PROJEÇÃO DOS EVENTOS DE SECA METEOROLÓGICA NA BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO VERDE

Conceição de Maria Marques de Oliveira [1]; Lívia Alves Alvarenga [2]& Ronaldo Haroldo do Nascimento de Menezes [3]

RESUMO – Esta pesquisa objetiva analisar o comportamento das secas meteorológica por meio do emprego de índices de seca padronizados, calculados a partir de projeções climáticas dos cenários RCP4.5 e RCP8.5. Foram utilizados os índices SPI e SPEI, a partir dos modelos SWAT e VIC. Para o clima futuro (2005-2099) o SPI apresentou resultados semelhantes de seca quando considerado os cenários RCP4.5 e RCP8.5. O SPEI apresentou resultados mais divergentes quando considerado cada cenário. As simulações RCP8.5 sugeriram um sério risco de ocorrência de megasseca na região. Os resultados indicam que haver um efeito conjunto de chuva e evaporação, principalmente associado ao aumento da temperatura.

ABSTRACT– This research aims to analyze the behavior of meteorological droughts using standardized drought indices, calculated from climate projections of the RCP4.5 and RCP8.5 scenarios. The SPI and SPEI indices were used, based on the SWAT and VIC models. For the future climate (2005-2099), the SPI showed similar drought results when considering the RCP4.5 and RCP8.5 scenarios. The SPEI showed more divergent results when considering each scenario. The RCP8.5 simulations suggested a serious risk of megadrought in the region. The results indicate a combined effect of rainfall and evaporation, mainly associated with increased temperature.

Palavras-Chave – Mudanças climáticas, Seca meteorológica, SWAT, VIC

[1]) Universidade do Estado do Maranhão, Cidade Universitária Paulo VI., São Luis, 65055-310, Maranhão, Brazil. cita_mo@yahoo.com.br, fone: 98 98176-0003.
[2]) Departamento de Recursos Hídricos, Universidade Federal de Lavras, Campus universitário, Lavras, 37200-000, Minas Gerais, Brazil. livia.aalvarenga@ufla.br, fone: 35 99848-0515
[3]) Universidade do Estado do Maranhão, Cidade Universitária Paulo VI., São Luis, 65055-310, Maranhão, Brazil. rhmenezes@yahoo.com.br, fone: 98 98201-4338

1. INTRODUÇÃO

A avaliação da severidade, variabilidade espacial e tendências das secas têm sido objeto de estudo por meio de diferentes índices. Índices de seca são representações numéricas da gravidade da seca, utilizando variáveis ou parâmetros que descrevem as condições de seca (Van Hieu *et al*., 2022). A complexidade dos índices depende do número de variáveis de entrada, que podem incluir precipitação, evapotranspiração, umidade do solo, vazão e/ou vegetação (Vicente Serrano *et al*., 2022).

De acordo com Vicente-Serrano *et al*. (2012) os índices normalizados e padronizados de seca permitem a comparação de eventos de seca entre diferentes regiões, independentemente de suas características climáticas locais. Vários índices foram desenvolvidos como o Índice Padronizado de Precipitação (*Standardized Precipitation Index* – SPI, Mckee *et al*., 1993) e o Índice Padronizado de Precipitação e Evapotranspiração (SPEI, *Standardized Precipitation Evapotranspiration Index*, Vicente-Serrano *et al*., 2010).

A avaliação dos impactos dos eventos extremos de seca projetados pode ser realizada por meio de Modelos Climáticos Globais (GCMs). No entanto, esses eventos são desafiadores para serem modelados, uma vez que são frequentes e ocorrem com uma resolução menor do que a apresentada pelos GCMs (Parmesan *et al*., 2022). Esse trabalho busca trazer como novidade, a aplicação de índices de seca que avaliam o comportamento das secas meteorológicas no futuro, por meio da aplicação de modelos climáticos regionais na bacia do rio Verde, Minas Gerais, Brasil.

2. METODOLOGIA

A bacia hidrográfica do Rio Verde (BHRV) situa-se no sul do estado de Minas Gerais entre as coordenadas de 21° 20’ e 22° 30’ latitude sul; 44° 40’ e 45° 40’ longitude oeste. A nascente do Rio Verde está localizada na vertente ocidental da Serra da Mantiqueira, o rio segue em direção oeste, pela encosta da serra, percorrendo aproximadamente 220 km até desaguar na represa de Furnas.

A temperatura na região da bacia hidrográfica do Rio Verde apresenta média anual em torno de 18 à 19 °C. O regime pluviométrico da região é caracterizado por uma concentração de chuvas no período de verão, entre os meses de outubro e março. Os meses de dezembro, janeiro e fevereiro são os de maior precipitação, com um total médio de 712,5 mm; e o trimestre mais seco ocorre nos meses de junho, julho e agosto, com total médio de 70,3 mm. O índice médio de precipitação na região é de 1450 mm/ano, variando entre 1200 e 1800 mm/ano. O ano hidrológico inicia em outubro e termina

em setembro do ano subsequente.

Foram utilizados dados de temperatura e precipitação do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET) através do site https://portal.inmet.gov.br. referente às três estações climatológicas. A estação de São Lourenço (SL; 22º 07' 48" S e 45º 02' 24" O) está localizada no interior da bacia do Rio Verde (BHRV), enquanto as estações Machado (MA; 21º 40' 48" S; 45º 56' 24" O) e Lavras (LV; 21º 13' 34" S, 44º 58' 47" O) estão fora dos limites físicos da bacia. Os dados fluviométricos foram obtidos por meio da Agencia Nacional de Águas e Saneamento Básico (ANA) no site: https://www.snirh.gov.br/hidroweb para estação Três Corações (TC; 21º 42' 11" S, 45º14'51" O).

O Índice Padronizado de Precipitação (SPI) foi calculado a partir da distribuição de probabilidade gama da precipitação observada em um período de tempo específico, e é expresso em termos de desvios padrão em relação à média (Coelho *et al*., 2015).

O Índice Padronizado de Precipitação e Evapotranspiração (SPEI) foi estimado utilizando o método de Thornthwaite (Thornthwaite, 1948), com os dados de déficit de pressão de vapor, velocidade do vento, temperatura, saldo de radiação, fluxo de calor do solo, constante psicrométrica, sendo expresso em desvios padrão em relação à média histórica.

A distribuição gama 3 parâmetros foi utilizada para o ajuste do modelo probabilístico. O teste de Anderson-Darling (Anderson e Darling, 1954) foi empregado para avaliar a adequação das distribuições utilizadas e dos ajustes encontrados, empregando-se um nível de significância de 5%. Após o cálculo dos índices de seca, aplicou-se a classificação geral proposta (*World Meteorological Organization* - WMO, 2012): Seca moderada -1,00 a -1,49; Seca severa -1,50 a -1,99; e Seca extrema ≤-2,00. Para avaliação dos índices SPI e SPEI foram utilizados escala temporal anual.

2.1 MODELOS HIDROLÓGICOS VIC E SWAT

O modelo hidrológico de macro-escala *Variable Infiltration Capacity* (VIC), desenvolvido por Liang *et al*. (1994), é semi-distribuído e permite simular o balanço de água e o balanço energético.

A evapotranspiração (transpiração da vegetação, evaporação do dossel e evaporação do solo nu) é baseada na equação de *Penman-Monteith*. Na camada superior do solo, a curva variável de capacidade de umidade do solo (Equação 1) controla a evaporação, infiltração e o escoamento superficial; enquanto a camada inferior controla a geração de fluxo de base, utilizando a formulação ARNO (Todini, 1996).

$$i = i_m * [1 - (1 - A)]^{1/bi} \quad (1)$$

Em que i e i_m são o ponto e a capacidade máxima de umidade do solo, respectivamente; A é a fração de uma área para a qual a capacidade de umidade do solo é menor ou igual a i; e b_i é o parâmetro de forma da capacidade de umidade do solo.

As simulações com o SWAT (*Soil & Assessment Water Tool*) foram baseadas no balanço hídrico (Equação 2), realizadas por meio de rotinas hidrológicas que calculam os componentes do ciclo da água, como fluxos de águas superficiais e subterrâneas, armazenamento de dossel, evapotranspiração, percolação, fluxos laterais e perdas de transmissão. Assim, o escoamento é calculado para cada Unidade de Resposta Hidrológica e é encaminhado para estimar o fluxo em cada sub-bacia.

$$SW_t = SW_0 + \sum_{i=0}^{t} (R - Q_{surf} - E_a - W_{seep} - Q_{gw}) \quad (2)$$

Onde SWt e SW_0 são, respectivamente, o teor de água final e inicial do solo, t é o tempo, R é a precipitação, Q_{surf} é o escoamento superficial, E_a é a evapotranspiração, W_{seep} é a percolação e fluxo preferencial e Q_{gw} é o fluxo de água subterrânea.

Os dois modelos foram calibrados com periodo de 1993-1990 e de validação com o período de 2000-2005, ambos foram adequados para simulação da vazão, sendo os valores de R^2 (coeficiente de determinação) e de NSE (*Nash-Sutcliffe*) superiores a 0,8, NSELog superiores a 0,35 (*Eficiência Nash–Sutcliffe* do logarítimico dos valores de vazão) e PBIAS (desvio percentual) menor que 25%.

O modelo VIC foi calibrado manualmente usando resolução espacial de 0,0010 (~ 1 km), com um total de 3728 células de grade considerando a bacia do Rio Verde até a sessão controle (estação fluviométrica). O SWAT foi calibrado usando o *Sequential Uncertainty Fitting Algorithm* (SUFI2), implementado em SWATCUP por Abbaspour *et al*. (2007). A resolução espacial de 30 m foi utilizada, com um total de 57 sub-bacias e 1503 unidades de resposta hidrológica.

2.2 PROJEÇÃO DE MUDANÇAS CLIMÁTICAS

As projeções de mudança do clima futuro foram obtidas na Plataforma de Projeções de Mudança do Clima para a América do Sul. As simulações climáticas utilizadas nessa pesquisa (resolução espacial horizontal de 20 km) são baseadas no *downscaling* dinâmico das simulações de modelos climáticos globais (GCMs): CanESM2 (*Canadian Earth System Model version* 2), HadGEM2-ES (*Hadley Centre Global Environmental Model* 2) e MIROC5 (*Model for*

Interdisciplinary Research on Climate), utilizando o modelo climático regional Eta (Marengo *et al*., 2012). O cenário futuro foi 2011-2099 (RCP4.5 e RCP8.5), que foram divididos em 3 *time slice*: 2011-2040; 2041-2070; 2071-2099.

Os cenários de emissão (*Representative Concentration Pathways* - RCPs) utilizados foram o RCP4.5 e o RCP8.5. O RCP4.5 é um cenário intermediário que representa um aquecimento global médio variando entre 1,1 e 2,6 °C, enquanto o RCP8.5 representa o cenário mais pessimista, com aquecimento médio variando entre 2,6 e 4,8 °C, no final do século (Santos *et al*., 2019).

Os valores médios dos três modelos regionais (Eta/HadGEM2-ES, Eta/CANES e Eta/MIROC5) foram utilizados para o cálculo do Índice de Precipitação Padronizado (SPI) e Índice Padronizado de Precipitação e Evapotranspiração (SPEI) para o clima futuro, tanto para o RCP4.5, quanto para o RCP8.5.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

A Figura 1 apresenta o comportamento dos índices SPI e SPEI no cenário climático futuro (2005-2099) simulados para as cidades de Lavras, Machado e São Lourenço. Observa-se que a distribuição da frequência de eventos de seca simulados ao longo do tempo pelo SPI é semelhante quando comparamos os dois cenários (RCP4.5 e RCP8.5). Eventos extremos de seca foram observados no cenário RCP4.5 em 2029/2030, com valores de -2.00 para Lavras, -2.03 para Machado e -2.16 para São Lourenço. No entanto, no cenário RCP8.5, não foram constatadas ocorrências de eventos extremos de seca em nenhuma das localidades analisadas.

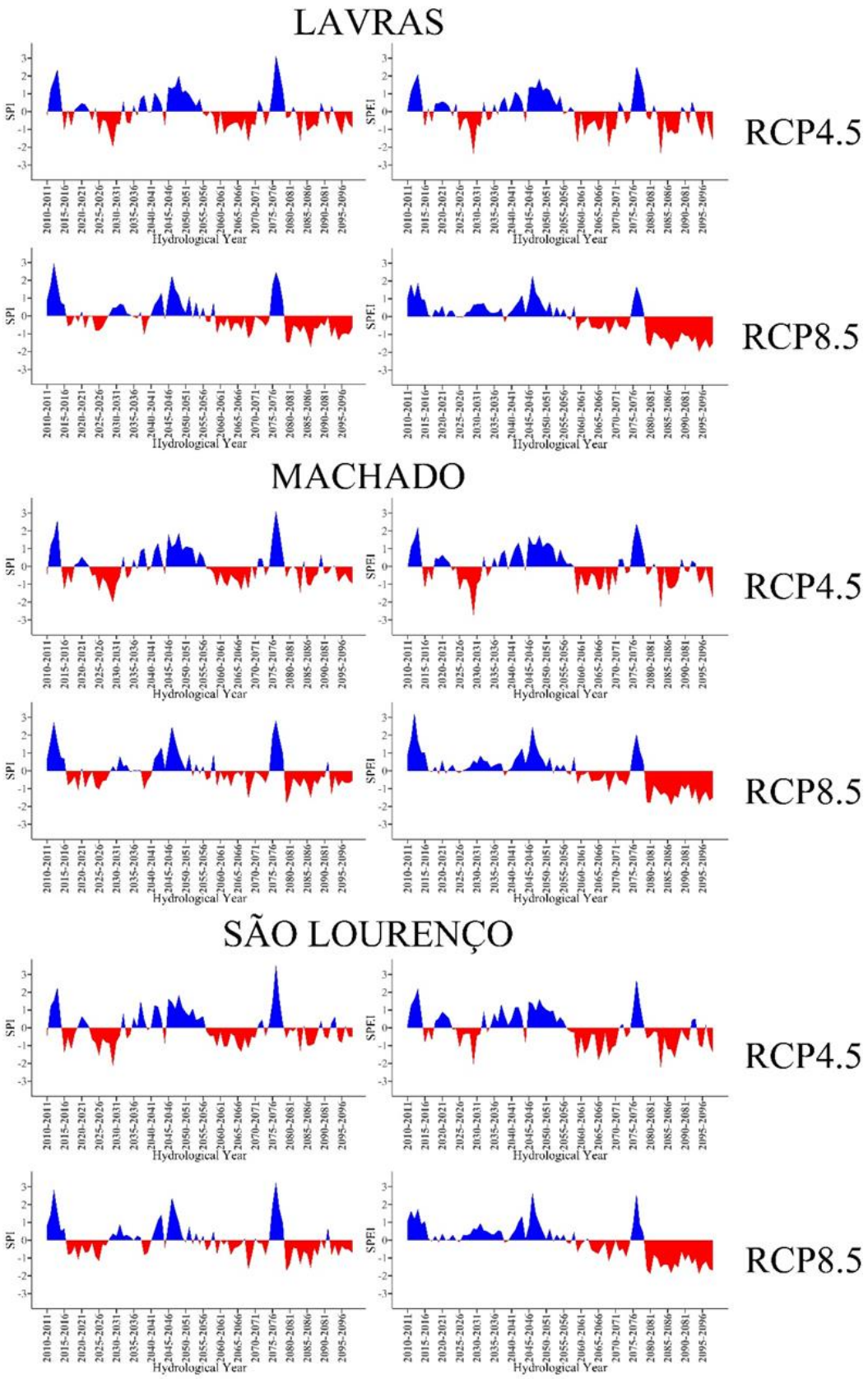


Figura 1 - Variabilidade temporal dos índices de seca SPI e SPEI para o clima futuro (2005-2099), nas localidades: Lavras, Machado e São Lourenço, na BHRV.

Ao analisar o SPEI, observa-se que o comportamento entre os dois cenários foi diferente. Considerando o cenário RCP4.5, foram observados uma tendência aos eventos extremos de seca nos anos hidrológicos de 2083/2084 (SPEI = -2.38, -2.76, -2.06) e 2098/2099 (SPEI = -2.40, -2.36, -2.27) para as cidades de Lavras, Machado e São Lourenço. Não foram simuladas secas extremas para o cenário RCP8.5. No entanto, observou-se que, a partir do ano hidrológico de 2079/2080, somente eventos de seca foram simulados.

Os resultados do SPEI sugerem um sério risco de ocorrência de megasseca para a região (Figura 1). De acordo com o sexto relatório do IPCC (2021), megassecas são caracterizadas por secas que duram pelo menos uma década e cujos impactos podem ser imensuráveis, especialmente se ocorrerem em uma região com alta densidade populacional.

As diferenças entre o SPI e o SPEI para o cenário RCP4.5 podem ser explicadas pelas simulações da precipitação e da evapotranspiração que se mantiveram relativamente constantes (Figura 2), em ambas cidades, para o cenário RCP4.5, o que pode justificar o comportamento semelhante entre os índices. Além disso, pode-se considerar que a precipitação é o principal fator para a caracterização de secas nesse cenário.

Para o cenário RCP8.5 as medianas da precipitação e da evapotranspiração se alteram com o decorrer do tempo no século XXI, sendo que, no período de 2071-2100, há um decréscimo da precipitação e um aumento da evapotranspiração. Nessa situação, o decréscimo da precipitação aliado a um aumento da temperatura (observado na evapotranspiração) são duas variáveis que intensificam a presença de secas no final do século XXI.

Assim, essas alterações poderão afetar a disponibilidade de água no futuro com a redução da precipitação podendo levar à escassez de água para todos os setores dependentes dos recursos hídricos na região, principalmente o abastecimento para consumo humano, irrigação e geração de energia elétrica. Esta condição pode gerar impactos na agricultura, fauna, flora e ecossistemas no geral, gerando perdas na produção agrícola e aumento de incêndios florestais, por exemplo. Além disso, ressalta-se o aumento de conflitos pelo uso da água e problemas de saúde pública devido à falta de água potável e proliferação de doenças de veiculação hídrica (Vieira *et al*., 2021).

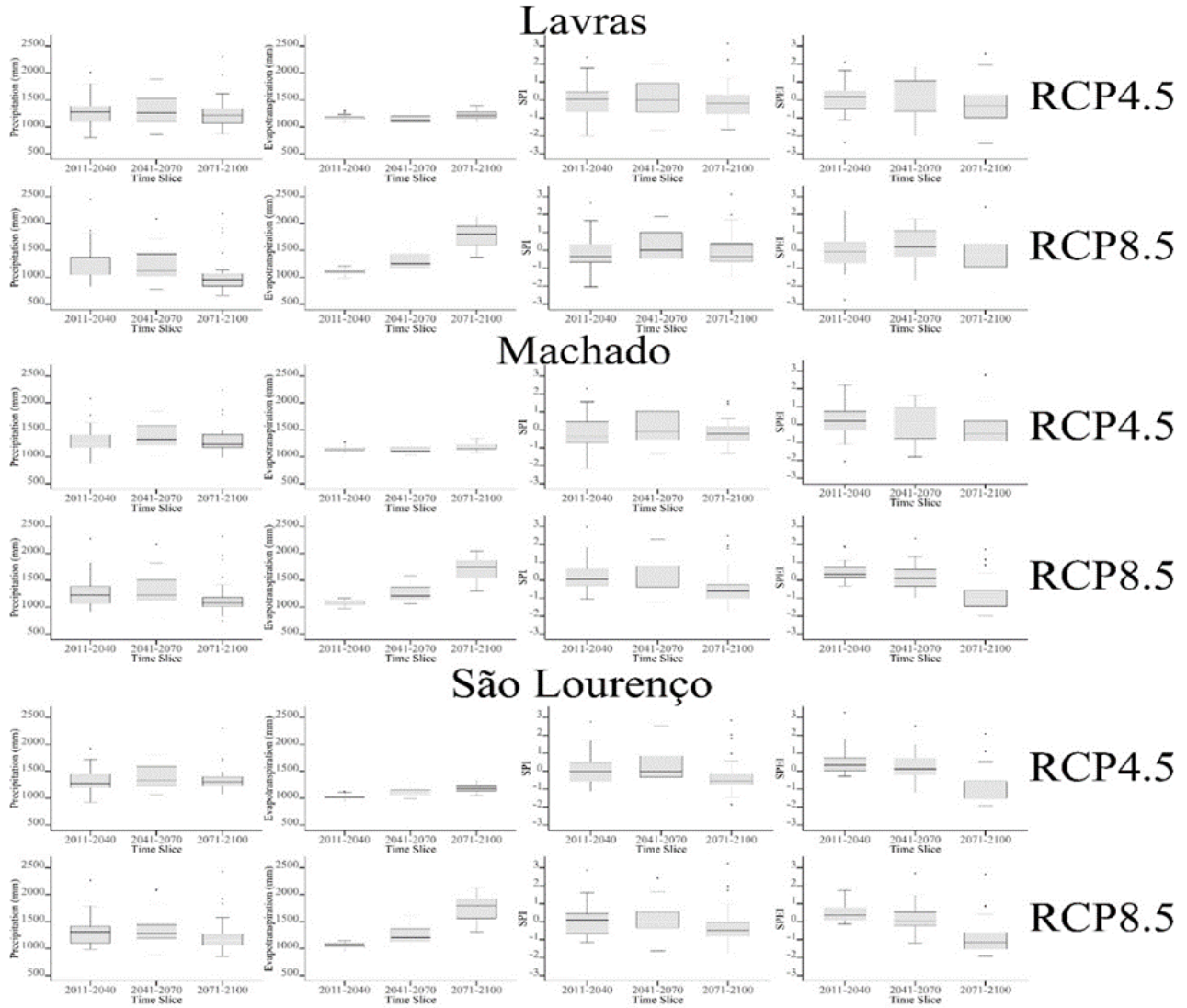


Figura 2 - Representação dos índices de seca SPI e SPEI através do boxplot em cada cenário RCP4.5 e RCP8.5 para as localidades: Lavras, Machado e São Lourenço.

CONCLUSÃO

No clima futuro (2005-2099) a seca metereológica simulada pelo SPI mostrou mais semelhança em ambos os cenários RCP's considerados. No entanto, o SPEI apresentou resultados diferentes da seca quando considerado cada cenário. Destaque pode ser dado para o RCP8.5, no qual as simulações sugeriram um sério risco de ocorrência de megasseca na região. Os resultados indicam que o feito conjunto de chuva e evaporação, principalmente associado ao aumento da temperatura deve ser considerado em estudos sobre mudanças climáticas.

REFERÊNCIAS

ABBASPOUR, K. C.; YANG, J.; MAXIMOV, I..; SIBER, R.; BOGNER, K., MIELEITNER, J., ZOBRIST, J., SRINIVASAN, R. (2007). "*Modelling hydrology and water quality in the pre-alpine/alpine Thur watershed using SWAT*". Journal of Hydrology 333, pp. 413–430.

ANDERSON, T. W.; DARLING, D. A. (1954). "*A test goodness of fit*". Journal of American Statistics Association 49, pp. 756-769.

COELHO, C. A. S.; CARDOSO, D. H. F.; FIRPO, M. A. F. (2015). "*Precipitation diagnostics of an exceptionally dry event in São Paulo, Brazil*". Theoretical and Applied Climatology 125(3-4), pp. 769–784.

IPCC - Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas. (2021). "*Summary for policymakers*". Cambridge University Press, Cambridge, UK.

LIANG, X.; LETTENMAIER, D. P.; WOOD, E. F.; BURGES, S. J. (1994). "*A Simple hydrologically based model of land surface water and energy fluxes for GSMs*". Journal of Geophysical Research 99(14), pp. 415-428.

MARENGO, J. A.; CHOU, S. C.; KAY, G.; ALVES, L. M.; PESQUERO, J. F.; SOARES, W. R.; *et al*. (2012). "*Development of regional future climate change scenarios in South America using the Eta CPTEC/HadCM3 climate change projections: Climatology and regional analyses for the Amazon, São Francisco and the Paraná River basins*". Climate Dynamics 38, pp. 1829–1848.

MCKEE, T. B.; DOESKEN, N. J.; LEIST, J. (1993). "*The relationship of drought frequency and duration to time scales*" in Preprints 8th Conference on Applied Climatology, Anaheim, California, Jan. 1993, pp. 179–184.

PARMESAN, C.; MORECROFT, M. D.; TRISURAT, Y.; ADRIAN, R.; ANSHARI, G. Z.; ARNETH, A.; *et al*. (2022). "*Terrestrial and Freshwater Ecosystems and Their Services*". Org. por Pörtner, H.O., Roberts, D.C., Tignor, M., Poloczanska, E.S., Mintenbeck, K. e Alegría, A. Cambridge University Press, New York, pp. 197–377.

SANTOS, C. A. S.; ROCHA, F.; RAMOS, T. B.; ALVES, L. M.; MATEUS, M.; OLIVEIRA, R. P. D.; *et al*. (2019). "*Using a hydrologic model to assess the performance of regional climate models in a semi-arid watershed in Brazil*". Water 11(1), pp. 1-17.

THORNTHWAITE, C. W. (1948). "*An approach toward a rational classification of climate*". Geographical Review 38(1), pp. 55-94.

TODINI, E. (1996). "*The ARNO rainfall-runoff model*". Journal of Hydrology 175, pp. 339–382.

VAN HIEU, N.; VAN TUAN, N.; BANG, N. K.; HAI, P. H.; HA, L. V.; HOA, T. T. (2022). "*Assessment of hydrological drought using the Standardized Streamflow Index (SSFI): A case study of the tien yen River Basin of Quang Ninh Province, Vietnam*". Journal of Geoscience and Environment Protection 10, pp. 309-326.

VICENTE-SERRANO, S. M.; LÓPEZ-MORENO, J. I.; BEGUERÍA, S.; LORENZO-LACRUZ, J.; AZORIN-MOLINA, C.; MORÁN-TEJEDA, E. (2012). "*Accurate computation of a Streamflow Drought Index*". Journal of Hydrologic Engineering 17(2), pp. 318–332.

VICENTE-SERRANO, S. M.; PEÑA-ÂNGULO, D.; BEGUERÍA, S.; DOMÍNGUEZ-CASTRO, F.; TOMÁS-BURGUERA, M.; NOGUERA, I.; *et al*. (2022). "*Global drought trends and future projections*". Philosophical Transactions of the Royal Society A 380, 20210285.

VICENTE-SERRANO, S. M.; SANTIAGO, B.; JUAN, I. L. M. (2010). "*A multiscalar drought index sensitive to global warming: The Standardized Precipitation Evapotranspiration Index*". Journal of Climate 23(7), pp. 1696–1718.

VIEIRA, N. P. A.; MELLO, C. R.; VIOLA, M. R.; BESKOW, S.; ALVARENGA, L. A. (2021). "*Climate change impacts on water resources of the largest hydropower plant reservoir in southeast Brazil*". Water 13, pp.1560.

WMO - World Meteorological Organization. (2012). "*In Standardized precipitation index user guide"*. World Meteorological Organization, Geneva, Switzerland. 24 p.