

ESTUDO DOS EFEITOS DAS MUDANÇAS GLOBAIS NA BACIA DO RIO MADEIRA
STUDIES OF THE EFFECTS OF GLOBAL CHANGES IN THE MADEIRA RIVER BASIN

J. L. Siqueira Júnior^{*}, D. A. Rodriguez^{*} and J. Tomasella^{*}

^{*}Centro de Ciência do Sistema Terrestre, INPE, Rodovia Presidente Dutra, Km 39, 12630-000 Cachoeira Paulista/SP, Brasil. jose.lazaro@cptec.inpe.br; daniel.andres@inpe.br; javier.tomasella@inpe.br

RESUMO

O Rio Madeira é dotado de riquezas essenciais à sociedade, seja por meio da navegação, irrigação de cultivos agrícolas, produção de energia elétrica ou o desenvolvimento de atividades econômicas. Mas, com as fortes evidências de mudanças climáticas estes recursos hídricos podem ser seriamente impactados. O objetivo deste trabalho foi analisar os processos hidrológicos de macro-bacias da região Amazônica, em particular na bacia do Rio Madeira para estudos em mudanças da cobertura da terra e câmbio climático. Desta forma, aplicou-se um modelo hidrológico de grandes bacias, no qual os parâmetros de solos e de vegetação foram ajustados para o clima atual (1970 a 1990). Utilizando o *downscaling* dinâmico realizado com o modelo atmosférico Eta, foram realizadas simulações dos cenários hidrológicos sob mudanças climáticas para os cenários atual e futuros (2011 a 2099), empregando os ajustes obtidos na calibração. Os impactos das mudanças no uso e na cobertura da terra para o clima atual foram avaliados considerando a evolução histórica do uso da terra na bacia. Para o cenário de mudanças climáticas considerou-se a cobertura vegetal e o uso da terra inalterados. A análise das simulações hidrológicas permitiram avaliar a influência das mudanças climáticas na resposta hidrológica e o quanto as mudanças no uso do solo e da cobertura vegetal impactam na bacia, em termos de disponibilidade hídrica, sazonalidade e frequência de eventos extremos.

PALAVRAS CHAVE: mudanças climáticas; recursos hídricos; simulação hidrológica.

ABSTRACT

The Madeira River is endowed with essential riches to society, whether through the navigation, irrigation of crops, electrical production or development of economic activities. But with the strong climate change evidences these water resources can be seriously impacted. The aim of this work was to analyze the hydrological processes into large-scale basins of the Amazon region, particularly in the Madeira River basin, for studies on land use and land cover change and climate change. Therefore, we applied a hydrological model for large basins, in which the parameters of vegetation and soil were calibrated, for current conditions (1970 to 1990). Using the dynamic downscaling performed with atmospheric Eta model, simulations were performed under hydrological scenarios of climate change for the current and future scenarios (2011 to 2099), using the adjustments obtained in calibration. The impacts of changes in the use and land cover during the current climate were evaluated considering the historical evolution of land use in the basin. For the climate change scenarios was considered the vegetation cover and land use unchanged. The hydrological simulations analysis allowed to assess the influence of climate change on hydrological response and how changes in land use and vegetation cover impact in basin, in terms of water availability, seasonality and extreme events frequency.

KEYWORDS: climate change; water resources; hydrological simulation.

INTRODUÇÃO

A Amazônia é um dos biomas mais importantes do mundo. Com disponibilidade hídrica correspondente aproximadamente a 16% do estoque mundial de água doce superficial (Andrade, 2008). A floresta, apesar de ser a característica mais marcante da Amazônia, não esconde a grande variedade e diversidade biológica que abrange cerca de 6.5 milhões de quilômetros quadrados, representando a maior rede hidrográfica mundial com papel fundamental no controle do regime de precipitação e umidade em grande parte do continente sul americano.

Com área de drenagem de 1.420.000 km², precipitação média anual de 1.940 mm e vazão média anual de 31.200 m³ s⁻¹, o rio Madeira é considerado o mais importante tributário do rio Amazonas, constituindo 23% do total da bacia Amazônica, estendendo-se por Bolívia (51%), Brasil (42%) e Peru (7%). Devido a sua característica estrutural, verificam-se grandes altitudes na parte montante da bacia, vastas zonas de inundação na planície e a presença de cachoeiras no Escudo Brasileiro, principalmente próximo a Porto Velho (Ribeiro, 2006), além das zonas de instabilidade climática, influenciados por fenômenos de circulação atmosférica e chuvas intensas determinando um alto índice de vazão, e umidade da esfera gasosa que envolve a terra. As condições climáticas da região são características do clima equatorial (quente e úmido).

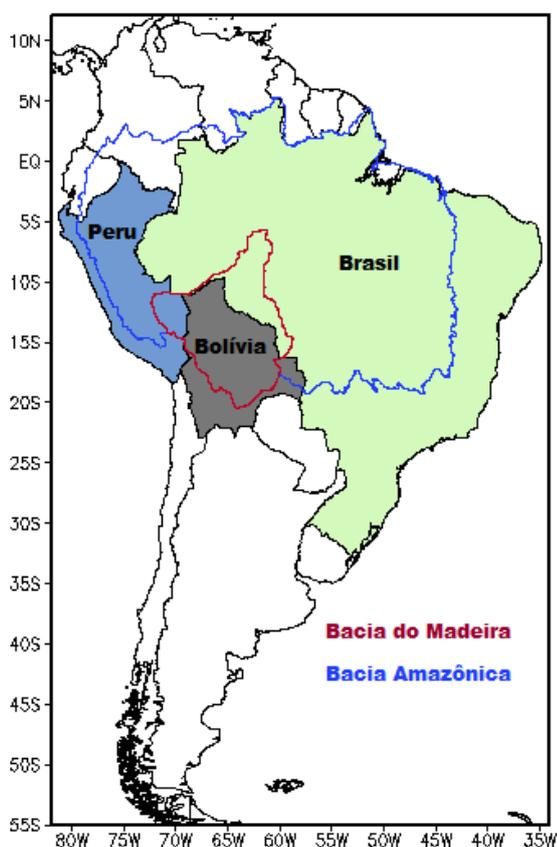


Figura 1 - Bacia Amazônica e área de estudo

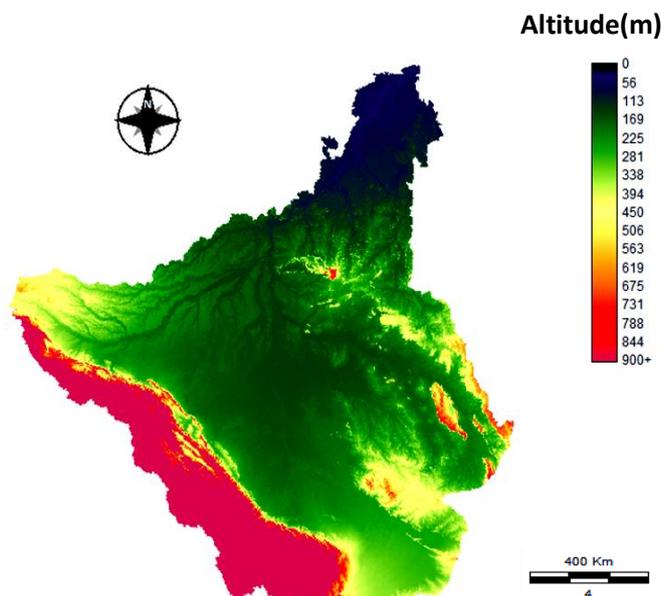


Figura 2 - Topografia da Bacia do Rio Madeira

O uso da terra e a sua ocupação na Amazônia são caracterizados pelo extrativismo vegetal e animal, agricultura de subsistência, pecuária e cultivo de espécies vegetais arbustivo-arbóreas. A produção de grãos recobre parcelas contínuas expressivas. A mineração e o garimpo também são responsáveis pela alteração dos ecossistemas naturais.

Nas últimas décadas, a região Amazônica vem sofrendo muitas influências e modificações em seu ecossistema, como o aumento da temperatura global seguindo a mesma tendência de aumento de temperatura à superfície causada pelo desmatamento (Nobre, 2001) e as queimadas; mudanças no uso da terra e nos regimes de chuva, ocasionando eventos climáticos extremos, como as secas de 2005 e 2010, consideradas as piores dos últimos cem anos (Marengo et al., 2008; 2010), além do aumento da suscetibilidade dos ecossistemas amazônicos ao fogo causando a redução das espécies menos tolerantes à seca, podendo até induzir uma "savanização" de partes da Amazônia (Nobre, 2007); ocorrências que são preocupantes à sociedade, e que estimulam a análise destes impactos sobre os recursos hídricos.

Acreditando que nos cenários climáticos futuros a ocorrência de eventos extremos possa ser mais freqüente, a presente pesquisa objetivou analisar e mensurar como estas mudanças climáticas, no uso e cobertura da terra afetam na resposta hidrológica da bacia do rio Madeira.

DADOS E METODOLOGIA

Para analisar o impacto das mudanças climáticas na bacia do Rio Madeira foi utilizado o Modelo Hidrológico de Grandes Bacias do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (MGB-INPE) (Tomasella et al., em fase de elaboração), alimentado com os cenários regionais de mudanças climáticas desenvolvidos no CPTEC-INPE (Chou et al, 2011) utilizando o modelo regional atmosférico Eta (Mesinger et al. 1988, Chou et al, 2007) . Este modelo utiliza condições de contorno geradas pelo modelo global Hadley Centre (HadCM3). As saídas do modelo possuem uma resolução de 40 Km, onde estas foram interpoladas para a resolução de 25 km para uso no modelo hidrológico. O cenário climático do modelo Eta (controle) utilizado equivale ao cenário A1B do IPCC, considerado um cenário intermediário entre os cenários A2 e B2, que correspondem respectivamente aos cenários extremos de alta emissão(pessimista) e baixa emissão(otimista) de poluentes. A descrição da "família" dos cenários são abordadas nos relatórios especiais sobre os cenários de emissões - SRES(*Special Report on Emissions Scenarios*) do IPCC.

O modelo hidrológico MGB-INPE foi desenvolvido a partir do MGB-IPH(Collischonn et al, 2007) modificando as rotinas de estimativa de evaporação e de separação de fluxos. A parametrização do MGB-INPE combina a formulação probabilística de distribuição de colunas de água nos pontos de grade como no modelo Xinanjiang (ZHAO, 1992; ZHAO; LIU, 1995) com os princípios utilizados no TOPMODEL (BEVEN; KIRKBY, 1979) para simular a resposta hidrológica. A posição do nível freático é calculada no modelo como uma proporção da quantidade d'água em excesso sobre a capacidade de campo em cada reservatório, seguindo a formulação do modelo DHSVM (WIGMOSTA et al, 2002). A perda d'água por interceptação é simulada no modelo através da metodologia proposta por Gash et al. (1995). A captura d'água da vegetação desde o solo é resolvida considerando o modelo de distribuição de raízes de Jarvis (1989). O modelo é composto dos seguintes módulos: Balanço de água no solo; Evapotranspiração; escoamentos: superficial, sub-superficial e subterrâneo na célula; escoamento na rede de drenagem. Nele a bacia é subdividida em células regulares, comunicadas por canais de drenagem representando a rede de drenagem da mesma. Cada célula está dividida em blocos de uso do solo, que resultam da combinação da vegetação, do tipo de solo e do uso da terra. O MGB-INPE gera valores diários de vazão em diferentes pontos dentro da bacia.

Para alimentar o modelo hidrológico foram utilizados diferentes bases de dados. Os dados hidrológicos e climáticos observados foram obtidos das seguintes instituições: ANA(Agencia Nacional de Águas), INMET(Instituto Nacional de Meteorologia), SENAMHI(Serviço Nacional de Meteorologia e Hidrologia - Peru e Bolívia) e CPTEC/INPE (Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos), onde os mesmos foram avaliados. As informações topográficas foram obtidas a partir do SRTM - *Shuttle Radar Topographic Mission* (disponível em <http://srtm.csi.cgiar.org>), na resolução espacial de 90 metros, seguindo a metodologia de Paz e Collischonn (2007, 2008). Os dados de vegetação utilizados foram produzidos pelo projeto PROVEG - INPE (Sestini, et al, 2002). Os dados do solo foram obtidos da fundação independente ISRIC (Dijkshoorn; Huting; Tempel, 2005) , disponíveis no site ISRIC - *world soil information* (<http://www.isric.org>). Considerando as mudanças no uso do solo nos últimos anos, foram incluídos na simulação informações de reconstrução desses padrões históricos de ocupação (floresta, pastagem, cultivos, etc).

A partir dos dados observados mencionados, referentes ao clima atual (1970-1990), foi realizada a calibração do MGB-INPE. O motivo da escolha desse período justifica-se pelo fato que neste intervalo há uma disponibilidade de informações mais completa. Após a calibração do MGB-INPE com os dados observados, foram coletadas da base de dados do modelo Eta-CPTEC informações para as simulações do clima atual (1961-1990) e futuro (2011-2040, 2041-2070 e 2071-2099).

A simulação do clima atual com os dados do modelo Eta-CPTEC foi desenvolvida para avaliar a capacidade do modelo hidrológico, alimentado com dados de simulação atmosférica, em representar situações reais. Devido aos erros sistemáticos contidos nos dados de precipitação do modelo Eta-CPTEC em comparação aos dados observados, foi imprescindível aplicar uma metodologia de correção para minimizar essas inconsistências. A técnica mais empregada neste contexto, baseia-se na construção de duas curvas de distribuição probabilísticas para cada ponto da grade, a dos dados observados e a das estimativas de precipitação do modelo Eta-CPTEC. Para cada valor de chuva previsto é atribuída uma probabilidade, e o valor de chuva corrigido é obtido da curva de distribuição de probabilidade das precipitações observadas de mesma probabilidade associada (Burgueño; Lana; Serra, 2004; Burgueño et al. 2010). A figura 3 apresenta este procedimento.

Para os cenários futuros também foi realizada a correção diária de precipitação em que foi adotada a distribuição probabilística teórica do tipo weibull; o método de correção busca a diferença de precipitação entre a chuva observada e a chuva prevista pelo modelo Eta-CPTEC que possui equivalente probabilidade

associada, isto é, a precipitação corrigida será a chuva prevista pelo modelo somado a diferença entre os volumes de observado e estimado, como ilustrado pela figura 4. Informações detalhadas sobre a metodologia de correção pode ser encontrada em Burgueño et al.(2010).

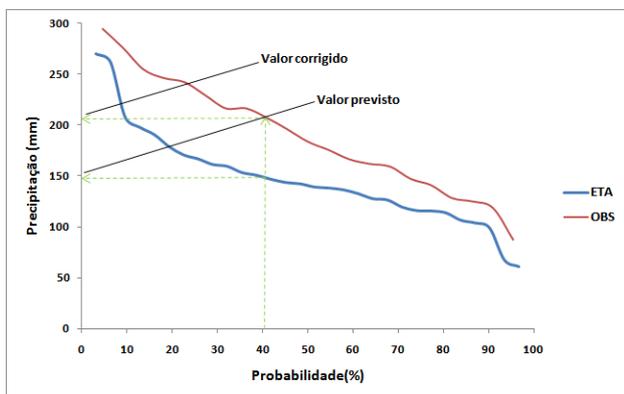


Figura 3 - Curvas de distribuição de probabilidade de precipitação, cenário atual.

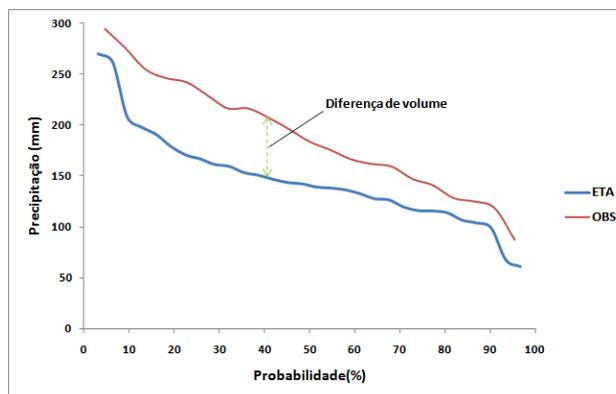


Figura 4 - Curvas de distribuição de probabilidade de precipitação, cenários futuros.

DESCOBERTAS E DISCUSSÕES

Calibração do modelo hidrológico (presente)

A calibração do MGB-INPE foi realizada de acordo com os postos fluviométricos selecionados para o estudo, isto é, aqueles com mais informações disponíveis no período entre 1970-1990. As funções objetivo consideradas foram: o coeficiente de Nash Sutcliffe das vazões diárias (NSE), o coeficiente de correlação das vazões diárias (R^2), o coeficiente de correlação dos logaritmos das vazões diárias (R_{\log}) e o erro relativo de volume baseado na integração das vazões diárias (ΔV) conforme a tabela a seguir:

Tabela 1 - Postos fluviométricos utilizados e avaliações estatísticas da calibração do MGB-INPE

SB	Estação	ID-ANA	Rio	Lat	Lon	Área drenagem (km ²)	NSE	R^2	R_{\log}	ΔV
1	Mato Grosso	15120001	Rio Guaporé	-15.01	-59.96	23814	0.58	0.62	0.48	0.17
2	Guajará-mirim	15250000	Rio Mamoré	-10.79	-65.35	589497	0.66	0.78	0.78	-0.20
3	Abunã	15320002	Rio Madeira	-9.70	-65.36	899761	0.74	0.88	0.89	-0.21
4	Porto Velho	15400000	Rio Madeira	-8.75	-63.92	954285	0.55	0.89	0.89	-0.23
5	Santa Isabel	15550000	Rio Candeias	-8.80	-63.71	12640	0.87	0.91	0.76	0.18
6	Ariquemes	15430000	Rio Jamari	-9.93	-63.07	7795	0.67	0.80	0.50	0.57
7	São Carlos	15440000	Rio Jamari	-9.70	-63.13	9884	0.76	0.84	0.62	0.35
8	Ji-Paraná	15560000	Rio Ji-Paraná	-10.87	-61.94	33012	0.55	0.69	0.64	0.58
9	Tabajara	15580000	Rio Ji-Paraná	-8.93	-62.06	60212	0.68	0.83	0.73	0.47
10	Humaitá	15630000	Rio Madeira	-7.50	-63.02	1066240	0.76	0.88	0.90	-0.16
11	Manicoré	15700000	Rio Madeira	-5.82	-61.30	1157516	0.69	0.83	0.85	-0.19

A figura 4 apresenta a rede de drenagem discretizada em células de 0.25 (25 x 25 km) e os hidrogramas diários resultantes da calibração em algumas sub-bacias. De um modo geral, o modelo apresentou um resultado satisfatório em termos de previsão das vazões diárias. Podemos observar, entretanto, algumas deficiências na qualidade do ajuste para os picos de vazão.

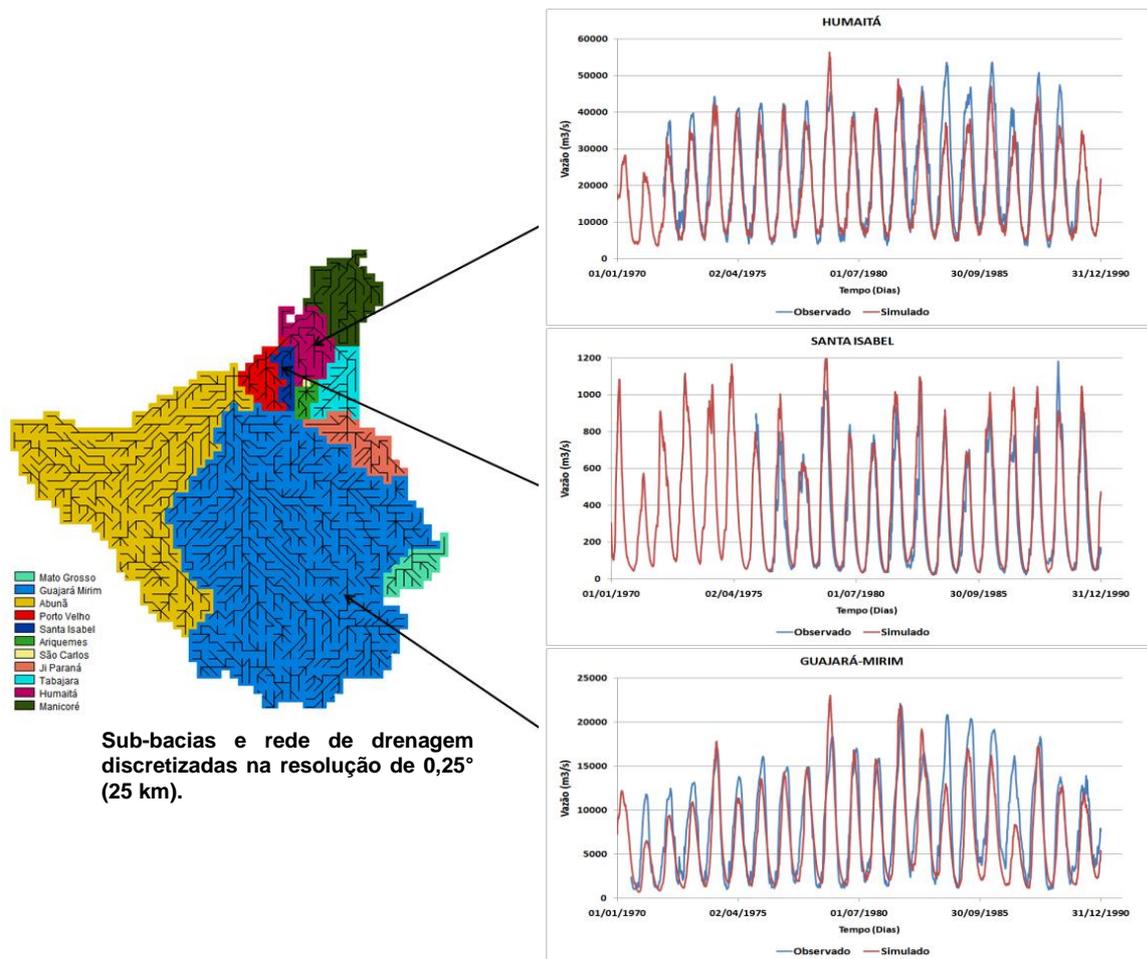


Figura 5 - Resultados da calibração do MGB-INPE utilizando dados observados

Correção dos erros sistemáticos de precipitação do modelo Eta (presente e futuro)

A precipitação é essencial para a caracterização climática e possui papel fundamental na representação dos processos hidrológicos. Porém, erros sistemáticos contidos nos dados de precipitação gerados por modelos atmosféricos são comumente encontrados (Wood et al., 2002) e podem influenciar nas simulações se não forem minimizados.

Como o modelo hidrológico foi ajustado utilizando dados de precipitação observada do período 1970-1990, comparou-se a climatologia da precipitação dos dados observados do período 1970-1990 e dos dados interpolados do modelo regional Eta referentes ao cenário de controle, ambos interpolados à uma resolução de 0,25. A figura 6 compara a climatologia do modelo, que representa o valor médio anual de precipitação previsto pelo modelo Eta, com a média anual obtida dos dados observados.

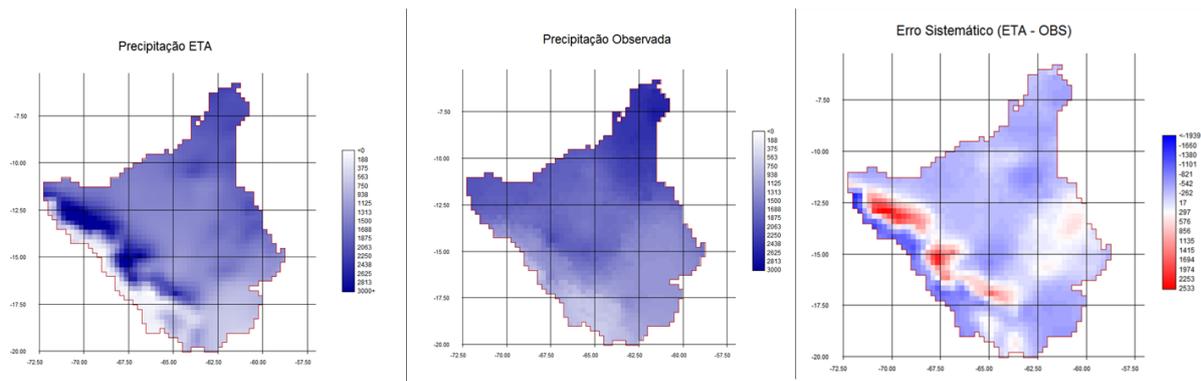


Figura 6: Valor médio anual de precipitação no período 1970-1990 na Bacia do Rio Madeira obtido dos dados previstos pelo modelo Eta, dados observados, e diferença entre as previsões do modelo

atmosférico e as observações.

Fica evidente que, para utilizar a precipitação prevista pelo modelo Eta como entrada no modelo hidrológico é necessário minimizar os erros sistemáticos. As climatologias anual (figura 7) e mensal (figuras: 8 e 9) de precipitação após a correção dos erros sistemáticos para o cenário atual e futuros são apresentadas abaixo:

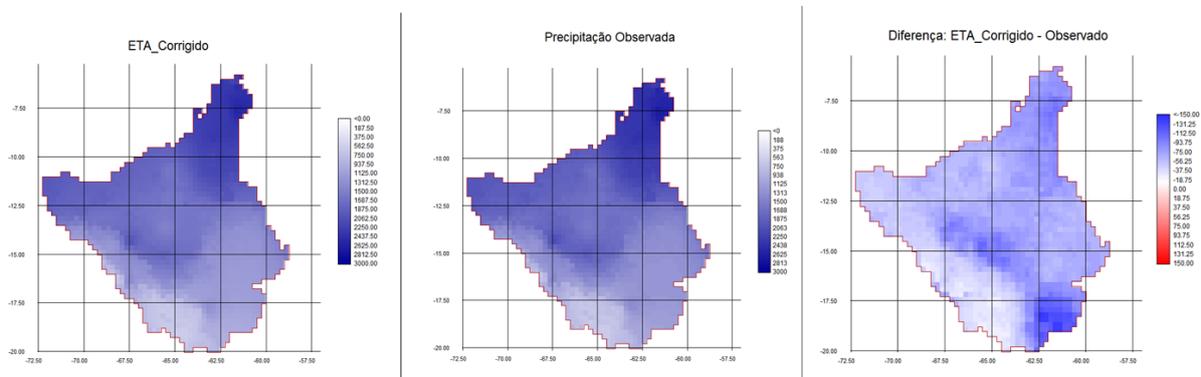


Figura 7: comparação entre a climatologia anual do período 1970-1990 dos dados observados e as chuvas geradas pelo modelo Eta após correção dos erros sistemáticos.

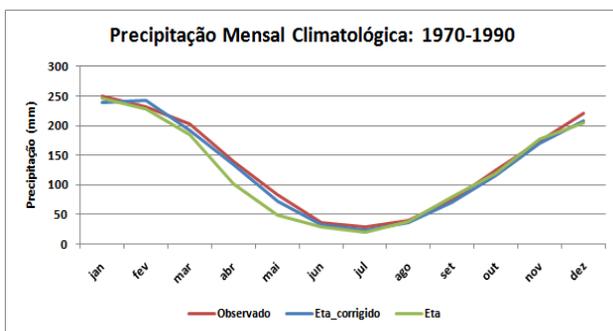


Figure 8 - comparação entre a climatologia de precipitação para clima atual.

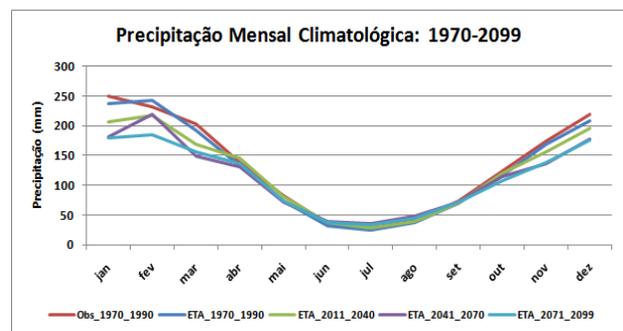


Figure 9 - comparação entre a climatologia de precipitação para os diferentes cenários .

As análises da precipitação média projetada pelo modelo Eta-CPTEC indicaram tendências razoáveis à redução de precipitações para os cenários futuros que podem estar associadas às mudanças no uso da terra, queimadas e desmatamento, pois, análises de diversos modelos globais sugerem um aumento da temperatura, provocadas pela alta concentração de gases de efeito estufa (IPCC, 2007), aliada às possíveis ocorrências dos fenômenos El-Niño e La-Niña, que por sua vez, atua nas alterações dos padrões normais de chuva. Segundo Marengo (et al., 2008; 2010) os principais fatores das últimas secas na Amazônia foram: o aquecimento anormal das águas superficiais nos oceanos e a ocorrência intensificada do El-Niño. Se configurarem os traços deste cenário de variabilidade no regime de chuvas associados a um clima mais quente é muito provável haver severas alterações no ecossistema e na biodiversidade na região do Madeira, principalmente sobre os recursos hídricos e florestais. Estudos reforçam a hipótese da floresta amazônica não resistir às mudanças do regime de chuvas e principalmente à elevação da temperatura média global durante o século XXI de aproximadamente 2°C a 4,5°C, projetada pelos diversos modelos do IPCC, confirmando assim os fortes indícios de mudanças climáticas. Neste contexto, Salazar et al.(2007) acreditam que a floresta possa ser substituída por uma vegetação do tipo savana, que são mais resistentes ao clima quente e seco.

Simulações hidrológicas (presente e futuro)

O objetivo desta fase do estudo é verificar em que medida as previsões do modelo hidrológico, utilizando os valores de precipitação simulados pelo modelo Eta-CPTEC, devidamente corrigidos dos erros sistemáticos de precipitação, consegue reproduzir as vazões da bacia do Rio Madeira nas condições de clima atual e futuro. Sendo assim, a verificação da qualidade das previsões do modelo Eta-CPTEC,

devidamente inseridas no modelo de MGB-INPE, foram feitas comparando as vazões médias mensais e as curvas de permanência observadas no período 1970-1990 (onde se dispõe de uma série de dados mais detalhada), com as médias mensais das previsões do Eta-CPTEC inserido no MGB-INPE e as correspondentes curvas de permanências.

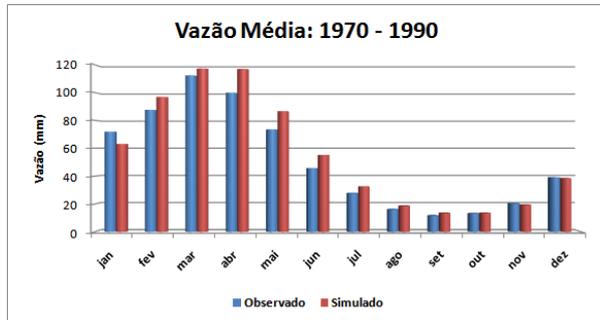


Figura 10 - Comparação da vazão média mensal observada e prevista pelo modelo MGB-INPE.

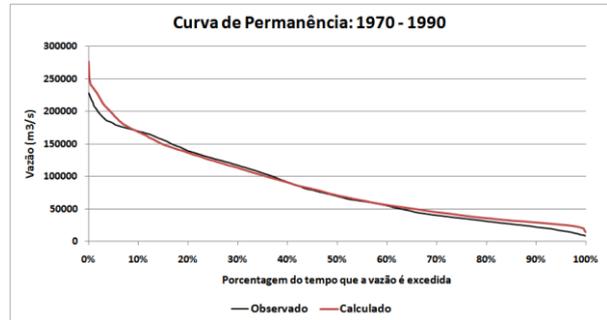


Figura 11 - Curvas de permanência observadas e da aplicação modelo hidrológico.

Pode-se concluir que o desempenho do MGB-INPE na simulação de vazões médias mensais, apesar de todas as simplificações é razoavelmente boa, pois, para o clima atual a variação climatológica de descargas foi inferior a 10%.

As simulações para os diferentes cenários de mudanças climáticas futuros foram comparados com o cenário de clima atual. A figura 12 mostra as vazões médias previstas pelo MGB-INPE para toda a bacia utilizando os dados do Eta-CPTEC correspondentes ao clima presente e futuro.

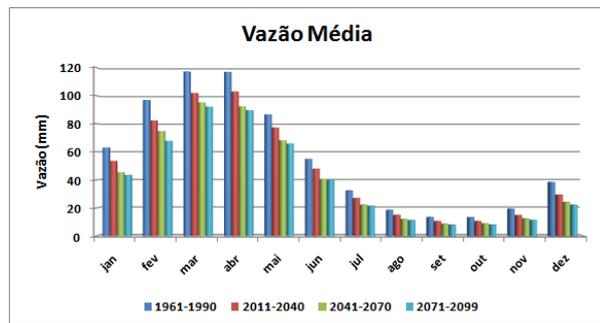


Figure 12 - Comparação entre vazões mensais médias prevista pelo modelo MGB-INPE

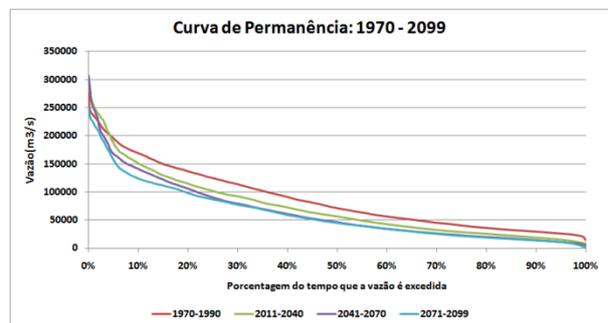
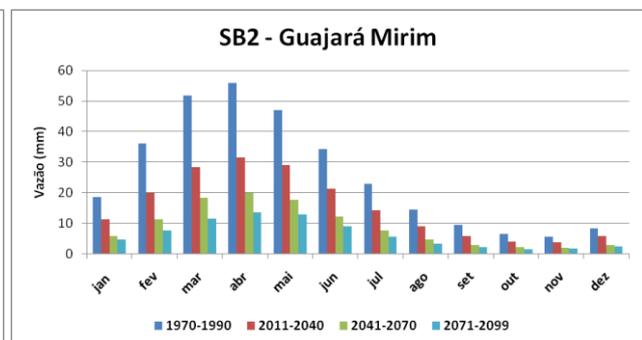
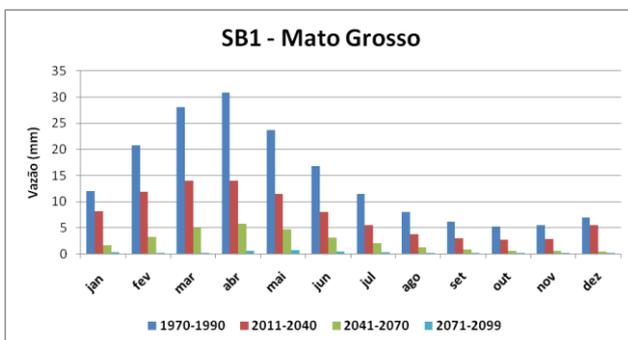


Figure 13 - Comparação das curvas de permanência para o cenário atual e futuro

A curva de permanência para os cenários futuros indica que no período 2041-2070 e 2071-2099 ocorrerá um aumento de vazões máximas na bacia, já os outros períodos indicam redução dos picos de vazão. Em geral, os cenários futuros apresentaram um expressivo decréscimo de vazão média mensal em quase todas as sub-bacias:



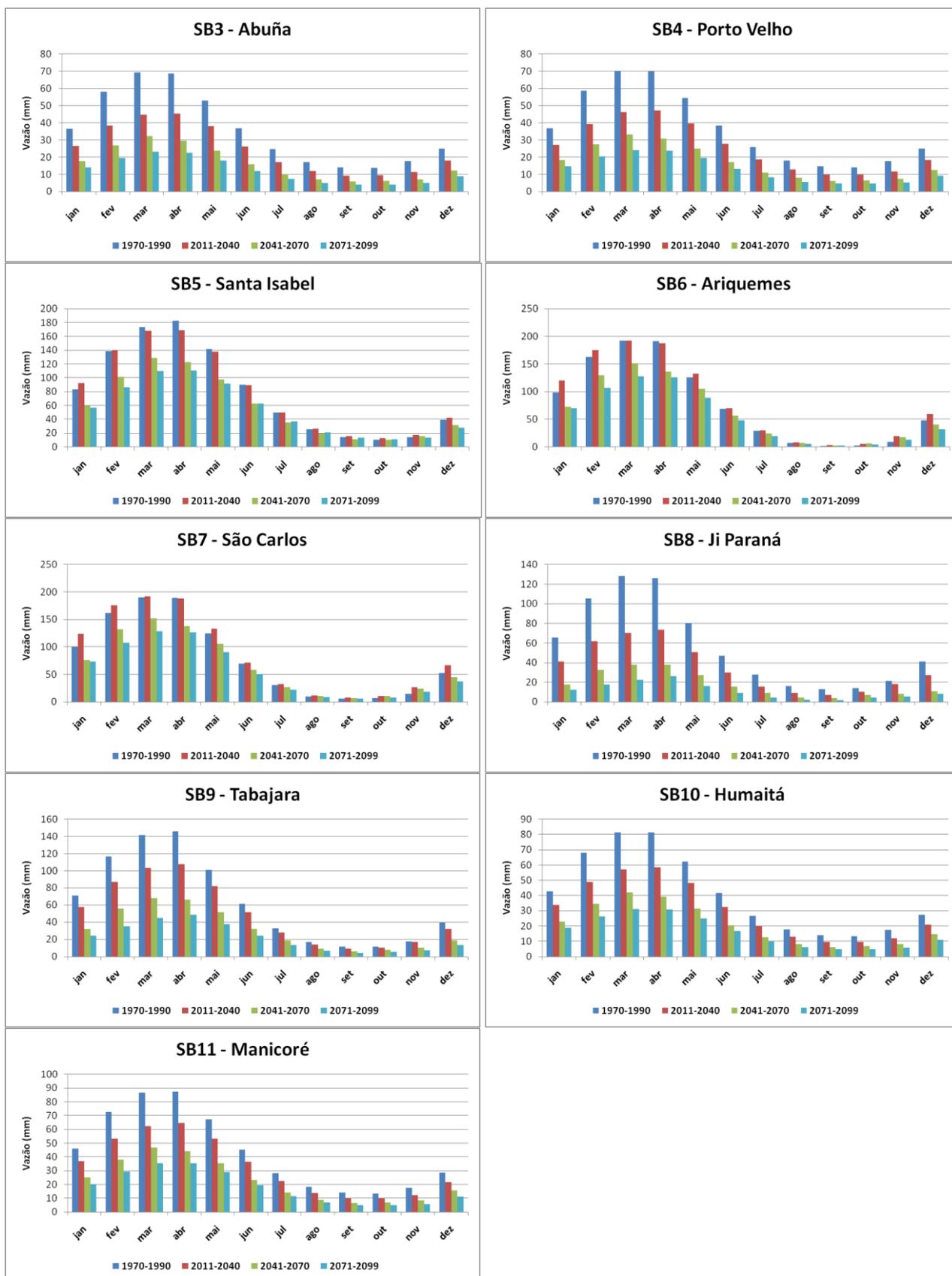


Figura 14 - Comparação das vazões médias mensais para o cenário atual e futuros por sub-bacia.

Foram avaliadas as variações percentuais da vazão média nos percentis 10, 50 e 90% dos cenários futuros com relação ao cenário atual (1970-1990) para cada sub-bacia:

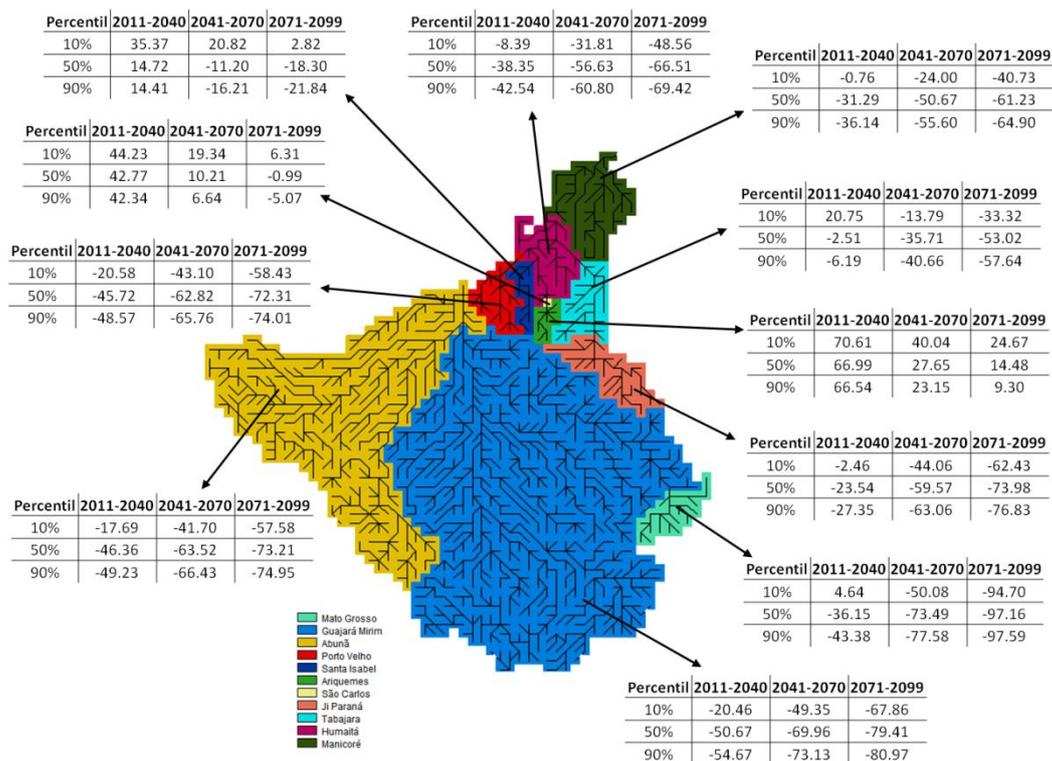


Figura 15 - Variação percentual nas vazões médias

Analisando as climatologias, o cenário referente ao período 2011-2040 apresenta uma redução em 5% na precipitação anual, aumento da evapotranspiração anual em 8% e diminuição da vazão média anual em 34% em relação ao período 1970-1990.

O cenário relativo ao período 2041-2070 mostra uma redução em 11% na precipitação anual e aumento da evapotranspiração anual em 15%, resultando numa diminuição em 59% na vazão média anual.

O cenário mais crítico corresponde ao período 2071-2099, em que houve uma redução em 13% na precipitação anual e aumento da evapotranspiração anual em 18%, impactando drasticamente a vazão em 69%.

As mudanças no uso do solo são as principais responsáveis pelas alterações nas variáveis do ciclo hidrológico numa bacia. Seus efeitos, além de ser um resultado das características inerentes a cada tipo de uso da terra, são integradores de processos de características heterogêneas em diferentes escalas espaciais e temporais. Tais heterogeneidades, no caso do uso da terra, caracterizam-se por paisagens fragmentadas, constituindo um dos padrões de paisagem característico das florestas tropicais na atualidade (Laurence e Bierregaard, 1997; Skole e Tucker, 1993), que afeta diretamente os processos ecológicos nos ecossistemas (p.e. Laurence et al., 1997), assim como os processos hidrológicos e climáticos (p.e. Avissar e Pielke, 1989; Kapos, 1989; Giambelluca et al., 2003; Ziegler et al., 2007).

De acordo com Rodriguez (2011), o impacto das mudanças do uso do solo nas descargas observadas na bacia depende da escala. Apenas nas bacias menores as mudanças na resposta hidrológica estão relacionadas com a mudança do uso do solo, enquanto que a resposta hidrológica da bacia inteira depende principalmente da variabilidade na precipitação. Este conceito justifica as significativas reduções das vazões no decorrer dos períodos, em que as sub-bacias mais impactadas foram as de maior escala. Em alguns casos, como nas sub-bacias de Mato Grosso, Guajará-Mirim e Ji-Paraná a redução nas descargas superou à 70% equiparados ao clima atual.

Segundo Nobre et al.(2007) as mudanças climáticas sobre o ecossistema Amazônia podem ser analisadas por diferentes perspectivas: variações climáticas decorrentes de causas ou fenômenos naturais, como por exemplo, o El Niño e La Niña;e, as mudanças climáticas por interferências e ações antrópicas, resultantes das alterações no uso do solo, ligadas diretamente ao desmatamento, as queimadas, a expansão da agricultura e pecuária, que por sua vez contribuem fortemente no aquecimento global devido as altas taxas de emissão de aerossóis. Estas mudanças representam um grande risco para o ciclo hidrológico na Amazônia, uma vez que o aumento de temperatura provocará uma maior evaporação e maior transpiração das plantas, o que levará a uma aceleração do ciclo hidrológico (Nobre *apud* Case, 2006), e conseqüentemente alterações nas características das estações secas e chuvosas, mitigando a incidência de eventos climáticos extremos, como as últimas secas severas de 1996-1997, 2004-2005(Tomasella et al., 2010) e 2010 (Marengo et al 2011).

CONCLUSÕES

Diante das projeções dos cenários climáticos futuros supracitados é muito provável que conseqüências adversas à biodiversidade possam ser confirmadas, decorrentes das alterações na disponibilidade hídrica da região do Madeira. Pois, os recursos hídricos da região são essenciais na manutenção e equilíbrio do ecossistema.

O modelo MGB-INPE apresentou um bom comportamento na simulação das series históricas de vazões na bacia, possibilitando a aplicação para a obtenção de cenários futuros. A análise de vazões médias mensais indicou que os cenários futuros deverão apresentar redução de vazões em média 54%. Isso pode ser explicado pela redução do volume de chuva precipitado e o significativo aumento da evapotranspiração decorrentes de uma provável situação climática global super aquecida.

Porém, salientamos que estes resultados podem incorporar incertezas em relação aos erros sistemáticos nas estimativas de precipitação, sendo que foi necessário realizar correções baseadas nos dados observados. Além disso, houve expressiva intensificação na estimativa de evapotranspiração para os cenários futuros, ambos gerados pelo modelo regional Eta-CPTEC. Dessa forma, podemos inferir que os dados disponibilizados pelo modelo regional Eta-CPTEC podem ser utilizados não somente em simulações hidrológicas, desde que seus erros sistemáticos sejam minimizados previamente.

Enfim, é necessário averiguar detalhadamente estes resultados em suas particularidades. Não há como no momento avaliar o grau de incerteza do cenário traçado, mas, o desempenho do modelo nas condições atuais é bastante satisfatório.

AGRADECIMENTOS

O primeiro autor agradece a rede GEOMA e o CNPQ pelo auxílio financeiro e aos revisores pelas valiosas sugestões.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ANDRADE, C. D.: **Análise pluviométrica da bacia transfronteiriça do rio Madeira**. Rio de Janeiro: UFRJ/COPPE.2008.

ANDRÉASSIAN V.: Waters and forests: from historical controversy to scientific debate. **Journal of Hydrology**, V. 291, I. 1-2, p. 1-27, 2004.

AVISSAR, R.; PIELKE, R. A. A parameterization of heterogeneous land surfaces for atmospheric numerical models and its impact on regional meteorology. **Monthly Weather Review**, v. 117, p. 2113-2136, 1989.

BEVEN, K.J.; KIRKBY, M.J. A physically based variable contributing area model of basin hydrology, **Hydrological Sciences Bulletin**, v. 24, p. 43-69, 1979.

BROWN, A.E., Zhang, L., McMahon, T.A., Western, A.W., Vertessy, R.A. A review of paired catchments studies for determining changes in water yield resulting from alterations in vegetation. **Journal of Hydrology**, v.310, p.28-61, 2005.

BRUIJNZEEL, L. A.: Hydrological functions of tropical forests: not seeing the soil for the trees? **Agriculture, Ecosystems & Environment**, v.104, p.185-228, 2004.

BURGUEÑO A, Lana X, Serra C: Monthly and annual statistical distributions of daily rainfall at the Fabra Observatory (Barcelona, NE Spain) for the years 1917–1999, **Springer-Verlag** 2004.

BURGUEÑO A, Martínez MD, Lana X, Serra C: Statistical distributions of daily rainfall regime in Europe for the period 1951–2000, **Springer-Verlag** 2010.

CHOU, S.C.; Marengo, J.A.; Dereczynski, C.P.; Waldheim, P.V.; Manzi, A.O. Comparison of CPTEC GCM and Eta Model results with observational data from the Rondonia LBA reference site, Brazil. **Journal of the Meteorological Society of Japan**, v. 85A, p. 25-42, 2007.

CHOU, S.C.; Marengo, J.A.; Lyra, A.A.; Sueiro, G.; Pesquero, J.F.; Alves, L.M.; Kay, G.; Betts, R.; Chagas, D.J.; Gomes, J.L.; Bustamante, J.F.; Tavares, P. ;Downscaling of South America present climate driven by 4-member HadCM3 runs. **Springer-Verlag** 2011.

CLARCK, C.O., Storage and the Unit Hydrograph, **Trans. Am. Soc. Civil Engrs.**, vol. 110, 1419-1488, 1945.

COLLISCHONN, W.: **Simulação hidrológica de grandes bacias**. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, RS, p. 46-48, 2001.

COLLISCHONN, W.; Allasia, D.G.; Silva, B.C.; Tucci, C.E.M. The MGB-IPH model for large-scale rainfall-runoff modelling. **Hydrological Sciences Journal**, v. 52, p. 878-895, 2007.

DIJKSHOORN JA, Huting JRM and Tempel P 2005. Update of the 1:5 million Soil and Terrain Database for Latin America and the Caribbean (SOTERLAC; version 2.0). Report 2005/01, **ISRIC – World Soil Information**, Wageningen.

GASH, J.H.C.; Lloyd, C.R.; Lachaud, G. Estimating sparse forest rainfall interception with an analytical model. **Journal of Hydrology**, v. 170, p. 79-86, 1995.

GIAMBELLUCA, T.W.; Ziegler, A.D.; Nullet, M.A.; Truong, D.M.; Tran, L.T. Transpiration in a small tropical forest patch. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 117, p. 1-22, 2003.

IPCC, AR4, WGI Report. **Cambridge Univ. Press**. 2007.

JARVIS, N.J. A simple empirical model of root water uptake. **Journal of Hydrology**, v. 107, p. 57-72, 1989.

KAPOS, V. Effects of isolation on the water status of forest patches in the Brazilian Amazon. **Journal of Tropical Ecology**, v. 5, p. 173-185, 1989.

LAURENCE, W.F.; Bierregaard, R.O.JR. **Tropical Forest Remnants: Ecology, Management, and Conservation of Fragmented Communities**. Chicago: The University of Chicago, 1997. 616p.

MARENGO, J. A.; Nobre, C. A.; Tomasella, J.; Oyama, M. D.; Oliveira, G. S.; Oliveira, R.; Camargo, H.; Alves, L. M. and Brown, I. F. :The Drought of Amazonia in 2005, **Journal of climate**, v21, p.495-516, 2008.

MESINGER, F. Forward-backward scheme, and its use in a limited area model. **Contribution to Atmospheric Physics**, v. 50, p. 200-210, 1977.

NASH, J.E., A Unit Hydrograph study with particular reference to British catchments, **Proc. Inst. Civ. Engrs.**, vol. 17, 249-282, 1960.

NOBRE, C.A., “**Amazônia: fonte ou sumidouro de carbono?**” Em: *Causas e dinâmica do desmatamento na Amazônia*. Ministério do Meio Ambiente, p.197-224. 2001.

NOBRE, Carlos A; Sampaio, G.; Salazar, L.: **Mudanças climáticas e Amazônia**. Cienc. Cult. , São Paulo, v. 59, n. 3, 2007 . Disponível em: <<http://cienciaecultura.bvs.br/pdf/cic/v59n3/a12v59n3.pdf>>. Acesso em: 06 Fev 2011.

PAZ, A. R., MGB-GIS (2008), **Manual do Usuário**. Instituto de Pesquisas Hidráulicas - IPH/UFRGS, versão 2.0.

PAZ, A.R.; Collischonn, W. : **Derivação de rede de drenagem a partir de dados do SRTM**. Rev. Geogr. Acadêmica v.2 n.2 (viii.2008) 84-95.

PIMENTEL, L.S. e Ewen, J., 2000, “**Modelagem hidrológica de grandes bacias hidrográficas: a necessidade de novas metodologias**”. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, v.5, n. 4, pp. 81-92.

RIBEIRO, N. A.: **Simulação Hidrológica na Amazônia: Rio Madeira** [Rio de Janeiro] 2006. XVII, 178 p. 29,7 cm (COPPE/UFRJ, D.Sc., Engenharia Civil, 2006). Tese - Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE.

RODRIGUEZ, D. A.: **Impactos dos padrões espaciais da vegetação nas variáveis atmosférica e terrestre do ciclo hidrológico, em bacia de floresta amazônica**. 2011. 208 f. Tese (Doutorado em Meteorologia), Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 2011.

SALAZAR, L.F.; Nobre, C.A. and Oyama, M.D. "Climatic change consequences on the biome distribution in tropical South America". **Geophysical Research Letters**. *In press*. 2007

SESTINI, M. F. **Elaboração de mapas de vegetação para utilização em modelos meteorológicos e hidrológicos**. São José dos Campos: INPE, 2002.

SESTINI, M. F. **Elaboração de mapas de vegetação para utilização em modelos meteorológicos e hidrológicos**. São José dos Campos: INPE, 2002.

SKOLE, D.L. and Tucker, C.J. 1993: Tropical deforestation and habitat fragmentation in the Amazon: satellite data from 1978 to 1988. **Science** **260**, 1905—1910

SNYDER, F.F., **Synthetic Unit-Graphs**, Trans. Am. Geophys. Union, vol. 19, 447-454, 1938.

TOMASELLA, J.; Borma, L.S.; Marengo, J.A.; Rodriguez, D.A.; Cuartas, L.A.; Nobre, C.A. and Prado, M.C.R. The droughts of 1996–1997 and 2004–2005 in Amazonia hydrological response in the river mainstem. **Hydrol. Process.** 25, 1228–1242 (2011), 2010.

TRANCOSO, R. : **Mudanças na cobertura da terra e alterações na resposta hidrológica de bacias hidrográficas na Amazônia**. Dissertação de Mestrado INPA/UFAM – Manaus- 2006.

TUCCI, C.E.M. **Modelos Hidrológicos**. Editora da UFRGS ABRH 678p, 2005.

U.S. Soil Conservation Service, National Engineering Handbook, Séc. 4, Hydrology, U.S. Department of Agriculture, Washington, D.C., 1985.

WIGMOSTA, M.S.; Nijssen, B.; Storck, P.; Lettenmaier, D.P. The Distributed Hydrology Soil Vegetation Model, In: Singh, V.P.; Frevert, D.K. (Ed.) **Mathematical Models of Small Watershed Hydrology and Applications**. Littleton, CO: Water Resource Publications, 2002, p. 7-42.

Wood, A. W.; Maurer, E. P.; Kumar, A.; Lettenmaier, D. P. Long-range experimental hydrologic forecasting for the eastern United States. **Journal of Geophysical Research Atmospheres**, 107, 4429, 2002.

ZHAO, R.J. and Liu, X.R. The Xinanjiang model. In: Singh, V.P. (Ed.) **Computer Models of Watershed Hydrology**. Highlands Ranch: Water Resources Publication, 1995. p. 215–232.

ZHAO, R.J. The Xinanjiang model applied in China. **Journal of Hydrology**, v. **135**, p.371–381, 1992.