

Caracterização do clima no Século XX e Cenário de Mudanças de clima para o Brasil no Século XXI usando os modelos de IPCC AR4

Jose A. Marengo
Maria C. Valverde
CPTEC/INPE
Rodovia Dutra km.40
12630-000 Cachoeira Paulista
São Paulo, Brasil.

Abstract

O presente artigo mostra uma revisão do estado da arte em estudos de tendências climáticas para o Brasil, desenvolvidos durante os últimos 50 anos e baseados em observações. Em seguida, é feita uma análise dos cenários de clima do futuro (até 2100) gerados pelos modelos usados no Quarto Relatório de Painel Intergovernamental de Mudanças Climáticas (IPCC AR4) em nível de Brasil e de regiões como Nordeste, Amazônia e a Bacia do Prata. As projeções do IPCC AR4 até 2100 são discutidas em relação aos cenários analisados em estudos anteriores usando os modelos do Terceiro Relatório do IPCC publicado em 2001. As análises e discussões apresentadas são relevantes à chuva e vazões de rios.

1. Introdução

O *Painel Intergovernamental de Mudanças Climáticas (International Panel on Climate Change - IPCC)* divulgou em Fevereiro de 2004 o 4^o Relatório de Avaliação das Mudanças no Clima do Planeta, chamado de IPCC-AR4. O Relatório demonstra de forma conclusiva os perigos do aumento da concentração de gases de efeito estufa na atmosfera resultante da baixa capacidade dos países industrializados de reduzir suas emissões, bem como da resistência de alguns países em desenvolvimento em negociar a estabilização, e até a diminuição de suas emissões. Segundo o IPCC AR4, se projeta um aumento de temperatura global entre 2°C a 4,5°C a mais do que os níveis registrados antes da Era Pré-Industrial. A estimativa mais certa fala em um aumento médio de 3°C, assumindo que níveis de dióxido de carbono se estabilizem 45% acima da taxa atual. Essa estimativa é mais precisa do que a anterior, divulgada em 2001 (IPCC 2001). O terceiro relatório de avaliação do IPCC publicado em 2001 projetava um crescimento de 1,4° C a 5,8° C para 2100. Em relação às causas da mudança de clima, o IPCC AR4

afirma que é "muito provável" (até 90% de chance) que as atividades humanas, lideradas pela queima de combustível fóssil, estejam fazendo a atmosfera esquentar desde meados do século 20. O relatório de 2001 dizia que essa ligação era "provável" (66% de chances ou mais).

Existem evidências (IPCC, 2001) de que eventos extremos como secas, enchentes, ondas de calor e de frio, furacões e tempestades têm afetado diferentes partes do planeta e têm produzido enormes perdas econômicas e de vidas. Pode-se mencionar no Brasil, o furacão Catarina em março de 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 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 os 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.

Este trabalho apresenta uma avaliação de projeções de clima futuro para a América do Sul, usando as saídas geradas pelos modelos IPCC-AR4, para cenários SRES de alta emissão de gases de efeito estufa, A1B, e para chuva. Este cenário, conhecido como Cenários SRES (Special Report Emission Scenarios), aparece detalhado nos trabalhos de Vera et al. (2006) e Li et al. (2005) e Valverde e Marengo (2006). Esta avaliação oferece informação de grande utilidade na representação da gama de cenários de clima para estudos de impacto regional. O documento não discute os méritos dos AOGCMs, nem dos cenários SRES, apresentando uma seleção de projeções

de clima futuro, disponível de forma a ajudar os 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. A ênfase é nos modelos de IPCC AR4 para projeções de precipitação até o ano 2100 para os cenários A2, A1B e B2.

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 também 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 30 anos.

2. Caracterização da variabilidade e tendências climáticas regionais para o Brasil durante o século XX

Um estudo recente (Marengo 2007) compila resultados de estudos da variabilidade climática em longo prazo no Brasil. Observou-se que variações em chuvas e vazões de rios na Amazônia e no Nordeste apresentam uma variabilidade interanual e em escalas de tempo interdecadal, que são mais importantes, mais até que tendências de aumento ou redução. A variabilidade está associada a padrões de variação da mesma escala de tempo nos oceanos Pacífico e Atlântico, como a variabilidade interanual associada ao *El Niño* Oscilação Sul, ENOS, ou à variabilidade decadal do Pacífico (PDO - Pacific Decadal Oscillation), do Atlântico (NAO - North Atlantic Oscillation) e à variabilidade do Atlântico Tropical e do Atlântico Sul. No sul do Brasil e norte da Argentina, tendências para aumento das chuvas e vazões de rios foram observadas desde meados do século XX, enquanto que na Amazônia, ainda que o desmatamento tenha aumentado gradativamente nos últimos vinte anos, não se detectaram tendências significativas nas chuvas ou vazões nesta região. No Nordeste, foi observado um ligeiro aumento de chuvas no longo prazo, mas a tendência não é estatisticamente significativa. Os estudos observacionais sobre mudanças nos extremos de clima (chuvas, temperaturas,

tempestades) são poucos, e os resultados têm sido comprometidos devido à qualidade ou ausência de informação climatológica diária confiável. Sugere-se ao leitor acessar as seguintes referências bibliográficas para expandir ainda mais esta revisão de literatura: Magalhães *et al.* (1988); Marengo e Nobre (2001); Xavier *et al.* (1992, 1994); Marengo (2002); Marengo (2003); Marengo e Soares (2003); Marengo e Silva Dias (2006), Berlato e Fontana (2003); Souza Filho (2003); Tucci (2003 a, b); IPCC (2001), Alexander *et al.* (2006); Vincent *et al.* (2005); Milly *et al.* (2005), UK Met Office (2005); Núcleo de Altos Estudos da Presidência do Brasil NAE (2005a, b); Haylock *et al.* (2006); Marengo *et al.* (2007), entre outros.

Em relação à temperatura do ar, estudos sobre tendências têm sido desenvolvidos em vários países da América do Sul. Um estudo abrangente de Duursma (2002) mostra tendências de aquecimento nas principais cidades durante os últimos 100 anos: +0.12°C em Quito (Equador) e +0.60°C em São Paulo (Brasil). Na bacia Amazônica, Marengo (2003) estimou o aquecimento na ordem de +0.85°C/100 anos, comparado com o estimado de +0.56°C/100 anos obtido por Victoria *et al.* (1998). O aquecimento pode variar por região, e realmente as causas podem ser devido a mudanças naturais de clima. Este aquecimento pode se dar por causa de fatores naturais, como os aquecimentos do Atlântico Sul ou El Niño, observados desde 1950, ou a fatores antropogênicos (ex: queima de combustível fóssil e industrialização e mudanças de uso da terra e subseqüentes queimadas). O aquecimento também tem sido observado em outras regiões do Brasil, como Campinas-SP e Pelotas-RS. Em Campinas, Pinto *et al.* (2001) mostram tendências positivas da temperatura mínima que ultrapassam os 2.5°C /100 anos, enquanto que a tendência positiva em Pelotas-RS é de menos de 1°C /100 anos. Estas tendências não podem ser atribuídas somente à variabilidade natural de clima, mas também ao efeito antropogênico associado ao crescimento das cidades.

Um estudo recente de temperaturas máximas e mínimas no Sul do Brasil durante o período 1960-2002 (Marengo e Camargo, 2007) aponta para um aquecimento sistemático da região Sul, detectando tendências positivas na temperatura máxima e mínima em níveis anual e sazonal. A amplitude térmica apresenta tendências negativas fortes neste período, sugerindo que as tendências na temperatura mínima são mais intensas que as máximas, especialmente no verão. Isto também foi detectado por Gonçalves *et al.* (2002) para São Paulo. Porém, estas análises de temperaturas máximas e mínimas não estabelecem se o verão pode ter dias ou noites mais quentes, ou se o inverno pode ter uma menor frequência de noites frias. Porém, as análises sugerem que o

aquecimento observado parece ser mais intenso no inverno em comparação ao verão, possivelmente devido ao aumento do número de dias quentes no inverno.

As mudanças no uso da terra também têm afetado sensivelmente o clima na América do Sul. Desde a década de 1990, estudos têm sido desenvolvidos simulando os efeitos no clima regional associados ao desmatamento da Amazônia. As experiências assumem um desmatamento total na região, ou seja, toda a floresta é substituída pela pastagem. Na realidade esta é uma experiência puramente “teórica”, pois na atualidade as medidas de controle do desmatamento na Amazônia, realizadas pelos satélites ambientais, mostram que a taxa de desmatamento é maior no chamado “arco do desmatamento”, que se estende desde a foz do rio Amazonas até o oeste da Amazônia, não cobrindo o sul e o centro-oeste dos estados da Amazônia.

2.1 Nordeste

Historicamente a região Nordeste sempre foi afetada por grandes secas ou grandes cheias. Relatos de secas na região podem ser encontrados desde o século XVII, quando os portugueses chegaram à região. Estatisticamente, acontecem de 18 a 20 anos de seca a cada 100 anos. Kane (1989) indicou para o Nordeste, que em 29 anos de El Niño, durante 137 anos, no período 1849-1985, apenas 12 foram associados a secas na região. No semi-árido nordestino, essa variabilidade climática, em particular as situações de seca, sempre é sinônima de agruras nas populações rurais do interior da região, e tem sido objeto de preocupação da sociedade e organismos do governo ao longo dos anos. No Atlântico Tropical e no Nordeste brasileiro, Wagner (1996) estudou tendências decadais nos mecanismos que controlam o gradiente meridional de TSM na região. Posteriormente, Hastenrath (2001) identificou tendência de longo prazo na chuva do Nordeste e o setor do Atlântico Tropical adjacente, caracterizado por um deslocamento da ZCIT e banda de chuvas mais para o Sul da sua posição climatológica. Isto poderia explicar as tendências positivas de chuva no Nordeste identificadas por Hastenrath e Greischar (1993) e Marengo *et al.* (1998), e que aparecem detalhadas nos mapas de anomalias globais de chuva no IPCC TAR (2001 a).

Wagner e Hastenrath detectaram um aquecimento sistemático do Atlântico Tropical sul, observado principalmente nos meses de verão (fevereiro/março), enquanto que a TSM no Atlântico norte aumenta no inverno (agosto/ setembro) e diminui no verão. Como consequência do incremento do gradiente meridional de TSM no verão, a ZCIT se desloca mais para o Sul e a chuva no norte do Nordeste tende a incrementar no

período de estudo 1951-90. A Figura 1 mostra as anomalias de chuva sazonal durante a estação chuvosa de fevereiro a maio para o Nordeste nos anos de 1901-1998 (em relação a 1961-90), derivados dos dados da Climate Research Unit (CRU). Além da forte variabilidade interanual, observa-se também a variabilidade interdecadal detectada por Wagner (1996) e por Nobre e Shukla (1996).

A partir da década de 1970, o volume de chuvas tem sido menor em relação a outros anteriores, e especificamente ao ano de 1985, que foi muito úmido. Esta variabilidade também tem sido observada nas vazões do rio São Francisco em Sobradinho, onde a tendência relativamente positiva desde 1931, contrasta com a tendência negativa observada a partir de 1979. Ainda que esta queda de vazões possa estar associada em parte a esta variabilidade de chuva, também poderia estar associada ao uso de água para irrigação e outras formas de uso.

2.2 *Amazônia*

A bacia amazônica contém uma gama variada de ecossistemas e grande riqueza em termos de diversidade biológica e étnica. Esta região contém a maior extensão de floresta tropical da Terra, mais de cinco milhões de quilômetros quadrados, e responde por aproximadamente um quarto das espécies animais e vegetais do planeta. Hoje, apenas algumas espécies são usadas pelo homem. A região tem recursos hídricos abundantes. A precipitação atmosférica anual é de 2,300mm, em média, e a descarga média do rio Amazonas no oceano Atlântico é de cerca de $220.000\text{m}^3/\text{s}$, o que corresponde a 18% da descarga total de água fresca nos oceanos do mundo.

Para a Amazônia, Dias de Paiva e Clarke (1995), Chu *et al.* (1995), Zhou e Lau, (2001), Matsuyama *et al.* (2002), Marengo (2004), Botta *et al.* (2002), Chen *et al.* (2003) e outros, têm identificado variações decadais e tendências na chuva e vazões na Amazônia. Chu *et al.* (1995) mostraram um aumento sistemático da convecção sobre o Norte da Amazônia desde 1975, que poderia indicar um aumento de chuva na região. A variabilidade dos registros de rios sobre a parte noroeste da bacia Amazônica, que compreende as bacias dos rios “Negro e Solimões”, não apresenta aumentos ou reduções sistemáticos nos registros de vazões. A análise da vazão de outros rios na região Amazônica (rios Uatuma, Jamari, Araguari, Curua-Una, Tocantins e Xingu) não apresenta tendências unidirecionais (Marengo *et al.*, 1998). O transporte de umidade para e desde a bacia Amazônica também apresenta variabilidade interdecadal e tendência, e a direção da tendência pode depender muito do período usado. Assim,

Costa e Foley (1999) detectaram uma redução no transporte de umidade no período 1979-96, enquanto que Curtis e Hastenrath (1999) detectaram uma tendência positiva no período 1950-99. Marengo (2004) identificou que desde finais de 1920, a chuva na Amazônia global apresenta pequenas tendências positivas, que não são estatisticamente significativas.

Porém, o resultado mais importante do estudo é a variabilidade interdecadal da chuva na bacia norte e sul da Amazônia, que mostra um comportamento contrastante. Na escala regional, a chuva na Amazônia apresenta uma fraca tendência negativa enquanto que a chuva na Amazônia Sul apresenta uma tendência positiva pronunciada. A variabilidade interdecadal de chuva na Amazônia, identificada por Marengo (2004) e apresentada na Figura 2, mostra mudanças de fase ou “climate shifts” em meados da década de 1940 e 1970. Após 1975, a Amazônia do Norte/Sul apresenta relativamente menos/mais chuvas, quando comparadas ao período anterior. Esta mudança de regime está associada a mudanças nos campos de circulação atmosférica e oceânica no Pacífico Central que aconteceu em 1975-76. O período relativamente menos chuvoso, após 1975, na Amazônia do Norte possivelmente se estende até o início de 2000. Esta mudança aparentemente foi associada com a fase positiva da Oscilação Decadal do Pacífico ou PDO em inglês, sendo este um período onde ocorreram eventos de El Niño mais frequentes e intensos (1982-83, 1986-87, 1990-94, 1997-98).

Por outro lado, a tendência positiva linear que mostra um aumento de chuva na Amazônia do Sul, pode ser atribuída a um aumento na atividade de perturbações extratropicais durante alguns anos de El Niño. Bhatta *et al.*, (2002), Foley *et al.* (2002) identificaram uma oscilação de 24–28 anos, que também aparece nas análises de Marengo (2004) e Zhou e Lau (2001). Este padrão de variabilidade é detectado também nas vazões dos rios Amazonas e Tocantins. A variação interdecadal na chuva na Amazônia do Sul, que mostra um aumento desde meados de 1970 parece ter alcançado um máximo até inícios da década de 1990, tendendo depois a diminuir, e aparentemente terminando ao final do século XX.

Num recente estudo sobre variabilidade de chuvas no estado do Acre, Fonseca Duarte (2006) mostrou que a chuva na cidade de Rio Branco - AC exibe uma tendência positiva e uma posterior diminuição, expressando que: enquanto para 1970 a média diária das chuvas estava em torno de $4,5\text{mm dia}^{-1}$, para finais da década dos anos 1980 e início dos anos 1990, esse valor alcançava um máximo próximo a $5,6\text{mm dia}^{-1}$; seguidamente as chuvas diminuíram: para o ano 2000, a média diária foi de $5,2\text{mm dia}^{-1}$.

Ele também constatou que continua a fase decrescente no ano 2001, para o qual a altura de chuvas foi de 1.900mm; em 2002, de 1.910mm; e em 2003, de 1.804mm, em torno de 5,0mm dia⁻¹. Em 2005, com a seca afetando a região sul da Amazônia esta tendência aparenta continuar e se agravar, pois os índices de chuva durante a estação chuvosa no Acre foram até 200mm abaixo da média histórica. Esta seca afetou grandemente a região oeste e o sul da Amazônia, como foi observado em 1964, e não o centro e o leste amazônico, como nos anos de El Niño. O aquecimento anormal de quase 1°C nas águas tropicais do Atlântico Norte ocasionou a calamidade. A seca de 2005 que afetou a Amazônia foi refletida nas vazões do rio Solimões, que tem a bacia coletora ao sul desta região, onde as chuvas têm sido muito baixas. A seca de 2005 no Acre é a maior dos últimos 100 anos, e em toda a região Amazônica, é uma das quatro piores do século (Marengo et al. 2006).

Este aumento de chuva no sul da Amazônia tem um padrão similar em termos de tendência na região do Brasil central, sudeste e sul (Liebmann *et al.* 2004; Liebmann *et al.*, 1999; Seluchi and Marengo, 2000; Grimm *et al.* 1998; Nogués-Paegle *et al.* 2002; Barros *et al.* 2002; Doyle and Barros 2002; Cazes-Boezio *et al.* 2003). Estudos desenvolvidos por Obregon e Nobre (2003) têm também identificado a mudança de regime em 1975-76 em chuva em estações na Amazônia do noroeste e no Sul do Brasil.

2.3 *Bacia do Prata*

Na região Sul do Brasil, o aumento sistemático das chuvas pode também ser observado nos registros hidrológicos que têm sido já estudados. A Figura 3 onde as vazões do rio Jacuí, em Espumoso e em Passo Bela Vista, apresentam tendências positivas. O mesmo pode ser dito em relação às vazões dos rios Paraguai, Uruguai e Paraná, no seu trecho inferior, e no rio Paraná, em Corrientes. Collishoorn (2001) apresentou resultados da avaliação do uso do solo para a bacia do rio Taquari, afluente do Jacuí no Rio Grande do Sul, que é vizinho à cabeceira do rio Uruguai. O cenário atual apresenta aumento de escoamento de 9% em função do uso do solo. Transformando a bacia de floresta em culturas anuais, o aumento do escoamento é de 14,4%, para pasto é de 13,2 %. Portanto, o impacto atual do uso do solo já representa 69% do impacto máximo (pior cenário). Assim, a mudança do uso do solo na região pode explicar em parte as tendências das vazões. Porém, a variabilidade interdecadal, associada ao PDO, pode também explicar estas tendências. Desde meados da década de 1970, aparecem mudanças no regime de chuva (como também foi detectado na

Amazônia) e já entre 2001-2003 vem se apresentando uma mudança de fase. As séries de vazões na bacia do rio Paraná apresentam uma importante não-estacionariedade entre os períodos anterior e posterior à década de 1970, com um incremento de vazão variando em cerca de 30%.

Este período coincide aproximadamente com a época das vazões acima da média daquelas observadas no rio Paraguai, Uruguai e Paraná e do rio Iguaçu, e com tendências de incremento da chuva na bacia, uma média cerca de 6% superior, para o período de 1971 a 1990, se comparado com o de 1930-1970 (Tucci, 2003a, b; Obregon e Nobre, 2003). Estudos já realizados nestas regiões e na Argentina documentam uma tendência positiva no aumento de chuva desde 1950. Esta tendência positiva na precipitação no período 1956-1991 facilitou uma extensão da fronteira agrícola na Argentina mais para o sul, incrementando terras disponíveis para a agricultura em mais de 100.000 km² desde 1960.

O desmatamento e as mudanças no uso da terra, como resultado das atividades humanas na Amazônia e na bacia do Prata, aumentaram rapidamente nas recentes décadas e há evidências de que estas ações modificam as características termodinâmicas da baixa atmosfera. Estas mudanças são resultado de complexas interações entre o clima, hidrologia, vegetação e o gerenciamento dos recursos água e terra. Existem amplas evidências de que mudanças no uso da terra nas bacias dos rios Alto Paraná, Paraguai e Uruguai podem ter contribuído para um aumento de 28% no fluxo médio do rio Paraná desde 1970. Tucci e Clarke (1998) perceberam que este incremento na vazão dos rios aconteceu após grandes áreas terem experimentado o desmatamento ou mudanças no uso da terra. A intensificação da atividade agrícola e industrial na região motivou uma transição de café para soja e cana-de-açúcar, assim como criação de gado na bacia do alto Paraná. A soja, diferentemente do café, precisa de preparação intensiva do terreno, que é feita com o uso de máquinas. O rio Iguaçu também tem apresentado aumentos sistemáticos nas vazões desde meados de 1970, mas a bacia tem experimentado poucas mudanças com o uso da terra e com o desmatamento nas últimas décadas (García e Vargas, 1998).

Durante a seca ocorrida no Sul do Brasil e no verão de 2004-2005, o total de chuva anual em 2005 nesta região superou a média no Estado de Santa Catarina, porém setores leste e noroeste do Rio Grande do Sul e, litoral e sul do Paraná experimentaram quedas nos índices pluviométricos. Contudo, a região passou por um período crítico de *déficit* de precipitação durante os meses de dezembro/04 a março/05. Neste período, o

total acumulado de chuva esteve entre 100mm e 500mm abaixo da média histórica. Os maiores impactos foram observados no Rio Grande do Sul, que apresentou quadro de seca com prejuízos para a produção agrícola e pecuária, além de problemas de abastecimento para a população. Em dezembro, janeiro e fevereiro de 2005, choveu menos da metade do que o registrado normalmente em todo o Rio Grande do Sul. Em fevereiro de 2005, a situação ficou ainda mais crítica no Estado, com déficits pluviométricos maiores do que 80mm, sendo que no norte os déficits foram iguais ou superiores a 110mm, 20% da média histórica.

Esta seca causou a maior quebra de safra agrícola da história. A perda poderá ser ainda maior se a seca persistir e prejudicar a segunda safra de milho, que começa a ser plantada nesta época do ano. O produto mais afetado até agora é a soja, vedete da balança comercial brasileira. Os produtores terão uma perda de receita da ordem de R\$ 5,4 bilhões. O Estado mais prejudicado foi o Rio Grande do Sul, com perda de 66,7% (6,1 milhões de toneladas) da produção estimada em dezembro do ano passado, seguido do Paraná com 13,3% (1,63 milhão de toneladas) e do Mato Grosso do Sul com 20,9% (1,051 milhão de toneladas). A soja lidera a lista de culturas mais prejudicadas pela seca.

3. Cenários climáticos do futuro para o Brasil para o Século XXI segundo os modelos de IPCC AR4: Análise de precipitação

Projeções para cenários extremos de alta emissão ou “pessimista” A2 e de baixa emissão ou “otimista” B2 de cinco AOGCMs do IPCC TAR: CCCMA, CSIRO, GFDL, HadCM3 e CCSR/NIES, para os *time slices* centrados em 2020, 2050 e 2080. Podem ser achados em Marengo (2007), Marengo e Silva Dias (2006), Grimm e Natori (2006), Marengo e Soares (2003) entre outros. Neste estudo analisaremos os cenários gerados pelos modelos globais de IPCC AR4.

3.1 *Clima do Século XX*

A seguir, se apresenta uma revisão de alguns dos cenários climáticos SRES dos modelos de IPCC AR4 para o Brasil e a América do Sul derivada dos modelos de IPCC. Para este estudo vamos analisar as projeções dos modelos de IPCC AR4 para o cenário A1B. Neste cenário A1B existe um equilíbrio entre os combustíveis fósseis e outras fontes de energia, e pode ser considerado como um cenário intermediário entre os

cenários A2 e B2. A concentração global de CO₂ varia entre 350 e 370 ppm entre 1990 e 2000, e depois se eleva até 720ppm até final do Século XXI, permanecendo constante. Os modelos do IPCC AR4 usados são: CNRM-CM3, ECHAM5, GFDL-CM2.1, GISS-EH, GISS-ER, INM-CM3.0, IPSL-CM4, MIROC3.2 (medres), MRI-CGCM 2.3.2, NCAR-CCSM3, e HadCM3, que aparecem descritos nos estudos de Vera et al. (2006) e Lie et al. (2006). Para o Século XX as simulações do clima são das rodadas do IPCC AR4 conhecidas como *Climate of the 20th Century (20C3M)*. O território brasileiro foi dividido em três regiões: **Nordeste - ND** (43.60°W – 34.72°W e 2.8°S – 10.6°S), **Amazônia - AMA** (75.60°W – 49.10°W, e 3.5°N – 12°S) e **Bacia da Prata – BP** (36.0°S -16.5°S e 64°W – 44.20°W).

Para o ciclo anual durante o Século XX calculou-se a precipitação média espacial e mensal de cada região. No **ND** (Figura 4) o período chuvoso do CRU estendeu-se de Janeiro a Abril (meses de máxima chuva) e os modelos HaDCM3, GFDL-CM2.1 e MIROC3.2 seguiram este mesmo comportamento. O CCCMA comportou-se como a climatologia. O MIROC3.2 e o GFDL-CM2.1 superestimaram mais a precipitação do ciclo anual em relação ao CRU. Por outro lado, o modelo que mais subestimou a chuva foi o HAD, embora no mês de Janeiro tenha apresentado uma ligeira superestimativa. Para a **AMA** (Figura 4) o ciclo anual do CRU mostrou um período chuvoso de janeiro a maio. Os modelos HAD e CCCMA apresentaram máximos de chuva nos meses correspondentes à climatologia. Por outro lado, o MIROC simulou um período chuvoso extenso (novembro até maio). O GFDL apresentou as máximas chuvas a partir de janeiro. O modelo CCCMA (HadCM3) foi o que mais (menos) subestimou a chuva do ciclo anual. Para a **Bacia da Prata** (Figura 4) o ciclo anual do CRU caracterizou o período chuvoso desde novembro até fevereiro como encontrado em estudos observacionais. Os modelos do IPCC apresentaram um comportamento similar à exceção do GFDL que iniciou seu período chuvoso em dezembro e subestimou mais que os outros modelos. O modelo CSIRO apresentou um comportamento anômalo para as três regiões.

Na Amazônia, o modelo HadCM3 mostra que uma estação seca mais longa no futuro excede o limite e não vai permitir o desenvolvimento da floresta. Os modelos GISS-ER e CCSM3 analisados por Li et al. (2006) mostram chuvas no século XX que são similares ao presente entre outubro e dezembro, e são 1 mm/dia menor que observações na estação seca. Em geral, os três modelos simulam bem o ciclo anual da

chuva na Amazônia assim como a extensão à estação seca para o presente comparado com observações.

3.2 *Clima do Século XXI*

O cenário A2 mostra que o ciclo anual climatológico representado por este experimento apresenta diferenças em relação ao experimento de simulação do clima do Século XX (20C3M). Quando comparamos as Figuras 4 e 5 observa-se que o GFDL (CSIRO) subestima (superestima) mais o ciclo anual quando comparado com o clima do século XX. Para o século XXI, O CCSRN (CSIRO) subestima (superestima) mais a chuva do ciclo anual (Figura 5). Para a AMA o experimento 20C3M subestima mais as precipitações. Já para este experimento, o GFDL (CCSRN) superestima (subestima) mais o ciclo anual da chuva em relação aos outros modelos (Figura 5). Para a região da BP o modelo GFDL subestima menos o ciclo anual da chuva em relação ao experimento 20C3M. Observa-se na Figura 5 que de uma forma geral todos os modelos subestimam o ciclo anual da chuva, sendo o CCSRN o que mais subestima. Por outro lado, o HAD somente o subestima na fase seca. Nos meses chuvosos apresenta ligeiras superestimativas.

No cenário B2, o ciclo anual climatológico deste experimento mostra um comportamento bastante similar ao experimento A2 para as três regiões (ND, AMA, BP). Os modelos CSIRO e CCSRN não apresentaram diferença nenhuma, já nos outros modelos as diferenças foram mínimas.

A Figura 6 mostra as anomalias da chuva ao longo dos 100 próximos anos, para as três regiões e confirma o encontrado por vários modelos do IPCC AR4 para o cenário A2. Para o Nordeste o modelo GFDL apresenta mais chuva até o ano 2100 enquanto que o mesmo modelo não apresenta excessos de chuva na Amazônia. Para as duas regiões o modelo HadCM3 apresenta anomalias negativas de chuva, enquanto que para a Bacia do Prata as anomalias são positivas.

Considerando a média de todos os modelos de IPCC AR4 (multimodel), a Figura 6 mostra, para o período 2090-2099 em relação a 1980-1999 para cenário A1B. Para o Brasil podem se observar aumentos de chuva no Sudeste Sul e em algumas áreas do oeste do Brasil próximo aos Andes de até 5%, ainda que não seja estatisticamente significativa. A ZCAS fica mais fraca e mais afastada do continente. Já no inverno, observa-se uma grande redução, e até 20% (estatisticamente significativos) em quase todo o Brasil.

Os estudos de Vera et al. (2006) usando os mesmos modelos de IPCC AR4, para o período 2070-2099 do cenário A1B, apontam para um aumento da precipitação sobre a América do Sul subtropical durante o verão, redução de precipitação durante o inverno em quase todo o continente e uma redução da precipitação durante as quatro estações ao longo do ano ao Sul dos Andes.

Comparando os campos simulados para o Século XXI em relação ao Século XX, Li et al. (2006) mostram as diferenças entre a chuva anual e de verão (Dezembro) para dois modelos de IPCC AR4: HadCM3 e GISS-ER, que mostram comportamentos opostos em relação a anomalias de chuva. O modelo HadCM3 mostra uma redução da precipitação sobre a Amazônia central e leste a nível anual. No verão, o mesmo modelo mostra reduções de chuva no futuro de quase 4 mm/dia sobre a região ao norte de 20 S e sobre a ZACS. Em contraste, o modelo GISS-ER mostra aumentos na precipitação, principalmente sobre a Amazônia e Nordeste. No verão, a precipitação aumenta sobre a região tropical da América do Sul, com uma ZCIT mais intensa mais ao sul da sua posição climatológica. A mesma mostra que as mudanças de chuvas para o futuro nestes modelos mostram padrões opostos, especialmente sobre a Amazônia, particularmente sobre a parte central e leste. Na região da Bacia do Prata, o modelo HadCM3 mostra no verão chuva mais abundantes no Século XXI, enquanto que o modelo GISS-ER não mostra aumentos ou reduções significativas de chuva nesta região.

4. Cenários hidrológicos do futuro para o Brasil para o Século XXI segundo os modelos de IPCC AR4

No Brasil, os rios São Francisco, Amazonas e Paraná-Prata são muito importantes pelas contribuições ao potencial hidroelétrico do País. Assim como pelos aspectos ecológicos, sociais, econômicos e agrícolas, considerando a grande vulnerabilidade do ecossistema Amazônico e da população do semi-árido nordestino às mudanças de clima, assim como o possível impacto de mudanças nos regimes hidrológicos e térmicos na bacia do Paraná-Prata, considerando também a grande contribuição desta bacia ao PIB do Brasil, e pelo fato de que, as maiores e economicamente as mais importantes cidades do Brasil e do Sudeste da América do Sul, localizam-se nesta bacia.

O estudo de Milly *et al.* (2005) avalia o impacto de mudanças climáticas em vazões de rios em nível mundial. A média foi feita com 12 modelos do IPCC AR4 [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], para o período entre 2041-2060 em relação ao clima atual 1900-70. Milly et al (2005) mostram aumentos de 20-60% nas vazões do rio Paraná-Prata, e reduções entre 10-15% na Amazônia e a bacia do São Francisco no Nordeste do Brasil. As projeções dos modelos também apresentam reduções no Pantanal. Os autores sugerem uma maior confiabilidade nas projeções para Amazônia e bacias do Sudeste da América do Sul, enquanto que as incertezas para a bacia do São Francisco ainda são consideráveis. De fato, as projeções futuras para a bacia do Paraná-Prata apresentam uma continuidade das tendências observadas durante os últimos 50 anos. Os resultados aparecem nos mapas da Figura 7, onde as tendências observadas e simuladas são mostradas.

5. Conclusões e discussões

Baseado nas evidências observacionais e tendências já observadas no Brasil, assim como de estudos desenvolvidos, considerando as projeções climáticas do futuro, derivadas dos modelos climáticos do IPCC AR4, este trabalho apresenta cenários climáticos para o Século XXI no Brasil. Na bacia do Prata, ainda que 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 agricultura, consumo ou geração de energia devido a um acréscimo previsto na evaporação ou evapotranspiração. As vazões também tendem a aumentar como consequência do aumento de chuvas e das mudanças de uso da terra na região. Na Amazônia, ainda que os vários modelos possam apresentar tendências de aumento ou redução, o consenso seria de redução de chuvas particularmente na Amazônia do leste. A extensão de uma estação seca nesta região poderia afetar o balanço hidrológico regional e assim comprometer atividades humanas, ainda que haja alguma previsão de aumento de chuva no futuro. Para o Nordeste, a tendência é de redução de chuvas acompanhada de aumento da temperatura para finais do Século XXI. As diferenças entre tendências de mudanças de temperatura e chuva geradas pelos diferentes modelos para algumas regiões, especialmente o Pantanal, sugerem que ainda há um grau de incerteza nas projeções de clima futuro nesta região. Ainda assim, pode se afirmar um clima mais quente e possivelmente com chuvas mais irregulares concentradas em poucos dias nesta região.

É certo que muitos dos cenários climáticos são produzidos pelos modelos, os quais ainda podem ter problemas em representar realmente os processos físicos que acontecem na natureza. Projeções de extremos climáticos, geradas 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, consistentes com tendências positivas mais intensas na temperatura mínima, que as da temperatura máxima. Também o risco de haver ondas de calor é bastante grande, especialmente nas regiões subtropicais da América do Sul. Existem também indicadores de períodos secos mais intensos e longos na Amazônia do leste e no Nordeste, assim como uma maior frequência e intensidade de extremos de chuvas na maior parte da América do Sul tropical.

Agradecimentos

Este documento é derivado principalmente 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 apoio do MMA/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*. Os autores agradecem ao Program for Climate Model Diagnosis and Intercomparison (PCMDI) por coletar e armazenar as saídas dos modelos de IPCC AR4 no IPCC Data archive. O IPCC Data Archive está sediado no Lawrence Livermore National Laboratory do Departamento de Energia de EUA.

Referências

- A. Botta, N. Ramankuttym, J. Foley, *Geophysical Research Letters*, 29, (2003).
- A. Fonseca Duarte, *Revista Brasileira de Meteorologia*, (2006).
- A. M. Grimm, S. E. T. Ferraz, J. Gomes, *Journal of Climate*, 11, (1998).
- A. M. Grimm, A. A. Natori, *Geophys. Res. Lett.*, 33, (2006).
- A. Magalhães, H.C. Filho, F. Garagorry, J. Gasques, L. C. B. Molion, M. Neto, C. A. Nobre, E. Porto, A. Rebouças, *In The Impact of Climate Variations on Agriculture. Vol 2. Assessments in Semi-Arid Regions.* (Eds. M. Parry, T. Carter, N. Konijn. Kluwer Academic Publishers, 1988).
- B. Liebmann, G. Kiladis, J. A. Marengo, T. Ambrizzi, J. Glick, *Journal of Climate*, 12, (1999).
- B. Liebmann, C. Vera, L. Carvalho, I. Camilloni, M. P. Hoerling, D. Allured, V. R. Barros, J. Baez, M. Bidegain, *Journal of Climate*, 17, (2004).
- C.E.M. Tucci, *Clima e Recursos Hídricos 9*, (Editores. C. Tucci e B. Braga. Coleção ABRH Vol. 9, Porto Alegre, RS, 2003a).
- C. E. M. Tucci, *Clima e Recursos Hídricos 9*. (Editores. C. Tucci e B. Braga. Coleção ABRH Vol. 9, Porto Alegre, RS, 2003b).
- C.E.M. Tucci, R. T. Clarke, *Water Resources Development*, 14, (1998).
- C. Vera, G. Silvestri, B. Liebmann, aP. Gonzalez, *Geophysical Research Letters*, 33, (2006).
- E. Duursma, *River flow and temperature profile trends; consequences for water resources.* A. de Man, P.E. van Oeveren, S. Montjin, Heineken, N. V. Company. Amsterdam 2002.
- E. M. C. Dias de Paiva, R. Clarke, *Buletim of the American Meteorological Society*, 75, (1995).
- F. A. De Souza Filho, *Em Clima e Recursos Hídricos.* C. Tucci e B. Braga Rds (Coleção ABRH, Porto Alegre, RS, 2003), pp. 77-11.
- G. Cazes-Boezio, A.W. Robertson, C. R. Mechoso, *Journal of Climate*, 16, (2003).
- G.O. Obregon, C. A. Nobre, *In Proceedings of the 7th International Conference on Southern Hemisphere Meteorology and Oceanography.* Wellington, New Zealand, (Ed. By American Meteorological Society, Boston, Massachusetts, 2003).
- H. Matsuyama, J. Marengo, G. Obregon, C. A. Nobre, *International Journal of Climatology*, 22, (2002).
- H. S. Pinto, E. Assad, J. Zullo JR. O. Brunini, B. A. Evangelista: *Trabalho apresentado no XII Congresso Brasileiro de Agrometeorologia*, (Fortaleza, CE, 2001).
- Intergovernmental Panel on Climate Change IPCC, *The Scientific Basis-Contribution of Working Group 1 to the IPCC Third Assessment Report.* (Cambridge Univ. Press. 2001).
- Intergovernmental Panel on Climate Change IPCC, *Climate Change 2007: The Physical Science Basis, Summary for Policy Makers.* IPCC Geneva, 2007.
- J. A. Marengo, *Mudanças climáticas e seus efeitos sobre a Biodiversidade: Caracterização do clima atual e definição das alterações climáticas para o Território Brasileiro ao longo do Século XXI.* (Series Biodiversidade No. 26, MMA, 2007).
- J. A. Marengo, J. Tomasella, C. Uvo, *Journal of Geophysical Research*, 103, (1998).
- J. A. Marengo, C. A. Nobre, *In Biogeochemistry of Amazonia*, (J. Richey, M. McClaine, R. Victoria, R., Eds., pp. 17-42, 2001).
- J. A. Marengo, *Revista Brasileira de Meteorologia*, 16, (2002).
- J. A. Marengo, *Theoretical and Applied Climatology*, 78, (2004).

- J. A. Marengo, W. Soares, *Clima e Recursos Hídricos 9*. (Associação Brasileira de Recursos Hídricos/FBMC-ANA. Porto Alegre, Brasil, 2003).
- J. A. Marengo, C.G.C Camargo, *International Journal of Climatology*, no prelo.
- J. A. Marengo, C.A. Nobre, J. Tomasella, G. Sampaio, R. de Oliveira, H. Camargo, M. Oyama, L. M. Alves, *Journal of Climate*, aceito (2007).
- J. A. Marengo, P. L. Silva Dias, *Em Águas Doces do Brasil: Capital Ecológico, Uso e Conservação*. (Eds. A. Rebouças, B., Braga e J. Tundisi. Editora Escrituras, SP, 2006).
- J. Nogués-Paegle, e coautores, *Meteorológica*, 27, (2002).
- J. Zhou, K. M. Lau, *International Journal of Climatology*, 21, (2001).
- L. Vincent, T. Peterson, V. R. Barros, M. B. Marino, M. Rusticucci, G. Miranda, Ramirez, L. M. Alves, T. Ambrizzi, J. Baez, J. I. Barbosa de Brito, M. A. Berlato, A. M. Grimm, R. Jaido dos Anjos, J. A. Marengo, C. MEIRA, L. C. B. Molion, D. F. Muncunil, D. Nechet, E. Rebello, J. Abreu de Sousa, Y. M. T. Anunciação, J. Quintana, J. Santos, G. Ontaneda, J. Baez, G. Coronel, J. G., Garcia, I. T. Varillas, M. Bidegain, M. Corradi, M. Haylock, D. Karoly, *Journal of Climate*. 19, (2005).
- L. V. Alexander, X. Zhang, T. C. Peterson, J. Caesar, B. Gleason, A. M. G. Klein Tank, M. Haylock, D. Collins, B. Trewin, F. Rahimzadeh, A. Tagipour, K. Rupa Kumar, J. Revadekar, G. Griffiths, L. Vincent, D. B. Stephenson, J. Burn, E. Aguilar, M. Brunet, M. Taylor, M. New, P. Zhai, M. Rusticucci, J. L. Vazquez-Aguirre, *Journal of Geophysical Research*, 111, D05109 (2006).
- M. Berlato, D. C. Fontana, Eds, *El Niño e La Nina: impactos no clima, na vegetação e na agricultura do Rio Grande do Sul: aplicações de previsões climáticas na agricultura*. (Editorial UFRGS. Porto Alegre, RS. 2003).
- M. Doyle, V. Barros, *Journal of Climate*, 15, (2002).
- M. H. Costa, J. A. Foley, *Journal of Geophysical Research*, 104, (1999).
- M. Haylock, T. Peterson, J. R. Abreu de Sousa, L. M. Alves, T. Ambrizzi, J. Baez, J. I. Barbosa de Brito, V. R. Barros, M.A. Berlato, M. Bidegain, G. Coronel, V. Corradi, J. V. Garcia, A. M. Grimm, R. Jaido dos Anjos, D. Karoly, J.A. Marengo, M. B. Marino, P. R. Meira, G. C. Miranda, L. C. B. Molion, D. F. Muncunil, D. Nechet, G. Ontaneda, J. Quintana, E. Ramirez, E. Rebello, M. Rusticucci, J. L. Santos, I. T. Varillas, L. Vincent, M. Yumiko, *Journal of Climate*, 19, (2006).
- M. C. Valverde, J. A. Marengo, *Trabalho apresentado no XIV Congresso Brasileiro de Meteorologia*. (Florianopolis, SC, 27 Nov – 1 Dez, 2006).
- M. Seluchi, J. A. Marengo, *International Journal of Climatology*, 20, (2000).
- NAE, *Mercado de Carbono*. (Cadernos NAE, Núcleo de Assuntos Estratégicos da Presidência da Republica, Brasília, NAE-SECOM 2005b).
- NAE, *Negociações internacionais sobre a mudança de clima; vulnerabilidade, impacta e adaptação á mudança de clima*. (Cadernos NAE, Núcleo de Assuntos Estratégicos da Presidência da Republica, Brasília, NAE-SECOM 2005a).
- O.N. Garcia, W. M. Vargas, *Climatic Change*, 38, (1998).
- P. C. D. Milly, K. A. Dunne, A. V. Vecchia, *Nature*, 438(17), (2005).
- P. Nobre, J. Shukla, *Journal of Climate*, 9, (1996).
- P. S. Chu, P. Yu, S. Hastenrath, *Bulletin of the American Meteorological Society*, 75, (1995).
- R. P. Kane, *Proc. Indian Acad. Sci. (Earth Planet Sci.)*, 3, (1989).
- R. Victoria, L. Martinelli, J. Moraes, M. V. Ballester, A. Krushche, G. Pellegrino, G., R. Almeida, J. Richey, *Journal of Climate*, 11, (1998).
- R. Wagner, *Journal of Geophysical Research*, 101, (2006).
- S. Curtis, S. Hastenrath, *International Journal of Climatology*, 19, (1999).

- S. Hastenrath, L. Greischar, *Journal of Climate*, 6, (1993).
- S. Hastenrath, *J Geophysical Research*, 105, (2001).
- T. M. B. S. Xavier, *Revista Brasileira de Meteorologia*, 9, (1994).
- T. C. Chen, E. S. Takle, J. H. Yoon, K. J. St Croix, P. Hsieh, *Trabalho apresentado no 7th International Conference on Southern Hemisphere Meteorology and Oceanography*, Wellington, New Zealand, Março 2003.
- T. M. B. S. Xavier, M.A.F. Silva Dias, A.F.S. Xavier, *Trabalho apresentado no VII Congresso Brasileiro de Meteorologia*, (São Paulo, 1992).
- UK MET OFFICE, *Recent research on climate change science from the Hadley Centre*. (UK Met Office, Exeter, 2005).
- V. Barros, M. Doyle, M. González, I. Camilloni, R. Bejarán, R. Caffera, *Meteorológica*, 27, 5 (2002).
- W. Collischoonn, *Simulações hidrológica em Grandes bacias*. Tese de doutorado. Instituto de Pesquisas Hidráulicas. UFRGS. Rio Grande do Sul, (2001).
- W. Li, R. Fu, R., Dickinson, *Journal Geophysical Research*, 111, (2006).

Figuras

Figura 1. Anomalias de chuva na região Nordeste do Brasil para o período de fevereiro a maio. As anomalias foram calculadas em relação ao período de referência 1961-90. Fonte de dados CRU Climate Research Unit desde 1901 a 1998.

Figura 2. Anomalias normalizadas de chuva para o Norte (a) e para o Sul (b) da Amazônia, desde 1929 a 1997. (Fonte: Marengo, 2004).

Figura 3. Vazões do rio Jacuí em Espumoso e em Passo Bela Vista (Fonte: Robin Clarke, IPH-UFRGS).

Figura 4. Ciclo Anual da chuva para as regiões do Nordeste (a), Amazônia (b) e Bacia da Prata (c) para o experimento Climate of the 20th Century (20C3M)

Figura 5. Ciclo Anual para o Nordeste (a), Amazônia (b) e Bacia da Prata (c)- Experimento SRES-A2

Figura 6. Mudanças relativas da precipitação (em %) para o período 2090-2099 relativo a 1980-1999. Valores são a média de todos os modelos de IPCC AR4 para o cenário A1B para verão (DJF) e inverno (JJA).

Figura 7. Mudança relativa de vazões durante o século XX na América do Sul. Valores são em porcentagem (%) para o período 1971-98 em relação ao 1900-70 (esquerda). Média aritmética de vazões de 12 modelos do IPCC para o período entre 2041-2060 em relação ao período entre 1900-70 em porcentagem (%) para o cenário A1B (direita). Fonte: Milly et al. (2005)