

ANÁLISE DE SENSIBILIDADE DA EVAPOTRANSPIRAÇÃO E VAZÃO À VARIABILIDADE CLIMÁTICA NA AMÉRICA DO SUL ATRAVÉS DE MODELAGEM HIDROLÓGICA

Elisa Bolzan Steinke^{1}; Rodrigo Cauduro Dias de Paiva¹; Vinícius Alencar Siqueira¹; Ayan Santos Fleischmann¹; João Paulo Lyra Fialho Brêda¹; Walter Collischonn¹*

Resumo – Apresenta-se resultados de sensibilidade na vazão e na evapotranspiração com um modelo hidrológico na América do Sul, diante da variação na precipitação. Essa análise é motivada por cenários de fortes alterações climáticas devido à maior concentração atmosférica de gases do efeito estufa. Assim, consideram-se importantes estudos de como alterações nos regimes de chuva podem impactar na disponibilidade hídrica e aumento de eventos extremos de secas e inundações. Uma forma de avaliação integrada está em desenvolvimento para América do Sul através da modelagem hidrológica com o MGB-IPH. Já foi simulado com sucesso um grande número de bacias do continente, as calibrações realizadas já permitem análises de cenários mais abrangentes da sensibilidade que foram realizados com base na alteração da precipitação. Conforme as simulações nos cenários forçados de 20% de aumento e redução na chuva, foram geradas mapas indicando zonas e trechos de maior sensibilidade da vazão ou evapotranspiração. Também nos hidrogramas estão indicadas bacias mais sensíveis nos extremos máximos ou vazão de estiagem. Resultados de modelos de previsões climáticas ainda devem ser a fonte de dados para simulações nos impactos sobre as bacias, frente à alteração da temperatura e diferentes cenários possíveis.

Palavras-Chave – sensibilidade, mudanças climáticas, América do Sul

SENSITIVITY ANALYSIS OF EVAPOTRANSPIRATION AND FLOW TO CLIMATE VARIABILITY IN SOUTH AMERICA BY HYDROLOGICAL MODELING

Abstract – In this paper, results of flow and evapotranspiration sensitivity in South America with a hydrological modelling by varying the precipitation are presented. This analysis is motivated by scenarios of strong climate change due to the higher atmospheric concentration of greenhouse gases. Thus, studies of how changes in rainfall regimes can impact water availability and increase extreme events of droughts and floods are considered important. An integrated assessment form is under development for South America through hydrological modelling with the MGB-IPH. A large number of basins on the continent have already been successfully simulated, and the calibrations carried out already allow the analysis of more comprehensive sensitivity scenarios that were performed based on the change in precipitation. According to the simulations in the forced scenarios of 20% increase and reduction in rain, maps were generated indicating zones and stretches of greater sensitivity of the flow or evapotranspiration. Also in the hydrograms are indicated more sensitive basins in the extreme extremes or flow of drought. Results of climate forecast models should still be the source of data for simulations of basin impacts, thanks to temperature change and different possible scenarios.

Keywords – sensitivity, climate change, South America

¹ Instituto de Pesquisas Hidráulicas da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre/Brasil.
*elisa.b.steinke@gmail.com

INTRODUÇÃO –

Na América do sul estão localizadas muitas bacias de destaque no mundo pela área de drenagem, vazão de escoamento e conflitos por causa da água, como por exemplo, a Bacia Amazônica. Esses recursos hídricos são importantes, em grande parte, para abastecimento humano, geração de energia, irrigação e navegação. Sua disponibilidade, assim como riscos de secas e cheias podem ser impactados pela variabilidade climática e assim afetar sensivelmente o meio biótico e antrópico a eles ligados. Visto que estudos climáticos apontam para alterações no clima devido à emissão de gases de efeito estufa (IPCC 2013), coloca-se em questão de que forma essas mudanças impactarão futuramente os recursos hídricos com os quais toda a sociedade convive.

Através de avaliações da sensibilidade hidrológica a alterações do clima de forma integrada na América do sul pode-se ampliar o conhecimento sobre as áreas de maior risco frente a diferentes cenários. Pretende-se também reunir ferramentas para analisar esses impactos nas bacias sob os fatores que influenciam uma maior ou menor sensibilidade. Modelos hidrológicos como o MGB-IPH fornecem os meios para simulação dessas alterações possível, e através do desenvolvimento de um modelo hidrológico integrado das bacias da América do Sul (Siqueira et al. 2017) poderão ser desenvolvidas projeções acerca de eventos extremos e avaliação da resiliência da disponibilidade hídrica frente às mudanças climáticas.

Visto que muitas previsões indicam variação no volume de precipitação como consequência dessas alterações no clima, este trabalho se propõe a investigar alterações nesse valor de entrada. Esta primeira análise integrada das mudanças hidrológicas na América Latina com base em modelagem hidrológica-hidrodinâmica regional discutirá a sensibilidade da evapotranspiração e vazão em escala macro. Resultados para bacias e exutórios de interesse selecionados também serão abordados.

MÉTODOS –

Modelo MGB-IPH

O MGB-IPH é um modelo hidrológico de grande escala baseado em processos, já aplicado com sucesso em um grande número de simulações na América do Sul (e.g. Collischonn et al. 2007; Paiva et al. 2013; Pontes et al., 2017). A bacia hidrográfica é dividida em minibacias, subdivididas em unidades de resposta hidrológica (URH) em função da vegetação e usos do solo encontrados. São simulados os processos verticais: balanço d'água no solo, balanço de energia e evapotranspiração, interceptação, infiltração no solo e escoamento superficial, escoamento e percolação ao aquífero. O modelo calcula a evapotranspiração através da equação de Peaman-Monteith, com uma abordagem similar a Wigmosta et al. (1994). O volume resultante do balanço hídrico é propagado em cada minibacia através de reservatórios lineares que representam o escoamento superficial, subsuperficial e subterrâneo. Na rede de drenagem sua propagação foi simulada com uma formulação inercial local (Pontes et al., 2017).

Modelo hidrológico da América do sul

A discretização da bacia em trechos de rio, minibacias e seções transversais para o modelo hidrológico-hidrodinâmico da América do sul foi realizada a partir do mapa global de direções de fluxo do HydroSHEDS (Lehrer et al. 2008) e do Bare-Earth SRTM v.1 DEM (O'Loughlin et al. 2016), ambos com resolução espacial de ~ 450 m. Foram geradas 33749 minibacias, posteriormente agrupadas em 296 sub-bacias. Dados meteorológicos foram obtidos da base de dados CRU CL 2.0 (New et al., 2002). Utilizou-se estimativas diárias de precipitação por satélite do produto MSWEP v 1.1 (Beck et al., 2017), com resolução espacial de $0.25^\circ \times 0.25^\circ$. Os parâmetros do modelo foram calibrados de forma manual a partir de dados de vazão obtidos de várias instituições da América do

Sul, filtrados com área de drenagem > 10.000 km². Maiores detalhes podem ser encontrados no artigo complementar de Siqueira et al. (2017).

Cenários e aspectos analisados

Cada bacia é subdividida em minibacias, onde o modelo simulou os valores de evapotranspiração e vazão diários gerados. Como entrada tem-se os valores para precipitação diária em pontos de coleta de todos os países entre os anos de 1990 e 2010. Três diferentes cenários foram simulados, um com precipitação observada (P) e os outros dois forçados para mais 20% e menos 20% de volume de chuva diária, respectivamente. Os dados da saída diários foram valores de evapotranspiração (Evap) para cada uma das minibacias e dados de vazão (Q) para cada trecho de rio correspondente. Para cada uma delas, calculou-se a evapotranspiração e vazão média, e a seguir, a variação percentual em relação aos dados de saída simulados com a precipitação original. O valor de 20% de aumento e redução foi escolhido por representar uma variação significativa, mas possível com base em cenários de alterações climáticas.

Calculou-se uma média entre as duas variações absolutas em cada minibacia e a seguir o valor de sensibilidade, definido por $\Delta Q_{med}/Q_{med}$ dividido por $\Delta P_{med}/P_{med}$ (Chiew 2006) no caso da vazão e $\Delta Evap_{med}/Evap_{med}$ dividido por $\Delta P_{med}/P_{med}$ no caso da evapotranspiração. Para os resultados foram gerados os mapas indicando as sensibilidades, que ilustram em cada trecho ou minibacia o quanto variou em função do aumento e redução. Também foram escolhidas oito bacias representativas da América do sul, destacadas na Figura 1, para as quais se calculou a sensibilidade média da evapotranspiração. No mapa representaram-se todas as redes com área de drenagem maior que 10.000 km² e destacaram-se os trechos com área de drenagem maior que 200.000 km², como é o caso do exutório de todas as bacias selecionadas. Para esses pontos também foi gerado hidrograma com a vazão original, aumentada e reduzida pela modificação da precipitação.

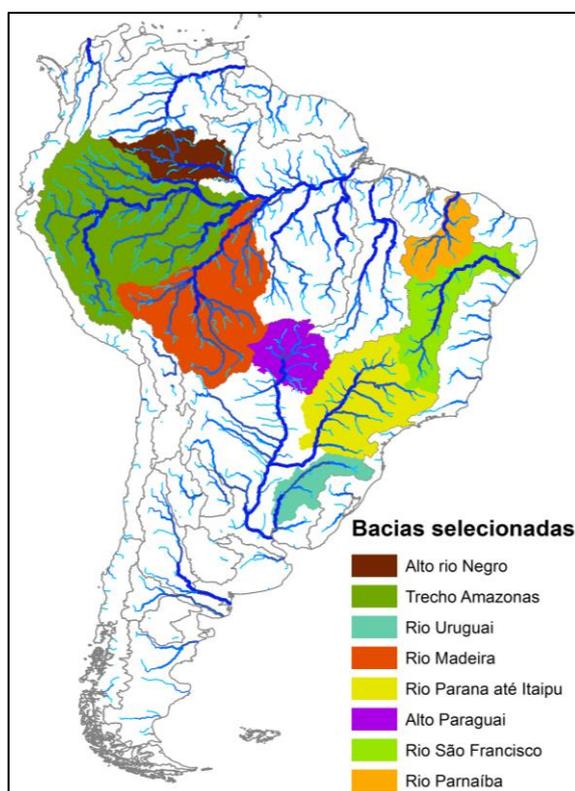


Figura 1: Mapa da América do sul com bacias selecionadas

RESULTADOS

Evapotranspiração

Após cálculo de variação da evapotranspiração gerada para aumento e redução de 20% na precipitação, verificou-se uma correlação muito alta (0,97) entre o módulo das variações em cada minibacia. A seguir calculou-se para cada bacia os dados demonstrados na Tabela 1, onde a sensibilidade média foi calculada dividindo-se a média das variações por 20%. Esta tabela indica claramente as bacias mais sensíveis (Parnaíba e São Francisco) e as menos (Alto Negro e Amazonas/Solimões em Manacapuru), grande distinção que pode ser observada também através da Figura 2. Este mapa é resultante das sensibilidades de cada minibacia simulada.

Bacia	Área (km ²)	Variação para aumento (P + 20%)	Variação para redução (P - 20%)	Sensibilidade média
Alto Negro	596.196	2,51%	-4,18%	0,17
Madeira	1.326.236	5,93%	-8,07%	0,35
Amazonas/Solimões	2.205.536	3,08%	-4,57%	0,19
Parnaíba	345.229	15,14%	-17,54%	0,82
São Francisco	638.874	14,52%	-16,15%	0,77
Uruguai	267.151	5,02%	-7,52%	0,31
Paraná até Itaipu	911.661	6,41%	-9,90%	0,41
Alto Paraguai	376.032	8,45%	-11,08%	0,49

Tabela 1: Variações da evapotranspiração ao aumento de 20% e redução de 20% na precipitação e sensibilidade média.

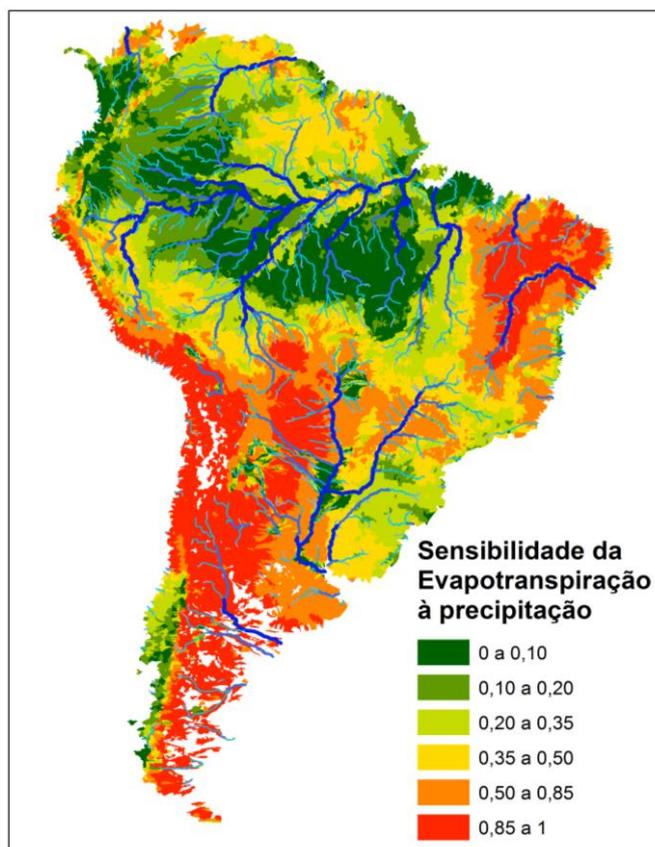


Figura 2 - Sensibilidade média da evapotranspiração à variação para mais e para menos 20% na precipitação.

Foram observados valores de sensibilidade muito próximos à zero até muito próximos a um, que podem ser justificados pela enorme diversidade de tipos e uso do solo, clima, vegetação e sazonalidade das regiões analisadas. Um padrão de baixa sensibilidade foi observado na região sul e noroeste da bacia amazônica, onde os 20% de alteração na precipitação geraram no máximo 4% de variação na evapotranspiração (equivalente à sensibilidade de 0,2). As zonas mais áridas, mais a jusante do rio São Francisco e na bacia do rio Parnaíba, assim como na região a oeste dos Andes abaixo da linha do Equador e nas redondezas do trópico de capricórnio, e mais ao sul o oeste e centro da Argentina, foram as que apresentaram maior sensibilidade à variação do volume de chuva. Visto que são regiões com grande potencial de evaporação, mas não têm disponibilidade de água suficiente para alcançar esse patamar, são fortemente impactadas nessa simulação. Já áreas como a região amazônica têm a razão evaporação real/ evaporação potencial já próxima à unidade, ou seja, não é a precipitação que controla a sensibilidade deste bioma (Churkina, 1998). Como exemplo, destaca-se a bacia do alto rio Negro, que apresentou a menor sensibilidade, aponta-se a elevada precipitação anual (acima de 3000mm/ano) e a baixa sazonalidade com boa distribuição durante o ano como justificativa desse resultado.

Vazão

Os resultados de sensibilidade da vazão se mostraram em alguns trechos ligeiramente diferentes para os cenários de aumento ou redução na precipitação, logo se optou por representá-los separadamente na Figura 3. A sensibilidade variou entre um fator de 1,5 (ou seja, variação de 30%) e fatores maiores do que 2,15 (i.e. maiores que 43%). Regiões que apresentaram semelhantes resultados foram do rio Negro e Solimões, que também têm, além da evapotranspiração, a vazão pouco sensível. A bacia do rio Madeira tem maior sensibilidade à evapotranspiração a montante (Figura 2), entretanto para vazão que será escoada em toda bacia, a sensibilidade é alta. O rio Uruguai também apresentou sensibilidade similar entre o aumento e a redução, enquanto o rio São Francisco se apresentou muito mais sensível ao aumento do volume de chuva, que acarretará em maior disponibilidade de água para escoamento.

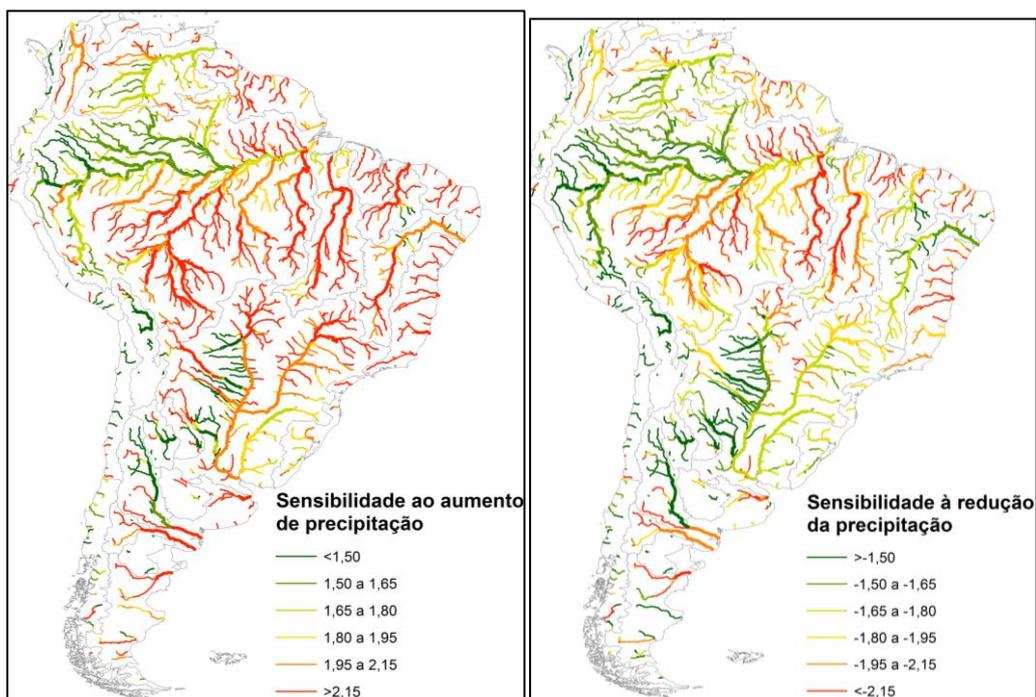


Figura 3: Sensibilidades da vazão ao aumento e redução de 20% na precipitação separadamente.

Hidrogramas

Para o exutório de cada bacia analisada gerou-se os hidrogramas correspondentes aos três cenários. Nota-se, comportamentos diferentes referentes à variação nas vazões de cheia e nas de estiagem. Rio Negro e Solimões apresentaram variações semelhantes nos picos Figura 4 e 5.

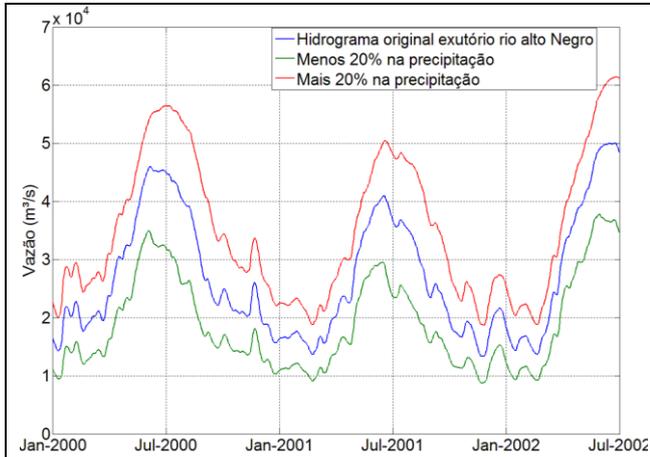


Figura 4: Hidrograma do exutório do alto rio Negro

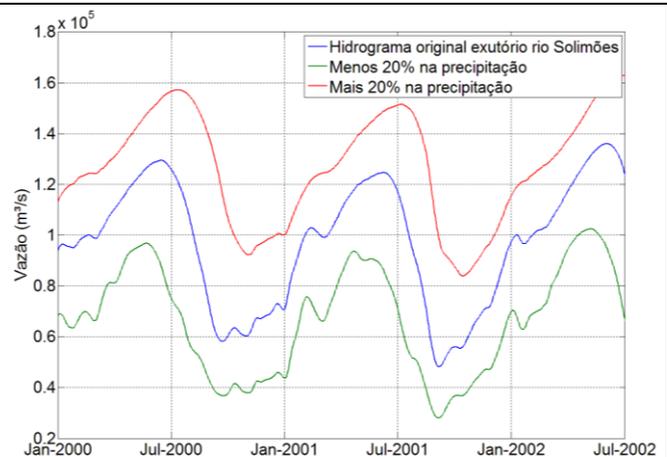


Figura 5: Hidrograma do rio Solimões em Manacapuru

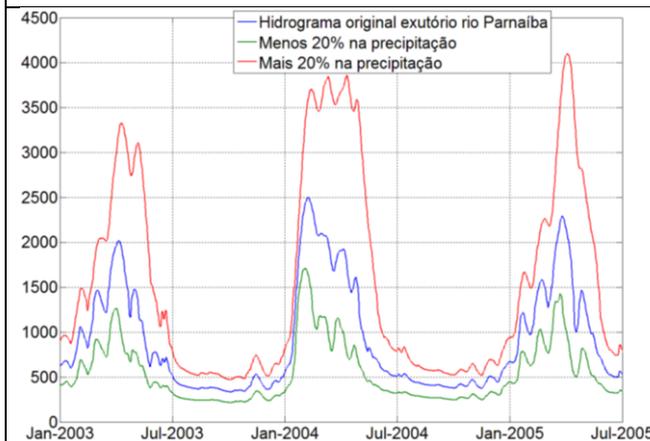


Figura 6: Hidrograma do exutório do rio Parnaíba

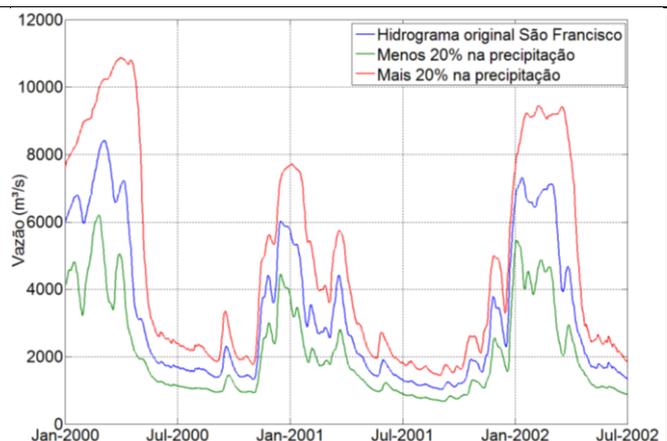


Figura 7: Hidrograma do exutório do rio São Francisco

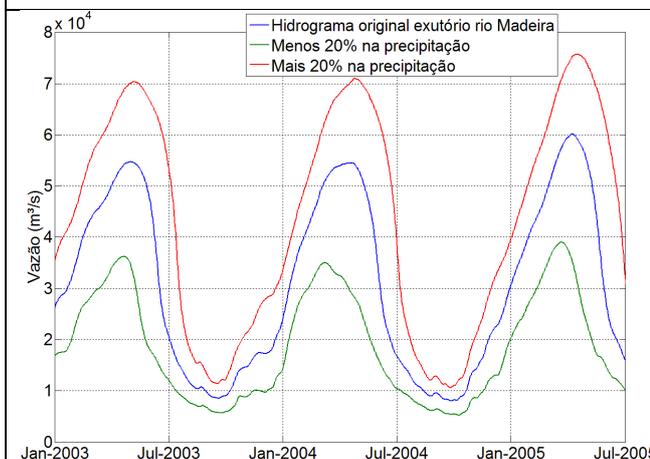


Figura 8: Hidrograma do exutório do rio Madeira

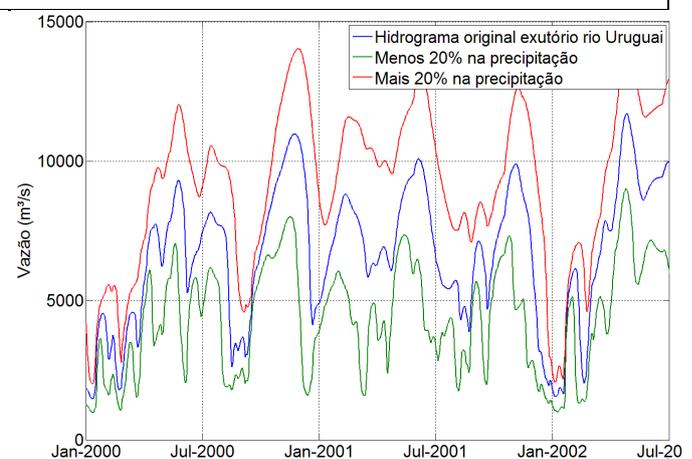


Figura 9: Hidrograma do exutório do rio Uruguai

As Figuras 6 e 7 do semi-árido representam os locais onde a evapotranspiração é muito sensível e as vazões de cheia também, enquanto as de estiagem tem uma variação muito menor. O hidrograma do rio Madeira, Figura 8 também teve grandes variações nas cheias e menores variações nas vazões mínimas. O hidrograma da Figura 9, do exutório do rio Uruguai apresenta um comportamento mais variado quando comparado aos outros, onde fica clara a sua não sazonalidade, o contrário dos outros exutórios. Além disso, no quesito evapotranspiração, a bacia do rio Uruguai é a terceira menos sensível das analisadas, ficando atrás apenas das do rio Parnaíba e São Francisco ambos do nordeste brasileiro. A sensibilidade da vazão também é pequena, entretanto, nota-se, picos acentuados de redução de vazão para precipitação reduzida de 20%, bem mais descontínuos quando comparados com a vazão reduzida dos outros hidrogramas.

CONCLUSÃO

As simulações com variação da precipitação para mais 20% e menos 20% geram resultados diversos para as diferentes bacias da América do sul. A análise da sensibilidade da evapotranspiração demonstrou-se bastante similar para os dois cenários alterados, foram encontrados valores de 0,17 a 0,82 como média das bacias analisadas. Destaca-se a bacia do rio Parnaíba e São Francisco, e no mapa integrado, as regiões mais áridas próximas à cordilheira dos Andes, com evapotranspiração mais sensível. Pode-se concluir que região do alto rio Negro e noroeste da bacia amazônica são pouco afetadas pela alteração no volume de chuva, o que não garante a sua baixa sensibilidade à mudança em outros fatores de entrada do modelo, como temperatura e insolação, que também podem sofrer com as alterações climáticas. Já a região sul da bacia amazônica apresenta alta sensibilidade na vazão tanto para aumento ou redução na precipitação. A avaliação dos hidrogramas nos exutórios chama atenção para as futuras variações principalmente em picos de cheias, que em rios como Parnaíba, por exemplo, são muito mais sensíveis que as vazões de estiagem. Diversas outras consequências das mudanças climáticas nos recursos hídricos ainda devem ser modeladas e analisadas, a sensibilidade de cada bacia e trecho de drenagem é uma ferramenta importantíssima para a análise de ações atuais que aumentem a resiliência da sociedade frente a essas alterações.

REFERÊNCIAS

- CHIEW, F. H. (2006). An overview of methods for estimating climate change impact on runoff. In *30th Hydrology & Water Resources Symposium: Past, Present & Future* (p. 643). Conference Design.
- CHURKINA, G. (1998). Contrasting climatic controls on the estimated productivity of global terrestrial biomes. *SW Running – Ecosystems*
- COLLISCHONN, W.; ALLASIA, D.; DA SILVA, B.C.; TUCCI, C.E.M. (2007). The MGB-IPH model for large-scale rainfall-runoff modelling. *Hydrological Sciences Journal*, v. 52, n. 5, pp. 878-895.
- LEHNER B, VERDIN K, JARVIS A. (2008). New global hydrography derived from spaceborne elevation data. *Eos, Transactions American Geophysical Union*, v. 89, n. 10, pp.: 93–94.
- IPCC (2013) Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Stocker, T.F., Qin, D., Plattner, G.-K., Tignor, M., Allen, S.K., Boschung, J., Nauels, A., Xia, Y., Bex, V. and Midgley, P.M. Eds., Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 1535. <http://dx.doi.org/10.1017/CBO9781107415324>.

O'LOUGHLIN, F. E., PAIVA, R. C. D., DURAND, M., ALSDORF, D. E., BATES, P. D. (2016). A multi-sensor approach towards a global vegetation corrected SRTM DEM product. *Remote Sensing of Environment*, 182, pp. 49-59.

PAIVA, R. C. D., D. C. BUARQUE, W. COLLISCHONN, M.-P. BONNET, F. FRAPPART, S. CALMANT, AND C. A. B. MENDES, (2013). Large-scale hydrologic and hydrodynamic modeling of the Amazon River basin, *Water Resources Research*, 49, pp. 1226–1243.

PONTES, P. R. M.; FAN, F. M.; SANTOS, A. S.; PAIVA, R. C. D.; BUARQUE, D. C.; SIQUEIRA, V. A.; JARDIM, P. F.; SORRIBAS, M. V.; COLLISCHONN, W. (2017); MGB-IPH model for hydrological and hydraulic simulation of large floodplain river systems coupled with open source GIS. *Environmental Modelling & Software*, v.94, pp.1-20.

SIQUEIRA, V.A.; FLEISCHMANN, A.S.; FAN, F.M.; PAIVA, R.C.D.; PONTES, P.R.M.; COLLISCHONN, W. (2017) Desenvolvimento de um modelo hidrológico-hidrodinâmico para a América do Sul – parte 1. In: XXII Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos (SBRH), 22, 2017. Florianópolis. Anais... Porto Alegre: ABRH, 2017.

WIGMOSTA, M. S.; VAIL, L. W.; LETTENMAIER, D. P. A distributed hydrology–vegetation model for complex terrain. *Water Resources Research* v. 30, n 6, pp. 1665–1679. 1994