAS) é mais intensa no cenário B2 durante o verão. Observa-se também que na região sul do Brasil registram-se aumentos na chuva sazonal e anual. A Zona de Convergência Intertropical (ZCIT) aparece mais intensa e deslocada ao norte de sua posição climática durante DJF e MAM, causando anomalias de chuva no nordeste e norte-centro da Amazônia durante essas estações em 2020. Na primavera (SON – Setembro/Outubro/Novembro) e no inverno (JJA – Junho/Julho/Agosto), para a mesma fatia de tempo centrada em 2020, verifica-se, na Amazônia central, uma tendência à diminuição de chuva na primavera (SON), além de um possível adiantamento da estação chuvosa no sudeste do Brasil, conforme indicado pelas anomalias positivas de chuva (SON), talvez mostrando uma configuração tipo ZCAS, durante a primavera de 2020, no cenário A2.

⁹ MARENGO, J. A. *Caracterização do clima no século XX e cenários climáticos no Brasil e na América do Sul para o século XXI derivados dos Modelos Globais de Clima do IPCC*. Op. cit.

MARENGO, J. A. & AMBRIZZI, T. Use of Regional Climate Models in impact assessments and adaptation studies from continental to regional and local scales. Op. cit.

MARENGO, J. & SILVA DIAS, P. Mudanças climáticas globais e seus impactos nos recursos hídricos. Cap. 3. In: REBOUÇAS, B.; BRAGA, B & TUNDISI, J. (eds.). *Águas doces do Brasil: capital ecológico, uso e conservação*. São Paulo: Escrituras, 2006. p. 63-109.

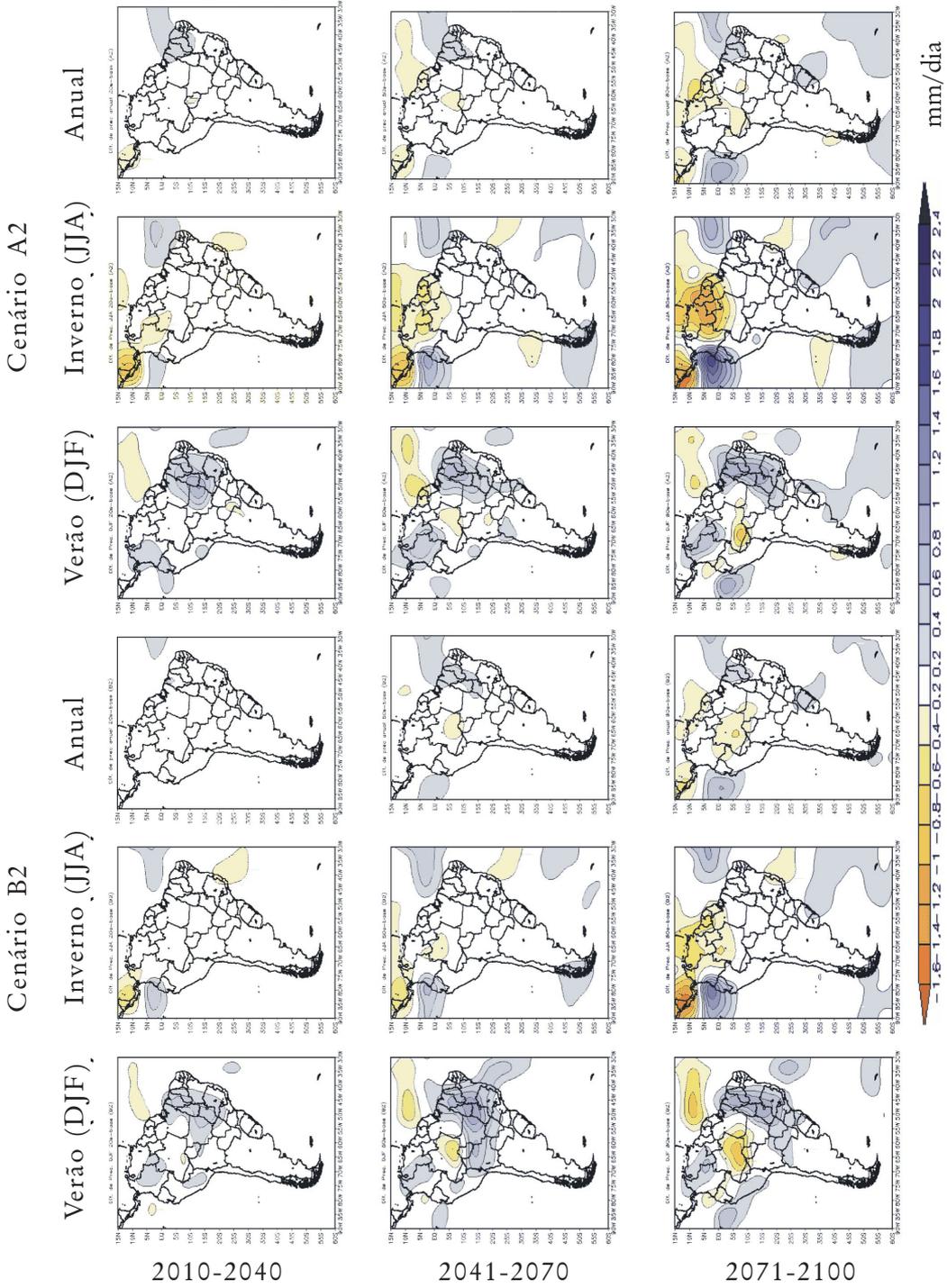


Figura 4: Média sazonal de verão (DJF), inverno (JJA) e anual dos 5 AGCMs para anomalias (em relação a 1961-90) de precipitação em cenários A2 e B2, dos períodos 2010-2040, 2041-2070 e 2071-2100. As unidades estão em mm/dia.

No inverno (JJA), a Zona de Convergência Intertropical (ZCIT) fica mais intensa, próxima a 5°C, no Pacífico e Atlântico tropical.

Na mesma análise, o modelo HadCM3 prevê mais chuva para a região sudeste-sul do Brasil e menos para o centro e norte da Amazônia, enquanto que todos os modelos apresentam diminuição de precipitações na Amazônia em geral. Paradoxalmente, na mesma estação e para esta mesma região, o modelo GFDL mostra anomalias positivas de chuva, mais intensa em B2 que em A2. Os outros modelos não oferecem padrão algum de mudança significativa de precipitação. O mesmo contraste entre estes dois modelos pode ser observado nos *time slices* de 2050 e 2080, especialmente durante o verão (DJF). Para os dois cenários, na Amazônia e no nordeste, existe diminuição de chuva, porém aumento no sudeste do Brasil e no norte do Peru e Equador, nos *time slices* centrados em 2050 e 2080. O cenário produzido pelo HadCM3 poderia ser comparado àquele de um fenômeno El Niño, juntamente com aquecimento no norte do Atlântico, como o de El Niño de 1998, com chuvas acima do normal ao norte do Peru, e uma ZCIT mais ao norte que o normal, gerando secas na Amazônia e, especialmente, no nordeste do Brasil durante o outono (MAM).

A figura 4 mostra a média dos cinco modelos para anomalias de precipitação relativas aos cenários A2 e B2, nos períodos 2010-2040, 2041-2070 e 2071-2100. Percebe-se que essa média atesta grande variabilidade, podendo os mapas médios apresentar graus de incerteza. Na Amazônia central, os mapas registram para o verão (DJF) anomalias negativas de chuva que são maiores em 2071-2100, em comparação com 2010-2040, enquanto regiões como o nordeste, sudeste e sul do Brasil se caracterizam por precipitações acima do normal, nos dois cenários A2 e B2. No inverno (JJA), os cenários de 2071-2100 para o norte da Amazônia e da América do Sul sinalizam menos chuva que o normal.

2. Temperaturas do ar

Todos os modelos utilizados prevêem aquecimento na América do Sul, ainda que em diferentes magnitudes.¹⁰ Nos dois cenários, o aquecimento é maior na região tropical, durante a primavera (SON) e verão (DJF), na ordem de 2°C. Ao norte da Amazônia, a temperatura sobe até 3°C no verão (DJF), em cenário A2. A figura 5 mostra a média dos cinco modelos atmosféricos para anomalias de temperatura

¹⁰ MARENGO, J. A. *Caracterização do clima no século XX e cenários climáticos no Brasil e na América do Sul para o século XXI derivados dos Modelos Globais de Clima do IPCC*. *Op. cit.*

MARENGO, J. & SILVA DIAS, P. Mudanças climáticas globais e seus impactos nos recursos hídricos. *Op. cit.*

MARENGO, J. A. & AMBRIZZI, T. Use of Regional Climate Models in impact assessments and adaptation studies from continental to regional and local scales. *Op. cit.*

MARENGO, J. A.; SOARES, W.; SAULO, C. & NICOLINI, M. Climatology of the LLJ east of the Andes as derived from the NCEP reanalysis. *Journal of Climate*, 17:2261-2280, 2004.

do ar nos períodos 2010-2040, 2041-2070 e 2071-2100. A diferença dos mapas que representam o conjunto de anomalias de precipitação e de temperatura do ar sugere um aquecimento maior durante o inverno, especialmente no cenário A2, para o período de 2071-2100. A região que mais aquece é a Amazônia, com até 3°C a mais no inverno, no cenário B2, considerando-se o período 2071-2100; no cenário A2, a temperatura subiria até 5°C.

As projeções de chuva e temperatura do ar (figuras 4 e 5) apresentam diferenças nos cenários futuros de chuva para a América do Sul, mostrando às vezes, entre os modelos, anomalias de sinais opostos, especialmente entre os modelos GFDL e HadCM3, o que gera anomalias próximas a zero, em média. Com relação à temperatura, os diferentes modelos sinalizam aquecimento para o sul do continente americano, o que tende a ser sempre maior no cenário A2, comparado ao cenário B2.

As chuvas mais intensas aparecem nas simulações dos modelos HadCM3, GFDL e CCSR-NIES.¹¹ No verão (DJF), os modelos HadCM3 e CCSR-NIES revelam anomalias positivas de chuva, que podem ser indicadores de intensificação da ZCAS sobre o sudeste do Brasil, estendendo-se até o oceano Atlântico, enquanto que o modelo GFDL mostra uma ZCAS mais continental. O modelo HadCM3 gera anomalias negativas de chuva na porção norte do nordeste brasileiro e na Amazônia, durante a estação chuvosa MAM (outono), enquanto aponta anomalias positivas de chuva mais intensas na costa do Peru e no Equador, bem como no sul do Brasil, similares ao padrão de anomalias de chuva registrado durante anos de El Niño intenso. Isso também pode ser observado nos mapas da figura 4.

As anomalias positivas de chuva no sul do Brasil, presentes nos vários modelos para 2080, especialmente no cenário A2, poderiam ser explicadas pelo aumento da convergência nessa região. Todos os modelos anunciam aquecimentos de até 2°C em 2080, especialmente na América do Sul subtropical. Nos três *time slices* e nos dois cenários, os modelos HadCM3 e CCSR-NIES prevêem aquecimento maior na região tropical, chegando a 6-8°C na Amazônia em 2080, que já apresenta uma redução de chuva de até 3 a 4mm dia⁻¹. É difícil estabelecer mudanças nos sistemas de circulação (intensidade dos ventos alísios do Atlântico tropical, do jato de baixos níveis, intensidade e frequência de frentes do sul ou na bacia do Chaco e noroeste da Argentina, bem como anticiclones subtropicais do Pacífico e Atlântico), que podem explicar o aumento das precipitações no

¹¹ MARENGO, J. A. *Caracterização do clima no século XX e cenários climáticos no Brasil e na América do Sul para o século XXI derivados dos Modelos Globais de Clima do IPCC*. *Op. cit.*

MARENGO, J. A. & AMBRIZZI, T. Use of Regional Climate Models in impact assessments and adaptation studies from continental to regional and local scales. *Op. cit.*

MARENGO, J. & SILVA DIAS, P. Mudanças climáticas globais e seus impactos nos recursos hídricos. *Op. cit.*

sul, nos cenários de 2080. Uma possível explicação para o fenômeno seria que o aquecimento maior do continente, em comparação com os oceanos adjacentes, alteraria a intensidade dos ventos alísios do Atlântico tropical, que poderiam ficar mais acelerados. Enquanto na Argentina o ar permanecesse mais seco, o transporte de umidade da Amazônia central e norte para o sul dessa mesma região, e para o sul do Brasil e Argentina seria menor. As altas temperaturas poderiam intensificar a baixa do noroeste da Argentina, motivando também uma aceleração do jato de baixos níveis, que no futuro poderiam ser mais frequentes e intensos, transportando ar mais seco que no clima atual. A convergência na saída do jato e a massa de ar transportada pelas frentes frias do sul (que no futuro talvez sejam igualmente mais intensas e frequentes) geram maior pluviosidade. Essa intensificação poderia ser explicada considerando o aquecimento da região subtropical da América nos próximos anos, bem como as anomalias de chuva observadas, em analogia com o clima do presente, que mostra tendências de redução da pluviosidade na região norte da Amazônia e no sul do Brasil, além de jatos intensificados e frequentes.¹²

¹² MARENGO, J. A. *Mudanças climáticas globais e efeitos sobre a biodiversidade*. *Op. cit.*

MARENGO, J. A.; SOARES, W.; SAULO, C. & NICOLINI, M. Climatology of the LLJ east of the Andes as derived from the NCEP reanalysis. *Op. cit.*

Na primavera (SON), estação que acontece no início do período chuvoso na maior parte do Brasil, o modelo HadCM3 indica tendências de chuva no sul da Amazônia, sudeste do Brasil, além de monção na América do Sul, sugerindo também um possível adiantamento da estação chuvosa. No inverno, o mesmo modelo e, em menor grau, o CCSR-NIES prevêem chuva mais fraca no sudeste. Nessa estação, todos os modelos apresentam intensificação da ZCIT no Atlântico tropical do norte e Pacífico tropical do leste, anomalias de chuva no norte da Amazônia, na costa da Venezuela e no leste da Colômbia, com reduções intensas de chuvas no cenário A2. O aquecimento é maior no inverno e na primavera que no verão, e mais intenso no cenário A2.

Vazões de rios

Os rios São Francisco, Amazonas e Paraná-Prata são muito importantes pela sua contribuição ao potencial hidrelétrico do Brasil, assim como pelos aspectos ecológicos, sociais, econômicos e agrícolas. A bacia do Paraná-Prata, onde se localizam as cidades economicamente mais importantes do Brasil e do sudeste da América do Sul, representa uma das maiores contribuições ao Produto Interno Bruto (PIB) do país.

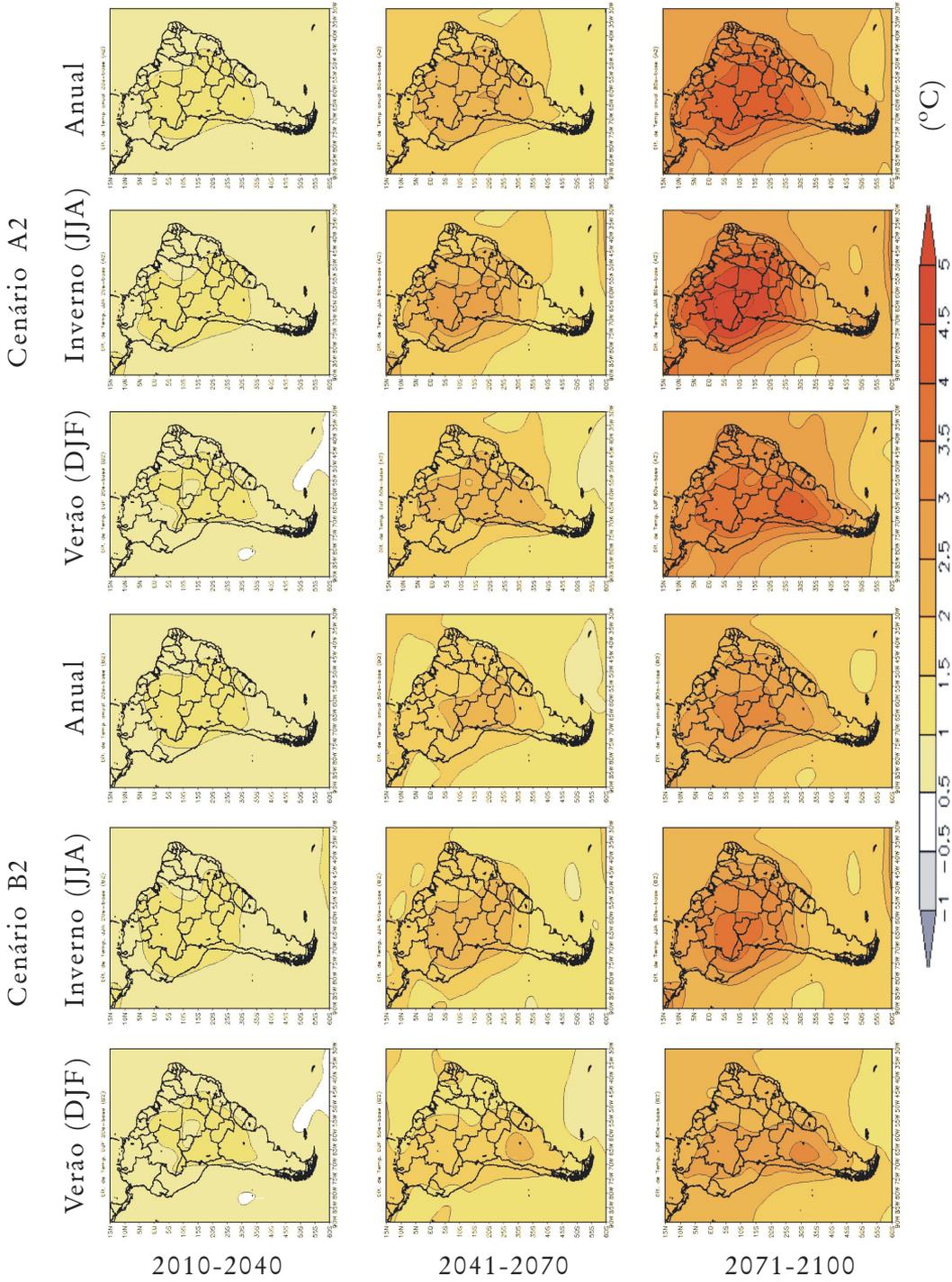


Figura 5: Média sazonal de verão (DJF), inverno (JJA) e anual dos cinco AGCMs para anomalias de temperatura do ar nos cenários A2 e B2, nos períodos 2010-2040, 2041-2070 e 2071-2100. As unidades estão em °C.

Dois estudos publicados recentemente sugerem que já existe evidência de que a atividade humana vem mudando o regime hidrológico e o fluxo dos rios em todo o mundo, seja por causa do aumento da temperatura do planeta, seja em consequência de alterações nas atividades das plantas, em função do dióxido de carbono na atmosfera. Essas mudanças podem gerar consequências nefastas para a produção de alimentos, frequência de inundações e danos para os ecossistemas. Um desses estudos é o relatório de mudanças climáticas publicado pelo *Hadley Centre for Climate Prediction and Research*, ligado ao Centro Meteorológico Inglês¹³, o qual prevê, ao longo do século XXI (2060-2100), no conjunto do planeta, que o fluxo dos rios deve subir cerca de 2% até 2020. Se for considerado também o efeito de concentração de carbono na atmosfera sobre as plantas, o aumento pode chegar a 7%, agravando muito a possibilidade de inundações e deslizamentos de terra em várias partes. O estudo é baseado nos cenários gerados pelo novo modelo do *Hadley Centre* HadGEM1, para o cenário A1B (menos extremo que o cenário A2), utilizado no quarto relatório do IPCC, e que, pelo fato de ter sido gerado por um único modelo, apresenta alguma incerteza. Segundo esse modelo, que inclui o efeito direto do aumento na concentração de CO₂ atmosférico nas plantas, a descarga fluvial no semi-árido brasileiro aumentaria entre 25 e 50%; na Amazônia e no Pantanal, haveria redução entre 25 e 50% e, na bacia do Paraná-Prata, a descarga de vazões deveria aumentar entre 20 e 40%. Essa previsão torna-se consistente diante do aumento de vazões na bacia do Paraná-Prata observado desde 2000.

O outro estudo mencionado foi publicado por um grupo de pesquisadores do Serviço Geológico dos Estados Unidos¹⁴ e avalia o impacto de mudanças climáticas em vazões de rios em nível mundial, utilizando a média feita a partir de doze modelos¹⁵ do IPCC para o período entre 2041 e 2060, em relação ao clima de 1900-70. Os autores mostram aumentos de 20 a 60% nas vazões do rio Paraná-Prata, e reduções entre 10 e 15% na Amazônia e bacia do São Francisco no nordeste do Brasil, em contraposição às projeções do modelo HadGEM1 para essa região. As previsões do HadGEM1 e a média dos modelos revelam aumentos nas vazões do Paraná-Prata e reduções na Amazônia e no Pantanal. Os autores sugerem maior confiabilidade nas previsões para a Amazônia e as bacias do sudeste da América do Sul, enquanto que as incertezas para a bacia do São Francisco permanecem consideráveis.

¹³ UK Met Office. *Climate change, rivers and rainfall*. Recent research on climate change science from the Hadley Centre. UK Met Office, Exeter, December 2005.

¹⁴ MILLY, P. C. D.; DUNNE, K. A. & VECCHIA, A. V. Global pattern of trends in streamflow and water availability in a changing climate. *Nature*, 438, 17 november 2005.

¹⁵ Os doze modelos são: CCSM3, CGCM3.1(T63), ECHAM5/MPI-OM, ECHO-G, FGOALS-g1.0, GFDL-CM2.0, GFDL-CM2.1, GISS-AOM, MIROC3.2(hires), MRI-CGCM2.3.2, HadCM3 e HadGEM1.

Conclusões

Evidências experimentais e tendências já observadas no Brasil, bem como outros estudos considerando as projeções climáticas derivadas dos modelos do IPCC, juntamente com o apanhado de impactos decorrentes da mudança climática no país, permitem concluir que: no Nordeste e na bacia do Prata, embora a chuva tendesse a aumentar no futuro, as elevadas temperaturas do ar simuladas pelos modelos poderiam, de alguma forma, comprometer a disponibilidade de água para a agricultura, consumo ou geração de energia, devido a um acréscimo previsto na evaporação ou evapotranspiração; a extensão de uma estação seca em algumas regiões do Brasil, como a Amazônia, poderia afetar o balanço hidrológico regional e assim prejudicar atividades humanas, ainda que se anuncie aumento de chuva no futuro.

As diferenças entre tendências de mudanças de temperatura e chuva geradas pelos diferentes modelos para algumas regiões, especialmente o Pantanal, sugerem também que existem incertezas nessas projeções. Isso porque os modelos ainda apresentam problemas em representar os processos físicos que realmente acontecem na natureza. De qualquer forma, projeções de extremos climáticos, gerados pelos modelos do IPCC, apontam para um aquecimento maior durante o inverno e estações de transição, assim como para uma tendência de noites mais quentes, condizentes com tendências positivas mais intensas de temperatura mínima do que de temperatura máxima. Também o risco de haver ondas de calor é bastante grande, especialmente nas regiões subtropicais da América do Sul. Existem ainda indicadores de períodos secos mais intensos e prolongados no leste da Amazônia e no Nordeste do Brasil, assim como possibilidades de frequência e intensidade maiores de extremos de chuvas na maior parte da América do Sul tropical.

No momento, estudos de impactos precisam concentrar-se nas atividades mais sensíveis à elevação de temperatura e do nível do mar, cujas incertezas são menores. Nesses estudos, deverão ser abordadas ainda as possíveis mudanças na frequência de extremos climáticos, como secas, tempestades severas, inundações etc. Pela própria natureza dos sistemas, é necessário que as investigações sejam implementadas de modo interdisciplinar. A integração se faz necessária, a fim de que se possam desenhar estratégias, tanto de mitigação quanto de adaptação, eficazes para enfrentar mudanças adversas do clima.

Este documento é derivado dos resultados dos projetos *Caracterização do clima atual e definição das alterações climáticas para o território brasileiro ao longo do século XXI*, apoiado pelo Projeto de Conservação e Utilização Sustentável da Diversidade Biológica Brasileira – PROBIO, com o auxílio do Ministério do Meio Ambiente, BIRD, GEF, CNPq e pelo Global Opportunity Fund (GOF) do Reino Unido, através do projeto *Using Regional Climate Change Scenarios for Studies on Vulnerability and Adaptation in Brazil and South America*.

José Marengo é graduado e doutor em Meteorologia e pesquisador do Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (CPTEC/INPE), Cachoeira Paulista, São Paulo.

marengo@cptec.inpe.br

A questão da vulnerabilidade e adaptação deve ser tratada de maneira pragmática, inclusive com o desenvolvimento de modelos que levem em conta as necessidades dos países em desenvolvimento. Nesse esforço, é crucial a participação de técnicos e cientistas, bem como o fortalecimento das instituições desses países. A experiência brasileira nesse domínio mostra que é preciso ajustar os métodos aplicáveis aos cenários de mudança climática resultantes de modelos globais para projeções de escopo regional ou local. Tal ajuste seria útil para as investigações sobre os impactos da mudança climática em áreas como gerenciamento de recursos hídricos, ecossistemas, atividades agrícolas e mesmo propagação de doenças. A maior resolução obtida em modelos de escopo regional ou local concorreria para uma previsão realista de alterações extremas, que, por sua vez, contribuiria substancialmente para uma avaliação mais precisa da vulnerabilidade dos países à mudança do clima e para a melhoria de sua capacidade de adaptação.