



Ministério do Meio Ambiente
Secretaria de Biodiversidade e Florestas

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

José A. Marengo

Biodiversidade 26



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**

República Federativa do Brasil

Presidente

LUIZ INÁCIO LULA DA SILVA

Vice-Presidente

JOSÉ DE ALENCAR GOMES DA SILVA

Ministério do Meio Ambiente

Ministra

MARINA SILVA

Secretaria Executiva

Secretário

JOÃO PAULO RIBEIRO CAPOBIANCO

Secretaria de Biodiversidade e Florestas

Secretário

MARIA CECÍLIA WEI DE BRITO

Departamento Conservação da Biodiversidade

Diretor

BRAULIO FERREIRA DE SOUZA DIAS

Ministério da Ciência e Tecnologia

Ministro

SÉRGIO MACHADO REZENDE

Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais

Diretor

GILBERTO CÂMARA

Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos

Coordenador Geral

MARIA ASSUNÇÃO FAUS DA SILVA DIAS

Equipe PROBIO:

Gerente: Daniela América Suárez de Oliveira. **Equipe técnica:** Carlos Alberto Benfica Alvarez, Cilulia Maria Maury, Júlio César Roma, Márcia Noura Paes. **Equipe financeira/administrativa:** Sérgio Luiz Pessoa, Gisele da Silva, Marinez Lemos Costa, Rosângela Abreu. **Apoio:** Edileusa Silva

Equipe científica do subprojeto Caracterização do clima atual e definição das alterações climáticas para o território brasileiro ao longo do século XXI:

Coordenador: Coordenador: José A. Marengo - CPTEC/INPE, SP; Carlos A. Nobre, CPTEC/INPE, SP; Igor Pisnitchenko, CPTEC/INPE, SP; Tatiana Tarasova, CPTEC/INPE, SP; Maria Valverde, CPTEC/INPE, SP; Lincoln M. Alves, CPTEC/INPE, SP; Renaud Laborbe, CPTEC/INPE, SP; Guillermo Obregon, CPTEC/INPE, SP; Julio P. Reyes Fernandez, CPTEC/INPE, SP; Wagner R. Soares, CPTEC/INPE, SP; Lincoln M. Alves, CPTEC/INPE, SP; Tercio Ambrizzi, IAG/USP, SP; Rosmeri P. Da Rocha, IAG/USP, SP; Simone T. Ferraz, IAG/USP, SP; Santiago V. Cuadra, IAG/USP; Enéas Salati, FBDS, RJ; Eneida Salati, FBDS, RJ; Tatiana Campanhol, CENA/USP, SP; Nilson Vilanova, CENA/USP, SP

Apoio administrativo

Evanize Fidalgo, CPTEC/INPE, SP; Josiane C. M. de Oliveira, CPTEC/INPE, SP; Leticia Faria, CPTEC/INPE, SP; Diana Raygoza, CPTEC/INPE, SP

Supervisão editorial

Cilulia Maria Maury – PROBIO

Revisão final

Maria Beatriz Maury de Carvalho

Normalização de referências bibliográficas

Helionídia Carvalho de Oliveira – IBAMA

Fotografias

Imagens gentilmente cedidas pelo Greenpeace

Fotos da capa, da esquerda para a direita, de cima para baixo: DESERTIFICAÇÃO - Santana do Cariri (Ceará), junho de 2006 - ©Greenpeace/Rodrigo Baleia; MASSA DE GELO - Groelândia, julho de 2005 - ©Greenpeace/Steve Morgan; IMPACTOS COSTA - Rio de Janeiro (Rio de Janeiro), junho de 2006 - ©Greenpeace/Gilvan Barreto; CHEIA AMAZÔNIA - CAIREIRO DA VÁRZES (Amazonas), junho de 2006 - ©Greenpeace/Rodrigo Baleia; DESMATAMENTO - Santarém (Pará), dezembro de 2003 - ©Greenpeace/Daniel Beltrá; DESERTIFICAÇÃO - Santana do Cariri (Ceará), junho de 2006 - ©Greenpeace/Rodrigo Baleia; SECA AMAZÔNIA - Barreirinha (Amazonas), outubro de 2005 - ©Greenpeace/Daniel Beltrá; SECA AMAZÔNIA - Manaquiri (Amazonas), outubro de 2005 - ©Greenpeace/Alberto César; CHEIA AMAZÔNIA - CAIREIRO DA VÁRZES (Amazonas), junho de 2006 - ©Greenpeace/Rodrigo Baleia.

Catálogo na Fonte

Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis

M324m Marengo, José A.

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 / José A. Marengo – Brasília: MMA, 2007. 2ª edição.

212 p.: il. color ; 21 cm. (Série Biodiversidade, v. 26)

Bibliografia
ISBN 85-7738-038-6

1. Biodiversidade. 2. Clima. 3. Classificação climática. 4. Bioclimatologia. I. Ministério do Meio Ambiente. II. Secretaria de Biodiversidade e Florestas. III. Título. IV. Série.

CDU(2.ed.)551.58

Ministério da Ciência e Tecnologia – MCT

Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos - CPTEC
Rodovia Dutra, Km 40 Caixa Postal 001 – Cachoeira Paulista – SP 12630-000

Ministério do Meio Ambiente - MMA

Centro de Informação e Documentação Luiz Eduardo Magalhães – CID Ambiental
Esplanada dos Ministérios – Bloco B – térreo – CEP – 70068-900
Tel.: 5561 4009 1235 Fax: 5561 4009 1980 – email: cid@mma.gov.br

SUMÁRIO

• Prefácio	7
• Agradecimentos	9
• Apresentação	11
• Lista de siglas	13
• Lista de tabelas	14
• Lista de figuras	15
• Introdução	19
 PARTE I	23
• O clima do presente	25
• Caracterização da variabilidade e tendências climáticas regionais para o Brasil durante o século XX	29
• Os relatórios de IPCC: de 1990 a 2007	79
 PARTE II	83
• Os modelos globais e cenários climáticos do IPCC	85
• Cenários climáticos do futuro para a América do Sul: projeções dos AOGMs globais do IPCC para o século XXI	93
• Análises regionais de cenários climáticos do futuro no Brasil e América do Sul	123
• Conclusões e discussões	137
 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	143
GLOSSÁRIO	156
ANEXOS	163
• Anexo A	167
• Anexo B	209

PREFÁCIO

O tema mudanças climáticas é atual e tem sido constantemente enfatizado pela mídia escrita e televisiva ao longo destes últimos anos. As informações transmitidas ao público em geral têm sido, quase sempre, muito concisas e por vezes imprecisas. Neste sentido, não somente a população, mas principalmente os tomadores de decisão, nem sempre tem conseguido discernir as certezas e incertezas com relação às variações do clima presente e, principalmente, do futuro. Este livro representa um esforço na direção de apresentar uma revisão atualizada dos estudos e projeções do clima futuro considerando os impactos na biodiversidade e no meio ambiente do continente sul-americano, com particular ênfase no território brasileiro.

Escrito numa linguagem simples, o autor consegue descrever, através de análises de dados e resultados de modelos numéricos avançados, o estado atual e passado do clima e sua projeção para o final do século XXI. O aumento das temperaturas na região amazônica, a intensificação do semi-árido do Nordeste, o avanço do mar na costa brasileira em função de seu aumento, eventos extremos de chuva e temperatura mais frequentes nas grandes metrópoles do país, assim como uma maior incidência de transmissão de doenças infecciosas são algumas das projeções considerando o aumento atual dos níveis de gases de efeito estufa e que são abordados de forma clara e direta neste livro.

O autor, Dr. José A. Marengo, pesquisador do CPTEC/INPE, reconhecido nacional e internacionalmente por seus diversos trabalhos voltados à climatologia, muitos dos quais focados na região amazônica, e por suas contribuições à meteorologia brasileira, obteve suporte financeiro não somente do Ministério do Meio Ambiente, por meio do Projeto de Conservação e Utilização Sustentável da Diversidade Biológica Brasileira - PROBIO e agências nacionais, como do Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico - CNPq e da Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo - FAPESP, mas também de financiadores internacionais como o *Global Opportunity Fund* - GOF do Reino Unido, demonstrando a alta confiança que estes órgãos depositaram em suas mãos. O presente livro demonstra que este apoio foi recompensado, pois os resultados apresentados em formas de gráficos e tabelas, a discussão da questão da vulnerabilidade e adaptação e as certezas e incertezas dos resultados dos modelos globais são descritos de maneira compreensível para o público em geral devendo, portanto, servir de guia para tomadores de decisões, órgãos não governamentais e curiosos sobre o que vem ocorrendo com o clima do mundo e, em particular, de nosso País. Sem dúvida, este será um livro que estarei aconselhando a meus alunos do curso de bacharelado e pós-graduação em meteorologia a ler com muita atenção.

Tércio Ambrizzi
Professor Titular
Departamento de Ciências Atmosféricas
IAG/USP

AGRADECIMENTOS

Este documento é derivado principalmente dos resultados do projeto “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/MMA e pelo CNPq, com recursos do BIRD/GEF, e do projeto *Using Regional Climate Change Scenarios for Studies on Vulnerability and Adaptation in Brazil and South America*, apoiado pelo *Global Opportunity Fund* - GOF do Reino Unido. Os pesquisadores agradecem ao CNPq pela outorga de bolsas de pesquisa para os colaboradores. Outras fontes de financiamento incluem a Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP-Projeto de Pesquisa Temático 01/13816-1), o Conselho de Desenvolvimento Científico e Tecnológico CNPq, e o Instituto Interamericano de Mudanças Globais-Projeto IAI-(PROSUR CRN55). Grande parte do material incluído neste documento é resultado de estudos publicados pelo autor na literatura nacional e internacional, assim como da revisão de trabalhos realizada para a preparação do Quarto Relatório Científico AR4 do Painel Intergovernamental de Mudanças Climáticas (IPCC).

Estendemos nosso agradecimento ao Centro Técnico Aeroespacial - CTA, ao Instituto Nacional de Meteorologia - INMET, à Agência Nacional de Águas - ANA, ao CPTEC/INPE, ao Instituto Agrônomo de Paraná - IAPAR e ao Departamento de Águas e Energia Elétrica do Estado de São Paulo - DAEE pelo fornecimento de informação meteorológica. Um agradecimento muito especial vai para o *Hadley Centre for Climate Research and Prediction* do Reino Unido, por fornecer o modelo global HadAM3P que serve de condições de contorno para rodar os modelos regionais. Ao IPCC - *Data Distribution Centre* (DDC), por fornecer as saídas dos cinco modelos globais do IPCC-TAR analisados neste relatório. As rodadas dos modelos climáticos foram feitas no IAG/USP e no CPTEC/INPE, e agradecemos à Coordenação Geral do CPTEC por facilitar o uso do supercomputador NEC SX-6 para rodar o modelo Eta/CPTEC.

Um carinho muito especial a minha esposa Ângela e meu filho Jose Antonio, que sempre estiveram comigo me apoiando e animando em todo momento.

APRESENTAÇÃO

O presente estudo, elaborado pelo Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (CPTEC/INPE) em colaboração com o Departamento de Ciências Atmosféricas da Universidade de São Paulo (USP/IAG) e com a Fundação Brasileira de Desenvolvimento Sustentável (FBDS), descreve o que há de mais recente em estudos observacionais e de modelagem da variabilidade climática no Brasil. Assim como as tendências climáticas observadas desde o início do século XX e as projeções climáticas para o século XXI, com ênfase na precipitação, temperatura, descarga fluvial e extremos climáticos. Este documento constitui o Primeiro Relatório para o PROBIO sobre caracterização do clima e sua variabilidade do século XX e, ainda, projeções climáticas para o século XXI utilizando os modelos climáticos globais do IPCC-Terceiro Relatório de Avaliação TAR. Sabe-se que o aquecimento global é um fenômeno que já tem sido detectado no Brasil e no mundo, e que tende a ser mais intenso nas grandes cidades devido ao efeito de urbanização. Extremos climáticos recentes, como as secas na Amazônia em 2005, no Sul do Brasil em 2004-2006, na Espanha e na Austrália; os invernos intensos da Ásia e Europa; as ondas de calor da Europa em 2003; o furacão Catarina no Sul do Brasil, em 2004; e os intensos furacões no Atlântico Norte, durante 2005, têm sido atribuídos ao aquecimento global. Ainda que as evidências não permitam estabelecer relações entre eles com grande certeza. O que se sabe é que estes fenômenos têm afetado a população, com grandes perdas de vidas humanas, afetando também a economia, agricultura, saúde, com impactos graves nos ecossistemas.

Na **Parte I** desta publicação são apresentados resultados de estudos observacionais de variabilidade e tendências dos componentes do ciclo hidrológico e temperatura do ar, assim como de extremos climáticos. Também são discutidas as evidências de variabilidade natural do clima e efeitos atribuídos à ação humana, com a finalidade de explicar as tendências climáticas atuais. Na **Parte II** são analisadas as projeções de modelos globais do clima para examinar como ele mudará anual e sazonalmente, no Brasil, no século XXI. São enfatizados os componentes do ciclo hidrológico e temperatura, em regiões econômica e ecologicamente importantes como Amazônia, Pantanal, Nordeste e a bacia do Paraná-Prata.

José A. Marengo

LISTA DE SIGLAS

- AOGCMs** – *Atmosphere-Ocean General Circulation Models*
- AR4** – *Fourth Assessment Report-IPCC (Quarto Relatório de Avaliação)*
- BIRD** – Banco Internacional de Reconstrução e Desenvolvimento (Banco Mundial)
- CCCMA** – *Canadian Center for Climate Modelling and Analysis (Canada)*
- CCSR** – *Center for Climate System Research (Japão)*
- CEPAGRI-UNICAMP** – Centro de Pesquisas Meteorológicas e Climáticas Aplicadas à Agricultura – Universidade de Campinas
- CNPq** – Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico
- CNRM** – *Centre National de Recherches Meteorologiques (França)*
- CONAB** – Companhia Nacional de Abastecimento
- CPTEC** – Centro de Previsão do Tempo e Estudos Climáticos
- CRU** – *Climate Research Unit (UK)*
- CSIRO** – *Commonwealth Scientific and Industrial Research Organization (Austrália)*
- CTA** – Centro Técnico Aeroespacial
- DOE** – *Department of Energy (EUA)*
- DTR** – *Diurnal Temperature Range (amplitude térmica diurna)*
- EMBRAPA** – Empresa Brasileira de Pesquisas Agropecuárias
- ENOS** – *El Niño Oscilação Sul*
- FAPESP** – Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo
- FAR** – *First Assesments Report - IPCC (Primeiro Relatório de Avaliação)*
- GCMS** – *General Circulation Models*
- GEF** – *Global Environment Facility*
- GFDL** – *Geophysical Fluid Dynamic Laboratory (EUA)*
- GISS** – *Goddard Institute for Space Studies (EUA)*
- GOF** – *Global Opportunity Fund (UK)*
- GPCP** – *Global Precipitation Climatology Project (USA)*
- GT1** – Grupo de Trabalho 1-IPCC
- GT2** – Grupo de Trabalho 2-IPCC
- GT3** – Grupo de Trabalho 3-IPCC
- HadGEM1** – *Hadley Centre Global Enviromental Model Version 1*
- HadCM3** – *Hadley Centre Coupled Model Version 3*
- IAG** – Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas
- IAI** – *Inter American Institute for Global Change*
- INMET** – Instituto Nacional de Meteorologia
- INMN** – Instituto de Meteorologia da Itália
- INPE** – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais
- IPH** – Instituto de Pesquisas Hidráulicas

IPCC – *Intergovernmental Panel on Climate Change*

IPCC - DDC – *Intergovernmental Panel on Climate Change – Data Distribution Centre*

IS92 – Cenários de emissão de gases de efeito estufa usados pelo IPCC em 2000

MMA – Ministério do Meio Ambiente

NAO – *North Atlantic Oscillation*

NAE – Núcleo de Assuntos Estratégicos da Presidência da República

NASA/GSFC – *National Aeronautics & Space Administration/Goddard Space Flight Center (EUA)*

NCAR – *National Center for Atmospheric Research (EUA)*

NCEP – *National Centers for Environmental Prediction (EUA)*

NIES – *National Institute for Environmental Studies (Japão)*

OECD – *Organisation for Economic Co-operation and Development*

OMM – Organização Meteorológica Mundial

PCM – *Parallel Climate Model (EUA)*

PORTOBRAS – Empresa de Portos do Brasil S.A - Administração de Portos do Brasil em Manaus

PDO – *Pacific Decadal Oscillation*

PNUMA – Programa das Nações Unidas para o Meio Ambiente

PROBIO – Projeto de Conservação e Utilização Sustentável da Diversidade Biológica Brasileira

SALLJ – *South American Low Level Jet East of the Andes*

SAR – *Second Assessment Report-IPCC (Segundo Relatório de Avaliação)*

SENAMHI – *Servicio Nacional de Meteorologia e Hidrologia (Peru)*

SOI – *Southern Oscillation Index*

SRES – *Special Report Emission Scenarios-IPCC*

TAR – *Third Assessment Report-IPCC (Terceiro Relatório de Avaliação)*

TSM – Temperatura da Superfície do Mar

UBA – Universidade de Buenos Aires

UFRGS – Universidade Federal do Rio Grande do Sul

UNFCCC – *United Nations Framework Convention on Climate Change*

UK-MET Office – *United Kingdom Meteorological Office (Reino Unido)*

USP – Universidade de São Paulo

ZCAS – Zona de Convergência do Atlântico Sul

ZCIT – Zona de Convergência Intertropical

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Rendimento médio da soja e do milho no Estado de Rio Grande do Sul nos últimos eventos *El Niño* e *La Niña*.

Tabela 2 – Anos de seca no Nordeste brasileiro durante os últimos quatro séculos.

Tabela 3 – Comparação de simulações climáticas de experimentos de desmatamento na Amazônia e de 2xCO₂ usando modelos globais.

LISTA DE FIGURAS*

PARTE I

Figura 1 – Anomalias de temperatura do ar global (em relação a 1961-90) desde o período industrial.

Figura 2 – Anomalias globais de temperatura do ar relativas ao período 1850-1920.

Figura 3 – Efeitos regionais na América do Sul do *El Niño* e *La Niña*, durante o verão (DJF) e inverno (JJA).

Figura 4 – Correlação em ponto de grade entre o Índice de Oscilação Sul (SOI) e chuva anual sobre continente.

Figura 5 – Anomalias de chuva no Brasil durante o verão DJF 1997-98 e outono MAM 1998. Período base é 1961-90

Figura 6 – Padrões de circulação atmosférica e de anomalias de TSM no Atlântico Tropical Norte e Sul durante anos secos e chuvosos no Nordeste.

Figura 7 – Anomalias de chuva na região Nordeste do Brasil para o período de fevereiro e maio, 1905-2000. As anomalias foram calculadas em relação ao período de referência 1961-90.

Figura 8 – Vazões do rio São Francisco em Sobradinho durante dezembro-janeiro-fevereiro no período 1931-1998.

Figura 9 – Nível médio do rio Negro em Manaus, AM, desde 1903 até 2004.

Figura 10 – Níveis do rio Negro em Manaus e do rio Amazonas em Iquitos, durante vários anos de seca, em metros.

Figura 11 – Anomalias normalizadas de chuva para o Norte (a) e para o Sul (b) da Amazônia, desde 1929 a 1997.

Figura 12 – Tendências de eventos de SALLJ (DJF), de chuva no Sul do Brasil, vazões no rio Iguaçu, anomalias de TSM no Sudoeste do Atlântico.

Figura 13 – Modelo conceitual do jato de baixos níveis ao leste dos Andes que transporta umidade da Amazônia e do oceano Atlântico Subtropical

Figura 14 – Tendências nas vazões anuais do rio Paraíba do Sul em Resende, Cachoeira Paulista, Pindamonhangaba, Campos. Ponte Municipal, Paraíba do Sul e Guaratinguetá, e de chuvas na bacia.

Figura 15 – Níveis máximos do rio Paraguai em Ladário.

Figura 16 – Vazões do rio Jacuí em Espumoso e Passo Bela Vista

Figura 17 – Média móvel de dez anos das vazões no rio Paraguai, em Pilcomayo; rio Uruguai, em Paso de Los Libres e rio Paraná em Posadas.

Figura 18 – Média móvel de dez anos das vazões no rio Paraná em Corrientes (Fonte: V. Barros-UBA).

Figura 19 – Tendência na chuva do sudeste da América do Sul no período 1951-1991.

*Nas legendas, quando indicado DJF, JJA, MAM, SDN, estes se referem às fevereiro, dezembro, janeiro, março, abril e aos meses, estações do ano, respectivamente.

Figura 20 – Mudança relativa de vazões durante o século XX na América do Sul.

Figura 21 – Tendências na temperatura do ar em algumas cidades do Brasil.

Figura 22 – Variação das temperaturas máximas e mínimas, médias anuais em Campinas.

Figura 23 – Tendências nas temperaturas mínima e máxima e amplitude térmica DTR durante o verão (DJF), inverno (JJA) e anual durante o período 1960-2002, para a Região Sul do Brasil.

Figura 24 – Resumo de diferentes experiências de modelagem de clima na Amazônia com desmatamento regional.

Figura 25 – Sumário de estimativas das componentes do balanço atmosférico-hidrológico na Amazônia segundo quatro estudos.

Figura 26 – Tendências nas frequências de noites quentes e frias e de dias quentes e frios em Campinas e Água Funda, São Paulo.

Figura 27 – Tendências observadas (por década) de vários índices de temperaturas extremas, baseados em percentuais para o período 1951 a 2003.

Figura 28 – Tendências observadas de vários índices de extremos de chuva para sudeste da América do Sul; para o período de 1961 a 2000.

Figura 29 – Variabilidade interanual do número de eventos extremos de chuva no Sul do Brasil durante 1991-2001. Ciclo anual do número de eventos extremos de chuva no Sul do Brasil.

Figura 30 – Tendências anuais observadas de vários índices de extremos de chuva, baseados em percentuais para o período 1951 a 2003.

Figura 31 – Tendências sazonais observadas do índice de chuva RX5day (máxima quantidade de chuva acumulada em cinco dias).

PARTE II

Figura 1 – Emissões antropogênicas (CO₂, N₂O, CH₄ e S₂O) para os seis cenários ilustrativos SRES: A1B, A2, B1, B2, A1F1 e A1T, e o cenário IS92a (Fonte: IPCC, 2001 b).

Figura 2 – Estimativa do forçamento radiativo antropogênico até 2002, derivada dos cenários ilustrativos SRES da Figura 2.

Figura 3 – Regionalização da previsão climática sazonal de chuva na América do Sul.

Figura 4 – Diferenças entre a precipitação anual do clima atual 1961-90 simuladas pelos modelos do IPCC-TAR CCCMA, CSIRO, GFDL, HadCM3 e CCSR/NIES em relação à climatologia média observada da CRU para o mesmo período 1961-90.

Figura 5 – Diferenças entre temperatura anual do clima atual 1961-90 simuladas pelos modelos do IPCC-TAR CCCMA, CSIRO, GFDL, HadCM3 e CCSR/NIES em relação à climatologia média observada da CRU para o mesmo período 1961-90.

Figura 6 – Projeções de anomalias de chuva para DJF e MAM para o time slice centrado no ano 2020 com referência ao período base 1961-90 para América do Sul, nos cenários A2 e B2 pelo modelo HadCM3.

Figura 7 – Projeções de anomalias de chuva para JJA e SON para o time slice centrado no ano 2020 com referência ao período base 1961-90 para América do Sul, nos cenários A2 e B2 pelo modelo HadCM3.

Figura 8 – Projeções de anomalias de chuva para SON para o time slice centrado no ano 2020 com re-

ferência ao período base 1961-90 para América do Sul, nos cenários A2 e B2 pelo modelo HadCM3.

Figura 9 – Projeções de anomalias de chuva para DJF para os time slices centrados nos anos 2020, 2050 e 2080 com referência ao período base 1961-90 para América do Sul, nos cenários A2 e B2 para vários modelos.

Figura 10 – Projeções de anomalias de chuva para DJF para o time slice centrado no ano 2050 com referência ao período base 1961- 90 para América do Sul, nos cenários A2 e B2 para vários modelos.

Figura 11 – Projeções de anomalias de chuva para MAM para o time slice centrado no ano 2080 com referência ao período base 1961- 90 para América do Sul, nos cenários A2 e B2 para vários modelos.

Figura 12 – Projeções de anomalias de chuva para JJA para o time slice centrado no ano 2080 com referência ao período base 1961- 90 para América do Sul, nos cenários A2 e B2 para vários modelos.

Figura 13 – Projeções de anomalias de chuva para SON para o time slice centrado no ano 2080 com referência ao período base 1961- 90 para América do Sul. nos cenários A2 e B2 para vários modelos.

Figura 14 – Média sazonal de verão (DJF), inverno (JJA) e anual dos 5 AGCMs para anomalias de precipitação dos cenários A2 e B2, dos períodos 2010-2040, 2041-2070 e 2071-2100.

Figura 15 – Projeções de anomalias de temperatura para DJF para o time slice centrado no ano 2020 em relação ao período base 1961- 90 para América do Sul, nos cenários A2 e B2 pelo modelo HadCM3.

Figura 16 – Projeções de anomalias de temperatura para JJA para o time slice centrado no ano 2020 em relação ao período base 1961- 90 para América do Sul, nos cenários A2 e B2 pelo modelo HadCM3.

Figura 17 – Projeções de anomalias de temperatura para SON para os time slices centrados nos anos 2020, 2050 e 2080 em relação ao período base 1961- 90 para América do Sul, nos cenários A2 e B2 pelo modelo HadCM3.

Figura 18 – Projeções de anomalias de temperatura para DJF para os time slices centrados nos anos 2020, 2050 e 2080 em relação ao período base 1961- 90 para América do Sul, nos cenários A2 e B2 pelo modelo HadCM3.

Figura 19 – Projeções de anomalias de temperatura para JJA para os time slices centrados nos anos 2020, 2050 e 2080 em relação ao período base 1961- 90 para América do Sul, nos cenários A2 e B2 pelo modelo HadCM3.

Figura 20 – Projeções de anomalias de temperatura para DJF para o time slice centrado no ano 2020 com referência ao período base 1961- 90 para América do Sul, , nos cenários A2 e B2 para vários modelos.

Figura 21 – Projeções de anomalias de temperatura para DJF para o time slice centrado no ano 2050 com referência ao período base 1961- 90 para América do Sul, nos cenários A2 e B2 para vários modelos

Figura 22 – Projeções de anomalias de temperatura para DJF para o time slice centrado no ano 2080 com referência ao período base 1961- 90 para América do Sul, nos cenários A2 e B2 para vários modelos.

Figura 23 – Projeções de anomalias de temperatura para JJA para o time slice centrado no ano 2020 com referência ao período base 1961- 90 para América do Sul, nos cenários A2 e B2 para vários modelos.

Figura 24 – Projeções de anomalias de temperatura para JJA para o time slice centrado no ano 2050 com referência ao período base 1961-90 para América do Sul, nos cenários A2 e B2 para vários modelos.

Figura 25 – Projeções de anomalias de temperatura para JJA para o time slice centrado no ano 2080 com referência ao período base 1961- 90 para América do Sul, nos cenários A2 e B2 para vários modelos.

Figura 26 – Média sazonal de verão (DJF), inverno (JJA) e anual dos 5 AGCMs para anomalias de temperatura do ar dos cenários A2 e B2, dos períodos 2010-2040, 2041-2070 e 2071-2100.

Figura 27 – Compostos de mudanças em extremos climáticos de oito modelos do IPCC-AR4 para o cenário A1B, e apresentando diferenças entre o futuro (2080-2099) e o presente (1980-1999).

Figura 28 – Mudanças previstas de vazões em percentagem (%) na América do Sul, para o período 2061-2100, cenário A1B gerado pelo Modelo HadGEM1 (Fonte: UK Met Office 2005).

Figura 29 – Média aritmética de vazões de 12 modelos do IPCC-TAR para o período entre 2041-2060 em relação ao período entre 1900-70 em percentagem (%) para o cenário A1B

Figura 30 – Regiões estrategicamente importantes para estudos detalhados de mudança de clima no Brasil.

Figura 31 – Variação sazonal de chuva em três regiões do Brasil para o clima do presente (1961-90 CRU) e para os futuros (2050-2100) cenários A2 e B2 dos modelos de IPCC-TAR: CCCMA, CSIRO, HadCM3, CCSR/NIES, GFDL.

Figura 32 – Séries de tempo de anomalias de chuva anual para o Nordeste, Amazônia, Pantanal e bacia do Prata durante 2000 -2100 geradas pelos modelos acoplados oceano-atmosfera do IPCC-TAR CCCMA, CCSR/NIES, CSIRO, GFDL e HadCM3.

Figura 33 – Séries de tempo de anomalias de temperatura anual para o Nordeste, Amazônia, Pantanal e Bacia do Prata durante 2000-2100 geradas pelos modelos acoplados oceano-atmosfera de IPCC-TAR CCCMA, CCSR/NIES, CSIRO, GFDL e HadCM3.

Figura 34 – Diagrama de dispersão com anomalias anuais de temperatura (°C) e chuva para (mm dia⁻¹) para a Amazônia, nos *time slices* centrados em 2020 (painel superior), 2050 (painel médio) e 2080 (painel inferior) em relação ao clima atual 1961-90.

Figura 35 – Diagrama de dispersão com anomalias anuais de temperatura (°C) e chuva para (mm dia⁻¹) para o Nordeste, nos *time slices* centrados em 2020 (painel superior), 2050 (painel médio) e 2080 (painel inferior) em relação ao clima atual 1961-90.

Figura 36 – Diagrama de dispersão com anomalias anuais de temperatura (°C) e chuva para (mm dia⁻¹) para o Pantanal, nos *time slices* centrados em 2020 (painel superior), 2050 (painel médio) e 2080 (painel inferior) em relação ao clima atual 1961-90.

Figura 37 – Diagrama de dispersão com anomalias anuais de temperatura (°C) e chuva para (mm dia⁻¹) para a bacia do Prata, nos *time slices* centrados em 2020 (painel superior), 2050 (painel médio) e 2080 (painel inferior) em relação ao clima atual 1961-90.

INTRODUÇÃO

O Painel Intergovernamental de Mudanças Climáticas (*International Panel on Climate Change - IPCC*) conclui, no seu Terceiro Relatório de Avaliação TAR (IPCC 2001 a), que a temperatura média da atmosfera tem aumentado em $0.6^{\circ}\text{C} \pm 0.2^{\circ}\text{C}$ durante o século XX. Os modelos globais do IPCC têm mostrado que entre 1900 e 2100 a temperatura global pode aquecer 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.

O aquecimento global recente tem impactos ambientais intensos (como o derretimento das geleiras e calotas polares), assim como em processos biológicos (como os períodos de floração). Conforme o artigo “Alpes perdem 10% do gelo em um ano”, publicado na Folha de São Paulo em 1/12/2005, as temperaturas na Europa, por exemplo, vêm subindo mais rapidamente que a média do planeta e, só no ano de 2003, 10% das geleiras dos Alpes derreteram, de acordo com relatório publicado em novembro de 2005 pela agência ambiental da União Européia. Os climas mais quentes provocados pelo aquecimento global podem aumentar a incidência de casos de peste bubônica, a epidemia que matou milhões de pessoas ao longo da história e exterminou um terço da população da Europa no século XIV. Assim como aumentar o número de doenças tropicais, como a malária, a dengue e a desinteria. Seja por causa da piora nas condições de saúde, devido à disseminação destas enfermidades, ou por causa da diminuição do suprimento de água, os países da África sub-saariana, da Ásia e da América do Sul são os mais vulneráveis às consequências do aquecimento da Terra. Muitas das principais moléstias que atingem os países pobres, das já citadas, malária e diarreia, passando pela subnutrição, são extremamente sensíveis às condições climáticas.

Também existem evidências (IPCC 2001b) de que eventos extremos, como secas, enchentes, ondas de calor e de frio, furacões e tempestades, têm afetado diferentes partes do planeta e produzido enormes perdas econômicas e de vidas. Como exemplos, podem ser citados a onda de calor na Europa em 2003, os furacões Katrina, Wilma e Rita no Atlântico Norte em 2005, o inverno extremo da Europa e Ásia em 2006. Também se pode mencionar, no Brasil, o furacão Catarina em março 2004, a recente seca da Amazônia em 2005 e as secas já observadas no Sul do Brasil em 2004, 2005 e 2006. Há, ainda, impactos relacionados, como alterações na biodiversidade, aumento no nível do mar e impactos na saúde, na agricultura e na geração de energia hidrelétrica que já podem estar afetando o Brasil, assim como o restante do planeta. O verão de 2003 na Europa, por exemplo, foi o mais quente dos últimos 500 anos e matou entre 12 mil e 15 mil pessoas. O aquecimento também deve exacerbar o problema das ilhas de calor em todas as grandes cidades, uma vez que prédios e asfalto retêm muito mais radiação térmica do que as áreas não-urbanas. As ferramentas comumente adotadas para obter e avaliar projeções climáticas passadas e futuras são os modelos de clima, que podem ser: Modelos Globais Atmosféricos (GCMs) ou Modelos Globais Acoplados Oceano-Atmosfera (AOGCMs). Esses modelos numéricos

provêm de uma visão tridimensional do sistema climático, descrevendo os principais processos físicos e dinâmicos, assim como as interações entre as componentes do sistema climático e os mecanismos de retro-alimentação (*feedbacks*) entre os processos físicos. Estes modelos podem simular climas futuros em nível global e regional como resposta a mudanças na concentração de gases de efeito estufa e de aerossóis. Um aumento na concentração de gases de efeito estufa tende a aquecer o planeta ao passo que aerossóis têm um efeito de esfriamento. O clima regional e global pode mudar com o desmatamento e outras atividades associadas ao uso da terra, como a agricultura, e construção de grandes cidades.

A habilidade dos AOGCMs em simular climas regionais vai depender da escala horizontal (chamada também de resolução), e as respostas seriam mais restritas se fossem utilizados modelos globais com resolução da ordem de 300-400km em relação ao uso de modelos regionais, que apresentam uma resolução na ordem de 10-50km.

Ainda assim, os AOGCMs podem oferecer informações sobre mudanças de clima de grande utilidade para escala continental, e considerando a extensão do Brasil, estes modelos podem certamente ajudar a detectar as características gerais do clima futuro. Porém, esses modelos não podem representar bem as mudanças no clima local tais como as tempestades ou frentes e chuvas, devido a efeitos orográficos e eventos extremos do clima. Para estes, é necessário usar a técnica de *downscaling*, que consiste na regionalização dos cenários climáticos obtidos por modelos globais usando modelos regionais (*downscaling* dinâmico) ou funções estatísticas (*downscaling* empírico ou estatístico). Recomenda-se ao leitor a revisão dos trabalhos de Giorgi *et al.* (2001), Giorgi e Mearns (2003) e Jones *et al.* (2004), para mais detalhes do *downscaling*.

Existem fontes de incerteza na modelagem de clima para obter projeções de clima futuro em nível global ou regional na atual geração de modelos usados pelo IPCC:

- ◆ Incertezas nas emissões futuras de gases de efeito estufa e aerossóis, atividades vulcânica e solar que afetam o forçamento radiativo do sistema climático;
- ◆ Incertezas na inclusão de efeitos diretos do aumento na concentração de CO₂ atmosférico nas plantas, e do efeito de comportamento das plantas no clima futuro;
- ◆ Incertezas na sensibilidade do clima global e nos padrões regionais das projeções do clima futuro simulado pelos modelos. Isto é devido às diferentes formas em que cada AOGCM representa os processos físicos e os mecanismos do sistema climático. Cada AOGCM simula um clima global e regional com algumas diferenças nas variáveis climáticas como temperatura do ar, chuva, nebulosidade e circulação atmosférica.

Uma fonte adicional de incerteza é em relação à variabilidade natural do clima. Parte desta variabilidade é consequência de perturbações internas do sistema climático (não forçadas pelos gases de efeito estufa) e a outra seria associada à poluição atmosférica e liberação de gases de efeito estufa, devido ao desenvolvimento industrial em muitos países do mundo. Em nível regional, a seleção de cenários considera forçamentos externos como variações na atividade solar ou atividade vulcânica.

No passado, cenários climáticos gerados por modelos globais foram aplicados em avaliações de impactos, vulnerabilidade e adaptação, ainda contendo pouca consistência nos cenários usados para uma mesma região em vários países. Por exemplo, cenários que assumem desmatamento nas regiões tropicais, ou aumentos nas concentrações de CO₂ na ordem de 100%, têm produzido climas futuros secos e quentes na América do Sul tropical. Contudo, nada é dito sobre os impactos do desmatamento da Amazônia em outras regiões do planeta. Sendo as respostas distintas para cada modelo e o desenho de experimentos de desmatamento, distinto entre modelos (Marengo e Nobre, 2001). Conseqüentemente, este tipo de cenário raramente captura uma ampla gama de incertezas nas projeções de clima. A inadequação na seleção dos cenários pode comprometer a interpretação de resultados de estudos de impacto. Entretanto, é necessária uma detecção prévia da variabilidade observada de clima no País, em escalas de tempo mais extensas possível. Isto vai servir de base para analisar o clima do futuro, tentando assim separar a variabilidade natural observada, da variabilidade forçada por atividades humanas que induzem a mudanças climáticas

Esta publicação apresenta uma avaliação de projeções de clima futuro para a América do Sul, usando as saídas geradas por cinco AOGCMs do IPCC-TAR e AR4, para cenários SRES de alta emissão de gases de efeito estufa, A2 ou “pessimista”, e de baixa emissão de gases de efeito estufa, B2 ou “otimista”. Estes cenários são conhecidos como Cenários SRES (*Special Report Emission Scenarios*), e aparecem detalhados e explicados em Carter *et al.* (2000) e Marengo e Soares (2003). Esta avaliação oferece informação de grande utilidade na representação da gama de cenários de clima para estudos de impacto regional. Este processo constitui a base para uma futura regionalização usando o *downscaling* com modelos regionais, onde cenários regionalizados de alta resolução espacial teriam grande utilidade em estudos de impactos e avaliação de vulnerabilidade. O documento não discute os méritos dos AOGCMs, nem dos cenários SRES, apresentando uma seleção de projeções de clima futuro, disponível de forma a poder ajudar aos especialistas em estudos de impactos na tomada de decisões. Na avaliação do clima futuro, além da informação dos cenários climáticos é também necessária a informação de outras mudanças ambientais e socioeconômicas. A análise é feita em nível anual e sazonal para mudanças nos padrões continentais de precipitação e temperatura do ar simulados por cinco AOGCMs. Este estudo não contempla a grande variedade de cenários SRES, usando somente os cenários extremos A2 (pessimista, altas emissões) e B2 (otimista, baixas emissões).

Previamente, o documento apresenta resultados de estudos observacionais de tendências climáticas nas diferentes regiões do Brasil, com a finalidade de detectar tendências observadas de clima e de caracterizar o clima do século XX e sua variabilidade e tendências, antes de entrar na avaliação das projeções de clima para o século XXI. Apresenta-se informação de tendências passadas de temperatura e precipitação em várias regiões do Brasil baseadas em estudos observacionais feitos no Brasil e no exterior durante os últimos 50 anos. O conteúdo do documento consiste de:

- ◆ Caracterização do clima do século XX, sua variabilidade e tendências e extremos de clima no Brasil, baseada numa exaustiva revisão de estudos observacionais já desenvolvidos e em atual desenvolvimento;
- ◆ Avaliação de projeções climáticas de cinco AOGCMs do IPCC-TAR que estão disponíveis para ser baixados do centro de processamento de dados do IPCC (IPCC-DDC). As simulações são para os cenários SRES A2 e B2, para precipitação e temperatura do ar para América do Sul;
- ◆ Avaliação da variabilidade sazonal (dezembro-janeiro-fevereiro DJF, março-abril-maio MAM, junho-julho-agosto JJA, e setembro-outubro-novembro SON) apresentados em fatias de tempo ou *time slices* de 30 anos cada um (2010-2040, 2041-2070, 2071-2100), centrados em 2020, 2050, e 2080, cada um com referência à média climática de 1961-90;
- ◆ Avaliação de cenários de mudanças de precipitação e temperatura do ar no longo termo (até 2100) para as diferentes regiões do Brasil, no contexto da variabilidade e tendências observadas de clima atual;
- ◆ Avaliação das projeções de mudanças nos extremos climáticos de temperatura e precipitação em nível regional: Amazônia, Nordeste, Pantanal e bacia do Paraná-Prata, usando dados do IPCC AR4;
- ◆ Avaliação das projeções de fluxo (vazões) dos rios Amazonas, Paraná-Prata e São Francisco em cenários futuros de clima.

A informação de mudanças de temperatura e precipitação em nível anual e sazonal para cada fatia de tempo é apresentada em forma de mapas continentais, e em forma de diagramas de dispersão para algumas regiões geográficas e ecológicas do Brasil. A informação é apresentada em mapas das variáveis e das anomalias em relação à média de 1961-90. Os diagramas de dispersão fornecem uma visão geral da amplitude das mudanças de clima projetadas pelos diferentes AOGCMs globais para o Brasil. Os analistas destes cenários podem utilizar esta informação para os estudos de impactos, e até podem comparar estas projeções dos cenários SRES com outras simulações anteriores (por exemplo, experimentos de desmatamento da Amazônia ou de 2xC02). Muitas destas avaliações de clima e hidrologia do futuro são baseadas na análise dos cenários extremos SRES A2 e B2 dos modelos globais do IPCC, produto do PROBIO, enquanto que outras análises consideram resultados de estudos recentes preparados para elaborar o Quarto Relatório (AR4) do IPCC, tanto na parte de extremos climáticos como da hidrologia dos grandes rios do Brasil.