PROJEÇÃO DE SECA HIDROLÓGICA 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 da seca hidrológica por meio do emprego de índices de seca padronizados, calculados a partir de projeções climáticas dos cenários RCP4.5 e RCP8.5. Foi utilizado o índice SSFI a partir de vazões simuladas pelos modelos hidrológicos SWAT e VIC. A seca simulada pelo SPI mostrou mais semelhança em ambos os cenários RCP's considerados. Os resultados obtidos para o SSFI no clima futuro, para os cenários RCP4.5 e RCP8.5 evidenciam um comportamento de intensidade, duração e magnitude de seca hidrológica diferentes em relação às simulações do modelo SWAT e VIC. Os resultados indicam que o conjunto de chuva e evaporação, principalmente associado ao aumento da temperatura deve ser considerado em estudos sobre mudanças climáticas.

ABSTRACT– This research aims to analyze the behavior of hydrological drought through the use of standardized drought indices, calculated from climate projections of the RCP4.5 and RCP8.5 scenarios. The SSFI index was used based on flows simulated by the SWAT and VIC hydrological models. The drought simulated by the SPI showed more similarity in both RCP scenarios considered. The results obtained for the SSFI in the future climate, for the RCP4.5 and RCP8.5 scenarios, show a different behavior of intensity, duration, and magnitude of hydrological drought compared to the simulations of the SWAT and VIC models. The results indicate that the combined effect of rainfall and evaporation, mainly associated with increased temperature, should be considered in studies on climate change.

Palavras-Chave – Mudanças climáticas, Seca hidrológica, 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

O efeito das mudanças climáticas tem provocado alterações no ciclo hidrológico aumentando a frequência e magnitude dos extremos climáticos, chuvas mais intensas e secas mais prolongadas e com mais riscos naturais (Taye *et al*., 2015). A seca é considerada um fenômeno natural complexo com efeito danoso que pode atingir vários setores produtivos.

Os índices normalizados e padronizados de seca permitem a comparação de eventos de seca entre diferentes regiões, independentemente de suas características climáticas locais. Dentre os índices desenvolvidos existe o Índice Padronizado de Vazão (SSFI, *Standardized Streamflow Index*, Vicente-Serrano *et al*., 2012), que tem sido uma importante ferramenta para avaliar a transição de secas meteorológicas para secas hidrológicas o que permite avaliar as condições hidrológicas em uma bacia hidrográfica (Cuartas *et al*., 2022).

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). Nesse sentido, os modelos hidrológicos, geralmente acoplados a modelos regionais (RCMs), são importantes ferramentas para avaliar projeções e têm sido utilizados para melhor compreender os impactos das alterações futuras no balanço hídrico associado às mudanças climáticas (Oliveira *et al*., 2023).

Esse trabalho tem por objetivo realizar a aplicação de índices de seca para avaliar o comportamento da seca hidrológica no futuro, por meio da aplicação de modelos climáticos regionais e modelos hidrológicos 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 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).

Índice Padronizado de vazão (SSFI) foi calculado a partir da anomalia padronizada da vazão observada em relação à média histórica. Esse índice foi desenvolvido com base no Índice Padronizado de Precipitação (SPI), incorporando o efeito do armazenamento de água no solo e na bacia hidrográfica. O 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).

A distribuição gama 3 parâmetros foi utilizada para o ajuste do modelo probabilístico. O teste de Anderson-Darling (Anderson; 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; Seca extrema: ≤-2,00.

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.

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).

As simulações dos RCPs podem apresentar vieses sistemáticos decorrentes de erros na conceituação e discretização de variáveis climáticas. Para remover erros e reduzir incertezas nas projeções, os dados de precipitação e temperatura do ar simulados para o clima presente pelos modelos MIROC, HADGEM e CANES foram corrigidos a partir de dados observados obtidos de estações meteorológicas, utilizando o método proposto por Lenderink *et al*. (2007).

O ensemble de modelos climáticos é uma técnica usada para reduzir as incertezas nas projeções climáticas. Consiste na combinação de diferentes modelos climáticos para fornecer uma projeção média. Dessa forma, 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 vazão (SSFI) 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 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 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.

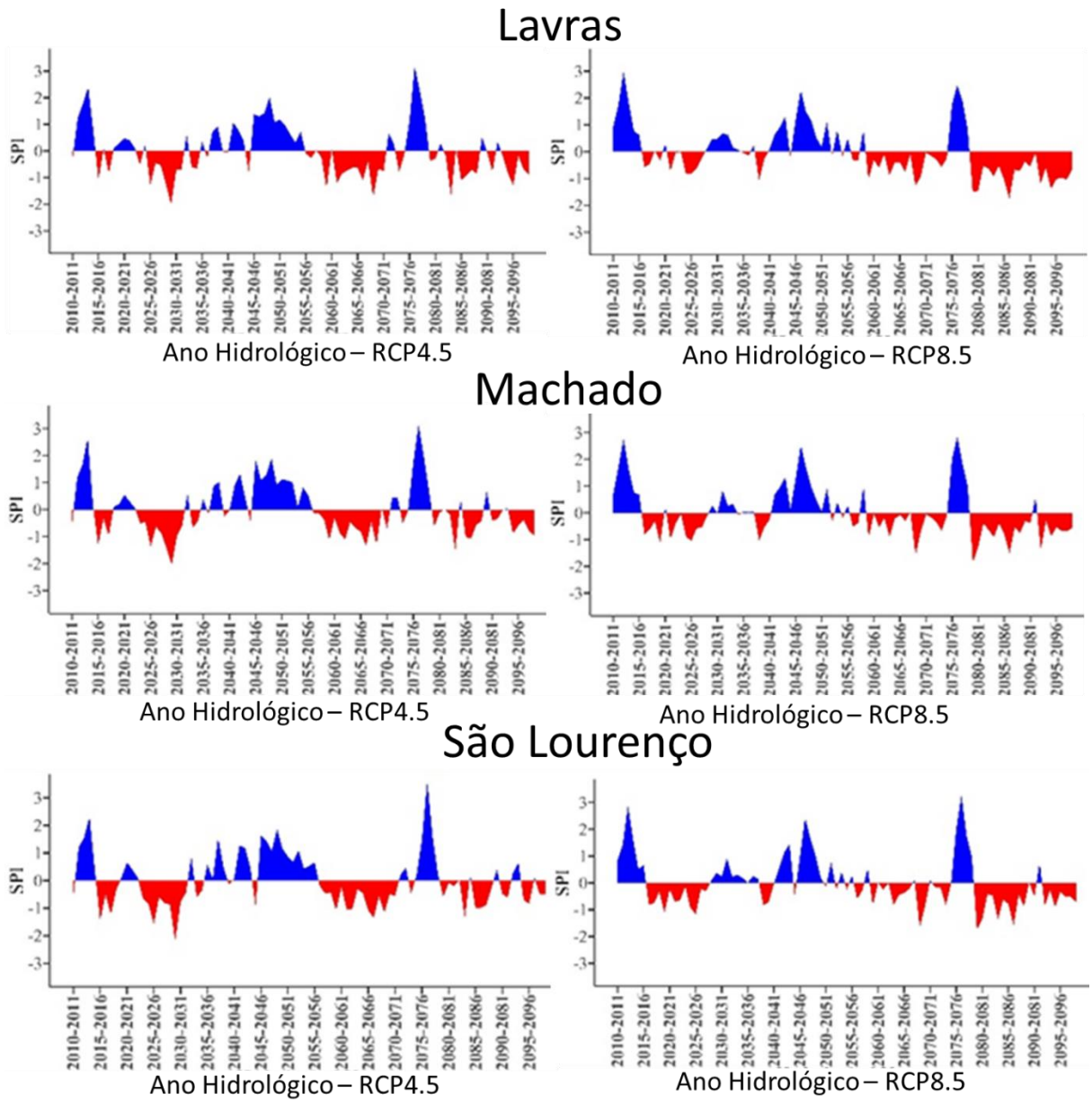


Figura 1. Variabilidade temporal dos Índices de Seca SPI para o Clima futuro (2005-2099), nas localidades: Lavras, Machado e São Lourenço, na BHRV.

Os impactos socioeconômicos de uma seca extrema podem ser devastadores para uma região, podendo atingir grandes extensões dependendo de sua duração, podendo gerar vários danos em setores como abastecimento humano, agricultura e a irrigação (Vuille *et al*., 2015).

Os resultados obtidos para o SSFI no clima futuro (2005-2099), para os cenários RCP4.5 e RCP8.5 (Figura 2) evidenciam um comportamento de intensidade, duração e magnitude de seca

hidrológica diferentes em relação às simulações do modelo SWAT e VIC. No cenário RCP4.5, segundo as simulações do SWAT, foram registrados eventos extremos de seca hidrológica no ano 2029/2030 (-2.4).

Já para o modelo VIC, foram registrados eventos extremos de seca hidrológica nos anos 2029/2023 (-2,5) e severos nos anos hidrológicos 2061/2062 (-1,8). Para os demais anos hidrológicos, os eventos de seca registrados foram classificados como moderados. No cenário RCP8.5, foi observada uma projeção de secas hidrológicas mais moderadas (-1,00 < SSFI < -1,49) entre os anos de 2016 a 2026 e mais severas (-1,50 < SSFI < -1,99) para os períodos de 2056 a 2070 e de 2080 a 2099. Já no cenário RCP8.5, não foi registrado nenhum evento extremo em ambos os modelos hidrológicos.

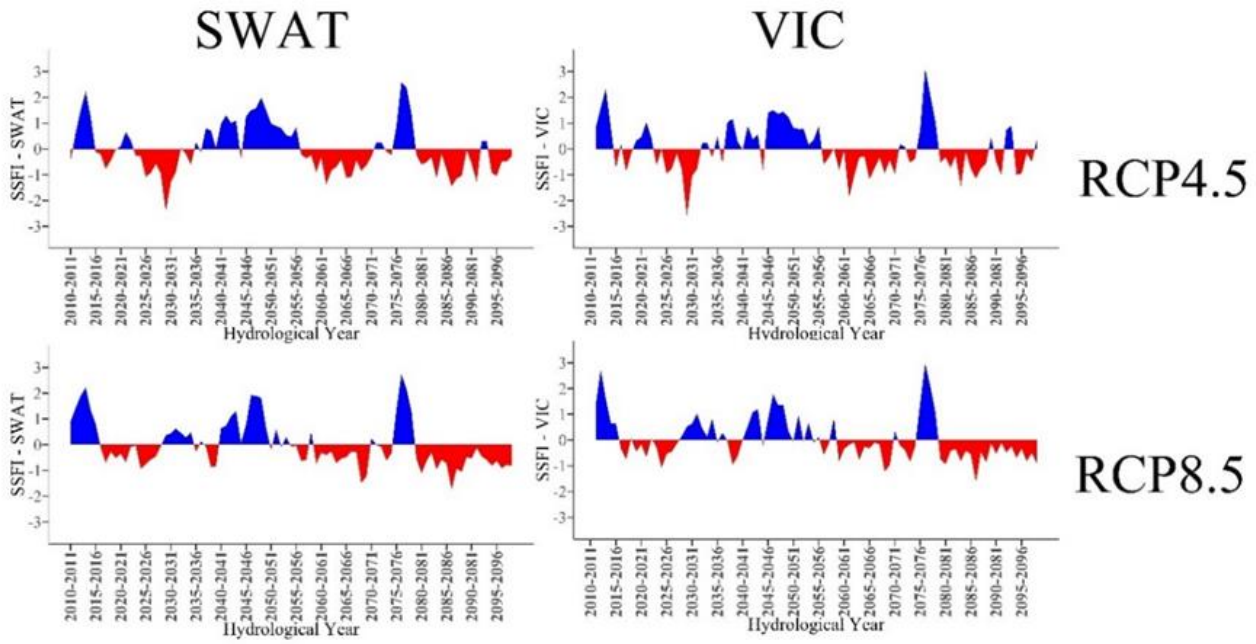


Figura 2. Variabilidade temporal dos modelos hidrológicos SWAT e VIC para o Índice de seca hidrológica (SSFI) considerando os cenários RCP4.5 e RCP8.5 para o clima futuro (2005-2099) na BHRV.

Analisando o comportamento dos índices de seca para uma mesma escala de tempo, a seca meteorológica pode ter influenciado a seca hidrológica, gerando redução na disponibilidade hídrica quase que simultaneamente. Nesse caso como a bacia do Rio Verde é muito pequena, o efeito da seca meteorológica foi praticamente refletido simultaneamente pela seca hidrológica.

CONCLUSÃO

A seca simulada pelo SPI mostrou mais semelhança em ambos os cenários RCP's considerados. Os resultados obtidos para o SSFI no clima futuro, para os cenários RCP4.5 e RCP8.5 evidenciam um comportamento de intensidade, duração e magnitude de seca hidrológica diferentes em relação às simulações do modelo SWAT e VIC. 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.

Os resultados deste estudo podem contribuir para a tomada de decisões, fornecendo subsídios ao planejamento de políticas e estratégias que visam minimizar e mitigar os impactos das secas na região. O conhecimento do comportamento da seca fornece informações fundamentais ao enfrentamento dos desafios socioambientais influenciados pelas 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.

CUARTAS, L. A.; CUNHA, A. P. M. D. A.; ALVES, J. A.; PARRA, L. M. P.; DEUSDARÁ-LEAL, K.; COSTA, L.C.O.; *et al*. (2022). "*Recent hydrological droughts in Brazil and their impact on hydropower generation*". Water 14(4), pp. 601-618.

LENDERINK, G.; BUISHAND, A.; VAN DEURSEN, W. (2007). "*Estimates of future discharges of the river Rhine using two scenario methodologies: Direct versus delta approach*". Hydrology and Earth System Sciences 11(3), pp. 1145–1159.

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.

OLIVEIRA, C. M. M.; ALVARENGA, L. A.; BESKOW, S.; DA CUNHA, Z. A.; VARGAS, M. M.; MELO, P. A.; *et al*. (2023). "*Hydrological Model Performance in the Verde River Basin, Minas Gerais, Brazil*". Resources 12(87), pp. 1-13.

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.

TAYE, M. T.; WILLEMS, P.; BLOCK, P. (2015). "*Implications of climate change on hydrological extremes in the Blue Nile basin: a review*". Journal of Hydrology: Regional Studies 4, pp. 280-293.

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

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.

VUILLE, M.; FRANQUIST, E.; GARREAUD, R.; LAVADO CASIMIRO, W. S.; CÁCERES, B. (2015). "*Impact of the global warminghiatus on Andean temperature*". Journal of Geophysical Research: Atmospheres 120, pp. 3745–3757.

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