

O CLIMA ATUAL E FUTURO DA AMAZÔNIA NOS CENÁRIOS DO IPCC: A QUESTÃO DA SAVANIZAÇÃO

Luiz Antonio Cândido, Antonio Ocimar Manzi, Julio Tota, Paulo Ricardo Teixeira da Silva, Flérica Seixas Moreno da Silva, Rosa Maria Nascimento dos Santos, Francis Wagner Silva Correia

As mudanças climáticas globais, provocadas pelo aumento da concentração de gases de efeito estufa na atmosfera após a revolução industrial, afetarão todos os setores das atividades humanas e os ecossistemas, como a saúde pública, a agricultura, os recursos florestais, os recursos hídricos e as áreas costeiras, por exemplo. Uma síntese dos últimos resultados divulgados pelo Painel Intergovernamental de Mudanças Climáticas (IPCC, na sigla em inglês) indica que haverá, no decorrer deste século, aumento de temperatura por todo o planeta, sendo mais severo sobre os continentes do que sobre os oceanos e aumento do nível dos oceanos. Haverá ainda aumento de chuvas nas regiões que já são bem providas de chuvas e diminuição nas regiões que hoje sofrem com a escassez de água, além de aumentar a frequência e a intensidade dos eventos extremos, como furacões, inundações e secas prolongadas (1).

Todavia, o quadro geral de mudanças do regime de chuvas nem sempre se aplica a todas as regiões da Terra. É o caso da Amazônia, onde todos os modelos projetam aumento de temperatura, mas não concordam entre si com respeito às alterações no regime de chuvas. Alguns modelos projetam diminuição, outros aumento e alguns pouca alteração no regime de chuvas (2).

A possibilidade da floresta amazônica não resistir à mudança do regime de chuvas e ser substituída por um ecossistema de vegetação mais esparsa, do tipo savana, é levantada em vários trabalhos (3, 4, 6). As projeções de savanização da Amazônia vêm, sobretudo, dos resultados do modelo climático do Centro Hadley do Reino Unido (3, 4), pelo fato deste projetar no futuro um padrão mais freqüente de temperatura das águas superficiais do oceano Pacífico equatorial típica do fenômeno El-Niño, e também projetar aumento da temperatura das águas superficiais do oceano Atlântico na região tropical do Hemisfério Norte (6). O fenômeno El-Niño está associado a condições mais secas na Amazônia, especialmente nas regiões norte, central e leste, enquanto que o aquecimento das águas do oceano Atlântico norte está associado a situações de estação seca mais severa na região sul e sudoeste da Amazônia (7, 8, 12). Portanto, um cenário futuro de "El-Niños" e águas relativamente mais quentes no oceano Atlântico tropical norte levará, certamente, a importantes reduções de chuvas e ao alongamento da duração da estação seca em grande parte da Amazônia.

Contudo, a análise do conjunto de modelos climáticos acoplados (oceano-atmosfera), que fazem parte das análises do IPCC, não corrobora o estabelecimento de um padrão mais freqüente do tipo El-Niño para o final deste século, além de que os modelos que projetam maior mudança climática para o padrão típico de El-Niño são os que apresentam as mais pobres simulações de variabilidade desse fenômeno no clima presente (6, 9). A probabilidade de configuração de um padrão mais freqüente de El-Niño neste século é de apenas 16%, enquanto que o cenário mais provável, de 59%, é o de que esse padrão não deve configurar-se (6).

Este artigo utiliza os resultados dos modelos do IPCC para analisar as projeções futuras de

mudanças anuais de temperatura e precipitação, detalhando-as por sub-bacias da Amazônia, com ênfase para a questão da sua savanização.

DADOS E MÉTODOS Foram utilizados os resultados de 21 modelos do Projeto de Intercomparação de Modelos Acoplados (CMIP, na sigla em inglês) do IPCC. Trata-se de modelos globais com acoplamento da atmosfera com os oceanos, cujas simulações serviram de base para a elaboração do quarto relatório de avaliação do Grupo de Trabalho I do IPCC, divulgado em fevereiro de 2007 (1), e para os relatórios subsequentes dos Grupos II e III. Os modelos apresentam resoluções espaciais diferentes entre si, que variam, em latitude e longitude, de 1,125° a 5°. A integração dos modelos foi iniciada em algum momento da segunda metade do século XVIII. Do início da integração ao final do século XX os modelos foram forçados com a evolução das concentrações de gases de efeito estufa (GEE) medidas no período. A partir do início do século XXI os modelos foram forçados com concentrações de GEE projetados para diferentes cenários de emissões, com base no Relatório Especial de Cenários de Emissões (SRES, da sigla em inglês) do IPCC, definidos em função de cenários projetados de aumento populacional e desenvolvimento socioeconômico. Um cenário mais otimista (B1), um intermediário (A1B) e um pessimista (A2) são analisados neste artigo. Eles projetam ao final do século XXI, respectivamente, concentrações atmosféricas de GEE de 600, 850 e 1250 ppmv (partes por milhão em volume), equivalentes em concentrações de gás carbônico. Foram analisadas as variáveis temperatura do ar à superfície e a precipitação, através da comparação dos resultados dos modelos com dados observacionais (climatologia) organizados em pontos de grade, no caso a Base de Dados Globais da Unidade de Pesquisa Climática (Climatic Research Unit (CRU) Global Dataset) (10). Nas comparações numéricas, o clima atual refere-se à média do período 1961-1990, indicado por OBS para a climatologia observada e 20c3m para os modelos, e o clima futuro refere-se à média do período 2061-2090, ou seja, um século mais tarde. É analisada a média dos resultados dos modelos, indicada por MULTI, que, dependendo dos cenários, compreende: todos os 21 modelos no clima atual (20c3m), 17 no cenário otimista (B1), 19 no cenário intermediário (A1B) e 16 no cenário pessimista (A2). Para alguns cenários, também são analisados modelos individuais, tais como o do Centro Hadley (HADCM3), o do Instituto de Estudos Espaciais Goddard da Nasa dos EUA (GIER) e o do Serviço Meteorológico da França (CNM3), por apresentarem tendências diferentes de alteração do clima da região. Como os resultados dos modelos não são homogêneos para toda a bacia amazônica, estes foram analisados para as sub-bacias dos rios: Negro, Madeira, Juruá-Purus, Ica-Jau e Tapajós-Xingu. Localmente é feita uma análise da precipitação mensal média na região de Belém no estado do Pará.

COMO OS MODELOS REPRESENTAM O CLIMA ATUAL? Um importante aspecto de medida de desempenho de um modelo ou conjunto de modelos, quanto aos seus prognósticos, é a capacidade de simular os elementos climáticos importantes no clima atual. A representação da temperatura e precipitação do clima atual considerando a média dos valores anuais das simulações (20c3m) dos modelos (MULTI) é comparada com as observações (OBS) em toda a bacia amazônica e nas suas sub-bacias. Os resultados são apresentados na [Tabela 1](#). A análise de toda a bacia (coluna Amazônia) indica que em média os modelos são 0,6°C mais frios e também mais secos, produzindo 24% menos chuva que a média anual observada para a bacia no período 1961 e 1990. Nas sub-bacias o comportamento dos modelos se repete, sendo as sub-bacias do Negro, Juruá-Purus e Tapajós-Xingu as mais secas, respectivamente, com 37%, 31% e 31% de chuva a menos e viés de

temperatura variando de $-0,2^{\circ}\text{C}$ a $-0,8^{\circ}\text{C}$ (condição mais fria). Os modelos HADCM3, GIER e CNM3 também simulam um clima mais seco para a Amazônia do que o observado, com déficits de chuva anual de 10%, 20% e 10%, respectivamente. No caso da temperatura do ar, enquanto o CNM3 é mais frio em cerca de $0,8^{\circ}\text{C}$, o HADCM3 e o GIER são mais quentes em cerca de $1,1^{\circ}\text{C}$ e $1,3^{\circ}\text{C}$. O padrão de clima mais seco dos modelos HADCM3, GIER e CNM3 se mantém nas sub-bacias, com exceção da do Madeira, onde o HADCM3 e o CNM3 apresentam um viés positivo na precipitação de 11% e 25%, respectivamente, e na sub-bacia do Negro, onde o GIER tem viés negativo na temperatura de $-0,5^{\circ}\text{C}$. Em geral, é nas sub-bacias do Negro e Tapajós-Xingu que os modelos apresentam os maiores desvios da climatologia de precipitação e de temperatura do ar. São também essas sub-bacias as comumente mais afetadas pelo fenômeno El-Niño.

Em termos de variabilidade inter-anual, alguns modelos apresentam grande variabilidade, como no caso HADCM3 e do CNM3, enquanto outros mostram pequena variação, caso do GIER, quando comparados ao clima observado (OBS), tanto para temperatura do ar ([Figura 1a](#)) quanto para a precipitação ([Figura 1b](#)). Na média dos modelos (MULTI) a variabilidade inter-anual é bem menor que a climatologia. Isso significa que a maioria dos modelos não consegue capturar a variabilidade inter-anual do clima atual, enquanto que alguns modelos tendem a intensificar esse padrão e, portanto, a superestimar a ocorrência de eventos extremos. Em geral, na maioria dos modelos, a precipitação é subestimada em todas as sub-bacias, com ênfase para a estação chuvosa (não apresentado). Apesar da grande variabilidade entre os modelos na simulação do clima atual, eles são incapazes de capturar a variação inter-anual da precipitação (ver faixa de desvio padrão na [Figura 1b](#)). A temperatura do ar é melhor representada pelos modelos, que em média simulam um clima anual ligeiramente mais ameno que o observado, mas com variabilidade intra-anual muito maior que a observada, especialmente na estação seca, quando os mesmos tendem a superestimar a temperatura do ar observada (não mostrado).

O QUE OS MODELOS PROJETAM PARA O CLIMA DO SÉCULO XXI? As projeções climáticas futuras mostram tendência de aquecimento nos três cenários (B1, A1B e A2) e em todas as sub-bacias. Na bacia amazônica como um todo, os aumentos de temperatura são de $2,3^{\circ}\text{C}$, $3,5^{\circ}\text{C}$ e $3,4^{\circ}\text{C}$, nos cenários B1, A1B e A2, respectivamente, quando comparado os valores médios do período 2061-2090 com os do período 1961-1990. Essa tendência de aquecimento é praticamente a mesma em todas as sub-bacias ([Tabela 1](#)) no conjunto dos modelos (MULTI). Na avaliação individual dos modelos para toda bacia amazônica e suas sub-bacias, verifica-se um maior aquecimento para os modelos HADCM3, que apresenta variações de temperatura superiores a $3,0^{\circ}\text{C}$ e $5,0^{\circ}\text{C}$ nos cenários B1 e A2, respectivamente, e CNM3 com variações de temperatura do ar de 3°C a 4°C para os cenários A1B e A2. O modelo GIER indica menores tendências de aquecimento, da ordem de 2°C e 3°C , nos cenários B1 e A2. O prognóstico de precipitação a partir da média dos modelos (MULTI) sugere uma pequena redução na precipitação de 2% a 3% nos cenários B1 e A2, enquanto no cenário A1B predomina um pequeno aumento, da ordem de 4%, mas com valores maiores nas sub-bacias a oeste e ao sul da região ([Tabela 1](#)). As maiores reduções na precipitação são previstas pelo modelo HADCM3, sendo da ordem de 11%(B1) e 16%(A2) para toda bacia, e de 21%(B1) e 30%(A2) para a bacia do Negro, e 20% (B1) e 27% (A2) para a bacia do Tapajós-Xingu. Os modelos GIER e CNM3 apresentam variações positivas de precipitação, mas com valores relativamente baixos ([Tabela 1](#)).

A tendência de aumento da temperatura do planeta nas três primeiras décadas do século XXI é de 0,2°C por década, em qualquer cenário de aumento de emissões de GEE (1). No caso da Amazônia, a taxa de aumento de temperatura do ar foi próxima de 0,3°C por década no mesmo período ([figura 1a](#)). A taxa de aquecimento mais elevada na Amazônia, em comparação com a taxa global, é esperada porque o aumento da temperatura sobre as regiões oceânicas, que cobrem praticamente 70% da superfície do planeta, é mais lento (1).

Os modelos HADCM3 e CNCM3 indicam tendências distintas de aquecimento até o final do século XXI para o cenário A2. O HADCM3 apresenta uma tendência mais linear na primeira metade do século para em seguida crescer de forma mais abrupta, com tendência de aumento da temperatura de 0,74°C por década na segunda metade do século. O CNCM3 tem comportamento e taxa de aquecimento por década semelhante ao MULTI-A2, de cerca de 0,42°C por década na média do século.

Para a precipitação o conjunto dos modelos não apresenta uma tendência de variação significativa com o tempo. No cenário A2 o modelo CNCM3 apresentou tendência de aumento de precipitação, principalmente para a segunda metade do século, enquanto o modelo HADCM3 exibe uma tendência acentuada de redução da precipitação desde a primeira metade do século, acentuando-se ainda mais na segunda metade e com grande variabilidade inter-anual ([tabela 1](#) e [figura 1b](#)).

SAVANIZAÇÃO DA AMAZÔNIA O nível de seca da Amazônia previsto pelo modelo HADCM3 levaria a substituição de grande área de floresta na Amazônia por um tipo de vegetação de savana (4). Estudos de alteração de bioma, utilizando cenários de mudanças climáticas globais do IPCC, têm sugerido a possibilidade de savanização de parte da Amazônia até o final deste século, resultados ressaltados recentemente pelo IPCC (11). Grande parte dos estudos utiliza-se das saídas geradas pelo modelo HADCM3. Recentemente, uma avaliação de um conjunto mais amplo de dados do IPCC, resultantes de 15 modelos climáticos, mostrou que os modelos que apresentam maiores desvios da climatologia nessa análise (ex. HADCM3) apresentam também uma ampla área de savanização da Amazônia, enquanto que os modelos com menores desvios da climatologia (ex. GISS) indicam pequenas áreas de avanço de savana sobre a floresta (ver Fig. 3 em 5). Isso indica que os resultados são dependentes dos modelos climáticos e dos cenários utilizados, onde aparentemente modelos que apresentam grandes desvios da climatologia (ex. modelos de clima mais seco na segunda metade do século XX), tendem a superestimar e, até mesmo, a antecipar uma nova condição de equilíbrio, no caso o de um clima inadequado para manter os ecossistemas atuais, que seriam substituídos por um tipo de vegetação de savana. A [Figura 2](#) apresenta valores médios mensais de precipitação no período 1961-1990 para uma área de aproximadamente 300 km por 400 km ao sul de Belém, estado do Pará, onde predomina um ecossistema de floresta tropical úmida típico da Amazônia. A curva verde representa a climatologia de precipitação observada e a curva preta a climatologia do modelo HADCM3. Neste caso, fica evidenciado que o modelo não é capaz de reproduzir as observações. A climatologia de chuva prevista pelo modelo foi abaixo da observada em todos os meses do ano e, na média anual, é em torno de 50% mais seco que a observação. A curva vermelha representa a projeção do modelo HADCM3 para a precipitação no período 2061-2090 no cenário pessimista de emissões (A2). Nesse cenário haveria uma redução adicional da precipitação anual de aproximadamente 56% em relação à precipitação do próprio modelo no período 1961-1990. Mesmo nos cenários B1 e A1B a redução de precipitação do modelo

HADCM3 é drástica nessa área (não apresentado). Para efeito de comparação, a [figura 2](#) apresenta também dados climatológicos de uma área de ecossistema típico de savana situada no sul do estado de Tocantins. Nota-se que o regime anual de chuvas dessa região de savana é similar ao do modelo HADCM3 para a região de Belém, exceto que a precipitação anual é aproximadamente 40% superior à precipitação do modelo, ou seja, a precipitação anual medida em uma área de vegetação típica de savana é muito maior que a precipitação produzida pelo modelo para uma área típica de floresta tropical úmida. Por outro lado, o método de análise de mudança climática considera que os desvios que os modelos apresentam na simulação do clima atual são sistemáticos e, portanto, que esses desvios devem se propagar nas projeções dos climas futuros. Desta maneira, a redução projetada de aproximadamente 56% nas precipitações do modelo HADCM3 para o período 2061-2090 (curva vermelha) é uma forte indicação de mudança climática que pode levar a substituição da floresta atual.

CONSIDERAÇÕES FINAIS As mudanças climáticas globais já estão em curso. Elas provocam aumento generalizado da temperatura do ar e mudanças nos regimes de precipitação. Somente o aumento de temperatura já afetará a biodiversidade dos ecossistemas da Amazônia de maneira dramática. Eventos extremos mais frequentes e intensos, como enchentes e secas prolongadas, são fatores adicionais de estresse para os ecossistemas e a vida das populações. Entretanto, devido às limitações dos atuais modelos climáticos acoplados em reproduzir o clima atual da Amazônia, ainda é impossível projetar com segurança a intensidade com que as mudanças afetarão a região. As florestas intactas podem ser mais resistentes à seca do que os modelos de clima-vegetação pressupõem? Diversos fatores ainda não são (ou são mal) representados nesses modelos, tais como a profundidade correta da zona de raízes profundas das árvores (que implica em um reservatório maior de água disponível para as plantas), dificultam a resposta a essa questão. Os modelos estimam uma possibilidade de seca excessiva da Amazônia com o potencial colapso da floresta no século XXI, entretanto os processos de produção de chuva na região são pobremente representados nos modelos. Por exemplo, uma parcela substancial das chuvas anuais na região costeira da Amazônia é devida às linhas de instabilidade que se formam a partir de circulações locais de brisa de mar na costa tropical atlântica. A resolução espacial grosseira dos modelos climáticos não permite que eles reproduzam esse processo. Além disso, é improvável que os desvios apresentados pelos modelos no clima atual se reproduzam sistematicamente nos futuros cenários de aumento de concentração de GEE.

O potencial de previsibilidade do clima global utilizando os modelos climáticos é baseado na estreita relação entre condição de contorno oceânica e continental, e em como a variabilidade e o acoplamento dessas forçantes com a atmosfera se processa, particularmente na região tropical e, portanto, espera-se que essas características sejam preservadas nos modelos acoplados atmosfera-oceano (AOGCM, sigla em inglês). Alguns AOGCM projetam no futuro uma situação mais permanente de aquecimento das águas superficiais do oceano Pacífico equatorial e do oceano Atlântico equatorial norte, com conseqüências diretas sobre a diminuição das taxas de precipitação na Amazônia, que pode levar a um novo clima, mais adequado a ecossistemas de vegetação típica de savana do que de floresta tropical úmida. Embora esse seja um quadro que não deva ser desconsiderado, há necessidade de se ampliar os conhecimentos científicos sobre o clima da Amazônia e de sua interação com os ecossistemas e, também, de aprimorar os atuais modelos climáticos para reduzir as incertezas dos impactos das mudanças climáticas globais na Amazônia.

Luiz Antonio Cândido é meteorologista, pesquisador da Coordenação de Pesquisa em Clima e Recursos Hídricos/CPCR e do Núcleo de Modelagem Climática e Ambiental/NMCA do Instituto Nacional de Pesquisas da Amazônia (Inpa).

Antonio Ocimar Manzi é físico, pesquisador titular do Inpa e gerente executivo do Experimento de Grande Escala da Biosfera-Atmosfera na Amazônia(LBA). Coordena o NMCA e o Grupo de Micrometeorologia do LBA no Inpa.

Júlio Tota é meteorologista, atualmente pesquisador bolsista do LBA no Inpa.

Paulo Ricardo Teixeira-Silva é meteorologista, atualmente bolsista de desenvolvimento tecnológico e industrial do CNPq/Finep, no LBA.

Flérida Seixas Moreno da Silva é física, mestranda da pós-graduação em ciências ambientais da Universidade Federal do Pará e desenvolve sua pesquisa junto ao NMCA do LBA/Inpa.

Rosa Maria Nascimento dos Santos é meteorologista, pesquisadora no NMCA do Inpa através do programa fixação de doutores da Fapeam.

Francis Wagner Silva Correia é físico, coordenador e professor do curso de meteorologia tropical da Universidade do Estado do Amazonas (UEA) e pesquisador no NMCA do Inpa.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. IPCC, AR4, WGI Report. Cambridge Univ. Press. 2007.
2. Li, W.; Fu, R.; Dickinson, R. E. *J. Geophys. Res.*, 111, D02111, 2006.
3. Cox, P.M.; Betts, R. A.; Jones, C. D.; Spall, S. A.; Totterdell, I. *Nature* 408,184–187, 2000.
4. Cox, P.M.; Betts, R.A.; Collins, M.; Harris, P. P.; Huntingford, C. C.D.; Jones, C. D. *Theoretical and Applied Climatology*, 78, 137-156, 2004.
5. Salazar, L. F.; Oyama, M. D. XIV CBMet:Anais:3637.Pdf, 6pp., 2006.
6. Collins, M AE. *Climate Dynamics* 24, 89–104, 2005.
7. Schöngart, J.; Junk, W. J. *Journal of Hydrology*, v335, 124-132, 2007.
8. Marengo, J.; Nobre, C.; Tomasella, J.; Sampaio, G.; De Oliveira, R.; Camargo, H.; Oyama, M.; Alves, L. *Journal of Climate*, 2006.
9. Cane, M. A. *Earth and Planetary Science Letters*, 164, 1-10, 2005.
10. New, M.; Lister, D.; Hulme, M.; Makin, I. *Climate Res.*, 21, 1-25, 2000.
11. IPCC, AR4, WGII Report. Cambridge Univ. Press. 2007.
12. Souza, E.B.; Kayano, M. T.; Tota, J.; Pezzi, L.P.; Fisch, G.; Nobre, C. *Acta Amazônica*, v. 30, n. 2, p. 305-318, 2000.