Revista Brasileira de Geografia Física

Homepage: www.ufpe.br/rbgfe

INFLUÊNCIA DE MUDANÇAS CLIMÁTICAS NO BALANÇO HÍDRICO DA AMAZÔNIA OCIDENTAL

Ailton Marcolino Liberato[1], José Ivaldo Barbosa de Brito[2]

[1] Doutorando em Meteorologia - UACA/UFCG, Av. Aprígio Veloso 882, Bodocongó, CEP 58109-970, Campina Grande, PB. Fone: (83) 3310-1054.
[2] Prof. Dr. da Unidade Acadêmica de Ciências Atmosféricas – UACA/UFCG.

Artigo recebido em 15/06/2010 e aceito em 30/07/2010

R E S U M O
A presente pesquisa teve por objetivo investigar possíveis alterações em componentes do balanço hídrico climático, associadas a diferentes cenários (A2 e B2) das mudanças climáticas do IPCC, para a Amazônia Ocidental (Acre, Amazonas, Rondônia e Roraima). Os dados climatológicos de temperatura do ar e totais de precipitação pluvial usados como referência neste estudo, são oriundos do INMET (1961-2005), da CEPLAC (1983-1999) e da reanálise do NCEP/NCAR (1983-1995). O método utilizado na elaboração do balanço hídrico é o de Thornthwaite & Mather (1957) modificado por Krishan (1980). Os resultados das projeções mostram tendência de clima mais seco, diminuição na umidade do solo, redução na vazão dos rios, aumento no risco de incêndio e diminuição no escoamento superficial e sub-superficial para a Amazônia Ocidental até 2100.
Palavras-chave: cenários, índices climáticos, Amazônia.

Influence of climate change on water budget of Western Amazonia

ABSTRACT
The main objective of this study was investigate possible alterations in the climatic water budget components associated with different scenarios (A2 and B2) of the IPCC to Amazonian Western (Acre, Amazonas, Rondônia and Roraima). The climatological data of air temperature and precipitation from the INMET (1961-2005), CEPLAC (1983-1999) and NCEP/NCAR reanalysis (1983-1995) were used in the present study. The Thornthwaite and Mather (1955) method was used in the elaboration of the climatic water budget modified by Krishan (1980). The results of the projections show drier climate trends and decrease of the soil moisture, reduction in the rivers discharge, increase in the fire risk and decrease in the runoff for the Amazonian Western up to 2100.
Keywords: scenarios, climate index, Amazonian.

Introdução

O balanço hídrico pode ser realizado tanto na atmosfera como na superfície da Terra, no solo ou, ainda, no sistema Terra-atmosfera. Na atmosfera o balanço é composto das seguintes variáveis: água precipitável (armazenamento de água na atmosfera); precipitações; convergência do fluxo de umidade atmosférico e a evaporação. Da mesma forma, em escala climatológica o ciclo hidrológico de uma grande bacia requer as mesmas variáveis atmosféricas, assim como a água armazenada na bacia e a divergência do escoamento superficial. Do ponto de vista agroclimatológico, uma variável importante no balanço hídrico é saber o armazenamento de água na camada de solo onde se situa o sistema radicular das plantas. A percolação para camadas mais profundas do solo e o escoamento superficial são contabilizado como excesso.

O balanço hídrico considera-se que o solo oferece certa resistência às perdas de água para a atmosfera, e que esta aumenta com a redução da água armazenada no solo. Este método leva em conta que, quando ocorre, no período considerado, um saldo positivo entre a precipitação e a evapotranspiração potencial, este é incorporado ao solo, reabastecendo-o e quando o solo atinge sua capacidade de armazenamento pleno, esse saldo passa a ser considerado excesso (escoamento e drenagem profunda); por sua vez, o balanço de água tem, como variáveis derivadas (saída), o armazenamento de água no solo, a variação do armazenamento de água do solo, negativo acumulado, a evapotranspiração real, o excesso e a deficiência hídrica.

* E-mail para correspondência: ailton@dca.ufcg.edu.br; ivaldo@dca.ufcg.edu.br.

A grande demanda atual por recursos hídricos faz-se necessário o conhecimento do ciclo da água dentro de uma bacia hidrográfica, principalmente das variáveis de precipitação e evapotranspiração. De acordo com Camargo (1971), para saber se uma região apresenta deficiência ou excesso de água durante um ano, é indispensável comparar dois elementos opostos do balanço hídrico: a precipitação que fornece a umidade para o solo e a evapotranspiração que consome a umidade do solo. Segundo Pereira *et al*. (2002), a disponibilidade hídrica pode ser quantificada pelo balanço hídrico climatológico, no qual fica evidenciada a flutuação temporal de períodos com excedente e com deficiência. O balanço hídrico de uma região tende a se manter sem grandes alterações naturais, mas com o aumento populacional e o uso indiscriminado da água, as ações antrópicas podem acabar interferindo no ciclo hidrológico por meio das taxas de precipitação, de infiltração no solo, da evapotranspiração e do escoamento superficial e profundo.

Segundo levantamento do INPE (2008) para a Amazônia Ocidental durante o período de 1988 a 2007, as taxas estimadas de desmatamento em relação à área total dos estados neste período foram 21,1% em Rondônia, 7,4% no Acre, 1,1% no Amazonas e 2,4% em Roraima. Cenários gerados pelo Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos – CPTEC/Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais – INPE até o final do século XXI indicam reduções de chuva de até 40% e aquecimento de até 8ºC na região Amazônica (Marengo et al., 2008). De acordo com Hutyra et al. (2005), eventos climáticos extremos como secas induzidas tanto pela variabilidade climática natural (por exemplo, dos padrões de circulação do Atlântico, que causaram a seca de 2005 na Amazônia ocidental, e dos eventos El Niño) quanto pelas atividades humanas (mudanças no uso do solo), podem fragmentar a Floresta Amazônica e transformar grandes áreas em savana.

Diante do exposto o objetivo deste trabalho é avaliar os impactos dos cenários futuros das mudanças climáticas nas componentes do balanço hídrico climático da Amazônia Ocidental.

Neste contexto e se considerando a importância das mudanças climáticas para o futuro do planeta, o objetivo deste trabalho é avaliar as condições climáticas atuais e elaborar alguns cenários climáticos, com base em observações de superfície, para a referida região.

Material e métodos

Neste trabalho foram utilizados dados meteorológicos referentes à temperatura do ar média e totais mensais de precipitação do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET) de 1961 a 2005, Comissão Executiva do Plano da Lavoura Cacaueira (CEPLAC) Scerne et al. (2000) de 1983 a 1999 e reanálise do National Centers for Environmental Prediction – NCEP/The National Center for Atmospheric Research – NCAR de 1983 a 1995. O estudo compreende 22 estações meteorológicas espacialmente bem distribuídas nos quatro estados da Amazônia Ocidental (Acre, Amazonas, Rondônia e Roraima).

Foram realizados estudos com os seguintes cenários: atual (dados observados de 1961 a 2005), com aumento e redução na precipitação em 15% até 2100 em relação à média atual (segundo cenários do IPCC), e aumentando em 3,8ºC A2 (altas emissões) e em 1,3ºC B2 (baixas emissões) a temperatura. Este aumento de temperatura do ar está baseado em uma média de seis modelos climáticos do IPCC TAR (Marengo, 2006) em relação à média atual. O cenário A2 – descreve um mundo futuro muito heterogêneo no qual a regionalização é dominante, com alto índice de crescimento populacional, e menos preocupação em relação ao desenvolvimento econômico rápido, nesse mundo existirá um fortalecimento de identidades culturais regionais, com ênfase em valores da família e tradições locais. O Cenário B2 – descreve um mundo futuro no qual a mudança tecnológica é mais diversa. A ênfase está em soluções locais, sustentabilidade econômica, social e ambiental, e nas iniciativas comunitárias e inovação social em lugar de soluções globais. Esses cenários entre outros são os utilizados pelos relatórios de Impacto Climático do Painel Intergovernamental de Mudanças Climáticas (Intergovernmental Panel of Climate Change – IPCC).

Calcularam-se e analisaram-se os índices climáticos para as condições atuais da Amazônia Ocidental, assim como, para os cenários A2 e B2 do IPCC (2007) a partir da condição de uma capacidade máxima de água disponível no solo (CAD) de 150 mm, utilizando a metodologia proposta por Thornthwaite & Mather (1957), com modificação de Krishan (1980) A evapotranspiração potencial (ETP) foi estimada pelo método de Thornthwaite (1948). Os mapas de distribuição espacial dos resultados foram elaborados no programa Surfer versão 7.0, pelo método “Kriging”.

Resultados e discussão

Precipitação pluviométrica

A análise da precipitação pluvial é fundamental, pois é uma variável base de entrada no cálculo do balanço hídrico.

Foi analisada a precipitação anual na Amazônia Ocidental durante o período de 1961 a 2005 (Figura 1a), e verificou-se que as localidades que apresentam maiores valores de precipitação são Iauaretê, Codajás e São Gabriel da Cachoeira, que esta localizada a noroeste de Manaus no Estado do Amazonas, com valor máximo de 3295 mm/ano. As localidades com menores valores de precipitação esta a nordeste da região (Uiramutã e Boa Vista em Roraima). Localidades como Ouro Preto D’Oeste (Rondônia) e Rio Branco (Acre), apresentam precipitação próxima aos 2000 mm/ano.

Estudos realizados por Salati et al. (2007) mostram que a precipitação observada entre 1961 a 1990 para a Amazônia Legal foi de 2123 mm/ano, as projeções médias dos modelos (Geophysical Fluids Dynamic Laboratories – GFDL e Hadley Centre for Climate Prediction and Research – HadCM3) para o cenário A2, indicam precipitações de 2105,7 mm/ano (2011 a 2040), 2080 mm/ano (2041 a 2070) e 2069,4 mm/ano

(2071 a 2100), e para o cenário B2, 2109,4 mm/ano (2011 a 2040), 2085,1 mm/ano (2041 a 2070) e 2051,3 mm/ano (2071 a 2100), respectivamente, ou seja, redução em relação à média atual.

Temperatura do ar

Foi analisada a temperatura média do ar na Amazônia Ocidental durante o período de 1961 a 2005 (Figura 1b), e verificou-se uma média anual variando entre 24,4ºC e 28ºC. As localidades com maiores valores de temperaturas são Boa Vista e Caracaraí em Roraima e Parintins no Estado do Amazonas. Os menores valores foram registrados nos municípios de Ouro Preto d'Oeste e Porto Velho em Rondônia, Rio Branco, Tarauacá e Cruzeiro do Sul no Estado do Acre. A temperatura do ar é variável no tempo e no espaço, e pode ser regulado por vários fatores, o efeito da incidência diferenciada da radiação solar em função da latitude é um dos fatores controladores da temperatura do ar. Na Amazônia Ocidental observou-se que os municípios próximos à linha do equador apresentaram valores mais elevados de temperatura do ar, enquanto as localidades mais ao sul/norte apresentaram valores menores. Ressalta-se que a topografia também é um fator importante na determinação da temperatura do ar, pois áreas elevadas mesmo próximas do equador devem apresentar temperaturas amenas. Porém, como a Amazônia Ocidental brasileira situa-se em uma grande planície, com exceção das terras altas do extremo norte do Amazonas, Roraima e extremo sul de Rondônia, o principal fator para a variabilidade espacial da temperatura do ar é a latitude.

De acordo com Cândido et al. (2007), as projeções climáticas futuras mostram tendência de aquecimento na bacia amazônica como um todo, nos cenários B1(otimista), A1B (intermediário) e A2 (pessimista), quando compara-se valores médios previstos em cada um destes cenários para período 2061-2090 com os observados no período 1961-1990. Cândido et al. (2007) ainda afirmaram que 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 3,0ºC e 5,0ºC nos cenários B1 e A2, respectivamente, e CNCM3 (serviço meteorológico da França) com variações de temperatura do ar de 3,0ºC a 4ºC para os cenários A1B e A2. O modelo GIER (Instituto de Estudos Especiais Goddard da NASA dos EUA) indica menores tendências de aquecimento, da ordem de 2ºC e 3ºC, nos cenários B1 e A2, respectivamente.

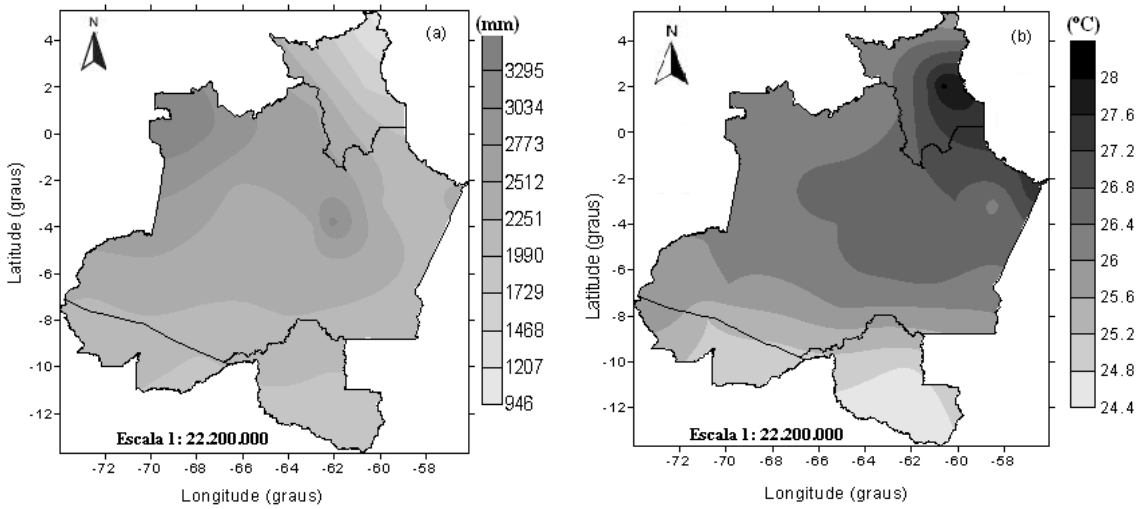


Figura 1. Distribuição espacial de precipitação média anual (a) e temperatura do ar média (b) na Amazônia Ocidental para o período de 1961 a 2005.

Evapotranspiração potencial anual média

Analisando a distribuição espacial da climatologia atual da evapotranspiração potencial (ETP) para a Amazônia Ocidental (Figura 2a), observam-se maiores valores entre os paralelos 4ºS e 3ºN e meridianos 58ºW a 62ºW, numa faixa que abrange o estado do Amazonas e Roraima, com valores entre 1723 mm/ano e 2123 mm/ano. Por outro lado, observa-se que os menores valores de ETP foram observados no sul e norte da Amazônia Ocidental, com valores entre 1323 mm/ano e 1523 mm/ano. Em uma faixa que se estende entre leste-oeste do Amazonas e sul-norte de Roraima a evapotranspiração potencial varia entre 1523 mm/ano e 1723 mm/ano. A evapotranspiração potencial é dependente da temperatura do ar, portanto, os locais que apresenta maiores temperatura, consequentemente, apresentam maiores valores de evapotranspiração potencial. Analisando os resultados das projeções de ETP para o cenário A2 do IPCC até 2100 para a Amazônia ocidental (Figura 2b), foram observados valores variando entre 2123 mm/ano ao sul da região e até 3723 mm/ano no centro leste do estado de Roraima, o que representa um aumento de aproximadamente 60% do valor da ETP atual. Na parte central do estado do Amazonas observa-se uma variação significativa na evapotranspiração potencial, variando entre 2523 mm/ano a 3123 mm/ano, ou seja, um valor climatológico aproximadamente 80% superior ao atual. Isto mostra que caso esta nova demanda não seja suprida por vapor d'água importado de outras partes e/ou evapotranspiração real local a atmosfera da Amazonas Ocidental torna-se muito seca.

Analisando os resultados das projeções de ETP para o cenário B2 do IPCC até 2100 para a Amazônia ocidental (Figura 2c), observam-se valores variando entre 1323 mm/ano ao sul de Rondônia até 2523 mm/ano ao leste do estado de Roraima. Observam-se valores variando entre 1523 mm/ano e 1723 mm/ano numa faixa que estende entre os paralelos 8ºS a 14ºS e meridianos 60ºW a 72ºW. Valores variando entre 1723 mm/ano e 1923 mm/ano são observados na faixa leste-oeste paralelo 6ºS a 8ºS no estado do Amazonas e estende-se até o extremo norte do estado de Roraima. Na parte central do Estado do Amazonas, próximo à região de Manaus, são observados valores em torno de 1923 mm/ano a 2123 mm/ano. Estes números mostram que caso o cenário B2 realmente ocorra a ETP da Amazônia Ocidental aumentaria de 15% no sul de Rondônia, 20% no Norte de Roraima e 25% no Amazonas e sul de Roraima. Mesmo em um cenário B2 há uma tendência da atmosfera da Amazônia Ocidental torna-se mais seca que a atual, caso a nova demanda de umidade não seja atendida. As análises dos resultados do cenário atual e das projeções de ETP, mostram que a Amazônia Ocidental apresenta um tipo climático megatérmico (A'), segundo as subdivisões climáticas propostas por Thornthwaite (1948).

Salati et al. (2007) encontraram os seguintes valores médios de ETP para a Amazônia Legal: 1520 mm/ano (dados observados 1961 a 1990) e média dos modelos (GFDL e HadCM3) para o cenário A2, 1699,4 mm/ano (2011 a 2040), 1841 mm/ano (2041 a 2070) e 1926,6 mm/ano (2071 a 2100), e cenário B2, 1702,1 mm/ano (2011 a 2040), 1803 mm/ano (2041 a 2070) e 1898,8 mm/ano (2071 a 2100), respectivamente. Em ambos os períodos analisados das projeções, quando comparados com a média climatológica, verificaram-se aumentos.

Os cenários gerados pelo modelo do Hadley Center projetam para a Amazônia um clima tipo savana, a partir do ano 2050. Essa Amazônia seca possui vegetação com maiores índices de evapotranspiração e seus solos tendem a ficar mais secos durante os meses sem água do que solos de regiões muito úmidas, e isso a torna mais vulnerável a incêndios florestais, o principal agente de conversão de florestas em savana (Krug, 2008).

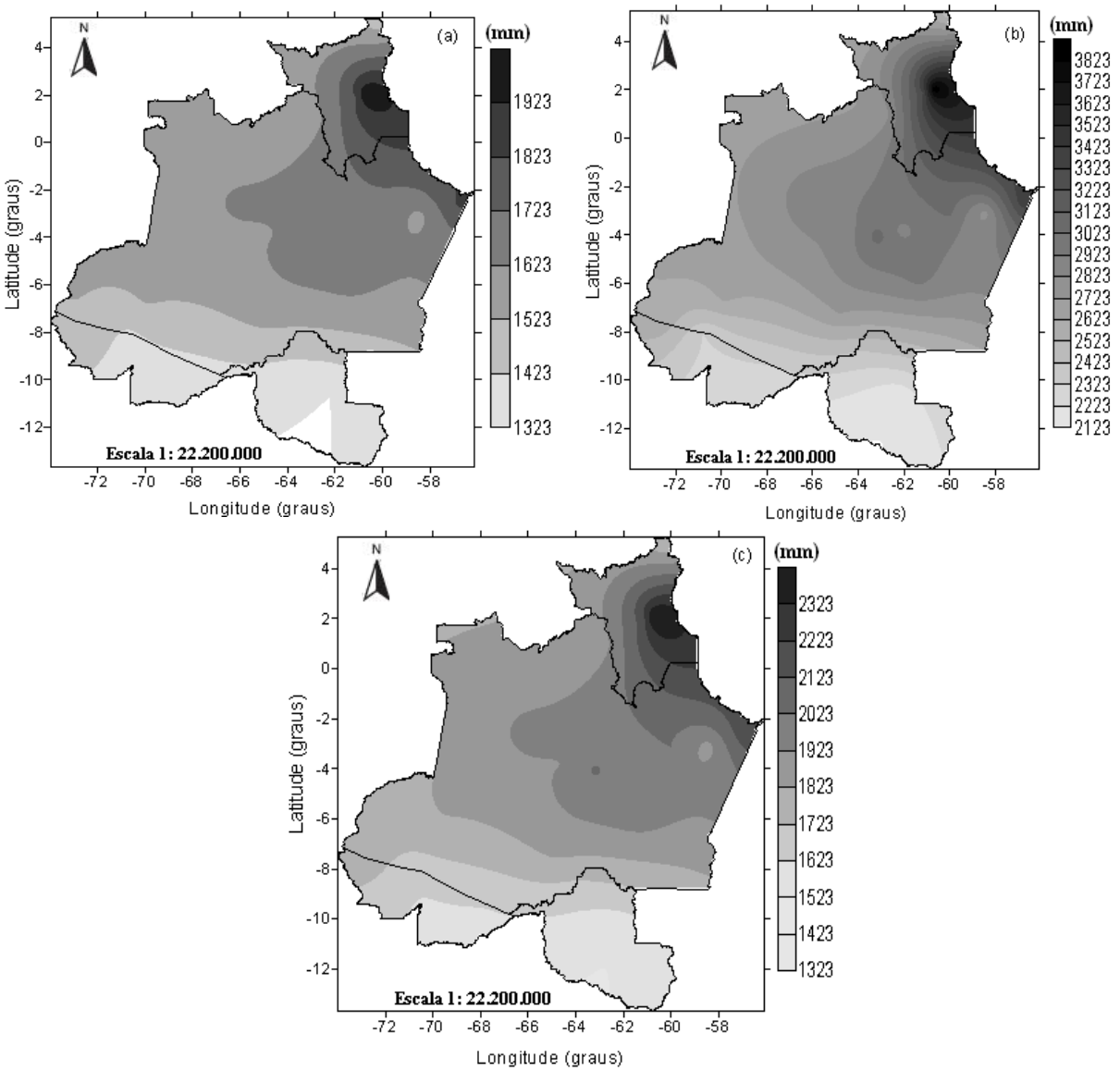


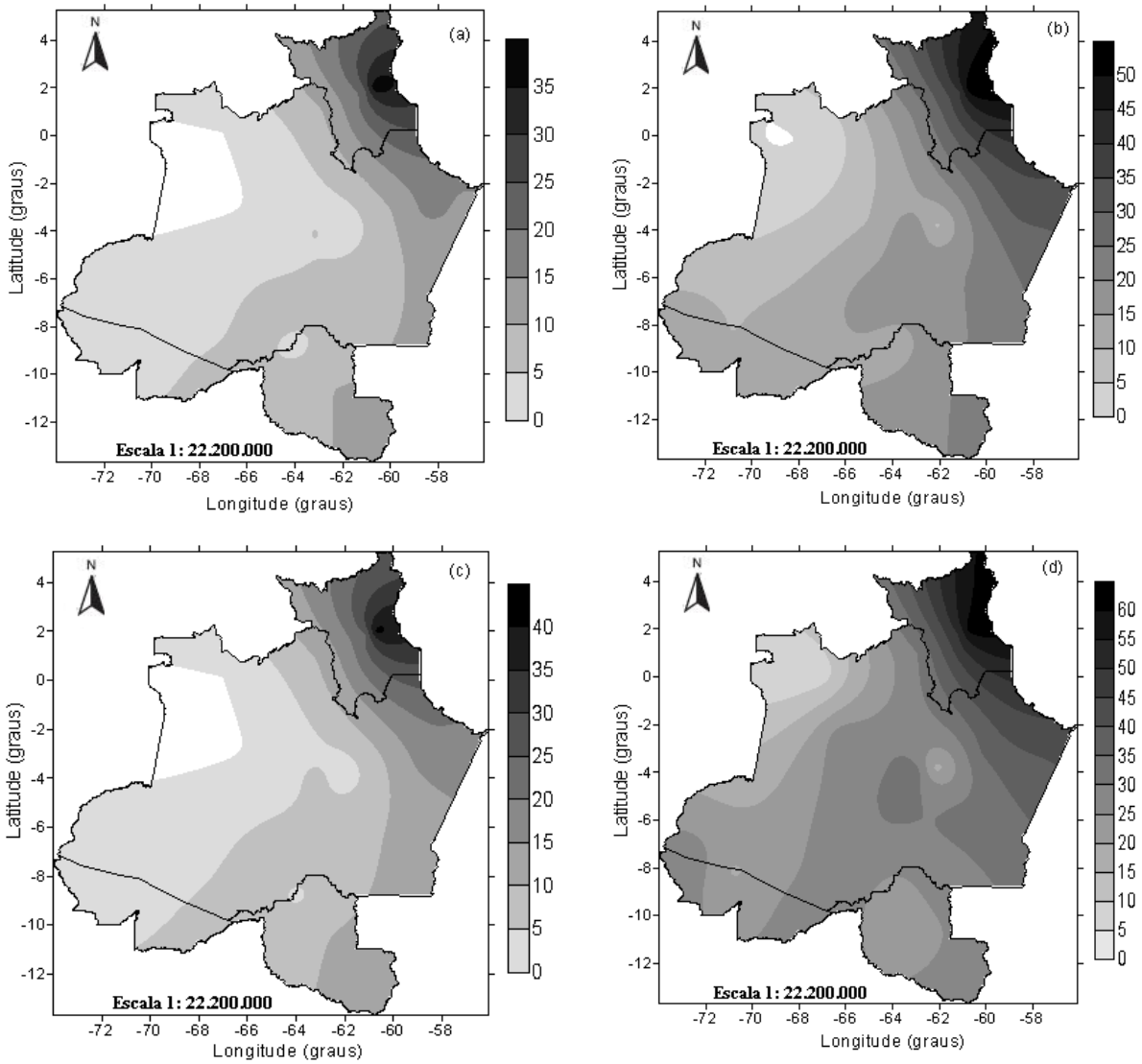
Figura 2. Distribuição espacial da evapotranspiração potencial anual no período de 1961 a 2005 **(a)**, e projeções para os cenários A2 **(b)** e B2 **(c)** até 2100, para Amazônia Ocidental.

Índice de aridez médio

Analisando a distribuição espacial do índice de aridez (*Ia*) para o período de 1961 a 2005 (Figura 3a) para a Amazônia Ocidental, foram observados valores variando entre 0 e 38. As localidades com maiores *Ia* foram: Boa Vista, RR (2ºN e 60,7ºW) 38, Uiramutã, RR (5ºN e 60ºW) 24, Caracaraí, RR (1,8ºN e 61,1ºW) 21, Itacoatiara, AM (3,1ºS e 58,4ºW) 16 e Parintins, AM (2,6ºS e 56,7ºW) 14, essas localidades apresentaram grande, moderada e pequena deficiência d'água. As localidades que apresentaram menores *Ia* foram Iauaretê, AM (0,6ºN e 69,2ºW), S.G. da Cachoeira, AM (0,1ºN e 67ºW), Benjamin Constant, AM (4,4ºS e 70ºW), Fonte Boa, AM (2,5ºS e 66,2ºW), Tefé, AM (3,8ºS e 64,7ºW) e Codajás, AM (3,8ºS e 62,1ºW) com deficiência d'água pequena ou nula.

As projeções do *Ia* até 2100 para o cenário A2 do IPCC, com aumento da precipitação em 15% (Figura 3b), mostram valores variando entre 0 e 55. As projeções (Figura 3b) indicam maiores valores de *Ia* para Boa Vista, RR (2ºN e 60,7ºW) 55, Uiramutã, RR (5ºN e 60ºW) 49, Caracaraí, RR (1,8ºN e 61,1ºW) 40, Itacoatiara, AM (3,1ºS e 58,4ºW) 32 e Parintins, AM (2,6ºS e 56,7ºW) 31, com grande e moderada deficiência d'água. As localidades que apresentaram menores *Ia* foram Iauaretê, AM (0,6ºN e 69,2ºW) e S.G. da Cachoeira, AM (0,1ºN e 67ºW), Benjamin Constant, AM (4,4ºS e 70ºW) e Fonte Boa, AM (2,5ºS e 66,2ºW) com deficiência d'água pequena ou nula. Analisando os resultados apresentados no cenário A2 do IPCC, com redução na precipitação em 15 % até 2100 (Figura 3d), observa-se valores de *Ia* variando entre 5 e 63. As projeções indicam menores valores de *Ia* para Iauaretê, AM (0,6ºN e 69,2ºW) e S.G. da Cachoeira, AM (0,1ºN e 67ºW) com deficiência d'água pequena ou nula.

As projeções de *Ia* até 2100 para o cenário B2 do IPCC, com aumento da precipitação em 15% (Figura 3c), mostram valores variando entre 0 e 41. As projeções indicam maiores valores de *Ia* para Boa Vista, RR (2ºN e 60,7ºW) 41, Uiramutã, RR (5ºN e 60ºW) 26 e Caracaraí, RR (1,8ºN e 61,1ºW) 25. Analisando os resultados apresentados no cenário B2 do IPCC, com redução na precipitação em 15% até 2100 (Figura 3e), observam-se valores de *Ia* variando entre 0 e 48, que representa grande, moderada e pequena ou nula deficiência d'água.



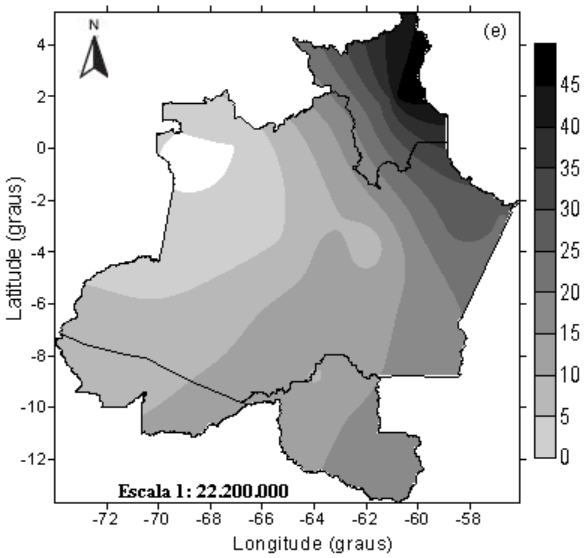


Figura 3. Distribuição espacial do índice de aridez no período de 1961 a 2005 **(a)**, e projeções para os cenários A2 com aumento **(b)** e redução **(d)** da precipitação média, e B2 com aumento **(c)** e redução **(e)** da precipitação média até 2100, para a Amazônia Ocidental.

Em todos os cenários analisados verifica-se um aumento da aridez da atmosfera, entretanto, esta elevação é relativamente baixa, pois, em média o maior valor de *Ia* é de 30, que é inferior a quase todas as cidades do Nordeste do Brasil. Entretanto, foram observadas em localidades isoladas, como algumas cidades de Roraíma, com valores superiores a 50, Parintins no Amazonas superior a 40, que são valores que representam um grau de aridez atmosférico relativamente elevado e que pode facilitar a propagação de incêndios florestais, consistente com Li et al. (2006).

Salati et al. (2007) encontrou os seguintes valores médios de Ia para a Amazônia Legal: 7,8 % (dados observados 1961 a 1990) e média dos modelos (GFDL e HadCM3) para o cenário A2, 12,5% (2011 a 2040), 15,9% (2041 a 2070) e 19,7% (2071 a 2100), e cenário B2, 12,1% (ano 2011 a 2040), 14,9% (2041 a 2070) e 330, 17,4% (2071 a 2100), respectivamente.

Em ambos os períodos analisados das projeções, quando comparados com a média climatológica, verificaram-se aumentos.

Se grandes áreas de floresta na 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 freqüência de fogo (risco > 60% para temperatura > 3°C) em muitas zonas da América do Sul. Em Hutyra et al. (2005) é mostrado que as florestas presentes em áreas com alta freqüência 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 km^2 de floresta estarão em potencial risco de desaparecer (> 11% da área total vegetada). O aumento da aridez 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.

Índice de umidade média

Analisando a distribuição espacial do índice de umidade (*Iu*) para o período de 1961 a 2005 (Figura 4a) para a Amazônia Ocidental, foram observados valores variando entre 22 a 114. As localidades com maiores *Iu* foram Iauaretê, AM (0,6ºN e 69,2ºW) 114, S.G. da Cachoeira, AM (0,1ºS e 67ºW) e Codajás, AM (3,8ºS e 62,1ºW) 91. As localidades com menores *Iu* foram Uiramutã, RR (5ºN e 60ºW) 0 e Boa Vista, RR (2,8ºN e 60,7ºW) 22.

As projeções do índice de umidade até 2100 para o cenário A2 do IPCC, com aumento da precipitação em 15% (Figura 4b), mostram valores variando entre 0 e 42. As projeções (Figura 4b) indicam maiores valores de *Iu* para Iauaretê, AM (0,6ºN e 69,2ºW) 42, Codajás, AM (3,8ºS e 62,1ºW) 33, Barcelos, AM (1ºN e 62,9ºW) 28, S.G. da Cachoeira, AM (0,1ºN e 67ºW) 27 e Ouro Preto D'Oeste, RO (10,7ºS e 62,2ºW) 23. Os menores valores de *Iu* foram observados em Uiramutã, RR (5ºN e 60ºW) 0, Fonte Boa, AM (2,5ºS e 66,2ºW) 4, Boa Vista, RR (2ºN e 60,7ºW) 5 e Caracaraí , RR (1,8ºN e 61,1ºW) 6. Comparando os resultados das projeções (Figura 4b), com os valores observados (Figura 4a), observa-se, em média, uma redução no *Iu* para toda a Amazônia Ocidental até 2100. Analisando os resultados apresentados no cenário A2 do IPCC, com redução na precipitação em 15 % até 2100 (Figura 4d), observa-se valores de *Iu* variando entre 0 e 10.

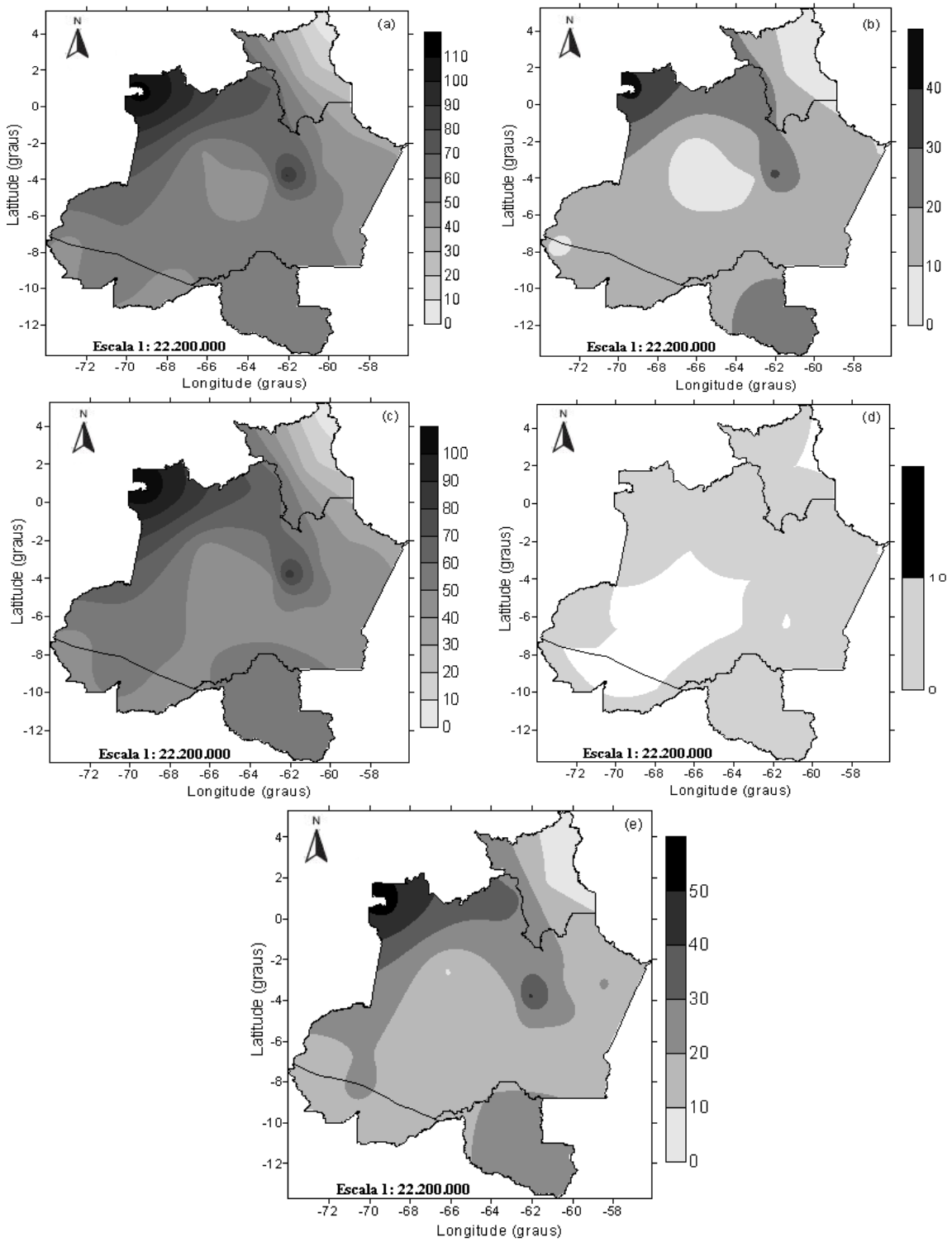


Figura 4. Distribuição espacial do índice de umidade no período de 1961 a 2005 **(a)**, e projeções para os cenários A2 com aumento **(b)** e redução **(d)** da precipitação média, e B2 com aumento **(c)** e redução **(e)** da precipitação média até 2100, para a Amazônia Ocidental.

As projeções indicam maiores valores de *Iu* para Iauaretê, AM (0,6ºN e 69,2ºW) e Codajás, AM (3,8ºS e 62,1ºW) 10, Barcelos, AM (1ºN e 62,9ºW) 9, Itacoatiara, AM (3,1ºS e 58,4ºW) 4 e Ouro Preto D'Oeste, RO (10,7ºS e 62,2ºW) 2, as demais localidades apresentaram valor zero. Quando comparados os resultados do cenário atual (Figura 4a) com as projeções (Figura 4d), observa-se em média uma redução no índice de umidade até 2100.

As projeções do Iu até 2100 para o cenário B2 do IPCC, com aumento e redução da precipitação em 15% (Figuras 4c e 4e), quando comparados com o cenário atual (Figura 4a), indicam redução no índice de umidade.

Salati et al. (2007) encontraram os seguintes valores médios de Iu para a Amazônia Legal: 47,4% (dados observados 1961 a 1990) e média dos modelos (GFDL e HadCM3) para o cenário A2, 36,4% (2011 a 2040), 28,9% (2041 a 2070) e 23,4% (2071 a 2100), e cenário

B2, 36,1% (2011 a 2040), 30,5% (ano 2041 a 2070) e 25,5% (2071 a 2100), respectivamente. Em ambos os períodos analisados das projeções, quando comparados com a média climatológica, verificaram-se aumentos.

Quando a floresta é sujeita a períodos anomalamente 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).

Índice hídrico médio

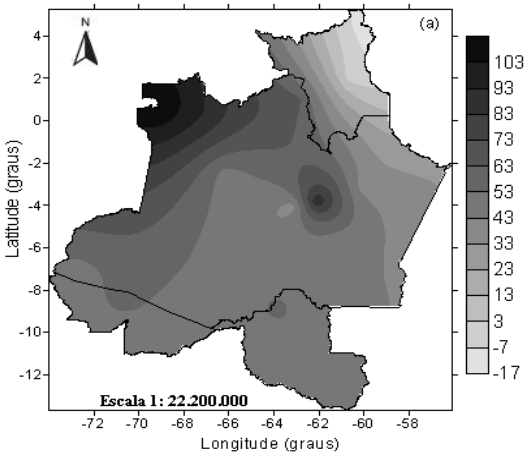
O índice efetivo de umidade (hídrico) é um dos principais parâmetros na classificação do tipo de clima de uma região, tem sido usado também como indicador de áreas sujeitas aos processos de desertificação, conforme definição das Nações Unidas. Na região Amazônica o IM pode ser utilizado para identificar as localidades menos úmidas, que deve ter uma atenção especial quanto ao monitoramento de prática agrícola tradicional, no preparo da terra com a utilização do fogo, prática que é considerada mais barata no preparo do terreno para o cultivo.

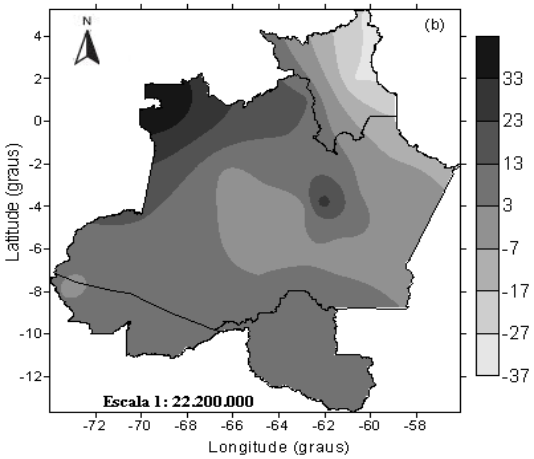
Com o objetivo de evitar grandes incêndios, semelhantes ao que ocorreu em 1998 no Estado de Roraima, o qual não houve controle e causou danos ambientais, é necessário evitar a utilização do fogo como prática de preparo do terreno pelos colonos e índios da região. Nessa região, em sua parte setentrional, registra-se um grande período de deficiência hídrica, com duração de oito meses durante seu ciclo hidrológico, oferecendo condições ideais para a propagação de incêndios, devido à alta temperatura ambiente e baixa umidade relativa do ar, combustível seco e pré-aquecido.

Analisando a distribuição espacial do índice efetivo de umidade (IM) para o período de 1961 a 2005 (Figura 5a) para a Amazônia Ocidental, foram observados que as localidades com maiores IM foram Iauaretê, AM (0,6ºN e 69,2ºW) 114, S.G. da Cachoeira, AM (0,1ºS e 67ºW) e Codajás, AM (3,8ºS e 62,1ºW) 91, os quais representam dois tipos climáticos, super-úmido e úmido. As localidades como Uiramutã, RR (5ºN e 60ºW) e Boa Vista, RR (2,8ºN e 60,7ºW) apresentaram um tipo climático sub-úmido seco.

As projeções de IM até 2100 para o cenário A2 do IPCC, com aumento da precipitação em 15% (Figura 5b), mostram valores variando entre -29 e 42. As projeções (Figura 5b) indicam maiores valores de IM para Iauaretê, AM (0,6ºN e 69,2ºW) 42, S.G. da Cachoeira, AM (0,1ºN e 67ºW) 27 e Codajás, AM (3,8ºS e 62,1ºW) 28, estes números apresentam um tipo climático úmido, portanto, estas localidades num cenário futuro mudará do clima super-úmido para úmido. Os menores valores de *IM* foram observados em Uiramutã, RR (5ºN e 60ºW) e Boa Vista, RR (2ºN e 60,7ºW) que tenderá de um clima sub-úmido para semi-árido. Caracaraí (RR) e as localidades como Parintins, Manaus, Itacoatiara, Coari e Fonte Boa no Estado do Amazonas atualmente apresentam clima úmido e num cenário de mudanças climáticas tende a clima sub-úmido seco.

Comparando os resultados das projeções (Figura 5b), com os valores atuais (Figura 5a), observa-se em média uma redução no IM para toda a Amazônia Ocidental até 2100. Analisando os resultados apresentados no cenário A2 do IPCC, com redução na precipitação em 15 % até 2100 (Figura 5d), observam-se valores de IM variando entre -37 e 7. As projeções indicam menores valores de *IM* para Uiramutã, RR (5ºN e 60ºW) e Boa Vista, RR (2ºN e 60,7ºW) com um tipo climático semi-árido, com exceção de Iauaretê, AM (0,6ºN e 69,7ºW) que apresenta um tipo climático sub-úmido, as demais localidades apresentam o tipo climático sub-úmido seco, ou seja, muitas localidades passariam de clima super-úmido ou úmido para sub-úmido seco. Quando comparados os resultados do cenário atual (Figura 5a) com as projeções (Figura 5d), observa-se em média uma redução de IM até 2100 e uma modificação do clima para condições mais seca em toda Amazônia Ocidental.





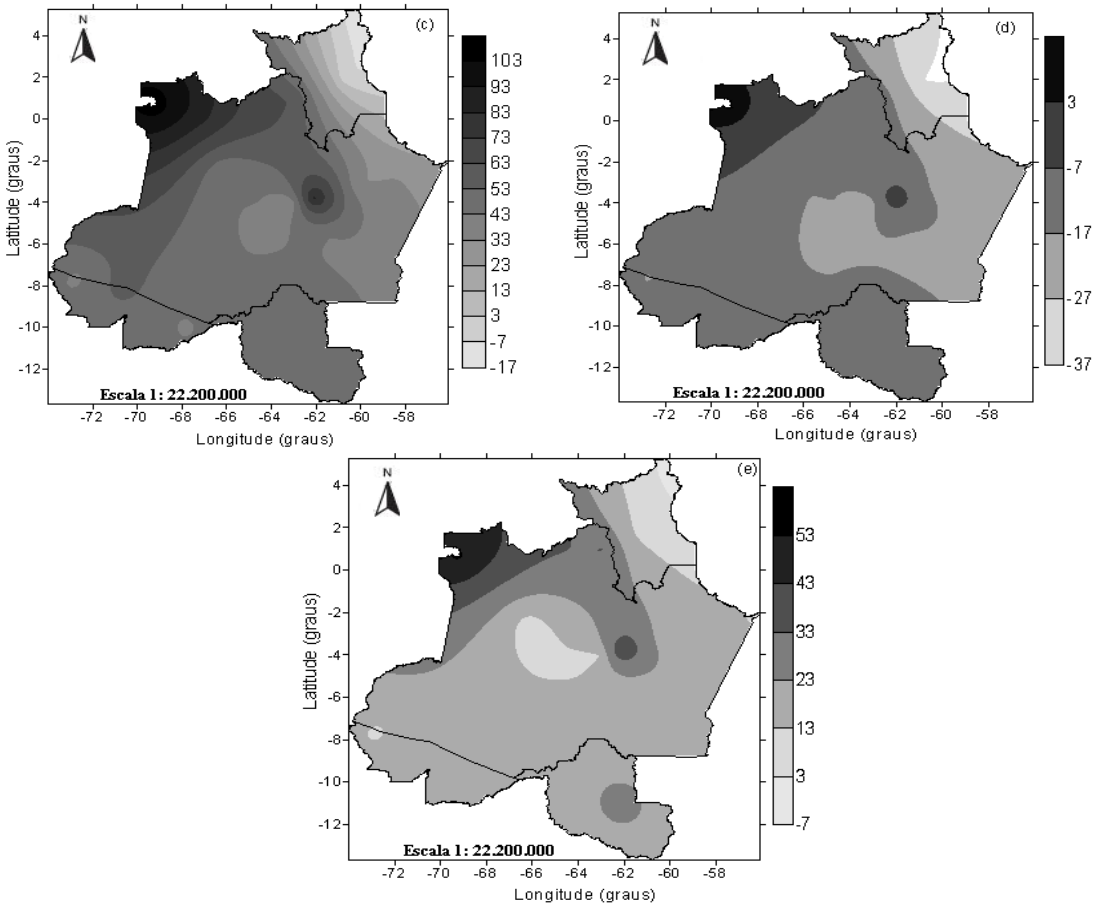


Figura 5. Distribuição espacial do índice de umidade efetiva no período de 1961 a 2005 **(a)**, e projeções para os cenários A2 com aumento **(b)** e redução **(d)** da precipitação média, e B2 com aumento **(c)** e redução **(e)** da precipitação média até 2100, para a Amazônia Ocidental.

As projeções de IM até 2100 para o cenário B2 do IPCC, com aumento da precipitação em 15 % (Figura 5c), mostram valores variando entre -15 e 108. Maiores valores de IM encontram-se em Iauaretê, AM (0,6ºN e 69,2ºW) 108, S.G. da Cachoeira, AM (0,1ºN e 67ºW) e Codajás, AM (3,8ºS e 62,1ºW) 85, que representa os tipos climáticos super-úmido e úmido, respectivamente. Os menores valores foram observados em Uiramutã e Boa Vista em Roraima, com o tipo climático sub-úmido seco. Comparando os resultados das projeções (Figura 5c), com os valores observados (Figura 5a), observa-se em média uma redução no IM para toda a Amazônia Ocidental até 2100, no entanto a configuração espacial é semelhante. Ressalta-se que o Cenário B2 com aumento da precipitação regional é o cenário mais otimista possível, mesmo assim verifica-se uma diminuição de IM, porém, sem uma modificação na classificação do clima. Analisando os resultados apresentados no cenário B2 do IPCC, com redução na precipitação em 15% até 2100 (Figura 5e), observam-se valores de IM variando entre -27 e 54. Quando comparados os resultados do cenário atual (Figura 5a) com as projeções (Figura 5e) observa-se, em média, uma redução no IM, até 2100, com modificação do clima para condições mais seca. Estes resultados colaboram com Nobre et al. (1991) que descreveram possíveis processos savanização da Região Amazonas.

As análises para as projeções dos cenários apresentados nesta seção mostram uma tendência de clima mais seco que o atual na Amazônia Ocidental. Entretanto, o leitor ainda pode perguntar se os valores mostrados estão dentro da variabilidade interanual do clima Amazônico? A resposta é que a maior parte das projeções mostradas apresenta valores superiores aos da variabilidade interanual. A propósito, os Fenômenos *El Niño*, associados com condições mais seca, e *La Niña*, associada com condições mais úmidas, são os eventos que produzem grande flutuação do clima na Amazônia Brasileira (Nobre & Shukla, 1996, Uvo et al. 1998, Ronchail et al., 2002).

Estudos realizados por Salati et al. (2007) para a Amazônia Legal mostram os seguintes valores médios de IM para a Amazônia Legal: 42,8% (dados observados de 1961 a 1990) e média dos modelos (GFDL e HadCM3) para o cenário A2, 28,9% (2011 a 2040), 19,4% (2041 a 2070) e 11,5% (2071 a 2100), e cenário B2, 28,8% (2011 a 2040), 21,6% (2041 a 2070) e 15% (2071 a 2100), respectivamente. Em ambos os períodos analisados das projeções, quando comparados com a média climatológica, verificaram-se reduções.

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 (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 Anglo-Brazilian Amazonian Climate Observation Study (ABRACOS) (Gash et al. 1996) e Large Scale Biosphere-Atmosphere Experiment in Amazonia (LBA) indicam que há um aumento da temperatura entre 0,3ºC e 3ºC, redução da evapotranspiração entre 15% e 20% devido à mudança de vegetação de floresta para pastagem.

Alguns estudos têm mostrado que o estômato da planta abre menos com altas concentrações de CO_2 (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).

Segundo Nobre et al. (2008), 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.

Conclusões

Foram obtidas as seguintes conclusões:

Tendência de clima mais seco que o atual na Amazônia Ocidental levando a uma diminuição de umidade na atmosfera e do solo e uma redução na vazão dos rios e um aumento no risco de incêndio.

O aumento de temperatura previsto nos cenários do IPCC é capaz de aumentar a evapotranspiração real produzindo uma redução da umidade do solo e uma diminuição do escoamento superficial e sub-superficial e, conseqüentemente, as vazões dos rios. Isto facilitará a queima de florestas e dificultará as navegações nos rios.

Há indicação de que o clima da parte leste da Amazônia Ocidental e dos estados de Rondônia e Acre se torne sub-úmido ou sub-úmido seco devido ao aumento do grau de aridez da região.

Agradecimentos

Ao CNPq pela concessão de Bolsa de Mestrado para o primeiro autor (Processo N. 131733/2007-9) e ao INMET, CEPLAC e NCEP/NCAR pelo fornecimento de dados para a realização deste estudo.

Referências

Andreae, M.O.; Rosenfeld, D.; Artaxo, P.; Costa, A.A.; Frank, G.P.; Longo, K.M.; Silva-Dias, M.A.F. 2004. Smoking rain clouds over the Amazon. Science, 303, 1337-1342.

Betts, R.A.; Cox, P.M.; Collins, M.; Harris, P.P.; Huntingford, C.; Jones, C.D. 2004. The role of ecosystem-atmosphere interactions in simulated Amazon forest dieback under global climate warming. Theoretical and Applied Climatology, 78, 157-175.

Cândido, L.A.; Manzi, A.O.; Tota, J.; Silva, P. R.T.; Silva, F.S.M.; Santos, R.M.N.; Correia, F.W.S. 2007. O clima atual e futuro da Amazônia nos cenários do IPCC: a questão da savanização. Ciência e Cultura (SBPC), 59, 44-47.

CAMARGO, A.P. 1971. Balanço hídrico no Estado de São Paulo. Campinas: IAC. Boletim Técnico, 116.

Cox, P.M.; Betts, R.A.; Jones, C.D.; Spall, S.A.; Totterdell, I.J. 2000. Acceleration of global warming due to carbon-cycle feedbacks in a coupled climate model. Nature, 408, 184-187.

Costa, M.H.; Yanagi, S.N.M.; Souza, P.J.O.P.; Ribeiro, A.; Rocha, E.J.P. 2007. Climate change in Amazonia caused by soybean cropland expansion, as compared to caused by pastureland expansion. Geophysical Research Letters, 34, 7, L07706.1-L07706.4.

Field, C.B.; Jackson, R.B.; Mooney, H.A. 1995. Stomatal responses to increased CO2: implications from the plant to the global scale. Plant, Cell and Environment, 18, 10, 1214-1225.

Friedlingstein, P.; Dufresne, J.L.; Cox, P.M.; Rayner, P. 2003. How positive is the feedback between climate change and the carbon cycle. Tellus, 55, 692-700.

Gash, J.H.C.; Nobre, C.A.; Roberts, J.M.; Victoria, R.L. 1996. Amazonian deforestation and climate. Chichester: Wiley & Sons, Chichester.

Hutyra, L.R.; Munger, J.W.; Nobre, C.A.; Saleska, S.R.; Wofsy, S.C. 2005. Climatic variability and vegetation vulnerability in Amazonia. Geophysical Research Letters, 32, L24712, doi:10.1029/2005GL024981.

INPE - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais. 2008. Monitoring the Brazilian Amazon forest by satellite: 1988– 2007. São José dos Campos: INPE.

IPCC - Intergovernmental Panel on Climate Change. Climate Change 2007: The Physical Science Basis, Summary for Policymakers. IPCC, Genebra, 2007.

Krishan, A. 1980. Agroclimatic classification methods and their application to Índia. In: Climatic classification: a consultant's meeting, 14-16, ICRISAT Center, Patancheru, India.

Krug, T. 2008. Impacto, vulnerabilidade e adaptação das florestas à mudança do clima. Parcerias Estratégicas, 27, 43-72.

Li, W.; Fu, R.; Dickinson, E. 2006. 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.

Marengo, J.A.; Dias, P.S. 2006. Mudanças climáticas globais e seus impactos nos recursos hídricos. In: Rebouças, A.C.; Braga, B.; Tundisi, J.G. Águas doces no Brasil: capital ecológico, uso e conservação. 3. ed. São Paulo: Instituto de Estudos Avançados da USP, Academia Brasileira de Ciências. 63-109.

Nobre, C.; Sampaio, G.; Salazar, L. 2008. Cenários de mudança climática para a América do Sul para o

final do século 21. Parcerias Estratégicas, 27, 19-42.

Nobre, P. Shukla, J. 1996. Variations of sea surface temperature, wind stress, and rainfall over the tropical Atlantic and South America. Journal of Climatology, 9, 2464-2479.

Nobre, C.A.; Sellers, P.J.; Shukla, J. 1991. Amazonian deforestation and regional climate change. Journal of Climatology, 4, 957-988.

Pereira, A.R.; Angelocci, L.R.; Sentelhas, P.C. 2002. Agrometeorologia: fundamentos e aplicações práticas. Guaíba: Agropecuária, 478p.

Ronchail, J.; Cochonneau, G.; Molinier, M.; Guyot, J. L.; Chaves, A.G.M.; Guimarães, V. 2002. Interannual rainfall variability in the Amazon basin and seasurface temperatures in the equatorial Pacific and the tropical Atlantic Oceans**.** International Journal Climatology, 22, 1663–1686.

Sampaio, G.; Nobre, C.; Costa, M.H.; Satyamurty, P.; Soares-Filho, B.S.; Cardoso, M. 2007. Regional climate change over eastern Amazonia caused by pasture and soybean cropland expansion. Geophysical Research Letters, 34.

Salati, E.; Salati, E.; Campanhol, T.; Villa Nova, N. Relatório 4 "Tendências das Variações Climáticas para o Brasil no Século XX e Balanços Hídricos para Cenários Climáticos para o Século XXI". Ministério do Meio Ambiente – MMA, Secretaria de Biodiversidade e Florestas – SBF, Diretoria de Conservação da Biodiversidade – DCBio. Mudanças Climáticas Globais e Efeitos sobre a Biodiversidade. Subprojeto Caracterização do clima atual e definição das alterações climáticas para o território brasileiro ao longo do Século XXI. Brasília, Fevereiro 2007.

Scerne, R.M.C.; Santos, A.O.S.; Santos, M.M.; Neto, F.A. Aspectos Agroclimáticos do Município de Ouro Preto D'Oeste – RO: Atualização Quinquenal. Belém, PA, Brasil, CEPLAC/SUPOR. Boletim Técnico nº17, 2000. 48p.

Scholze, M.; Knorr, W.; Arnell, N.W.; Prentice, I.C. 2006. A climate-change risk analysis for world ecosystems. Proceedings of the National Academy of Sciences, 103, 13116-13120.

Sellers, P.J.; Bounoua, L.; Collatz, G.J.; Randall, D.A.; Dazlich, D.A.; Los, S.O.; Berry, J.A.; Fung, I.; Tucker, C.J.; Field, C.B.; Jensen, T.G. 1996. Comparison of radiative and physiological effects of doubled atmospheric CO_2 on climate. Science, 271, 1402-1406.

Thornthwaite, C.W. 1948. An approach toward a rational classification of climate. Geographical Review, 38: 55-94.

Thornthwaite, C.W.; Mather, J.R. 1957. Instructions and Tables for Computing Potential Evapotranspiration and Water Balance. Publications in Climatology, 10, 183-311.

Uvo, C.R.; Repelli, C.A.; Zebiak, S.E.; Kushnir, Y. 1998. The relationship between tropical Pacific and Atlantic SST and northeast Brazil monthly precipitation. Journal of Climate, 11, 551-562.