

XXIII SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS

A VAZÃO DO RIO JAGUARÍ NO SÉCULO 21 ESTIPULADA COM PROJEÇÕES CLIMÁTICAS REGIONALIZADAS

*Lucas Machado Pontes¹; Leonardo Moreno Domingues²; Mári Andrea Feldman Firpo³,
Humberto Ribeiro da Rocha⁴*

RESUMO – A Bacia do Rio Jaguarí é o principal afluente do Sistema Cantareira, que é responsável pelo abastecimento de água de 4,5 milhões de habitantes da Região Metropolitana de São Paulo e que sofre cada vez mais com pressões antrópicas e possíveis mudanças climáticas. Nosso objetivo é discutir os impactos simulados das projeções das mudanças climáticas no balanço de águas superficiais do rio Jaguarí usando projeções regionalizadas de longo prazo de modelos climáticos. Utilizou-se o modelo hidrológico SWAT forçado por projeções no intervalo temporal 2006 a 2099, sob três cenários (RCP26, RCP60 e RCP85) e quatro modelos climáticos (GFDL, HadGEM, IPSL e Miroc). Todas as projeções mostraram aumento da temperatura e diminuição da umidade relativa do ar e, para a GFDL, a precipitação diminuiu substancialmente, especialmente no cenário RCP85, enquanto outros modelos apresentaram precipitação crescente. A vazão calculada foi reduzida (fluxo máximo, médio e mínimo) no caso do GFDL, enquanto para outros modelos a descarga pareceu aumentar. Concluímos que nem as projeções nem nossas simulações de vazão mostraram consenso absoluto usando esses modelos, nos quais a precipitação desempenhou um papel importante na vazão de água futura, enquanto a evapotranspiração afetou menos.

ABSTRACT– The Jaguarí River Basin is the main contributor of the Cantareira reservoir system, which is responsible for the water supply to 4.5 million inhabitants in São Paulo Metropolitan region, which has been increasingly affected by anthropogenic pressures and climate changes. We aim to discuss the simulated impacts of climate change projections on the surface water balance of the Jaguarí River using long term regionalized projections of climate models. We used the SWAT hydrological model forced by projections in the temporal range 2006 to 2099, under three scenarios (RCP26, RCP60 and RCP85) and four climate models (GFDL, HadGEM, IPSL and Miroc). All projections showed increasing temperature and decreasing air relative humidity and, for the GFDL, precipitation substantially decreased, especially in the RCP85 scenario, while other models showed increasing precipitation. The calculated discharge was reduced (maximum, average and minimum flow) in GFDL case, while for other models discharge appeared to increase. We concluded that neither the projections nor our simulations of discharge showed absolute consensus using these models, wherein precipitation played a leading role in the future water discharge while evapotranspiration affected it less.

Palavras-Chave – Mudança climática, modelagem hidrológica, segurança hídrica

1) Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciência Atmosféricas da Universidade de São Paulo. Rua do Matão, 1226 – Cidade Universitária, São Paulo-SP, CEP: 05509-090. Tel: (11) 3091-4772. Email: lucas.pontesm@gmail.com.

2) Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciência Atmosféricas da Universidade de São Paulo. Rua do Matão, 1226 – Cidade Universitária, São Paulo-SP, CEP: 05509-090. Tel: (11) 3091-4772. Email: leomdomingues@gmail.com.

3) Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais – INPE, Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos – CPTEC. Rodovia Presidente Dutra km 40 SP-RJ. Cachoeira Paulista, SP. CEP: 12630-000. Tel: (12) 3186-8400. Email: mariffirpo@gmail.com.

4) Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciência Atmosféricas da Universidade de São Paulo. Rua do Matão, 1226 – Cidade Universitária, São Paulo-SP, CEP: 05509-090. Tel: (11) 3091-4705. Email: humberto.rocha@iag.usp.br.

INTRODUÇÃO

A questão da segurança hídrica no Sudeste Brasileiro e especialmente na Região Metropolitana de São Paulo (RMSP) vem ganhando destaque, sobretudo após a seca que atingiu a região em 2014. Além dos problemas de qualidade da água devido a urbanização, agora questiona-se os impactos de alterações climáticas no regime hídricos dos mananciais. O Rio Jaguarí é o principal afluente dos reservatórios que formam o Sistema Cantareira, o qual é responsável pelo abastecimento de 47% da RMSP.

Para avaliar os possíveis efeitos das mudanças climáticas no balanço hídrico e da disponibilidade hídrica para as diversas atividades humanas, são utilizados cenários que buscam avaliar projeções das emissões de gases de efeito estufa de acordo com o desenvolvimento das atividades antrópicas. Estes cenários, chamados *Representative Concentration Pathways* (RCP), são utilizados em modelos climáticos para avaliar os efeitos da concentração desses gases nas variáveis climáticas, e podem ser utilizadas na modelagem hidrológica para estimar os impactos dessas mudanças na vazão de cursos d'água e no balanço hídrico de bacias hidrográficas.

O *Soil and Water Assessment Tool* (SWAT) (Arnold, 2012) é um modelo hidrológico bastante estudado e com diversas aplicações no mundo todo. O modelo foi criado para avaliar os impactos de alterações do uso do solo e mudanças climáticas no regime hídrico de bacias hidrográficas de grande porte. Tem apresentado repostas satisfatórias em bacias brasileiras quando calibrado com dados observados.

O objetivo principal é avaliar quais os possíveis impactos no balanço e regime hídrico da Bacia do Rio Jaguarí dados os cenários de mudanças climáticas.

MATERIAIS E MÉTODOS

Área de estudo

A Bacia do Rio Jaguarí, localizada no sudeste do Brasil, entre as coordenadas geográficas 22.60° S e 22.91° S de latitude e 45.85° W e 47.00° W de longitude (figure 1). Com uma área de drenagem de 966 km², e altitudes entre 856 e 2.037 m (figura 1).

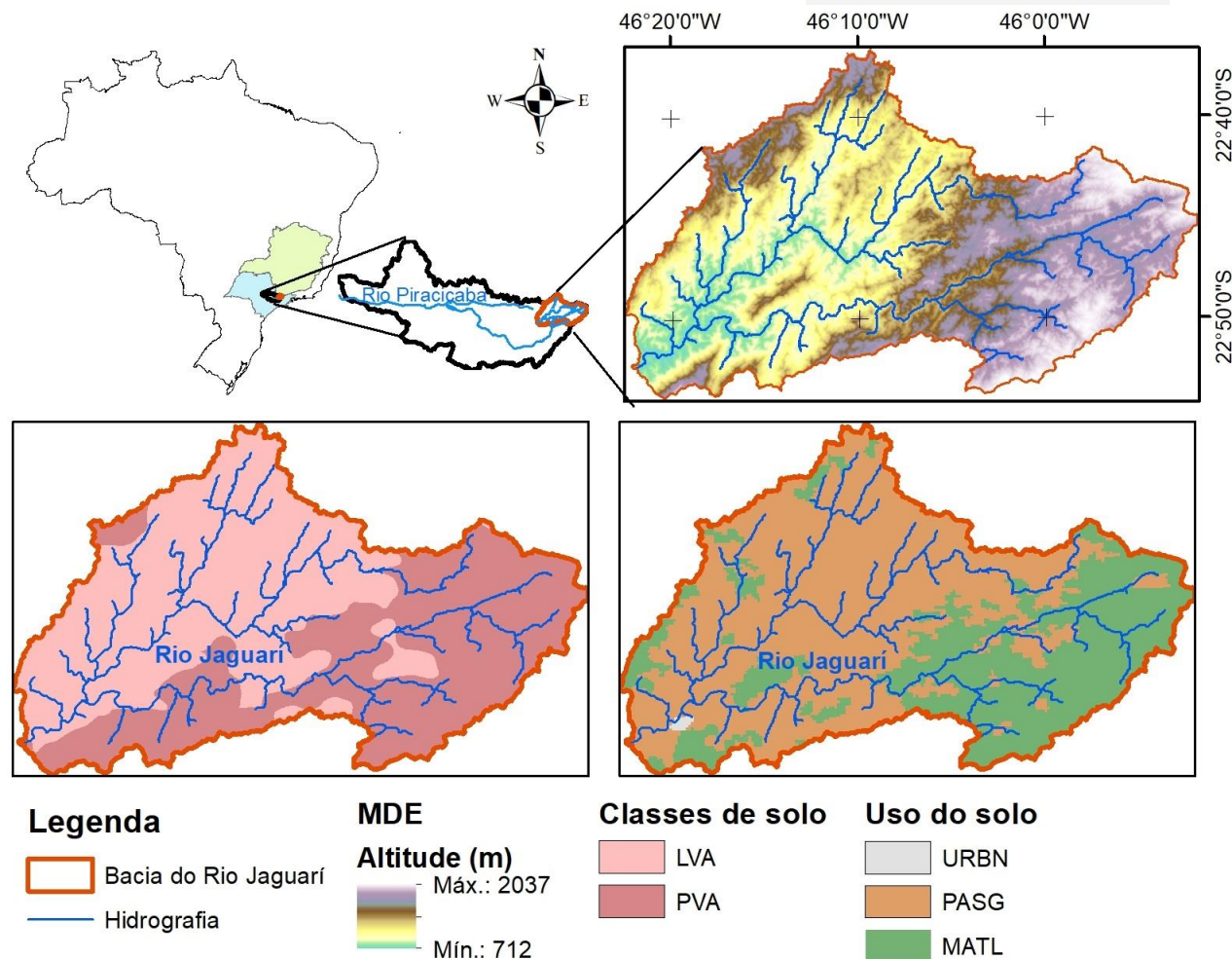


Figura 1 - Localização da Bacia do Rio Jaguarí, com o modelo digital de elevação (MDE) mapa pedológico e do uso e cobertura do solo. LVA – Latossolo Vermelho-Amarelo, PVA – Argissolo Vermelho-Amarelo, URBN – área urbana, PASG – pastagem, MATL – mata atlântica.

O clima da bacia é classificado como Cwb, com precipitação média anual de 1.488 mm. A bacia é caracterizada por um relevo ondulado, com as principais nascentes na porção sul da Serra da Mantiqueira. A geologia é predominantemente de formação granito-gnaiss, os solos são argilosos, sendo as principais classes os latossolos e argissolos. A vegetação primária é o bioma Mata Atlântica, porém a maior parte da bacia é ocupada por pastagens (figura 1).

Dados de entrada

As variáveis climáticas utilizadas como entrada do modelo hidrológico foram obtidas da regionalização de 4 modelos climáticos (GFDL, HadGEM, IPSL e Miroc) feita no contexto do Inter-Sectoral Impact Model Intercomparison Project (ISIMIP) que visa sintetizar as projeções de impactos de diferentes níveis de aquecimento global na agricultura, água, bioma, saúde e infraestrutura (Hempel et al., 2013). A regionalização fornece uma grade regular de 0.5°, os dados passaram por correção de viés com base em observações históricas de estações meteorológicas de superfície.

Para cada modelo foram utilizados dados diários de precipitação (P), umidade relativa (UR), velocidade do vento (VV), temperatura mínima (Tmin) e máxima (Tmax) e radiação solar (Rad), para o período base de 1980 a 2005 e projeções futuras de 2006 a 2099.

Modelagem hidrológica

As simulações hidrológicas foram feitas com o modelo SWAT (Arnold, 2012), versão 2012. Este é um modelo de tempo contínuo, semi-distribuído, e baseado em processos, que utiliza o conceito de unidades de resposta hidrológica (HRU) para agrupar áreas com de acordo com o declive, vegetação e solos. O modelo é executado em passo diário.

A caracterização do relevo foi feita com modelo digital de elevação SRTM com resolução espacial horizontal de 30m. O uso e cobertura do solo foi obtido com classificação de imagem Landsat (figura 1).

O modelo utilizado foi previamente calibrado com uso de vazões medidas em estação fluviométrica no exutório da bacia, com dados disponíveis entre 1985 e 2010.

Vazões de referência

Os índices são indicadores úteis para avaliar a tendência de alteração das vazões extremas de dados diários. Os índices de vazão máxima (Q5), vazão média (Qm) e vazão mínima (Q95) foram calculados para cada modelo e cenário com os valores diários simulados com o SWAT para o período de 1983 a 2005 (base) e 2006 a 2099 para as projeções.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Projeção das variáveis climáticas

As variáveis climáticas utilizadas como entrada no modelo hidrológico foram obtidas por modelos climáticos e diferentes cenários futuros de mudanças climáticas. Cada modelo climático equaciona de maneira diferente os efeitos da concentração de gases do efeito estufa nas variáveis climáticas, e cada cenário possui projeções da concentração desses gases na atmosfera (figura 2).

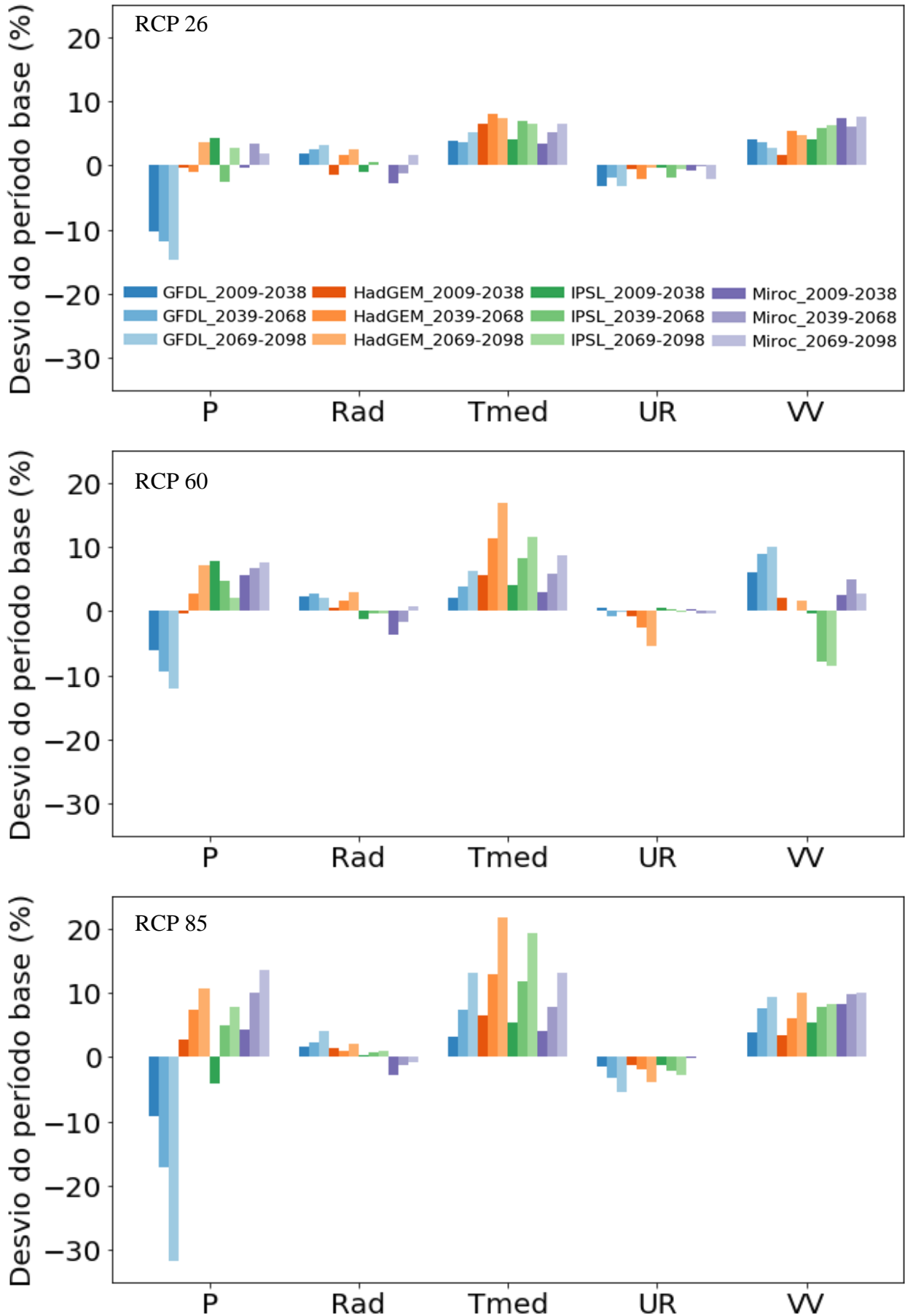


Figura 2 – Desvios das variáveis climáticas em relação ao período base. P – precipitação (mm), RAD – radiação solar (MJ m^2), Tmed – temperatura média ($^{\circ}\text{C}$), UR – umidade relativa média (%), VV – velocidade do vento (m s^{-1}).

Para todos os modelos há um aumento progressivo da temperatura média anual em consequência do aumento da concentração do gás carbônico. A temperatura média anual na bacia é de 18,7 °C (período base dos modelos), a maior temperatura (21.7 °C) foi no cenário RCP 85 para o modelo HadGEM no período de 2069 a 2098, que representa um aumento de 16% em relação ao histórico. Como a umidade relativa do ar é inversamente proporcional a temperatura do ar, a UR diminui em todos os casos.

Ao contrário dos demais modelos, o GFDL apresentou redução progressiva da precipitação ao longo dos períodos, em todos os cenários, sobretudo no RCP85 (base = 1759.36 mm, 3º período RCP85 = 1304.73 mm) 34.8% menor. O modelo IPSL apresentou uma pequena redução da precipitação no 2º período do RCP26, e 1º período do RCP85. Os demais modelos apresentaram aumento da precipitação total anual (menos de 10% no RCP26, 10% no RCP60 e mais de 10% no RCP85). Os maiores aumentos foram para o modelo Miroc no RCP 85, em que a precipitação chegou a 1917.63 mm no 3º período (15% maior em relação ao período base). Outros estudos identificaram uma tendência de redução da precipitação no sudeste do Brasil em caso de mudanças climáticas (Chou *et al.*, 2014; Oliveira *et al.*, 2017; Silveira *et al.*, 2016).

A velocidade do vento aumentou, exceto para o modelo IPSL RCP60 em que a velocidade média do vento diminui cerca de 10% no 3º período em relação ao período base. O maior aumento na velocidade do vento se deu no modelo HadGEM RCP85, em que a média anual foi de 3 m/s, 3% maior que o período base.

Balanco hídrico

O período base do modelo HadGEM foi selecionado para visualizar e entender o resultado das simulações com o SWAT na Bacia do Rio Jaguarí. A figura 3 ilustra os principais componentes do balanço hídrico mensal obtido com o SWAT.

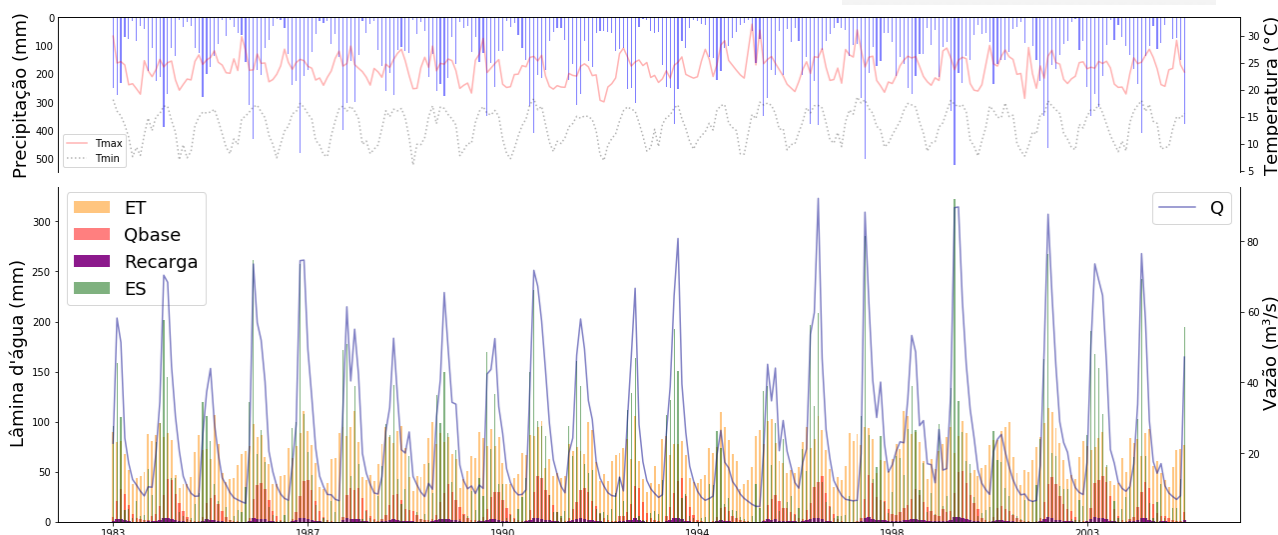


Figura 3 – Balanço hídrico mensal na Bacia do Rio Jaguarí obtidos com o modelo SWAT para o período de 1983 a 2005 com as variáveis climáticas do modelo HadGEM. ET – evapotranspiração (mm), Qbase – escoamento base (mm), ES – escoamento superficial (mm) e Q – vazão ($\text{m}^3 \text{s}^{-1}$).

Observa-se a coerência entre o volume de precipitação e a ocorrência de vazões máximas e mínimas, bem como a variação sazonal da temperatura e da evapotranspiração. As vazões variam entre $5 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ e $92 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$, que é coerente com observações de campo e outras simulações feitas na bacia (Pontes et al., 2016). As vazões máximas são formadas predominantemente pelo escoamento superficial e as mínimas pelo escoamento base, o que mostra uma boa coerência do modelo.

A evapotranspiração anual média para o período base variou de 769.82 mm (GFDL) a 861.48 mm (IPSL), que corresponde de 48% a 53% da precipitação total anual, respectivamente. Essa proporção aumenta de 48% para 54% (GFDL RCP85), se mantém estável nos cenários com os modelos HadGEM e IPSL e, diminui de 50% para 45% no modelo Miroc em todos os cenários. Assim, verifica-se que a precipitação é a variável determinante no balanço hídrico (Chou *et al.*, 2014)

Curva de permanência e vazões de referência

Os resultados principais deste estudo são os índices de vazões extremas e vazão média ao longo das projeções futuras e de acordo com os modelos e cenários. A figura 4 apresenta as curvas de permanência e os índices Q95, Qmédia e Q5 para as simulações hidrológicas com o SWAT e os modelos e cenários estudados.

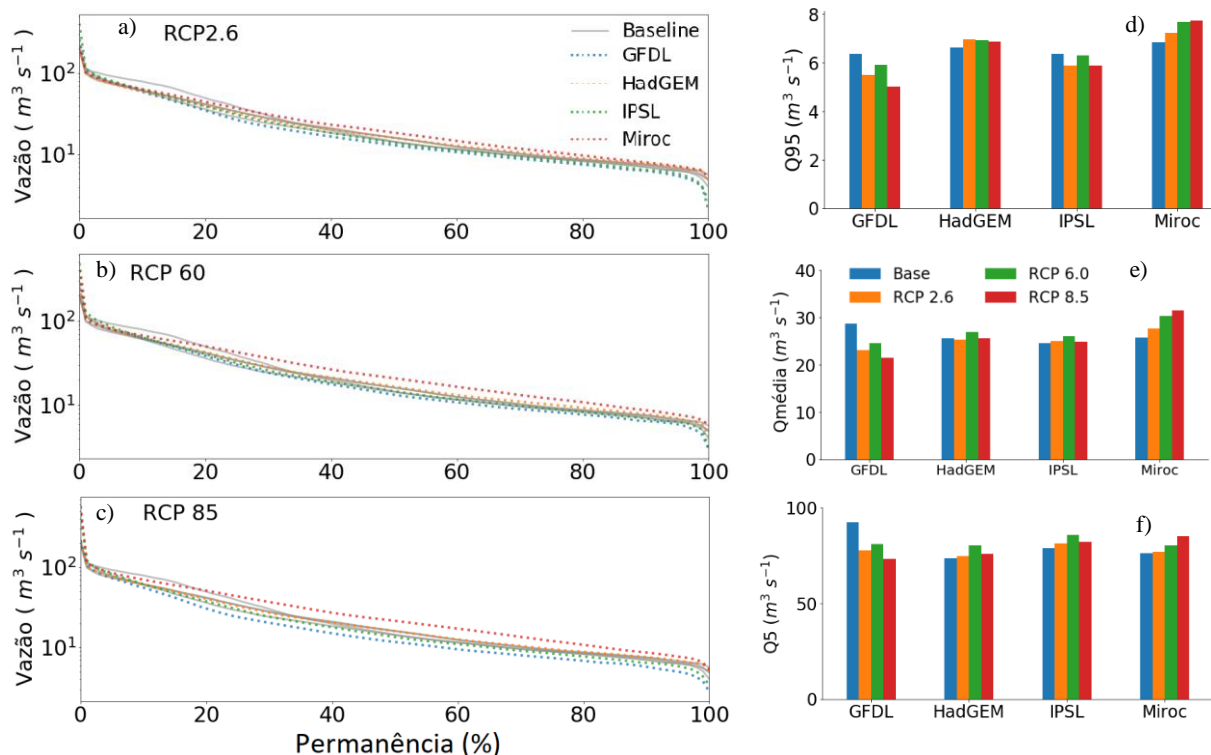


Figura 4 – Curvas de permanência (a,b,c) e vazões de referência (d, e, f) das vazões diárias do Rio Jaguarí obtidas com o SWAT para os cenários e modelos climáticos utilizados.

Observa-se que a diferença entre a curva de duração no período base e os demais cenários é pequena. As vazões mínimas são menores que a período base no modelo GFDL, em todos os cenários, o que pode ser verificado na figura 4.d. Quanto às vazões máximas (Q5) observa-se uma diminuição para o GFDL e um aumento das vazões máximas nos demais modelos (figura 4.f).

As vazões mínimas de referência (Q95), utilizada como medida para a outorga do uso de água na Bacia do Rio Jaguarí, diminuem no modelo GFDL em todos os cenários, devido a diminuição da precipitação, chegando a 5.41 mm no RCP85 (20% menor do que no período base). O modelo IPSL também indica uma pequena diminuição da Q95. Já para os modelos HadGEM e Miroc a tendência é de aumento da Q95, que chega a aumentar 21%, em relação ao período base, no cenário RCP60.

Para as vazões médias de longo prazo, evidencia-se a diminuição nos cenários do modelo GFDL e aumento progressivo para o modelo Miroc, enquanto para os modelos HadGEM e IPSL não há mudança significativa.

CONCLUSÃO

Não há convergência entre os modelos climáticos quanto aos efeitos das mudanças climáticas. Todos apontam para um aumento das temperaturas, sobretudo nos cenários de maior concentração de CO_2 na atmosfera. Porém, enquanto o modelo GFDL prediz que esse aquecimento causará redução

das chuvas na área da bacia, os demais modelos indicam o contrário, aumento das precipitações totais anuais.

Apesar de o aumento da temperatura causar maior evapotranspiração, é a mudança no regime de chuvas que é determinante no balanço hídrico, sobretudo na vazão.

As vazões de referência máxima (Q_5) e mínima (Q_{95}) acompanham as tendências de volume de precipitação apresentadas pelos modelos climáticos. Assim, as vazões tendem a diminuir nos cenários obtidos com o modelo GFDL, as vazões máximas aumentam nos demais modelos e as mínimas tem uma leve redução para o modelo IPSL e um aumento significativo para o HadGEM e sobretudo para o modelo Miroc.

AGRADECIMENTOS – Agradecemos a CAPES e a ANA pela bolsa de pós-doutorado concedida ao autor.

REFERÊNCIAS

ARNOLD, J.G.; SRINIVASAN, R.; MUTTIAH, R.S.; WILLIAMS, J.R. 1998. *Large area hydrologic modeling and assessment part I: Model development*. Journal of The American Water Resources Association 34(1): 73-89. DOI: 10.1111/j.1752-1688.1998.tb05961.x.

CHOU, S.C.; LYRA, A.; MOURÃO, C.; DERECZYNSKI, C.; PILOTTO, I.; GOMES, J.; BUSTAMANTE, J.; TAVARES, P.; SILVA, A.; RODRIGUES, D.; CAMPOS, D.; CHAGAS, D.; SUEIRO, G.; SIQUEIRA, G.; MARENGO, J. (2014). *Assessment of Climate Change over South America under RCP 4.5 and 8.5 Downscaling Scenarios*. American Journal of Climate Change 03(05): 512–527. DOI: 10.4236/ajcc.2014.35043.

HEMPEL, S.; FRIELER, K.; WARSZAWSKI, L.; SCHEWE, J.; PIONTEK, F. (2013). *A trend-preserving bias correction: The ISI-MIP approach*. Earth System Dynamics 4(2): 219–236. DOI: 10.5194/esd-4-219-2013.

OLIVEIRA, V.A.; MELLO, C.R.; VIOLA, M.R.; SRINIVASAN, R. (2017). *Assessment of climate change impacts on streamflow and hydropower potential in the headwater region of the Grande river basin, Southeastern Brazil*. International Journal of Climatology 37(15): 5005–5023. DOI: 10.1002/joc.5138.

PONTES, L.M; VIOLA, M.R.; SILVA, M.L.N.; BISPO, D.F.; CURI N. 2016. *Hydrological modeling of tributaries of Cantareira system, Southeast Brazil, with the SWAT model*. Engenharia

Agrícola, 36(6): 1037-1049. DOI:<http://dx.doi.org/10.1590/1809-4430-Eng.Agric.v36n6p1037-1049/2016>

SILVEIRA, C.S.; SOUZA FILHO, F.A.; VASCONCELOS JÚNIOR, F.C. (2016). *Streamflow projections for the Brazilian hydropower sector from RCP scenarios*. Journal of Water and Climate Change, 8(1), 114–126. doi:10.2166/wcc.2016.052.

VIOLA, M.R.; DE MELLO, C.R.; CHOU, S.C.; YANAGI, S.N.; GOMES, J.L. (2014). *Assessing climate change impacts on Upper Grande River Basin hydrology, Southeast Brazil*. International Journal of Climatology 35(6): 1054–1068. DOI: 10.1002/joc.4038.