

XXIV SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS

REDUÇÃO DA VAZÃO NO RIO CARINHANA NOS ÚLTIMOS ANOS PODE SER EXPLICADA PELA REDUÇÃO DA CHUVA

Walter Collischonn¹ ; Pedro Frediani Jardim² & Rafael Barbedo Fontana³

Palavras-Chave – tendência hidrológica; redução da vazão; mudança climática

INTRODUÇÃO

Uma questão fundamental nas atividades econômicas que dependem dos recursos hídricos é avaliar e prever o quanto as variáveis hidrológicas, como a vazão dos rios, podem sofrer alterações em função de mudanças de diversos tipos: da vegetação, do clima e dos usos da água. Esta questão está por trás de projeções de impactos de mudanças climáticas, do reconhecimento do valor dos serviços ambientais e da tomada de decisão com relação à infraestrutura para atender aos diversos usos da água.

Do ponto de vista da ciência hidrológica esta questão da mudança das variáveis hidrológicas foi colocada no centro das discussões, recentemente, com o início da década científica Panta Rhei (Montanari et al., 2013), organizada pela IAHS (International Association of Hydrological Sciences). Além disso, das 23 questões fundamentais da hidrologia listadas por Blöschl et al. (2019), pelo menos quatro delas estão relacionadas diretamente à mudança das variáveis hidrológicas e sua predição.

A mudança nas variáveis hidrológicas, notadamente na vazão dos rios, também está no centro de uma profunda crise recente no Brasil, porque vários rios nas regiões Sudeste e Centro-Oeste passam, atualmente, por situações inéditas de seca. Diversos rios estão com uma tendência de redução de vazão nas últimas décadas (Silva et al., 2019; ANA 2013).

As possíveis causas para explicar as modificações observadas da vazão incluem a variabilidade climática natural, as mudanças climáticas antrópicas, as mudanças de vegetação ou de uso da terra, e as mudanças de usos consuntivos da água. Compreender quais são os fatores que estão atuando em cada um destes casos não é uma tarefa trivial.

Em alguns casos, as análises realizadas até agora chegaram a resultados contraditórios. Na bacia do Paraná, por exemplo, Lee et al. (2018) concluíram que o aumento da vazão observado no período posterior a 1970 ocorreu como consequência da alteração da vegetação na bacia. Estes autores sugerem, inclusive, que este aumento de vazão ocorreu a despeito de uma alegada redução na precipitação (Lee et al., 2013). Já Bayer (2014), por outro lado, concluiu que a maior parte do aumento da vazão no período posterior a 1970 pode ser explicada pelo aumento da precipitação, em relação ao período anterior a 1970.

O papel da chuva na variabilidade de longo prazo da vazão nem sempre é fácil de identificar porque existe um efeito amplificador no processo de transformação de chuva em vazão. De maneira

1) Universidade Federal do Rio Grande do Sul; Instituto de Pesquisas Hidráulicas; collischonn@iph.ufrgs.br

2) Universidade Federal do Rio Grande do Sul; Instituto de Pesquisas Hidráulicas

3) Universidade Federal do Rio Grande do Sul; Instituto de Pesquisas Hidráulicas

geral, parece ser mais difícil identificar as mudanças na precipitação do que na vazão. Isso está relacionado à elasticidade da vazão em relação à precipitação.

A princípio, o papel da precipitação na alteração da vazão poderia ser investigado através da aplicação de um modelo hidrológico do tipo chuva-vazão. Entretanto, diversos trabalhos vem mostrando que o desempenho da maioria dos modelos hidrológicos durante períodos prolongados (multianuais) de seca é particularmente ruim (Duethmann et al., 2020; Fowler et al. 2020; Saft et al. 2016).

Fowler et al. (2020), por exemplo, mostraram que diversos modelos hidrológicos do tipo chuva vazão foram incapazes de descrever adequadamente a redução de vazão ocorrida em bacias hidrográficas no Sudeste da Austrália, durante a chamada “Seca do Milênio” (Millenium Drought) que ocorreu no início dos anos 2000. Da mesma forma, Saft et al. (2016) mostraram que os modelos tendem a gerar estimativas falsamente otimistas de alteração de vazão em locais em que há redução de precipitação.

A mesma dificuldade em representar adequadamente a totalidade do impacto da modificação da precipitação na redução ou aumento da vazão foi observado, em alguns casos, na experiência pessoal dos autores do presente trabalho com o modelo MGB aplicado a bacias hidrográficas no Brasil, em trabalhos que ainda não foram documentados de maneira apropriada.

O fraco desempenho dos modelos hidrológicos chuva-vazão em representar a redução da vazão durante estiagens prolongadas (multianuais) é particularmente preocupante considerando que estes mesmos modelos são ferramentas fundamentais na análise dos impactos das mudanças climáticas futuras sobre a disponibilidade de recursos hídricos. Se os modelos do tipo chuva-vazão são incapazes de reproduzir adequadamente a redução da vazão observada, que ocorre em um período de alguns anos ou décadas mais secas, possivelmente são pouco confiáveis como instrumentos para prever o que acontecerá no futuro, com períodos secos ainda mais longos.

Modelos hidrológicos devem ser testados para verificar sua capacidade de representar a transição entre períodos secos e úmidos, e vice-versa. A estrutura de modelos hidrológicos talvez tenha que ser modificada para que isto seja possível (Fowler et al., 2021), reconhecendo que mesmo durante estiagens prolongadas a vegetação parece manter a evapotranspiração (Pascolini-Campbell, 2021), e que possivelmente há estados alternativos de equilíbrio na resposta de bacias hidrográficas, e que os sistemas hídricos naturais podem ser menos resilientes do que se supunha (Peterson et al., 2021)

Neste contexto, o objetivo desse trabalho foi analisar, de forma bastante preliminar, o possível papel da precipitação, e de sua variação ao longo do tempo, sobre a variação da vazão do rio Carinhanha (BA e MG), um importante tributário do rio São Francisco. Ao mesmo tempo, o trabalho também teve o objetivo de testar a capacidade do modelo hidrológico MGB em representar a variabilidade temporal da vazão em função da variabilidade temporal da chuva.

VARIABILIDADE DA VAZÃO DO RIO CARINHANHA

O Rio Carinhanha é um afluente da margem esquerda do rio São Francisco, cuja bacia encontra-se no limite entre os estados de Minas Gerais e Bahia. O rio Carinhanha e seus tributários drenam uma área de aproximadamente $17\ 000\ km^2$ na região do Sistema Aquífero Urucuia – SAU (Kiang e de Paula, 2016), em que predominam rochas com grande capacidade de armazenamento de água subterrânea, o que contribui para a regularização natural da vazão dos rios, apesar da forte sazonalidade da precipitação. A figura 1 apresenta a localização da bacia hidrográfica do rio Carinhanha bem como a estação fluviométrica mais a jusante na bacia, denominado Juvenília (código ANA 45260000).

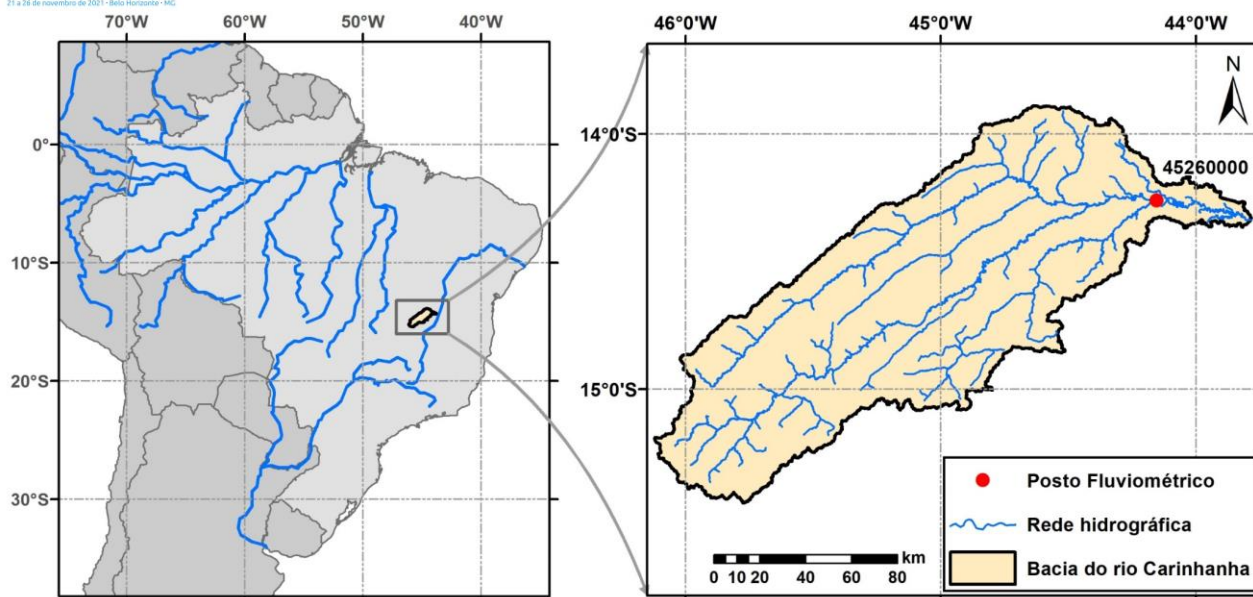


Figura 1: Localização da bacia do rio Carinhanha e do posto fluviométrico Juvenília (45260000).

O rio Carinhanha, assim como os demais rios que drenam o SAU, apresenta uma grande variabilidade temporal da vazão ao longo do período de observação (figura 2). A vazão média do rio Carinhanha em todo o período de observação é de $132 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$. No entanto, este valor tem diminuído progressivamente, desde a década de 1980, aproximadamente. Na década de 1981 a 1990 a vazão média do rio Carinhanha foi de $160 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$, e na década de 2011 a 2020 a vazão média foi de $88 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$. Em bacias vizinhas localizadas sobre o mesmo SAU, como os rios Grande e Corrente, a variabilidade da vazão é semelhante. No próprio rio São Francisco estão sendo observadas reduções de vazão muito relevantes ao longo das últimas décadas (ANA, 2013, Silva et al., 2019). Além da vazão, dados de satélite da missão GRACE indicam que o armazenamento de água na bacia sofreu drástica redução na última década em comparação à década passada (figura 3). O armazenamento médio, em termos de anomalia em relação à média de 2004-2009, foi de -33 mm entre 2002 e 2011, enquanto no período entre 2011 e 2020 chegou à -347 mm .

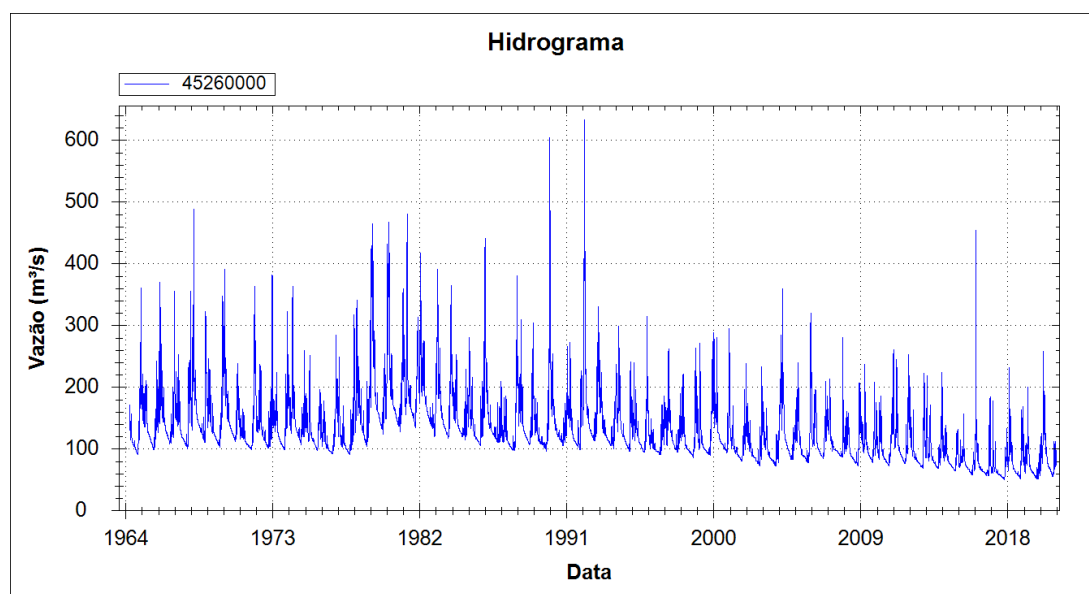


Figura 2: Série de vazão observada do rio Carinhanha no posto fluviométrico Juvenília (45260000).

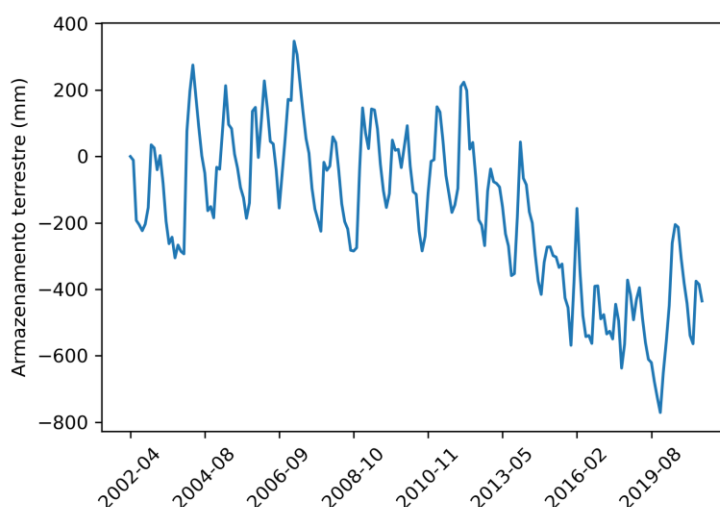


Figura 3: Série de anomalia do armazenamento terrestre na bacia do rio Carinhanha (em relação à média de 2004-2009), segundo dados do GRACE.

Alguns autores analisaram a variabilidade das vazões dos rios da região. Gonçalves et al. (2016), por exemplo, constataram que a redução da vazão de base do Rio Grande (BA), ao longo do período de 1977 a 2013, foi superior à redução da chuva. Por este motivo, estes autores consideraram que a variação da chuva não foi a única causa da redução da vazão. Silva et al. (2020) analisaram a redução da vazão na bacia do rio Corrente, que é vizinha da bacia do rio Carinhanha, e concluíram que a alteração do uso da terra foi a principal causa da redução da vazão. Entretanto, estas análises simplificadas não consideraram que os processos de transformação de chuva em vazão podem amplificar os impactos da redução da precipitação.

A figura 4 apresenta a alteração do uso do solo ocorrida na bacia a partir do ano de 1985 elaborada com base nos mapas do MapBiomas (Souza et al., 2020) e no levantamento das áreas irrigadas por pivôs centrais realizada pela ANA e Embrapa Milho e Sorgo (2019). Na figura, é possível perceber que a principal alteração ocorrida na bacia se deve à inclusão de pivôs de irrigação e áreas agrícolas nas cabeceiras da porção mais ao sul.

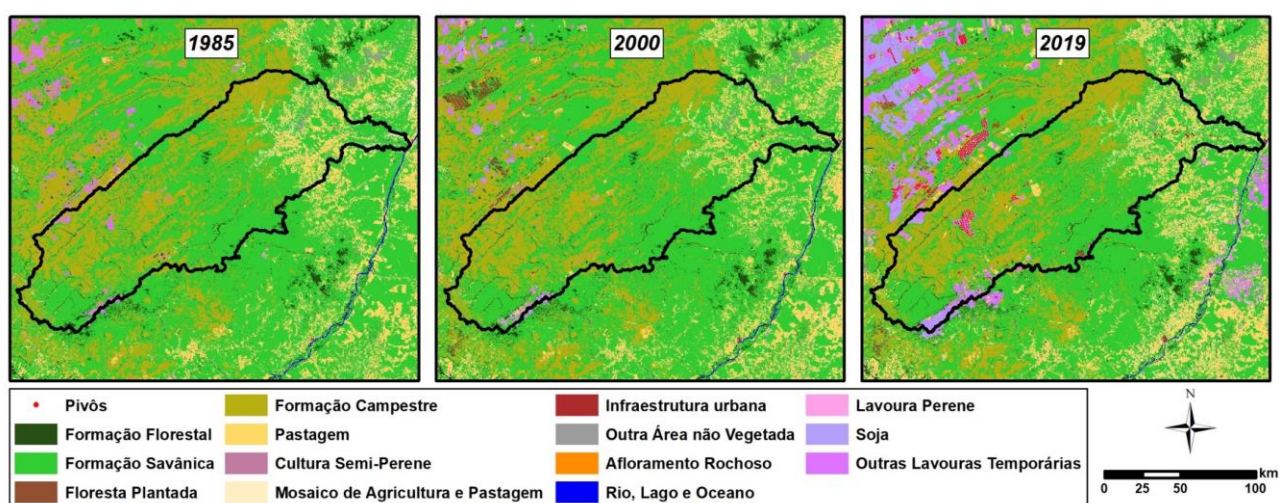


Figura 4: Evolução do uso da terra na bacia hidrográfica do rio Carinhanha entre 1985 e 2019.

SIMULAÇÃO DA VAZÃO DO RIO CARINHANHA COM O MODELO MGB

Aqui apresentamos uma aplicação preliminar do modelo MGB na bacia do rio Carinhanha. O modelo MGB é um modelo hidrológico semi-distribuído que representa os processos de transformação de chuva em vazão, e o trânsito da água na rede hidrográfica em bacias hidrográficas de grande escala e está descrito mais detalhadamente em outras publicações (Collischonn e Tucci, 2001; Collischonn et al., 2007; Pontes et al., 2017). Foram utilizados dados de 51 postos pluviométricos situados na bacia e na vizinhança, e o modelo foi calibrado considerando apenas os dados de vazão do posto fluviométrico Juvenília, embora existam outros postos fluviométricos na bacia.

No modelo MGB a estimativa da evapotranspiração é realizada utilizando a equação de Penman-Monteith, a partir de dados de temperatura e umidade relativa do ar, radiação solar, velocidade do vento e pressão atmosférica. Estes dados normalmente são obtidos de estações meteorológicas do INMET. Entretanto, as séries temporais de dados diários normalmente apresentam muitas falhas. Por esse motivo, em diversas aplicações do modelo MGB são utilizados os valores das normais climatológicas (valores médios mensais de cada estação meteorológica). O mesmo procedimento foi adotado na simulação apresentada aqui.

Os parâmetros do modelo foram calibrados de forma automática, utilizando o algoritmo MOCOM-UA, e três funções objetivo: Coeficiente de Eficiência de Nash-Sutcliffe, Coeficiente de Eficiência de Nash-Sutcliffe dos logaritmos das vazões, e Viés da vazão média. Todas as métricas foram calculadas apenas no posto fluviométrico Juvenília. A simulação foi realizada no período de 1940 a 2020, mas para o cálculo das métricas de desempenho da calibração foram considerados apenas os dados posteriores a 1990, já que na parte superior da bacia praticamente não existem dados de precipitação antes da década de 1980.

A figura 5 apresenta os hidrogramas calculado e observado, no posto fluviométrico Juvenília, no rio Carinhanha, no período de 1990 a 2020. Pode-se observar que as vazões mínimas decrescem ao longo do tempo, de mais de $100 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ no início da década de 1990 a quase $50 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ na década de 2010.

O coeficiente de desempenho de Kling e Gupta (KGE), que mede o quanto o hidrograma calculado se aproxima do hidrograma observado, em termos de correlação, viés, e amplitude de variação, é igual a 0,82, no período total entre 1990 e 2020, sugerindo que o modelo representa razoavelmente bem o comportamento da bacia do rio Carinhanha neste período.

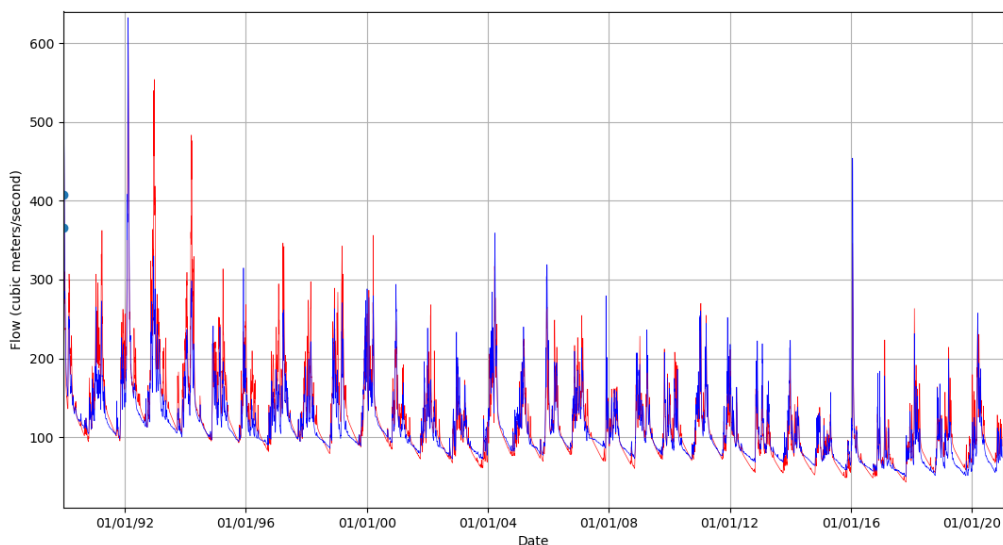


Figura 5: Hidrogramas calculado e observado do rio Carinhanha no posto fluviométrico Juvenília no período de 1990 a 2020.

A tabela 1 apresenta os valores da vazão média e da vazão Q95 (vazão que é superada ou igualada 95% do tempo) dos dados observados e dos dados simulados, contrastando dois períodos de 10 anos: o período de vazão alta, que vai de 1991 a 2000 e o período de vazão baixa, que vai de 2011 a 2020. A vazão média observada passou de 137 m³.s⁻¹ no período de 1991 a 2000 para 88 m³.s⁻¹ no período de 2011 a 2020, e a vazão média calculada passou de 154 para 89 m³.s⁻¹ nos mesmos períodos. A redução da vazão média observada foi de 36%, enquanto a redução da vazão da vazão média calculada foi de 43%. No caso da vazão Q95, a redução estimada pelo modelo entre os dois períodos foi de 43%, enquanto a redução da Q95 observada foi de 41%.

Deve ser considerado que não houve alteração de dados de entrada do modelo MGB entre os dois períodos, exceto da precipitação, em que foram utilizadas as séries históricas de dados diários dos postos pluviométricos. Isto significa que não foram alterados os parâmetros do modelo, a cobertura do solo ao longo do período simulado, nem outros dados de entrada, como as séries de dados de outras variáveis atmosféricas (temperatura, umidade relativa, etc). Desta forma a redução de aproximadamente 43% na vazão média e na vazão Q95 obtida com base nos hidrogramas calculados pelo modelo MGB é inteiramente devida à redução da chuva.

Tabela 1 – Comparação entre a vazão calculada e a observada, nos períodos de 1991 a 2000 e 2011 a 2020, e da alteração percentual da vazão (média e Q95), no rio Carinhanha, no posto fluviométrico Juvenília.

Década	Vazão média		Q95	
	MGB	observado	MGB	observado
1991 a 2000	154	137	92	94
2011 a 2020	89	88	53	56
Alteração	-43%	-36%	-43%	-41%

CONCLUSÕES

O modelo hidrológico MGB-IPH foi aplicado na bacia do rio Carinhanha buscando analisar o possível papel da precipitação, e de sua variação ao longo do tempo, sobre a variação da vazão do rio Carinhanha. Os resultados mostram que a redução da vazão observada de aproximadamente 40% ocorrida no rio Carinhanha, entre as décadas de 1990 e 2010 é representada adequadamente pelo modelo MGB utilizando como dado de entrada as séries de dados diários de precipitação observada em postos pluviométricos da região. Para obter esse resultado não foi necessário considerar a alteração da vegetação da bacia e não foi necessário considerar o aumento do uso consuntivo de água para irrigação, que vem ocorrendo no período mais recente.

Este exemplo demonstra que a redução na vazão do rio Carinhanha nos anos recentes pode ser explicada em sua totalidade pela redução na precipitação. Isto não significa que outros fatores, como mudança de uso da terra e aumento de usos consuntivos não tiveram um papel na redução da vazão. Entretanto, o resultado sugere fortemente que não é necessário invocar outras causas além da alteração da chuva para explicar a redução na vazão que vem sendo observada ao longo das últimas décadas. Este resultado difere dos resultados obtidos com o próprio modelo MGB em outras bacias, como a bacia do rio Doce, onde a vazão nos últimos anos tende a ser superestimada (resultados ainda não publicados) e dos resultados obtidos com diversos outros modelos em bacias hidrográficas da Austrália, conforme mostrado por Fowler et al. (2020) e por Saft et al. (2016).

Os resultados na bacia do rio Carinhanha devem ser considerados preliminares, já que não foram realizadas investigações aprofundadas sobre o impacto da variabilidade de outras variáveis de entrada do modelo, como temperatura, umidade relativa do ar, e radiação solar, que são fundamentais para o cálculo da evapotranspiração. Estudos anteriores sugerem que a variabilidade da precipitação

está associada com a variabilidade destas outras variáveis (Fleischmann et al., 2019; Collischonn e Collischonn, 2016), e que a temperatura do ar vem aumentando na região (Regoto et al., 2021).

REFERÊNCIAS

ANA 2013 Análise de estacionaridade de séries hidrológicas na bacia do rio São Francisco e usos consuntivos a montante da UHE Sobradinho - Nota Técnica nº 006/2013/SPR.

ANA e Embrapa Milho e Sorgo, 2019. "Levantamento da Agricultura Irrigada por Pivôs Centrais no Brasil (1985-2017)". Segunda Edição. Disponível em: <<http://www.snirh.gov.br>>

Bayer, D. M. (2014). Efeitos das mudanças de uso da terra no regime hidrológico de bacias de grande escala. Tese Doutorado. IPH UFRGS.

Blöschl, G., Bierkens, M. F., Chambel, A., Cudennec, C., Destouni, G., Fiori, A., ... & Renner, M. (2019). Twenty-three unsolved problems in hydrology (UPH)—a community perspective. *Hydrological sciences journal*, 64(10), 1141-1158.

Collischonn, B. and Collischonn, W., 2016. Rainfall as proxy for evapotranspiration predictions. *Proceedings of the International Association of Hydrological Sciences*, 374, 35–40. doi:10.5194/piahs-374-35-2016

Collischonn, W., Allasia, D., Da Silva, B. C., & Tucci, C. E. (2007). The MGB-IPH model for large-scale rainfall—runoff modelling. *Hydrological Sciences Journal*, 52(5), 878-895.

COLLISCHONN, W., TUCCI, C. E. M. Simulação hidrológica de grandes bacias. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, v. 6, n. 1, p. 95-118, 2001.

Duethmann, D., Blöschl, G., & Parajka, J. (2020). Why does a conceptual hydrological model fail to correctly predict discharge changes in response to climate change?. *Hydrology and Earth System Sciences*, 24(7), 3493-3511.

Fleischmann, A., Fan, F., Collischonn, B., Collischonn, W., Pontes, P., & Ruhoff, A. (2019). Precipitation as a proxy for climate variables: application for hydrological modelling. *Hydrological Sciences Journal*, 64(3), 361-379.

Fowler, K., Knoben, W., Peel, M., Peterson, T., Ryu, D., Saft, M., ... & Western, A. (2020). Many commonly used rainfall-runoff models lack long, slow dynamics: Implications for runoff projections. *Water Resources Research*, 56(5), e2019WR025286.

Fowler, K., Coxon, G., Freer, J.E., M. Knoben, W.J., Peel, M.C., Wagener, T., Western, A.W., Woods, R.A., Zhang, L., Towards more realistic runoff projections by removing limits on simulated soil moisture deficit, *Journal of Hydrology* (2021), doi: <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2021.126505>

Gonçalves, R. D., Engelbrecht, B. Z., & Chang, H. K. (2016). Análise hidrológica de séries históricas da Bacia do Rio Grande (BA): contribuição do Sistema Aquífero Urucuia. *Águas Subterrâneas*, 30(2), 190-208.

Kiang, C. H., & de Paula, F. (2016). Contribuição ao arcabouço geológico do sistema aquífero Urucuia. *Geociências (São Paulo)*, 34(4), 872-882.

Lee, E., Moorcroft, P. R., Livino, A., & Briscoe, J. (2013, December). The Parana paradox: can a model explain the decadal impacts of climate variability and land-cover change?. In *AGU Fall Meeting Abstracts (Vol. 2013, pp. GC11D-1028)*.

- Lee, E., Livino, A., Han, S. C., Zhang, K., Briscoe, J., Kelman, J., & Moorcroft, P. (2018). Land cover change explains the increasing discharge of the Paraná River. *Regional environmental change*, 18(6), 1871-1881.
- Montanari, A., Young, G., Savenije, H. H. G., Hughes, D., Wagener, T., Ren, L. L., ... & Belyaev, V. (2013). “Panta Rhei—everything flows”: change in hydrology and society—the IAHS scientific decade 2013–2022. *Hydrological Sciences Journal*, 58(6), 1256-1275.
- Pascolini-Campbell, M., Reager, J. T., Chandanpurkar, H. A., & Rodell, M. (2021). A 10 per cent increase in global land evapotranspiration from 2003 to 2019. *Nature*, 593(7860), 543-547.
- Peterson, T. J., Saft, M., Peel, M. C., & John, A. (2021). Watersheds may not recover from drought. *Science*, 372(6543), 745-749.
- Pontes, P. R. M., Fan, F. M., Fleischmann, A. S., de Paiva, R. C. D., Buarque, D. C., Siqueira, V. A., ... & Collischonn, W. (2017). MGB-IPH model for hydrological and hydraulic simulation of large floodplain river systems coupled with open source GIS. *Environmental Modelling & Software*, 94, 1-20.
- Regoto, P., Dereczynski, C., Chou, S. C., & Bazzanella, A. C. (2021). Observed changes in air temperature and precipitation extremes over Brazil. *International Journal of Climatology*.
- Saft, M., M. C. Peel, A. W. Western, J.-M. Perraud, and L. Zhang (2016), Bias in streamflow projections due to climate-induced shifts in catchment response, *Geophysical Research Letters*, 43(4), 1574–1581, <https://doi.org/10.1002/2015GL067326>, 2015GL067326
- Silva, A. L. D., Souza, S. A. D., Coelho Filho, O., Eloy, L., Salmons, Y. B., & Passos, C. J. S. (2021). Water Appropriation on the Agricultural Frontier in Western Bahia and Its Contribution to Streamflow Reduction: Revisiting the Debate in the Brazilian Cerrado. *Water*, 13(8), 1054.
- Silva, W. L., Xavier, L. N. R., Maceira, M. E. P., & Rotunno, O. C. (2019). Climatological and hydrological patterns and verified trends in precipitation and streamflow in the basins of Brazilian hydroelectric plants. *Theoretical and Applied Climatology*, 137(1), 353-371.
- Souza, Carlos M. et al. (2020). Reconstructing three decades of land use and land cover changes in Brazilian biomes with landsat archive and earth engine. *Remote Sensing*, v. 12, n. 17, p. 2735.