

Cenários de mudança climática para a América do Sul para o final do século 21

*Carlos A. Nobre
Gilvan Sampaio
Luis Salazar*

A melhor ferramenta para projetar cenários prováveis de alterações climáticas para o futuro são os modelos matemáticos do sistema climático global (MCG), que levam em conta de forma quantitativa (numérica) o comportamento dos compartimentos climáticos (atmosfera, oceanos, criosfera (áreas com gelo e neve), vegetação, ciclos biogeoquímicos, etc.) e de suas interações. Esses modelos permitem que se simulem prováveis cenários de evolução do clima para vários cenários de emissões dos Gases de Efeito Estufa (GEE). Porém, há duas grandes fontes de incertezas ao utilizar estes modelos. A primeira, é que não sabemos precisamente a trajetória futura das emissões dos GEE e de aerossóis atmosféricos, que depende de decisões humanas sobre o caminho socioeconômico-ambiental desejado e que venha a ser efetivamente implementado. A segunda fonte de incerteza advém do fato que os modelos matemáticos são representações imperfeitas da natureza e diferentes modelos climáticos diferem substancialmente em suas projeções para o clima do futuro, dado o mesmo cenário de evolução das concentrações de GEE e de aerossóis na atmosfera. A maneira de abordar essas duas incertezas é utilizar vários cenários de emissões de GEE e diferentes modelos climáticos.

As Figuras 1 a 4 mostram cenários climáticos para o período 2071-2100 para 15 diferentes modelos climáticos globais e dois cenários de emissões de GEE do Painel Intergovernamental de Mudanças Climáticas – IPCC (“World Climate Research Programme’s (WCRP’s) Coupled Model Intercomparison Project phase 3 (CMIP3) multimodel dataset”): A2 é o cenário chamado de “pessimista”, isso é, a manutenção dos padrões de emissões de GEE observados nas últimas décadas; esse cenário implicaria em chegarmos a 2100 com concentrações atmosféricas de CO₂ de cerca de

850 partes por milhão em volume (ppmv); e, B1 é o cenário de menores emissões ou cenário “otimista”, tendendo à estabilização das emissões de GEE, e concentração, no final deste século, de cerca de 550 ppmv (NAKICENOVIC e SWART, 2000).

As análises desses cenários mostram maiores diferenças nas anomalias de precipitação e temperatura entre os diferentes modelos do que entre os diferentes cenários para o mesmo modelo. Como esperado, as maiores fontes de incertezas dos cenários de mudança climática regional estão associadas às projeções dos diferentes MCG. O aquecimento projetado para América do Sul varia de 1° a 4°C para o cenário B1 e de 2° a 6°C para o cenário A2. Em resumo, um clima substancialmente mais quente para qualquer dos cenários e modelos climáticos tomados. Essa análise é mais complicada para as mudanças na precipitação pluviométrica, uma vez que os diferentes modelos apresentam diferenças na magnitude e mesmo no sinal da anomalia. Em termos gerais para América do Sul, as regiões mais afetadas seriam a Amazônia e o Nordeste brasileiro, em processos relacionados principalmente com a intensidade e posicionamento da Zona de Convergência Intertropical (ZCIT). Entre esses processos destacam-se o provável enfraquecimento da célula de Hadley no Hemisfério Norte (ocasionando uma ZCIT mais ao norte, já que o gradiente de temperatura neste hemisfério diminuiria) e aumento da concentração de vapor de água atmosférico na região equatorial. Porém, a discordância é grande: enquanto alguns modelos apontam para anomalias positivas de precipitação sobre partes da Amazônia e Nordeste Brasileiro, outros apontam para anomalias negativas (GIORGI e FRANCISCO, 2000; OYAMA, 2003), muito embora o centro-leste da Amazônia e o norte do Nordeste sejam relativamente tidas como locais de grande previsibilidade climática (MOURA e HASTENRATH, 2004). O que entra em cena aqui são as diferentes formas em que cada modelo representa os processos físicos e hidrológicos globais e, regionalmente, culminando na limitada representação de sistemas convectivos de mesoescala (como complexos convectivos de mesoescala ou linhas de instabilidade). Tanto na Amazônia como no Nordeste brasileiro, esses sistemas convectivos de mesoescala, junto com a ZCIT, são de suma importância para os regimes de precipitação locais (SATYAMURTY et al., 1998). Portanto, o estado da ciência atual ainda não permite estabelecer cenários inequívocos de mudanças do regime hidrológico.

Figura 1. Projeções de anomalias de precipitação (mm/dia) para América do Sul para o período de 2071-2100 (Cenário B1) em relação ao período base de 1961-1990 para 15 diferentes modelos climáticos globais disponíveis através do IPCC

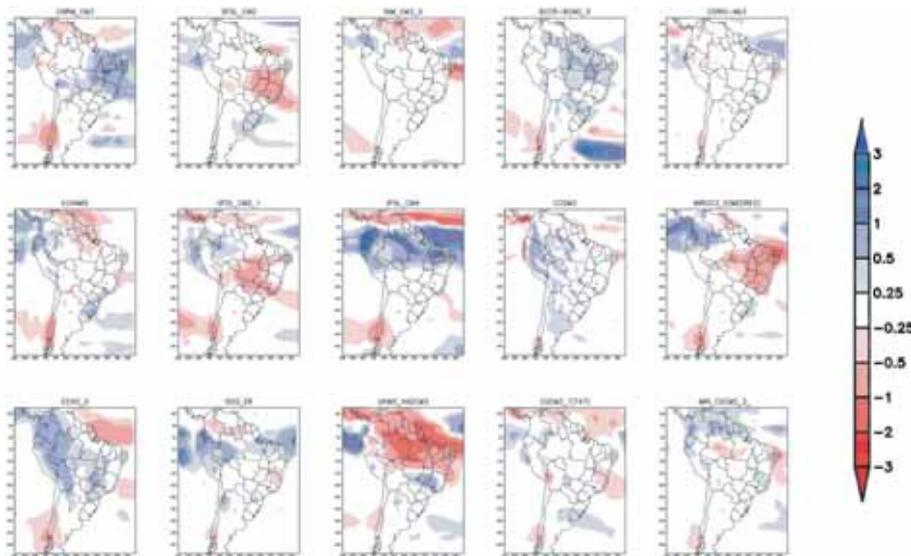


Figura 2. Projeções de anomalias de temperatura (°C) para América do Sul para o período de 2071-2100 (Cenário B1) em relação ao período base de 1961-1990 para 15 diferentes modelos climáticos globais disponíveis através do IPCC

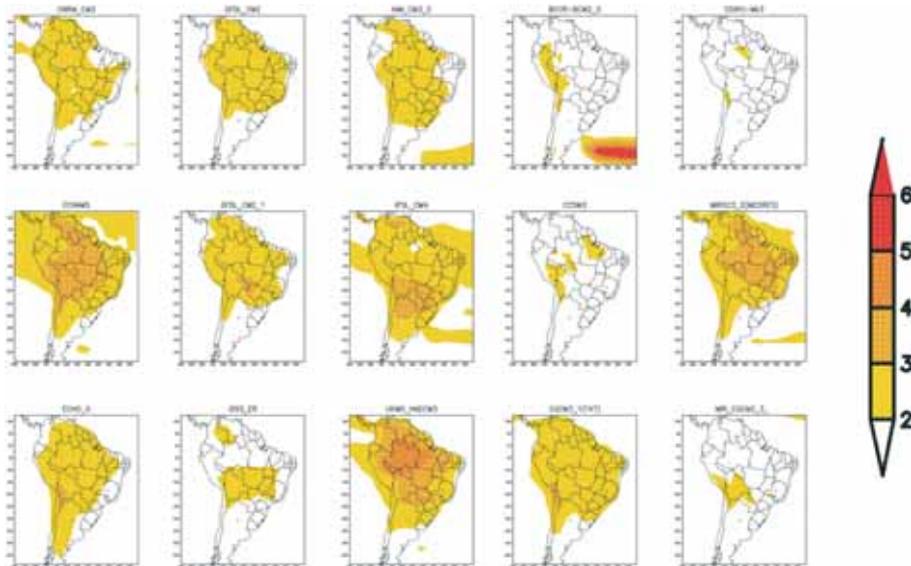


Figura 3. Projeções de anomalias de precipitação (mm/dia) para América do Sul para o período de 2071-2100 (Cenário A2) em relação ao período base de 1961-1990 para 15 diferentes modelos climáticos globais disponíveis através do IPCC

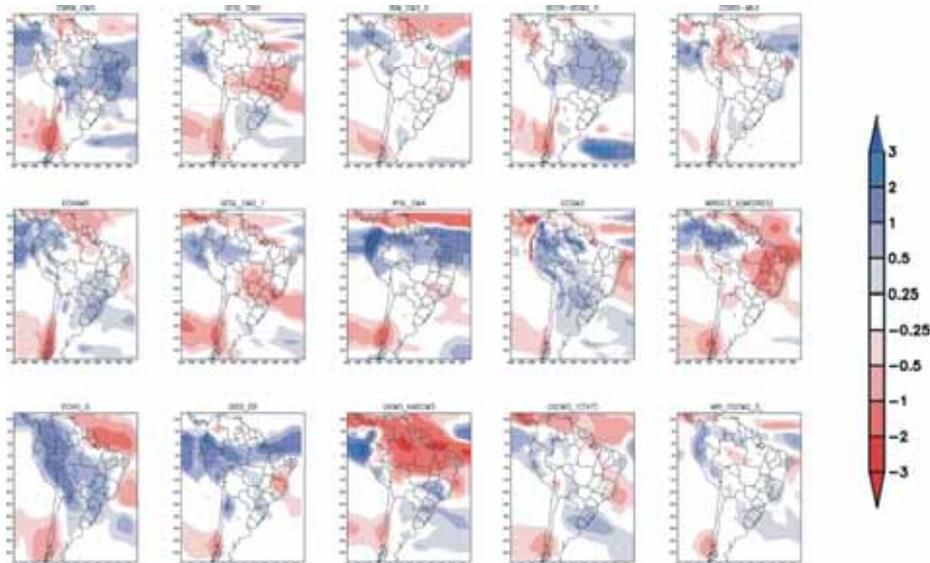
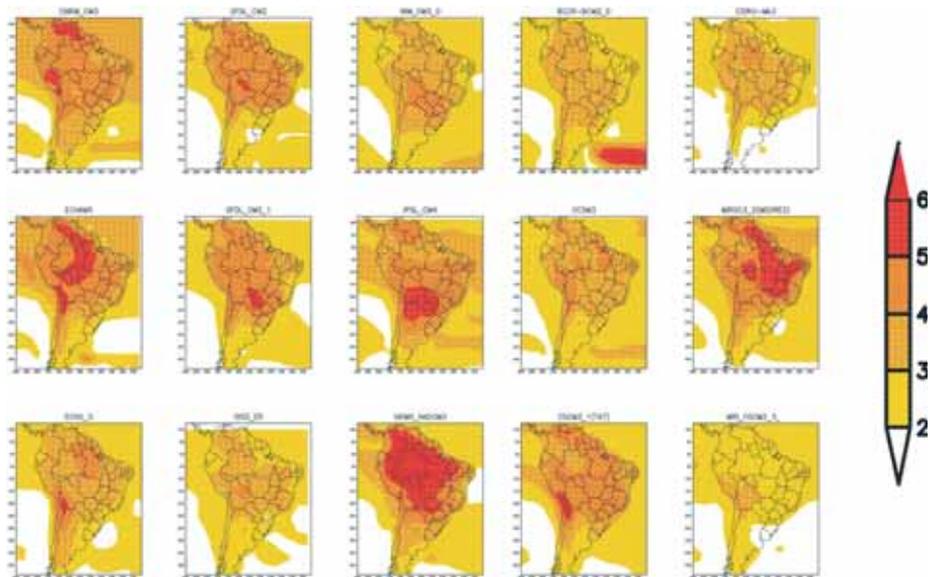
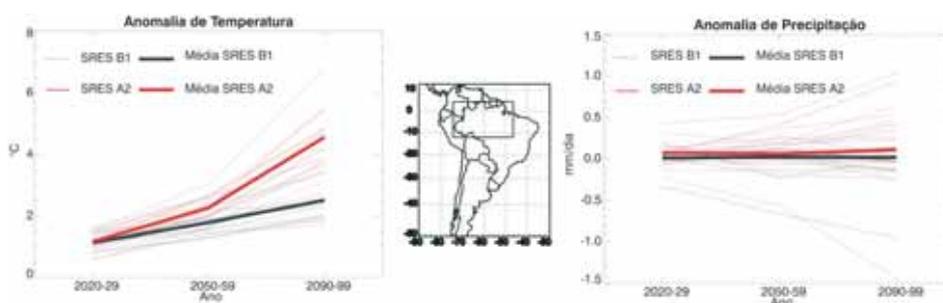


Figura 4. Projeções de anomalias de temperatura (°C) para América do Sul para o período de 2071-2100 (Cenário A2) em relação ao período base de 1961-1990 para 15 diferentes modelos climáticos globais disponíveis através do IPCC



A Figura 5 apresenta as anomalias de precipitação e temperatura para a Amazônia, projetadas por 15 diferentes modelos para os cenários A2 e B1. Como descrito nas análises anteriores, existe muita variabilidade nas anomalias de precipitação projetadas entre os diferentes modelos na magnitude e no sinal da anomalia até o final do século 21. A diferença entre as anomalias de precipitação para diferentes modelos sugere que ainda temos um grau de incerteza nos cenários de projeções do clima futuro, o que indica a necessidade de melhorar a representação dos processos físicos como nuvens, precipitação, aerossóis e interação da vegetação e clima. Espera-se que para o próximo relatório do IPCC os modelos climáticos globais utilizados também considerem a dinâmica da vegetação de modo que as mudanças na vegetação se refletem em mudanças no clima, e vice-versa. Na análise da temperatura para a Amazônia, todos os modelos concordam com o sinal da anomalia, com um aquecimento médio entre todos os modelos de 4°C (2°C) para o cenário A2 (B1) para o final deste século. A anomalia de temperatura aumenta com tempo no decorrer do século, sendo maior para o cenário mais “pessimista” (A2).

Figura 5. Anomalias de precipitação e temperatura para a região Amazônica (área destacada no mapa) de 15 modelos climáticos globais para os cenários de emissões A2 (linhas vermelhas) e B1 (linhas azuis). A linha grossa representa o valor médio de todos os modelos



É importante ressaltar que os modelos climáticos globais utilizados para fazer as projeções futuras descritas antes têm resolução espacial entre 200 e 400 km de latitude/longitude, ou seja, baixa resolução espacial. Todavia, existe uma técnica para traduzir a relativa baixa resolução espacial dos modelos climáticos globais para escalas mais refinadas por meio da regionalização (*downscaling*) das projeções desses modelos usando modelos

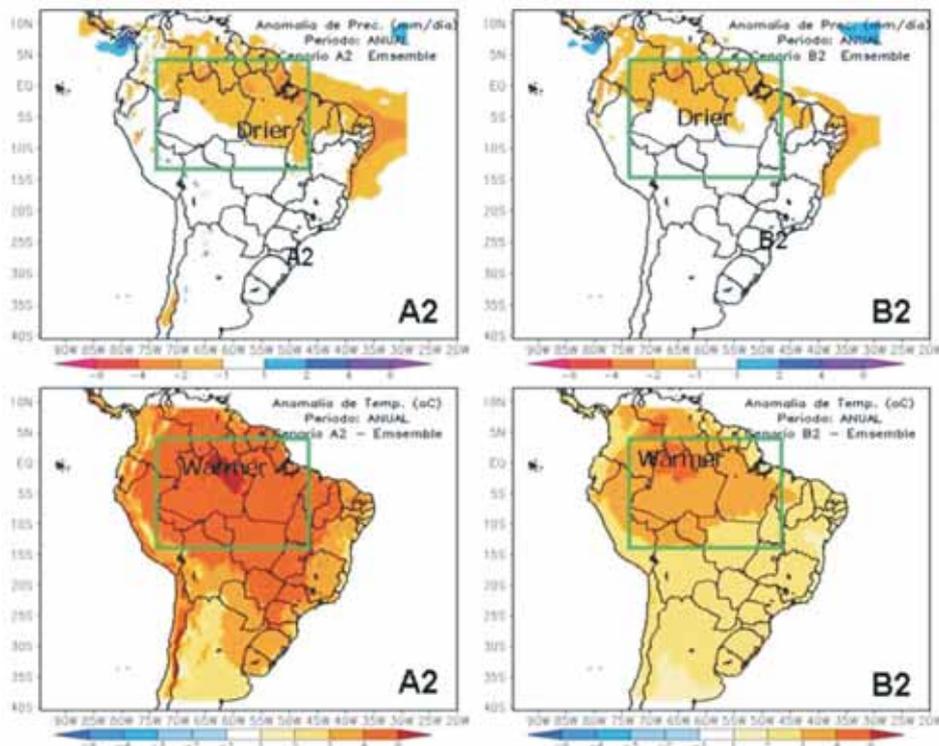
climáticos regionais de mais alta resolução sobre a área de interesse, e tendo como condições de fronteira dados provenientes de modelos climáticos globais (AMBRIZZI et al., 2007).

Com o objetivo de produzir cenários de mudança climática numa escala espacial mais alta (50 km) para América do Sul, o projeto “Caracterização do Clima Atual e Definição das Alterações Climáticas para o Território Brasileiro ao Longo do Século 21”, (MARENGO et al., 2007, MARENGO and AMBRIZZI, 2006) utilizaram três modelos regionais (ETA/CPTEC-Inpe, RegCM3 e HadRM3P) para elaborar cenários de mudança climática. Esse exercício de regionalização utilizou os cenários globais provenientes do modelo climático global do Centro Hadley de Pesquisas Climáticas, do Reino Unido. Esses modelos regionais projetam um aumento médio de temperatura para a Amazônia de 2° a 4°C e diminuição de precipitação de 1mm/dia a 4 mm/dia, principalmente no leste da Amazônia, para o final deste século (Figura 6). Segundo Ambrizzi et al. (2007), as mudanças climáticas mais intensas para o final do século 21, relativo ao clima atual vão acontecer na região tropical, especificamente Amazônia e Nordeste do Brasil. Estas duas regiões constituem o que poderia ser chamado de *hot spots* de mudanças climáticas e representam as regiões mais vulneráveis do Brasil às mudanças climáticas, tanto na componente socioeconômica como em termos da biodiversidade.

As projeções derivadas desses modelos regionais (AMBRIZZI et al. 2007) podem apresentar um viés associado ao fato de que simulações do modelo climático global do Centro Hadley foram utilizadas como condição de contorno para as integrações com os modelos regionais, sendo que esse modelo climático global é aquele que projeta climas bastante secos e quentes para a Amazônia e Nordeste, em comparação com vários outros resultados dos demais modelos do IPCC.

O avanço do conhecimento científico sobre o funcionamento do complexo sistema climático levará, em pouco tempo, à diminuição das incertezas nas projeções das alterações das mudanças climáticas em escala regional. De qualquer maneira, uma das projeções importantes é a que diz respeito a maior ocorrência de extremos climáticos e de eventos intensos, como secas, veranicos, vendavais, tempestades severas, inundações, etc., num planeta mais aquecido. A ocorrência de eventos extremos e suas graves consequências associadas ocorridos no Brasil nos últimos anos, ilustram

Figura 6. Anomalias anuais de precipitação (painel superior, em mm/dia) e temperatura (painel inferior, em °C) (para América do Sul, período 2071-2100) em relação a 1961-90, para os cenários A2 de altas emissões e B2 de baixas emissões. As projeções representam a média aritmética dos cenários produzidos pelos modelos regionais Eta/CPTEC, RegCM3 e HadRM3P (50 km de resolução)



Fonte: Ambrizzi et al. (2007).

bem a necessidade de uma estratégia de adaptação para o país. Com a ampliação esperado no aumento da frequência dos eventos extremos, vários setores de atividades econômicas terão que se adaptar. Por exemplo, o setor de construções de barragens e grandes obras de engenharia, uma vez que o período de recorrência de enchentes poderá se modificar. Enxurradas mais frequentes afetam negativamente a atividade agrícola, inclusive com aceleração da perda de fertilidade dos solos.

A questão do possível aumento dos extremos climáticos automaticamente nos remete ao problema da vulnerabilidade das populações e dos ecossistemas a estas mudanças. A vulnerabilidade social aos efeitos

do clima pode ser definida como “conjunto de características de uma pessoa ou grupo que determina a sua capacidade de antecipar, sobreviver, resistir e recuperar-se dos impactos dos fatores climáticos de perigo” (BLAIKIE et al., 1994). O IPCC a define como “o grau de suscetibilidade de indivíduos ou sistemas ou de incapacidade de resposta aos efeitos adversos da mudança climática, incluindo-se a variabilidade climática e os eventos extremos” (McCARTHY et al., 2001). Uma boa medida da capacidade de adaptação a potenciais mudanças futuras no clima é verificar como populações enfrentam a variabilidade natural do clima atual e no passado histórico. Nesse ponto, já podemos distinguir uma profunda diferença na resposta à variabilidade e aos extremos climáticos entre nações desenvolvidas e em desenvolvimento. Como as periódicas secas do Nordeste, as enchentes e inundações, os deslizamentos em encostas em regiões metropolitanas e serranas não nos cansam de ensinar, a vulnerabilidade das populações do país a tais extremos é realmente muito alta. Decorre, assim, que devemos esperar que, mantidas as condições atuais de desenvolvimento, a vulnerabilidade do Brasil às mudanças climáticas prováveis será igualmente muito alta, podendo ser potencialmente um significativo óbice ao desenvolvimento sustentável do país no futuro. Com um clima mais quente, haverá mais vapor d’água na atmosfera e uma aceleração do ciclo hidrológico. Essa é uma das projeções de mudanças climáticas onde há bastante confiança. A aceleração do ciclo hidrológico implica em aumento da frequência de tempestades severas e intensas. Deslizamentos de terra em encostas, enchentes e inundações provocadas por tempestades severas são dois desastres naturais responsáveis por grande número de vítimas no país, principalmente nas regiões metropolitanas do Rio de Janeiro, Recife, Salvador e Belo Horizonte, e nas Serras do Mar e da Mantiqueira, inclusive com repercussões na saúde em termos de aumento da mortalidade-morbidade. Os sistemas de defesa civil e de saúde pública devem, portanto, levar em consideração que tais desastres tenderão a se tornar mais freqüentes no futuro, se o aquecimento do planeta prosseguir.

Eventos extremos, como a seca de 2005 no oeste e sudoeste da Amazônia, num cenário futuro de aumento de CO₂ e diminuição de aerossóis, podem se tornar mais freqüentes. É provável que um aumento na temperatura da superfície do mar no Atlântico norte tropical tenha sido a causa da seca de 2005 na Amazônia, já que havia a ausência de episódio El Niño e a região mais afetada foi o sudoeste da Amazônia, ao passo que secas

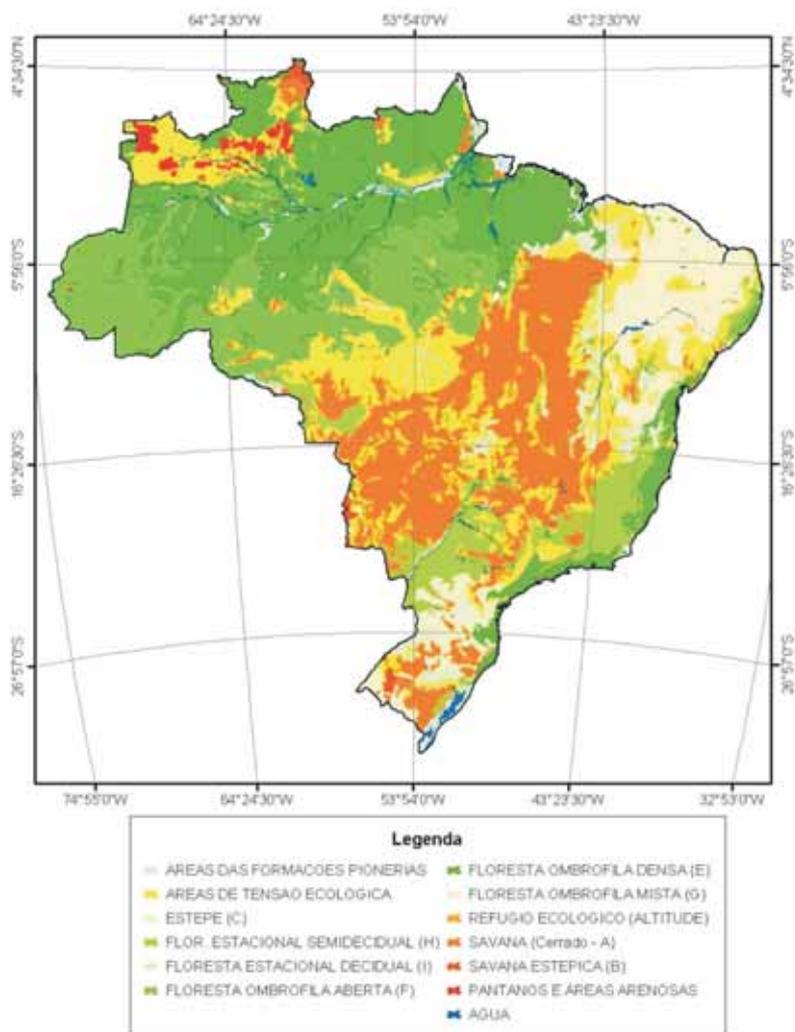
associadas a episódios El Niño fortes acontecem no norte e leste daquela região. Isso implicou numa diminuição da intensidade dos ventos alísios de nordeste e do transporte de umidade do Atlântico tropical em direção a Região Amazônica. Segundo Marengo et al. (2007), as causas da seca ocorrida na Amazônia em 2005 não estão relacionadas ao El Niño, mas a três possíveis fatores interconectados: 1) o Atlântico norte tropical anormalmente mais quente do que o normal; 2) a redução na intensidade do transporte de umidade pelos alísios de nordeste em direção ao sul da Amazônia durante o pico da estação de verão; e, 3) a diminuição do movimento vertical sobre esta parte da Amazônia, resultando num reduzido desenvolvimento convectivo e reduzida precipitação. Esses três fatores são dinamicamente consistentes na medida em que águas mais quentes no oceano Atlântico tropical norte induziriam movimentos ascendentes atmosféricos sobre essa região, com abaixamento da pressão atmosférica, e movimentos descendentes compensatórios sobre a região da seca no oeste-sudoeste da Amazônia, e conseqüente aumento da pressão atmosférica. Esse padrão de anomalias de pressão reduziria a intensidade dos ventos alísios transportando umidade do oceano para a Amazônia (NOBRE et al., 2007).

IMPACTOS DAS MUDANÇAS CLIMÁTICAS NOS ECOSISTEMAS

Este capítulo trata da questão das possíveis alterações nos grandes biomas brasileiros (Figura 7) como resposta aos cenários de mudanças climáticas indicadas nas Figuras 1 a 5. A distribuição geográfica das comunidades da vegetação e sua relação para o clima têm sido examinadas com modelos biogeográficos ou modelos de biomas. Esses modelos usam como paradigma central o fato que o clima exerce controle dominante sobre a distribuição da vegetação. Os modelos biogeográficos podem simular a vegetação potencial (sem os efeitos dos usos da terra e do solo) baseando-se em alguns parâmetros climáticos, tais como a temperatura e a precipitação, entre outros. Devido à simplicidade destes modelos e a existência de regras empíricas globais entre a vegetação natural e o clima, esses modelos têm sido utilizados para a estimativa de impactos das mudanças climáticas na cobertura vegetal (KING e NEILSON, 1992; CLAUSSEN e ESCH, 1994, NOBRE et al., 2004, SALAZAR et al., 2007). Oyama e Nobre (2004) desenvolveram um modelo de vegetação potencial (CPTEC-PVM) que consegue representar a distribuição global dos diferentes biomas, e em escala regional, os biomas da América do Sul, onde outros modelos extensamente

utilizados como o Biome (PRENTICE et al., 1992) e o Biome3 (HAXELTINE e PRENTICE, 1996) têm algumas deficiências.

Figura 7. Principais biomas brasileiros



Fonte: MMA

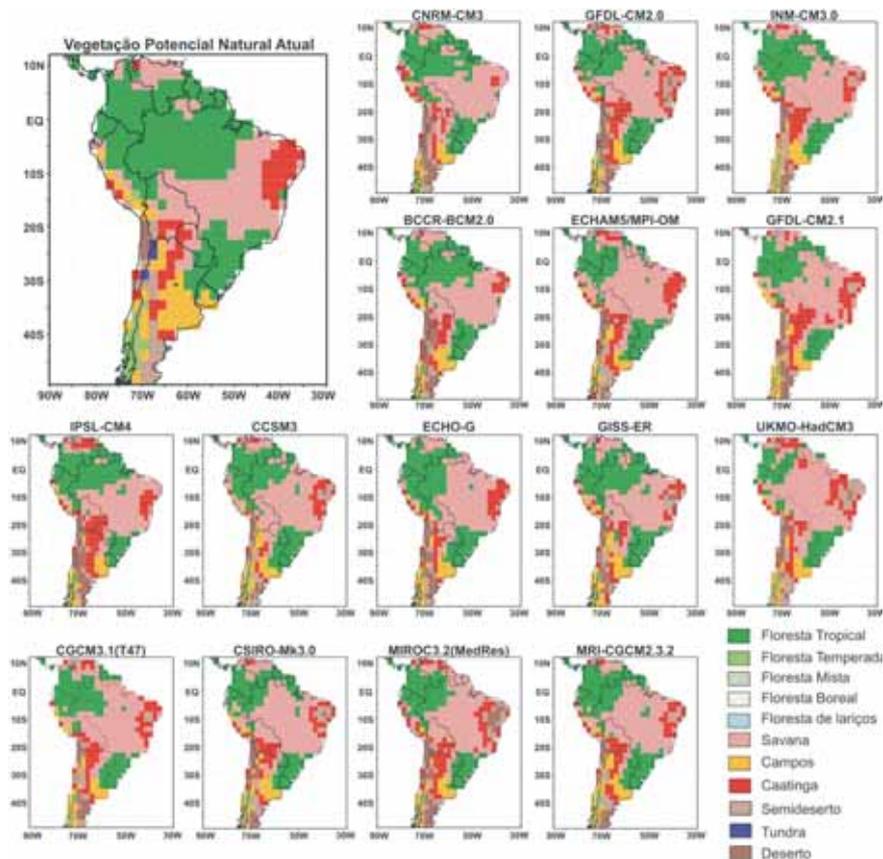
Preliminarmente, deve-se mencionar que ecossistemas naturais como um todo não têm capacidade intrínseca de migração ou adaptação à magnitude das projetadas mudanças climáticas na escala de tempo em que estão ocorrendo, isto é, décadas. Ecossistemas migram ou se adaptam

naturalmente a flutuações climáticas ocorrendo na escala de muitos séculos a milênios. Portanto, devemos esperar rearranjos significativos dos biomas, com sérias conseqüências para a manutenção da mega-diversidade biológica dos biomas brasileiros, com o resultado muito provável de sensível empobrecimento biológico.

Para avaliar quantitativamente as prováveis alterações e redistribuições dos biomas na América do Sul para o século 21, em resposta aos cenários de mudanças climáticas, Salazar et al. (2007) utilizaram o modelo de vegetação potencial CPTEC-PVM (OYAMA e NOBRE, 2004) para calcular biomas de equilíbrio com as saídas de quinze modelos climáticos globais preparados para o Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas – Quarto relatório de Avaliação (IPCC/AR4), apresentadas nas Figuras 1 a 5. Foram analisados os cenários climáticos A2 e B1 que representam cenários de alta e baixa emissão de CO₂, respectivamente. A resolução horizontal dos modelos varia entre 1.5 a 4°C, o que indica que esta análise foi feita na grande escala.

A Figura 8 apresenta a vegetação potencial atual e a redistribuição de biomas projetados com o modelo de vegetação potencial CPTEC-PVM para América do Sul para o cenário A2 e o período 2090-2099, dos quinze modelos analisados. Para a América do Sul Tropical, tomando-se uma média dessas projeções, constata-se a projeção do aumento da área de savanas (com o cerrado invadindo o Pará) e um substituição de área de caatinga por semi-deserto no núcleo mais árido do Nordeste do Brasil (NOBRE et al., 2004). Em particular, o modelo HADCM3 é o que coloca o cenário mais extremo para a Amazônia, chegando a se especular de um possível quase completo desaparecimento da floresta Amazônia (COX et al., 2000). Em termos simples, o aumento de temperatura induz a uma maior evapotranspiração (soma da evaporação da água à superfície com a transpiração das plantas), reduzindo a quantidade de água no solo, mesmo que as chuvas não diminuam significativamente. Esse fator pode por si só pode desencadear a substituição dos biomas existentes hoje por outros mais adaptados a climas com menor disponibilidade hídrica para as plantas (por exemplo, savanas tropicais substituindo florestas tropicais, caatinga substituindo savanas tropicais, semi-deserto substituindo caatinga).

Figura 8. Distribuição projetada dos biomas naturais na América do Sul para o período 2090-2099 dos 15 MCG para o cenário A2. O painel superior à esquerda representa os biomas potenciais em equilíbrio com o clima atual (representa os biomas potenciais, mais não a distribuição atual da vegetação, que é resultado das mudanças na cobertura vegetal e nos usos do solo)

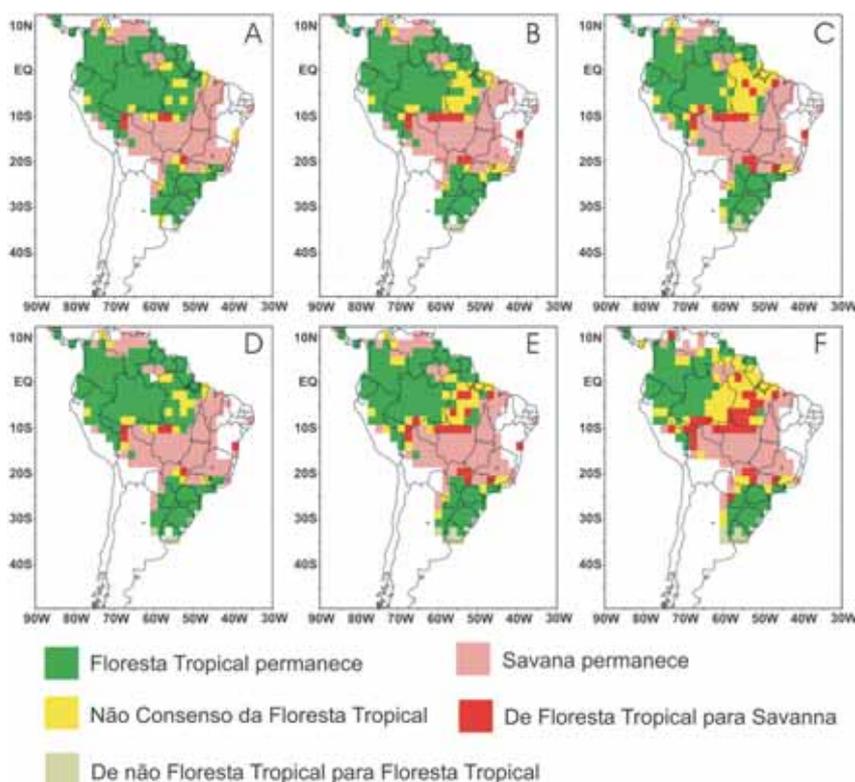


Fonte: Salazar et al., 2007

A Figura 9 apresenta os pontos de grade onde mais de 75% dos 15 modelos (> 11 modelos) coincidem na condição futura (onde um determinado bioma permanece, desaparece, aparece ou não existe consenso entre os modelos da sua condição futura) da floresta tropical e da savana para os dois cenários analisados em três períodos de tempo no século 21. Para a América do Sul tropical, os resultados indicam que para os cenários analisados, os modelos apresentam regiões de consenso de redução da floresta tropical que é substituída por savana tropical. Essa redução da floresta

tropical aumenta com o tempo através do século 21. Para o bioma catinga, no nordeste do Brasil, não existe consenso da sua condição futura, especialmente para o período 2090-2099. Esse “não-consenso” está relacionado com as diferenças nas projeções de precipitação e temperatura entre os modelos para esta região. Para o período 2090-2099 nos dois cenários, a floresta tropical na Colômbia e no Oeste da Amazônia é mantida, e a mata Atlântica estende-se para o sul, no sul do Brasil (Figuras 9c e 9f).

Figura 9. Pontos de grade onde mais de 75% dos modelos (> 11 modelos) coincidem na projeção da condição futura da floresta tropical e da savana, em relação à vegetação potencial atual, resultando nas seguintes possibilidades: a floresta tropical permanece; a savana permanece; mudança da floresta tropical para savana; mudança da floresta tropical para não-floresta tropical. A figura também apresenta os pontos de grade onde não existe consenso entre os diferentes modelos para os períodos (a) 2020-2029, (b) 2050-2059 and (c) 2090-2099 para o cenário B1 e (d), (e) e (f) para o cenário A2



Fonte: Salazar et al., 2007

Em termos gerais, é possível que exista uma redução de áreas cobertas por floresta tropical (18% [8%] desaparecem, com 30% [23%] de não-consenso para o cenário A2 [B1] e o período de tempo de 2090-2099) e um correspondente aumento de áreas cobertas com savana. Outras projeções de mudanças na vegetação mostram redução das áreas de floresta na América do Sul (por exemplo, SCHOLZE et al., 2006, COOK e VIZY, 2007) ou um *die-back* da floresta (por exemplo, JONES et al., 2003; COX et al., 2000; 2004). Considerando que a escala natural de migração dos ecossistemas de séculos a milênios e muito maior que a escala de tempo da ocorrência de mudanças climáticas (décadas), essas têm o potencial de influir profundamente na diversidade ecológica de plantas e animais.

Outros experimentos com uma versão atualizada do CPTEC-PVM que inclui o ciclo de carbono e o bioma de floresta tropical sazonal foram feitas por Lapola (2007). Os resultados indicaram que no sudeste da Amazônia não existe consenso entre os modelos, em relação à substituição da floresta por savana. Esse resultado mostra o efeito de fertilização do CO₂ o que favoreceria a manutenção ou mudança para biomas de maior porte nas áreas onde a temperatura aumenta, portanto, a diminuição da precipitação precisa ser maior para substituição de floresta para savana. Isso mostra que a resposta da floresta tropical para valores elevados de CO₂ é uma questão crítica que precisa ser estudada mais profundamente.

Às mudanças climáticas por origem do aquecimento global, há que se adicionar aquelas devido às alterações da cobertura da vegetação. Há projeções que os desmatamentos da floresta tropical amazônica levarão a um clima mais quente e seco na região (NOBRE et al., 1991, SAMPAIO et al., 2007, COSTA et al., 2007). As várias simulações dos efeitos climáticos da substituição da floresta por pastagens na Amazônia produzidas por tais estudos e as observações dos projetos Abracos (GASH et al., 1996; GASH e NOBRE, 1997) e LBA (Experimento de Grande Escala da Biosfera-Atmosfera na Amazônia; <www.cptec.inpe/lba>) indicam que há um aumento da temperatura entre 0,3°C e 3°C, redução da evapotranspiração entre 15% e 30% e redução da precipitação entre 5% e 20% devido à mudança de vegetação de floresta para pastagem. Esse aumento de temperatura é maior do que aquele projetado pelo cenário B1, mas bem inferior àquele previsto pelo cenário A2 para o final do século 21. Provavelmente os efeitos de aumento de temperatura induzidos pelas mudanças globais e aqueles advindos dos desmatamentos se somariam

sinergicamente, aumentando o risco de incêndios florestais porque o secamento da vegetação na estação seca e sua flamabilidade são maiores com temperaturas mais altas (NEPSTAD et al., 1999), aumentando a vulnerabilidade dos ecossistemas tropicais.

Em Scholze et al. (2006), o risco de perda da floresta em algumas partes da Amazônia é de mais de 40% para os cenários que apresentam uma anomalia de temperatura maior que 3°C. Por outro lado, se houver tendência ao aumento das precipitações, estes atuam para contrabalançar a redução das chuvas devido ao desmatamento e o resultado final seria mais favorável à manutenção dos ecossistemas e espécies.

Adicionalmente, alguns estudos têm mostrado que o estômato da planta abre menos com altas concentrações de CO₂ (FIELD et al., 1995), o que reduz diretamente o fluxo de umidade da superfície para a atmosfera (SELLERS et al., 1996). Isso pode aumentar a temperatura do ar próximo da superfície pelo aumento da razão entre o fluxo de calor sensível e fluxo de calor latente. Numa região como a Amazônia, onde muito da umidade para a precipitação advém da evaporação da superfície, a redução da abertura estomatal pode também contribuir para um decréscimo na precipitação (BETTS et al., 2004).

Se grandes áreas da Amazônia forem substituídas por savana, o grau relativo de aridez poderá aumentar já que a vegetação adaptada ao fogo tem uma menor transpiração. Em Scholze et al. (2006) conclui-se que é provável uma maior frequência de fogo (risco > 60% para temperatura > 3°C) em muitas zonas da América do Sul. Em Hutyrá et al. (2005) é mostrado que as florestas presentes em áreas com alta frequência de secas (> 45% de probabilidade de seca) podem mudar para savana, se a aridez aumentar como previsto pelos cenários de mudança climática (COX et al., 2004; FRIEDLINGSTEIN et al., 2003). Portanto, cerca de 600.000 km² de floresta estarão em potencial risco de desaparecer (> 11% da área total vegetada). O aumento da aridez, portanto, pode levar à divisão da Amazônia (HUTYRA et al., 2005), com uma cunha de savanas tropicais penetrando desde a região de Cerrados do Brasil Central através do leste da região, separando o contínuo de florestas desde a costa Atlântica até os Andes.

Quando a floresta é sujeita a períodos anormalmente secos, aumenta a probabilidade de ocorrência de queimadas e incêndios florestais que podem

destruir centenas de milhares de hectares de floresta e injetar na atmosfera grandes quantidades de fumaça e aerossóis que poluem o ar em extensas áreas, afetando a população e com potencial de atrasar o início da estação chuvosa e a quantidade de chuva na região (ANDREAE et al. 2004). Considerando os cenários de mudança climática do modelo do HadCM3 para o IPCC/AR4, a duração da estação seca poderia aumentar em até dois meses ou mais na maior parte da Amazônia, o que levaria ao aumento da estação seca dos atuais 3-4 meses para 5-6 meses na Amazônia central e oriental. Esse aumento da estação seca implicaria num aumento do risco da ocorrência de queimadas e mudança na climatologia da chuva o que favoreceria a substituição da floresta por savana (LI et al., 2006). Esses impactos ecológicos afetam a possibilidade de manejo sustentável da floresta na região, o que é uma premissa básica para a economia regional (BROWN et al., 2006). Tomando em seu conjunto, as evidências desses estudos auxiliam a dar consistência aos resultados apresentados na Figura 9 de cálculos de redistribuição de biomas na América do Sul tropical, principalmente com respeito à hipótese de “savanização” de partes da Amazônia.

A floresta Amazônica contém uma grande parte da biodiversidade do mundo, pois mais de 12% de todas as plantas com flores são encontradas na Amazônia (GENTRY, 1982). Sendo assim, ameaças à existência da floresta amazônica indicam sérias ameaças à biodiversidade. Entretanto, existem poucos estudos sobre os efeitos das mudanças climáticas na distribuição de espécies. Em nível global, Thomas et al. (2004) avaliaram o risco de extinção de espécies para áreas que cobrem cerca de 20% da superfície terrestre, e encontraram que entre 15% e 37% das espécies estariam comprometidas com risco de extinção até o ano de 2050. Esse trabalho foi feito considerando três cenários de mudança climática: 1) mínima (aumento da temperatura de 0.8-1.7°C e aumento de CO₂ de 500 ppmv), 2) média (aumento de temperatura de 1.8-2.0°C e aumento de CO₂ de 500-550 ppmv), e 3) máxima (aumento de temperatura de mais de 2°C e aumento de CO₂ de mais de 550 ppmv).

Em nível regional, as simulações de Miles et al. (2004), baseadas nos cenários futuros do HADCM2Gsa1 (que assume um aumento anual de 1% na concentração de CO₂), analisaram o que poderia acontecer com a distribuição de 69 espécies de *angiospermas* na Amazônia entre 1990 e 2095. Chegaram à conclusão que 43% das espécies poderiam tornar-se inviáveis

até 2095, com máximo impacto no nordeste da Amazônia e melhores condições para preservação de espécies da planície amazônica nos extremos ocidental da Amazônia, e recomendaram a extensão de áreas protegidas para o oeste da região como forma de manter grande resiliência da biodiversidade Amazônica às mudanças climáticas.

Essencialmente, essa é a mesma conclusão que se segue aos resultados com modelos de biomas mencionados acima. Para que as espécies afetadas possam atingir novas zonas bioclimáticas, a dispersão e migração deverão ser feitas em centenas de quilômetros (HARE, 2003). Muitos desses experimentos de modelagem não têm considerado as influências não-climáticas como as mudanças do uso do solo, o desmatamento, a disponibilidade de água, as pestes e doenças, queimadas e incêndios florestais, e todas as outras que possam limitar a migração e dispersão de espécies (CASE, 2006). No trabalho de Sala et al. (2000), eles estudaram a mudança na biodiversidade para o ano 2100, considerando alguns destes aspectos e identificaram que para os biomas tropicais os principais agentes que afetam a biodiversidade são mudanças nos usos da terra e as mudanças climáticas.

Um raciocínio análogo pode ser feito sobre impactos das projeções das mudanças climáticas nos agro-ecossistemas. De modo geral, com algumas exceções, há tendência de menor disponibilidade hídrica em partes da Amazônia, Nordeste e Centro-Oeste, que poderiam afetar negativamente a agricultura principalmente no Nordeste e Centro-Oeste. No Sul e Sudeste, essas projeções indicam modificações bem menores no regime hidrológico. Entretanto, para projeções de impactos no setor agrícola e, conseqüentemente, para avaliação das vulnerabilidades deve-se considerar os efeitos da temperatura e da concentração do dióxido de carbono, o chamado efeito de “fertilização” de CO₂, sendo que geralmente um aumento pronunciado da temperatura média é prejudicial às culturas se colocá-la fora de sua faixa ótima e, ao contrário, o aumento da concentração de CO₂ resulta normalmente em maior produtividade para as culturas.

IMPACTOS DAS MUDANÇAS CLIMÁTICAS NOS AGROSSISTEMAS

Um pequeno número de estudos tratou da questão dos impactos das mudanças climáticas na agricultura brasileira. Alguns dos estudos utilizaram cenários futuros de mudanças climáticas a partir de modelos climáticos globais

e buscaram calcular efeitos negativos e positivos sobre a produtividade das culturas de trigo, milho e soja (SIQUEIRA et al., 1994; SIQUEIRA et al., 2001; TRAVASSO et al., 2004) ou sobre o impacto das mudanças climáticas na incidência de pragas na cultura de trigo no sul do Brasil (FERNANDES et al., 2004). Por outro lado, alguns estudos analisaram o risco agroclimático da cultura de café a extremos climáticos (MARENGO, 2001; PINTO et al., 2002; ASSAD et al., 2004). Para o Estado de São Paulo, por exemplo, Pinto et al. (2002) calcularam que, com um aumento de 3 °C na temperatura média e 15% nas chuvas, somente 15% da área do Estado seriam propícias à cultura do café arábica e para um aumento de 5,8 °C, somente 1,1%, mesmo se considerando que não haveria mais risco provocado por geadas nesses cenários. Para o clima atual, 40% do Estado são indicados para essa cultura.

De modo geral, os vários estudos sobre impactos na produtividade agrícola das culturas de milho, trigo e soja não permitem conclusões seguras no sentido que o efeito do aumento das temperaturas contribui à redução da produtividade, inclusive devido à maior incidência de pragas, mas que pode ser compensada, até certo ponto, pelo aumento da concentração de dióxido de carbono. Especificamente para a cultura do café no Sul-Sudeste do país, os estudos indicam geralmente que o risco agroclimático desta cultura poderia aumentar consideravelmente devido a temperaturas mais altas, mesmo se considerando menor frequência de geadas. Nota-se que todos os estudos utilizaram modelos matemáticos para estimar os impactos na agricultura, porém falta maior validação dos resultados com experimentação de campo.

REFERÊNCIAS

AMBRIZZI, T. et al. *Cenários regionalizados de clima no Brasil para o século XXI: projeções de clima usando três modelos regionais: relatório 3*. Brasília: MMA, 2007.

ANDREAE, M. O. et al. Smoking rain clouds over the Amazon. *Science*, n. 303, p. 1337-1342, 2004.

ASSAD, D. A. et al. Impacto das mudanças climáticas no zoneamento agroclimático do café no Brasil. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, v. 39, n. 11, p.1057-1064, 2004.

BETTS, R. A. The role of ecosystematmosphere interactions in simulated Amazon forest dieback under global climate warming. *Theoretical and Applied Climatology*, n. 78, p.157-175, 2004.

BLAIKIE, P. et al. *At risk: natural hazards, people's vulnerability, and disasters*. New York: Outledge, 1994.

BROWN, I. F. Fires in rain forests of southwestern Amazonia: Multi-national satellite imagery for monitoring and for informing the public. *EOS Transactions*, v. 87, n. 26, p. 253-264, 2006.

CASE, M. Climate change impacts in the Amazon: review of scientific literature (World Wildlife Fund – WWF). In: CONFERENCE OF THE PARTIES TO THE CONVENTION ON BIOLOGICAL DIVERSITY, 8., 2006, Curitiba. *Proceedings...* [S.l.: s.n.], 2006.

CLAUSSEN, M.; ESCH, M. Biomes computed from simulated climatologies. *Climate Dynamics*, n. 9, p. 235-243, 1994.

COOK, K. H.; VIZY, E. K. *Effects of 21st century climate change on the amazon rainforest*. [S.l.: s.n.], 2007. No prelo.

COSTA, M. H.; FOLEY, J. A. Combined effects of deforestation and doubled atmospheric CO₂ concentrations on the climate of Amazonia. *Journal of Climate*, n. 13, p.18–34, 2000.

_____ et al. Climate change in Amazonia caused by soybean cropland expansion, as compared to caused by pastureland expansion. *Geophysical Research Letters*, n. 34, 2007. Doi: 10.1029/2007GL029271.

COX, P. M. et al. Acceleration of global warming due to carbon-cycle feedbacks in a coupled climate model. *Nature*, n. 408, 184-187, 2000.

_____. Amazonian forest dieback under climate-carbon cycle projections for the 21st century. *Theoretical and Applied Climatology*, n. 78, p. 137-156, 2004.

CRAMER, W. Global response of terrestrial ecosystem structure and function to CO₂ and climate change: results from six dynamic global vegetation models. *Global Change Biology*, v. 7, n. 4, p. 357-373, 2001.

FERNANDES, J. M. et al. Expected impacts of climate change on the incidence of crop disease in the Pampas region of Argentina, Brazil and Uruguay: modeling fusarium head blight in wheat under climate change using linked process-based model. In: AIACC REGIONAL WORKSHOP FOR LATIN AMERICA AND THE CARIBBEAN, 2., 2004, Buenos Aires, Argentina. *Proceedings...* [S.l.: s.n.], 2004. (AIACC Project, n. LA27).

FIELD, C. B.; JACKSON, R. B.; MOONEY, H. A. Stomatal responses to increased CO₂: implications from the plant to the global scale. *Plant, Cell and Environment*, v. 18, n. 10, p. 1214-1225, 1995.

FRIEDLINGSTEIN, P. et al. How positive is the feedback between climate change and the carbon cycle. *Tellus*, n. 55, p. 692– 700, 2003.

_____. Climate-carbon cycle feedback analysis: results from the C4MIP model intercomparison. *Journal of Climate*, v. 19, n. 14, p. 3337-3353, 2006.

GASH, J. H. C. et al. *Amazonian deforestation and climate*. Chichester: Wiley, 1996.

_____; NOBRE, C. A. Climatic effects of amazonian deforestation: some results from ABRACOS. *Bulletin of the American Meteorological Society*, v. 78, n. 5, p. 823-830, 1997.

GENTRY, A. H. Neotropical floristic diversity. *Annals of the Missouri Botanical Garden*, n. 69, p. 557–593, 1982.

GIORGI, F.; FRANCISCO, R. Evaluating uncertainties in the prediction of regional climate. *Geophysical Research Letters*, v. 27, n. 9, p. 1295-1298, 2000.

HARE, W. *Assessment of knowledge on impacts of climate change contribution to the specification of art. 2 of the UNFCCC*. Berlin: WBGU Potsdam, 2003.

HAXELTINE, A.; PRENTICE, I. C. BIOME3: an equilibrium terrestrial biosphere model based on ecophysiological constraints, resource availability, and competition among plant functional types. *Global Biogeochemical Cycles*, v. 10, n. 4, p.693-709, 1996.

HUTYRA, L. R. et al. Climatic variability and vegetation vulnerability in Amazônia. *Geophysical Research Letters*, n. 32, 2005. Doi: 10.1029/2005GL024981.2005.

JONES, C. D. et al. Strong carbon cycle feedbacks in a climate model with interactive CO₂ and sulphate aerosols. *Geophysical Research Letters*, v. 30, n. 9, p. 1479, 2003.

KING, G. A.; NEILSON, R. P. The transient response of vegetation to climate change: a potential source of CO₂ to the atmosphere. *Water, Air and Soil Pollution*, n. 64, p. 365-383, 1992.

LAPOLA, D. *Consequências das mudanças climáticas globais nos biomas da América do sul: um modelo de vegetação potencial incluindo ciclo de carbono*. 2007. Tese (Mestrado em Meteorologia)- Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, 2007.

MARENGO, J. A. Impactos das condições climáticas e da variabilidade e mudanças do clima sobre a produção e os preços agrícolas: ondas de frio e seu impacto sobre a cafeicultura nas regiões Sul e Sudeste do Brasil. In: LIMA, M. A. de;

CABRAL, O. M. R.; MIGUEZ, J. D. G. (Ed.). *Mudanças climáticas globais e a agropecuária brasileira*. Jaguariúna: Embrapa Meio Ambiente, 2001. p. 97-123.

_____. *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)*. [S.l.: s.n.], 2004. Encontro dos coordenadores dos subprojetos apoiados pelo PROBIO, Brasília, DF, 27 a 29 de Outubro, 2004.

_____; AMBRIZZI, T. Use of regional climate models in impacts assessments and adaptations studies from continental to regional and local scales. In: ICSHMO, 8., 2006, Foz do Iguaçu. *Proceedings...* São Paulo: INPE, 2006. p. 291–296.

_____ et al. The drought of amazonia in 2005. *Journal of Climate*, 2007.

MCCARTHY, J. J. (Ed.). *Climate change 2001: impacts, adaptation & vulnerability*. United Kingdom: Cambridge University Press, 1000 p. Contribution of Working Group II to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change.

MILES, L.; GRAINGER, A.; PHILLIPS, O. L. The impact of global climate change on tropical forest biodiversity in Amazonia. *Global Ecology and Biogeography*, n. 13, p. 553-565, 2004.

MOURA, A. D.; HASTENRATH, S. Climate prediction for Brazil's Nordeste: performance of empirical and numerical modeling methods. *Journal of Climate*, v. 17, n. 13, p. 2667-2672, 2004.

NAKICENOVIC, N.; SWART, R. (Ed.). *Emissions scenarios 2000: special report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. United Kingdom: Cambridge University, 2000. 570 p.

LI, W.; FU, R.; DICKINSON, E. Rainfall and its seasonality over the Amazon in the 21st century as assessed by the coupled models for the IPCC AR4. *Journal of Geophysical Research*, n. 111, 2006.

NEPSTAD, D. C. et al. Large scale impoverishment of Amazonian forests by logging and fire. *Nature*, v. 398, n. 6727, p. 505-508, 1999.

NOBRE, C. A.; SELLERS, P. J.; SHUKLA, J. Amazonian deforestation and regional climate change. *Journal of Climatology*, n. 4, p. 957-988, 1991.

_____; SAMPAIO, G.; SALAZAR, L. F. Mudanças climáticas e amazônia. *Ciência e Cultura*, v. 59, p. 22-27, 2007.

_____. Impacts of climate change scenarios for 2091-2100 on the biomes of South America. In: CLIVAR INTERNATIONAL CONFERENCE, 2004, Baltimore. *Proceedings...* [S.l.: s.n.], 2004.

NOWAK, R. S.; ELLSWORTH, D. S.; SMITH, S. D. Functional responses of plants to elevated atmospheric CO₂—Do photosynthetic and productivity data from FACE experiments support early predictions?. *New Phytologist*, v. 162, n. 2, p. 253–280, 2004.

OYAMA, M. D. *Consequências climáticas da mudança de vegetação do Nordeste brasileiro: um estudo de modelagem*. 2003. Tese (Doutorado)- Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, 2003.

PINTO, H. S. et al. Variabilidade climática. In: ÁGUA, Agricultura e meio ambiente: avanços e desafios. Jaguariúna: Embrapa Meio Ambiente, 2003. V. 1, p. 1-13.

PRENTICE, L. C. et al. A global bio'me model based on plant physiology and dominance, soil properties, and climate. *Journal of Biogeography*, n. 19, p. 117-134, 1992.

SALA, O. E. Biodiversity-global biodiversity scenarios for the year (2100). *Science*, n. 28, p. 1770–1774, 2000.

SALAZAR, L. F.; NOBRE, C. A.; OYAMA, M. D. Climate change consequences on the biome distribution in tropical South America. *Geophysical Research Letters*, n. 34, 2007. Doi: 10.1029/2007GL029695.

SAMPAIO, G. Regional climate change over eastern Amazonia caused by pasture and soybean cropland expansion. *Geophysical Research Letters*, n. 34, 2007. Doi: 17710.11029/12007GL030612.

SATYAMURTY, P.; NOBRE, C. A.; Dias, P. L. S. South America. *Meteorological Monographs*, v. 27, n. 49, p. 119-139, 1998. Southern Hemisphere Meteorology, cap. 3C.

SCHOLZE, M. et al. A climate-change risk analysis for world ecosystems. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, n. 103, p.13116-13120, 2006.

SELLERS, P. J. et al. Comparison of radiative physiological effects of doubled atmospheric CO₂ on climate. *Science*, v. 271, n. 5254, p. 1402-1406, 1996a.

SIQUEIRA, O. J. et al. Potential effects of global climate change for Brazilian agriculture and adaptive strategies for wheat, maize and soybean. *Revista Brasileira de Agrometeorologia*, n. 2, p. 115-129, 1994.

_____. Efeitos potenciais das mudanças climáticas na agricultura brasileira e estratégias adaptativas para algumas culturas. In: LIMA, M. A. de; CABRAL, O. M.

R.; MIGUEZ, J. D. G. (Ed.). *Mudanças climáticas globais e a agropecuária brasileira*. Jaguariúna: Embrapa Meio Ambiente, 2001. p. 65-96.

THOMAS, C. D. et.al. Extinction risk from climate change. *Nature*, v. 427, n. 6970. p. 145-148, 2004.

TRAVASSO, M. et al. Expected impacts of climate change on crop yields in the Pampas region of Argentina, Brazil and Uruguay. In: AIACC REGIONAL WORKSHOP FOR LATIN AMERICA AND THE CARIBBEAN, 2., 2004, Buenos Aires, Argentina. *Proceedings...* [S.l.: s.n.], 2004. (AIACC Project, n. LA27).

Resumo

Este artigo apresenta as projeções de anomalias de precipitação e temperatura para a América do Sul, e analisa os seus possíveis impactos sobre os ecossistemas e agrossistemas brasileiros, a partir de diferentes modelos climáticos globais do IPCC e modelos regionais. Os modelos regionais indicam que as mudanças climáticas mais intensas para o final do século 21 vão acontecer na região tropical, especificamente Amazônia e Nordeste do Brasil. Porém, apesar do avanço do conhecimento científico sobre o funcionamento do complexo sistema climático, ainda há um grau de incerteza nos cenários do clima futuro, o que indica a necessidade de melhorar a representação dos processos físicos como nuvens, precipitação, aerossóis e interação da vegetação e clima.

Palavras-chave

Mudanças climáticas. América do Sul. Gases de efeito estufa.

Abstract

This article presents the projections of precipitation and temperature anomalies for South America and examines its possible impacts on Brazilian ecosystems and agrosystems, using the different IPCC global climate models and regional models. Regional models point out that more extreme climate change at the end of the 21 century will occur in the tropical region, particularly the Amazon and Northeast of Brazil. However, although the progress in scientific knowledge, there still exist some degree of uncertainty over future climate scenarios, which shows the need to improve the representation of physical processes, such as precipitation, aerosols and vegetation-climate interaction.

Keywords

Climatic changes. South America. Greenhouse gas emissions.

Os autores

CARLOS A. NOBRE é engenheiro eletrônico pelo Instituto Tecnológico de Aeronáutica (ITA), doutor em meteorologia pelo Instituto Tecnológico de Massachusetts (MIT/USA), e pós-doutor pela Universidade de Maryland (EUA). É pesquisador titular do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (Inpe). Foi um dos arquitetos do Experimento de Grande Escala da Biosfera-Atmosfera da Amazônia (LBA) e diretor do CPTEC-Inpe.

GILVAN SAMPAIO DE OLIVEIRA é mestre e doutor em Meteorologia pelo Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (Inpe). Atualmente faz parte do Grupo de Interação Biosfera-Atmosfera da Divisão de Clima e Meio Ambiente do Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos (CPTEC/Inpe).

LUIS FERNANDO SALAZAR é engenheiro civil e mestre em Engenharia – Recursos Hídricos (Universidade Nacional da Colômbia). Atualmente faz doutorado em Meteorologia pelo Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (Inpe).