

CAPÍTULO 1

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



<https://doi.org/10.22533/at.ed.268152524011>

Data de submissão: 20/01/2025

Data de aceite: 24/01/2024

Conceição de Maria Marques de Oliveira

Departamento de Engenharia Agrícola,
Universidade Estadual do Maranhão, São
Luís, Maranhão
<http://lattes.cnpq.br/5044468869147271>

Lívia Alves Alvarenga

Departamento de Recursos Hídricos,
Universidade Federal de Lavras, Lavras,
Mimas Gerais
<http://lattes.cnpq.br/8014126811283124>

RESUMO: As secas podem acarretar crise hídrica, que pode afetar a produção de alimento e causar impactos socioambientais. Esta pesquisa objetiva analisar o comportamento das secas meteorológica e hidrológica 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 para secas meteorológica e o SSFI para secas hidrológica, a partir de vazões simuladas pelos modelos hidrológicos SWAT e VIC. Para o clima presente (1961a 2005) os índices SPEI e SPI apresentaram resultados semelhantes com relação a eventos extremos de seca. Para o clima futuro (2005 a 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. No clima futuro o SSFI simulou secas extremas para os cenários, RCP4.5 e RCP8.5. Levando em consideração o comportamento dos índices de seca para uma mesma escala de tempo, a seca meteorológica pode ter influenciado a seca hidrológica, gerando redução das vazões do rio quase simultaneamente devido à pequena área da bacia considerada. Estes resultados podem ser utilizados no planejamento de políticas e estratégias que visem minimizar os impactos das secas na região.

PALAVRAS-CHAVE: Mudanças climáticas, Seca meteorológica, Seca hidrológica, SWAT, VIC.

PROJECTION OF METEOROLOGICAL AND HYDROLOGICAL DROUGHT EVENTS IN THE VERDE RIVER HYDROGRAPHIC BASIN

ABSTRACT: Droughts can lead to a water crisis, which can affect food production and cause socio-environmental impacts. This research aims to analyze the behavior of meteorological and hydrological droughts through the use of standardized drought indices, calculated from climate projections of the RCP4.5 and RCP8.5 scenarios. The SPI and SPEI indices were used for meteorological droughts and the SSFI for hydrological droughts, based on discharge simulated by the SWAT and VIC hydrological models. For the current climate (1961 to 2005) the SPEI and SPI indices showed similar results regarding extreme drought events. For the future climate (2005 to 2099), the SPI presented similar drought results when considering the RCP4.5 and RCP8.5 scenarios. The SPEI presented more divergent results when considering each scenario. In the future climate, the SSFI simulated extreme droughts for the scenarios, RCP4.5 and RCP8.5. Taking into account the behavior of drought indices for the same time scale, meteorological drought may have influenced hydrological drought, generating a reduction in river discharges almost simultaneously due to the small area of the basin considered. These results can be used in planning policies and strategies that aim to minimize the impacts of droughts in the region.

KEYWORDS: Climate change, Meteorological drought, Hydrological drought, SWAT, VIC.

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. De acordo com Cuartas et al. (2022), entre 1998 e 2017, mais de 4,4 bilhões de indivíduos foram afetados de diversas formas, incluindo perda de casas e vidas, além da necessidade de assistência para lidar com os impactos dos eventos extremos.

Entre os eventos climáticos extremos que resultam em maiores perdas, as secas assumem papel de destaque. De acordo com informações fornecidas pela Organização Mundial da Saúde (WHO, 2022), a escassez de água afeta diretamente cerca de 40% da população mundial, com a possibilidade de que até 700 milhões de pessoas em risco sejam deslocadas de suas residências até o ano de 2030.

A avaliação da severidade, variabilidade espacial e tendências das secas têm sido objeto de estudo por meio de diferentes índices (Brito et al., 2018). 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 (Van Loof, 2015; Dai et al., 2018; Manning et al., 2018; 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 (SPI, Standardized Precipitation Index, McKee et al., 1993), o Índice Padronizado de Precipitação e Evapotranspiração (SPEI, Standardized Precipitation Evapotranspiration Index, Vicente-Serrano et al., 2010) e o Índice Padronizado de Vazão (SSFI, Standardized Streamflow Index, Vicente-Serrano et al., 2012).

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 (Alvarenga et al., 2018; Zakhia et al., 2021; Melo et al., 2022; Oliveira et al., 2023).

No Brasil, os modelos regionais de clima (RCMs) e cenários têm sido amplamente utilizados para projetar e analisar a recorrência de eventos de seca. Para avaliar possíveis impactos de secas em diferentes regiões do país, vários estudos têm utilizado os índices de seca (Gonçalves et al., 2023). O Índice Padronizado de Precipitação (SPI) pode ser utilizado para avaliar o déficit de precipitação em um determinado local e tem sido aplicado em muitos estudos sobre seca meteorológica (Silva; Mello, 2021; Silva et al., 2022; Freitas et al., 2022); o Índice Padronizado de Evapotranspiração e Precipitação (SPEI) considera a demanda atmosférica de água por meio da evapotranspiração e tem se mostrado um índice mais robusto e eficaz no diagnóstico de tendências da seca meteorológica (Cuartas et al., 2022).

O índice padronizado de vazão (SSFI) 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; Shamshirband et al., 2020).

Os índices de secas também são importantes ferramentas utilizadas para avaliar os impactos das mudanças climáticas na hidrologia de diferentes regiões (Rodrigues et al., 2020; Silva et al., 2022). Silva et al. (2022) estudaram a severidade da seca no Sul de Minas do período 1970-2020 com projeção para 2098-2099 usando modelos climáticos globais produzido pelo ETA (HadGEM2-ES, MIROC5, BESM, CanESM2) com resolução horizontal de 20km com 2 projeções RCP4.5 e RCP8.5 e avaliaram a recorrência e o impacto da seca usando o índice SPI. Segundo os autores, os resultados mostraram que o período 2013-2014 foi considerado o mais seco seguido de 2014-2015, o que gerou escassez hídrica e afetou a produção de café na região. As projeções futuras indicam que as secas extremas continuarão a ocorrer.

Com base no exposto acima, esse trabalho busca trazer como novidade, a aplicação de índices de seca que avaliam o comportamento das secas meteorológicas e hidrológicas no passado e no futuro, por meio da aplicação de modelos climáticos regionais e modelos hidrológicos na bacia do rio Verde, Minas Gerais, Brasil. Esse estudo almeja ainda diagnosticar os possíveis impactos da seca na região, que atualmente é importante como produtora de energia e como polo de agronegócio.

Visa-se, portanto, (i) Analisar o comportamento da seca meteorológica a partir de projeções climáticas dos cenários RCP4.5 e RCP8.5, utilizando o ensemble dos modelos Eta-HadGEM2-ES, Eta-MIROC5 e Eta-CanESM2 na bacia hidrográfica do Rio Verde e (ii) Analisar o comportamento da seca hidrológica a partir das vazões simuladas pelos modelos hidrológicos VIC e SWAT na bacia hidrográfica do Rio Verde, utilizando as projeções climáticas dos RCPs.

MATERIAIS E MÉTODOS

Área de estudo

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 (Figura 1). A nascente do Rio Verde está localizada na vertente ocidental da Serra da Mantiqueira, no limite dos municípios de Passa Quatro e Itanhandu, a uma altitude de cerca de 2600 metros, próxima à divisa dos estados de Minas Gerais, São Paulo e Rio de Janeiro. O rio segue em direção oeste, pela encosta da serra, percorrendo aproximadamente 220 km até desaguar na represa de Furnas, localizada no limite dos municípios de Elói Mendes e Três Pontas. Nesse ponto, o rio atinge uma altitude de cerca de 809 m acima do nível do mar (PDRH-Rio Verde, 2010).

As temperaturas na região da bacia hidrográfica do Rio Verde apresentam 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.

A região Sul de Minas, segundo o Instituto Brasileiro Geográfico (IBGE, 2019) apresenta o Produto Interno Bruto nominal estimado (PIB) de US\$12624 milhões de dólares, uma população de 2311547, um PIB per capita de US\$ 5487 para 142 município. É uma região bastante importante economicamente devido à produção de café (arábica) e seu potencial hidroelétrico. A região em 2021 produziu cerca de 19152,2 sacas que corresponde a mais de 30% total da produção brasileira (Companhia Nacional de Abastecimento -

CANAB, 2021). Além disso, tem importância significativa para o setor energético, possui várias pequenas centrais hidrelétricas e quatro centrais de alta potência, entre elas a Usina Hidrelétrica de Furnas, sendo o maior reservatório do Brasil com capacidade instalada de 1216 MW (Bueno et al., 2016).

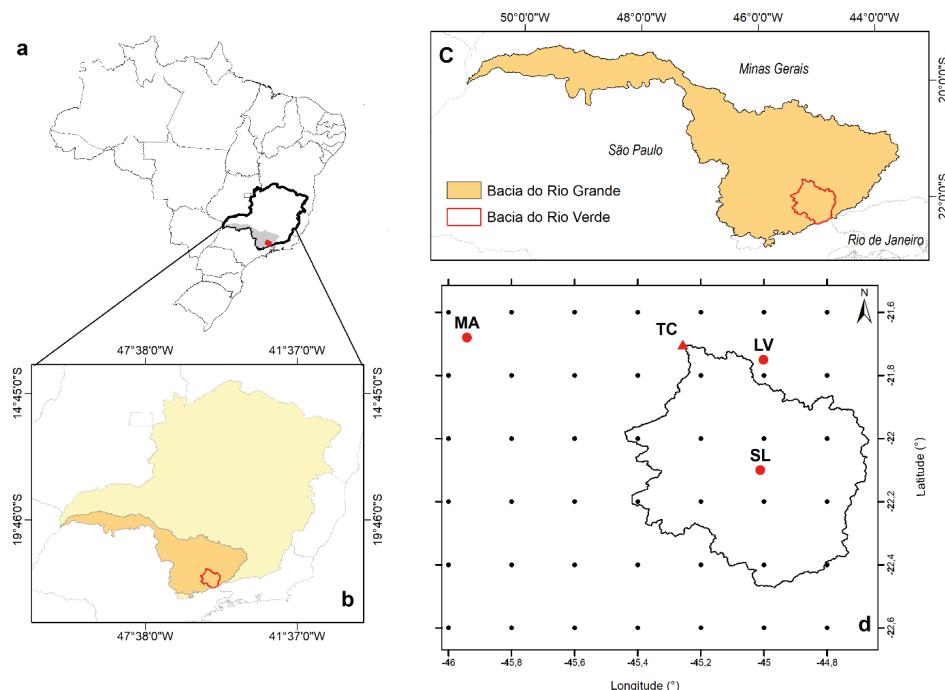


Figura 1 – a) Localização do Estado de Minas Gerais –MG, Brasil; b) Localização da Bacia Hidrográfica do Rio Grande -MG; c) Localização da Bacia Hidrográfica do Rio Verde; d) Estações climatológicas (LV - Lavras; MA - Machado; SL - São Lourenço) e estação fluviométrica Três Corações (TC) na Bacia hidrográfica do Rio Verde.

2.2 Base de dados empregados

Dados de temperatura e precipitação do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET) foram obtidos através do site (referente às três estações climatológicas- Figura 1D). A estação de São Lourenço (SL; 22° 07' 48" S e 45° 02' 24" O) está localizada no interior da bacia hidrográfica do Rio Verde (BHRV), enquanto as estações Machado (MA; 21° 40' 48" S; 45° 56' 24" O) e Lavras (LV; 21° 13' 34" S, 44° 58' 47" O) estão fora dos limites físicos da bacia. Os dados fluviométricos foram obtidos por meio da Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (ANA) para estação Três Corações (TC; 21° 42' 11" S, 45° 14' 51" O). O período da série histórica utilizado para análise das três estações climatológicas e dos dados fluviométricos corresponde aos anos de 1990 a 2005.

Índice de Precipitação Padronizado (SPI), Índice Padronizado de Precipitação e Evapotranspiração (SPEI) e Índice Padronizado de vazão (SSFI)

Neste estudo o SPI foi definido com base na precipitação total durante o ano hidrológico de outubro a setembro do ano seguinte. O Índice Padronizado de Precipitação (SPI) é uma ferramenta amplamente utilizada para quantificar a severidade e duração das anomalias de precipitação em uma determinada área. A metodologia de cálculo foi inicialmente proposta por McKee et al. (1993) e, posteriormente, aprimorada por outros autores (Hayes et al., 2011; Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas - IPCC, 2021). O índice é 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) é um indicador climático que considera a demanda atmosférica no balanço hídrico, o que o torna uma medida mais robusta que o SPI. O SPEI utiliza a demanda atmosférica no balanço hídrico (Vicente-Serrano et al., 2009). Para estimar a evapotranspiração potencial foi utilizado 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 e constante psicrométrica. O SPEI é calculado a partir da distribuição de probabilidade gama, da diferença entre a precipitação e a evapotranspiração observadas em um período de tempo específico, e é expresso em desvios padrão em relação à média histórica.

Índice Padronizado de vazão (SSFI) é um índice padronizado utilizado para avaliar a seca hidrológica. É calculado a partir da anomalia padronizada da vazão observada em relação à média histórica. De acordo com Mcvicar et al. (2012) o SSFI é uma ferramenta útil para analisar e comparar as condições de seca hidrológica em diferentes regiões. O índice foi desenvolvido com base no Índice Padronizado de Precipitação (SPI), incorporando o efeito do armazenamento de água no solo e na bacia hidrográfica.

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) (Tabela 1). Para avaliação dos índices SPI, SPEI e SSFI foram utilizados escala temporal anual.

Classificação	Intervalo
Seca moderada	-1,00 a -1,49
Seca severa	-1,50 a -1,99
Seca extrema	≤-2,00

Tabela 1 - Classificação dos índices dos diferentes tipos de seca (SPI, SPEI e SSFI).

Fonte: Adaptado de McKee et al. (1993); WMO (2012).

Modelos hidrológicos VIC e SWAT

O modelo hidrológico de macro-escala Variable Infiltration Capacity (VIC), desenvolvido por Liang et al. (1994, 1996), é semi-distribuído e permite simular o balanço de água e o balanço energético. O modelo se distingue de outros modelos hidrológicos por meio da parametrização da variabilidade espacial da infiltração e pela conceitualização do escoamento base.

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).

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

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 é o parâmetro de forma da capacidade de umidade do solo.

O SWAT (Soil & Assessment Water Tool), desenvolvido pelo Agricultural Research Service (Neitsch et al., 2005), é um modelo de simulação de base hidrológica e base semi-conceitual que permite análise de diferentes processos em bacias hidrográficas a partir de parâmetros espacialmente distribuídos em nível de sub-bacias (Srinivasan; Arnold, 1994).

As simulações com o SWAT são 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 SW_t 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 modelos hidrológicos foram executados para o período de 1990 a 2005, os primeiros três anos foram usados para aquecimento, os quais os dois modelos foram calibrados com o período de 1993 a 1990 e de validação com o período de 2000 a 2005, ambos foram adequados para a 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 logarítmico dos valores de vazão) e PBIAS (desvio percentual) menor que 25%. Mais detalhes sobre a descrição das entradas, parâmetros e desempenho do SWAT e VIC podem ser encontrados em Alvarenga et al. (2020).

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.

Projeção das mudanças climáticas

As projeções das mudanças do clima presente e 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, Arora; Matthews, 2011; Chylek et al., 2011), HadGEM2-ES (Hadley Centre Global Environmental Model 2- Earth System, Collins et al., 2011; Jones et al., 2011) e MIROC5 (Model for Interdisciplinary Research on Climate, Watanabe et al., 2010), utilizando o modelo climático regional Eta (Pesquero et al., 2010; Marengo et al., 2012). A período base utilizado foi entre 1961 a 2005 e o cenário futuro foi entre 2011 a 2099 (RCP4.5 e RCP8.5), dividido em 3 time slice: 2011 a 2040; 2041 a 2070; 2071 a 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.

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 do clima presente (1961 a 2005) e as projeções do clima futuro (2006 a 2099) foram extraídas na Plataforma de Projeções de Mudança do Clima para a América do Sul regionalizadas pelo modelo Eta (PROJETA), do CPTEC, para o ponto de grade referente a localização da estação meteorológica da BHRV. Os dados foram baixados do site PROJETA homepage Web platform.

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), Índice Padronizado de Precipitação e Evapotranspiração (SPEI) e Índice Padronizado de vazão (SSFI) para o clima presente e futuro, tanto para o RCP4.5, quanto para o RCP8.5.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

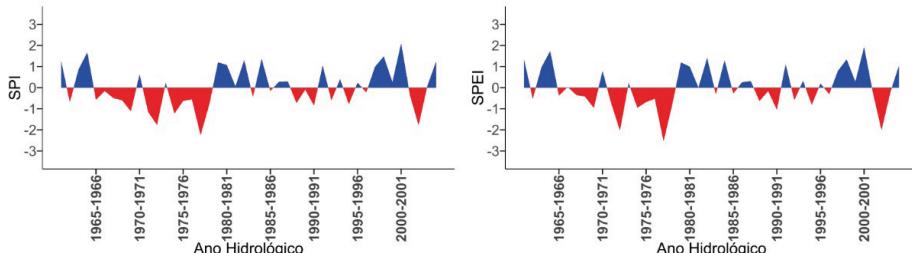
Seca Meteorológica

Os índices SPI e SPEI foram calculados para as estações Lavras, Machado e São Lourenço durante o período de 1961 a 2005 e apresentaram resultados semelhantes com relação a eventos extremos de seca (Figura 2). Essas semelhanças podem ser explicadas pela distância entre as estações, de aproximadamente 100 km, e pela escala e resolução dos modelos climáticos utilizados de 20 km. Alvarenga et al. (2018) afirmam que a melhoria da resolução espacial dos modelos hidrológicos é fundamental para a obtenção de resultados simulados mais precisos e confiáveis.

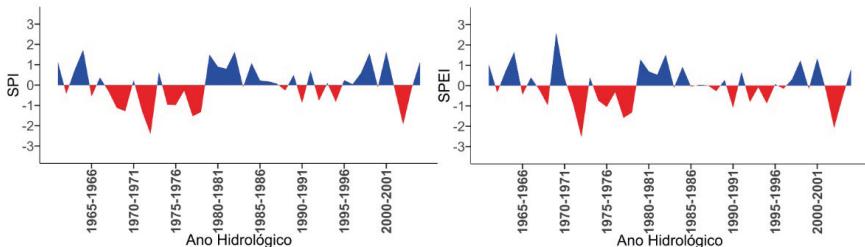
Os valores negativos de SPI e de SPEI indicam anos secos e os valores abaixo de -2 representam condições extremas de seca, conforme a classificação apresentada na Tabela 1. Durante o período de análise, os piores eventos de seca simulados pelo SPI ocorreram em 1977/1978 ($SPI = -2.25$), 1972/1973 ($SPI = -2.41$) e 1968/1969 ($SPI = -2.07$) para Lavras, Machado e São Lourenço, respectivamente. Por outro lado, eventos extremamente secos, observados pelo SPEI, foram verificados em 1972/1973, 1977/1978 e 2002/2003 ($SPEI = -2.03, -2.54$ e -2.01), para Lavras; em 1972/1973 e 2002/2003 ($SPEI = -2.53$ e -2.07), para Machado; e em 2002/2003 ($SPEI = -2.20$), para São Lourenço (Fig. 2).

A análise dos resultados mostrou que os valores do SPEI foram geralmente menores do que os valores do SPI, sugerindo que a inclusão da evapotranspiração no cálculo do SPEI levou a valores mais negativos. Essa diferença foi mais significativa para Machado e Lavras, da qual em geral os valores do SPEI foram de 10 a 20% inferiores em relação aos valores do SPI no mesmo ano (Figura 2). Esse resultado permite inferir que a inclusão da evapotranspiração nos índices de seca pode melhorar a caracterização dos eventos de seca (Silva; Mello, 2021).

Lavras



Machado



São Lourenço

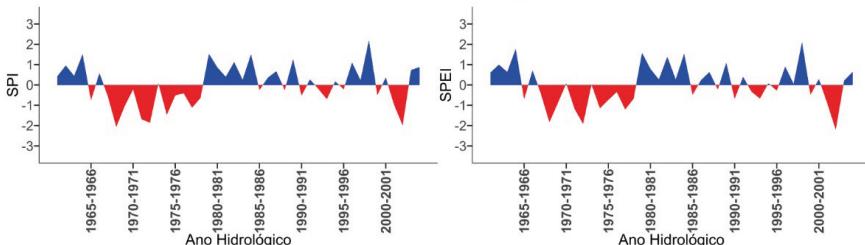


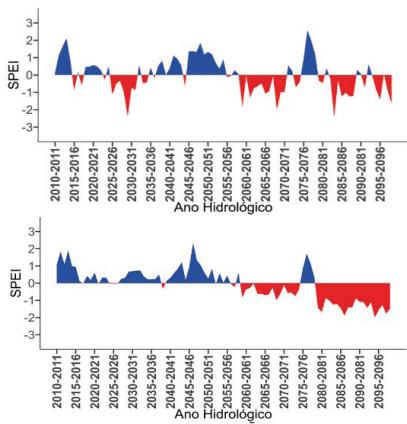
Figura 2 – Variabilidade temporal dos Índices de Seca SPI e SPEI no Clima Presente (1961 a 2005) para as localidades: Lavras, Machado e São Lourenço, na BHRV.

A Figura 3 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.

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 ($\text{SPEI} = -2.38, -2.76, -2.06$) e 2098/2099 ($\text{SPEI} = -2.40, -2.36, -2.27$) 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 3). 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. Ressalta-se que os modelos de mudanças climáticas contêm incertezas, portanto tais eventos não necessariamente ocorrerão nestes anos hidrológicos específicos. Destaca-se, no entanto, a importância de se verificar e prever o aumento das frequências visando o planejamento adequado dos recursos hídricos.

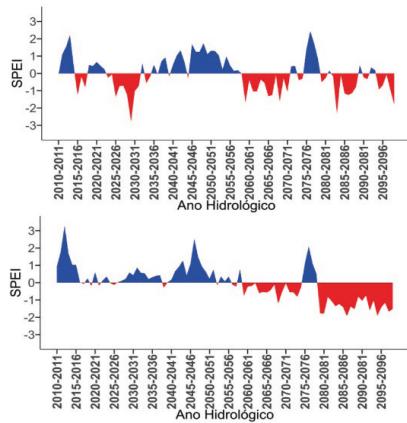
Lavras



RCP 4.5

RCP 8.5

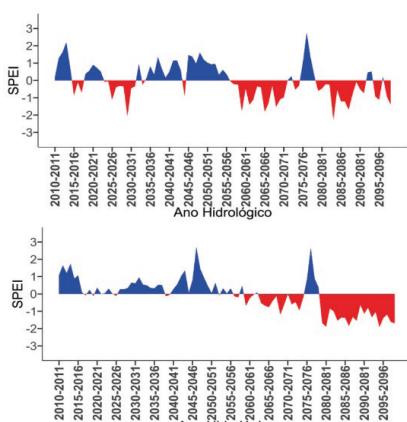
Machado



RCP 4.5

RCP 8.5

São Lourenço



RCP 4.5

RCP 8.5

Figura 3 – Variabilidade temporal dos Índices de Seca SPI e SPEI para o Clima futuro (2005 a 2099), nas localidades: Lavras, Machado e São Lourenço, na BHRV.

As diferenças entre o SPI e o SPEI para o cenário RCP4.5 podem ser explicadas pela análise de Box-plot da precipitação e da evapotranspiração apresentados na Figura 4. Observa-se que as medianas das simulações de precipitação e evapotranspiração mantiveram-se relativamente constantes, em ambas as 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.

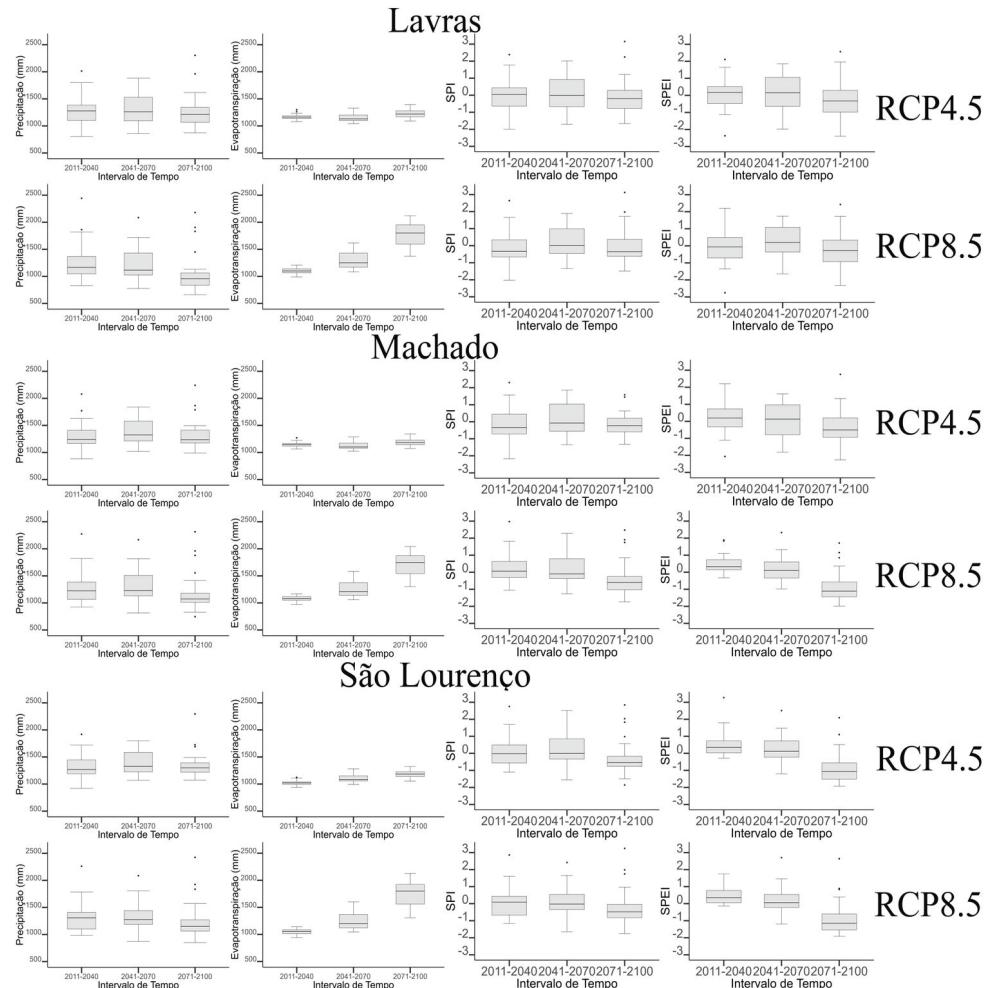


Figura 4 – Representação dos índices de seca SPI e SPEI através do boxplot em cada cenário RCP4.5 e RCP8.5 para as localidades: Lavras, Machado e São Lourenço.

Para o cenário RCP8.5 observa-se um comportamento diferente, em que as medianas da precipitação e da evapotranspiração se alteram com o decorrer do tempo no século XXI, sendo que, no período de 2071 a 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, 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 (Oliveira et al., 2019; Rodrigues et al., 2020; Vieira et al., 2021).

Os impactos socioeconômicos de uma megassecagem podem ser devastadores para uma região, podendo atingir grandes extensões dependendo de sua duração. Este fenômeno também foi identificado no Chile Central, onde foi observada uma redução de 25% a 40% das chuvas e um aumento na evaporação de reservatórios, gerando vários danos em setores como abastecimento humano, agricultura e a irrigação (Vuille et al., 2015).

A BHRV está localizada no sul do estado de Minas Gerais, região considerada um dos polos da produção de café no estado. Em concordância com Camargo (2010) e Damatta e Ramalho (2006) o efeito do aumento da temperatura pode levar à redução da produtividade em diferentes estágios fisiológicos da cultura do café. Isso porque as fases de crescimento e amadurecimento dos frutos podem ser aceleradas, muitas vezes resultando em perda de qualidade do grão, crescimento ou anormalidades, como o amarelecimento das folhas. A fase de floração também pode ser afetada, especialmente em uma condição de seca prolongada, podendo resultar no aborto de flores.

Projeção dos impactos da seca hidrológica

A Figura 5 apresenta a série histórica do SSFI simulado na BHRV. Verificou-se que apenas um valor de seca extrema ($SSFI = -2.69$; 1972/1973) foi simulada por meio do modelo hidrológico SWAT, enquanto nenhum valor de seca extrema foi obtido por meio do modelo hidrológico VIC.

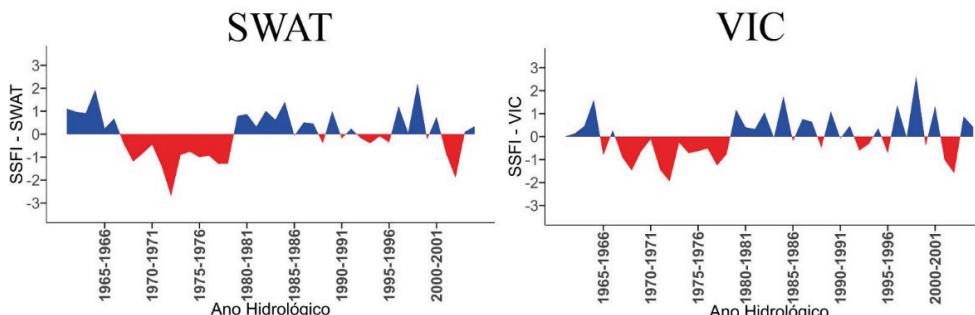


Figura 5 – Variabilidade temporal do índice (SSFI) considerando o clima presente (1961 a 2005), na BHRV.

Os resultados obtidos para o SSFI no clima futuro (2005-2099), para os cenários RCP4.5 e RCP8.5 (Figura 6) evidenciam um comportamento de intensidade, duração e magnitude de seca hidrológica diferentes para as simulações de cada modelo (SWAT e VIC). Em geral, no cenário RCP4.5 as simulações do SWAT e do VIC registraram eventos extremos de seca hidrológica entre os anos 2023 a 2030. No cenário RCP8.5 foi observada a projeção de secas hidrológicas mais moderadas ($-1,00 < \text{SSFI} < -1,49$) entre os anos de 2016 a 2026 e mais severas ($-1,50 < \text{SSFI} < -1,99$) para os períodos de 2056 a 2070 e de 2080 a 2099. Fica claro que no cenário RCP8.5 não foi registrado nenhum evento extremo de seca em ambas as simulações dos modelos hidrológicos.

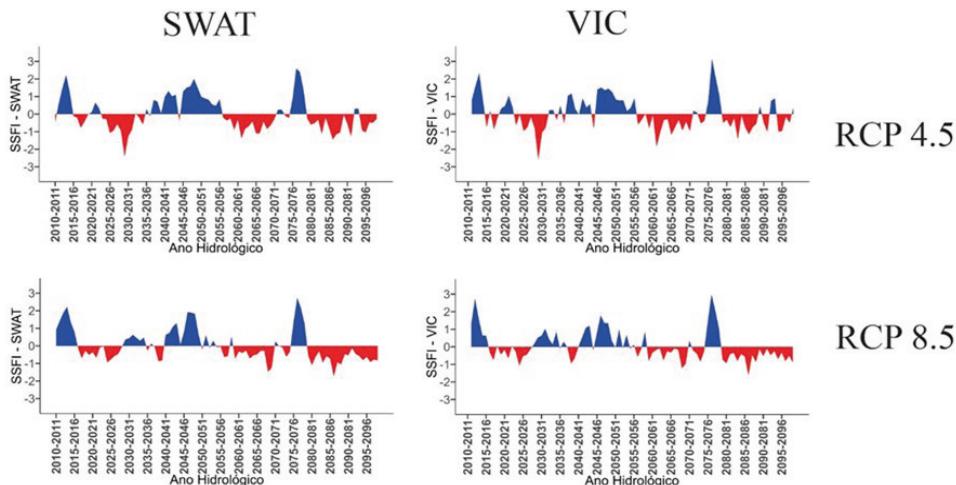


Figura 6 – Variabilidade temporal dos modelos hidrológicos SWAT e VIC para o Índice de seca hidrológica (SSFI) considerando os cenários RCP4.5 e RCP8.5 para o clima futuro (2005 a 2099) na BHRV.

Resultados semelhantes foram apresentados por Chou et al. (2014) para a região Centro-Sul do Brasil; por Alvarenga et al. (2018) para a região Sudeste; e por Lyra et al. (2017) para a América Central, os quais observaram diminuição da vazão ao utilizarem os mesmos cenários para o final do século.

Analizando 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 refletido simultaneamente pela seca hidrológica.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este estudo investigou os efeitos da seca na Bacia Hidrográfica do Rio Verde, inserida em uma região importante para a produção de café e geração de energia elétrica, no sul de Minas Gerais. Utilizando projeções climáticas dos cenários RCP4.5 e RCP8.5 buscou-se analisar o comportamento das secas. Os índices SPI e SPEI foram utilizados para a análise da seca meteorológica e o índice SSFI para análise da seca hidrológica (vazões simuladas pelos modelos hidrológicos SWAT e VIC).

No clima presente (1961 a 2005) o índice SPEI apresentou valores ligeiramente menores em comparação ao SPI. Os resultados mostraram que a inclusão da evapotranspiração no cálculo do SPEI pode melhorar a caracterização da seca meteorológica, porém a precipitação continua sendo o fator determinante para ocorrência ou não das secas.

No clima futuro (2005 a 2099) a seca 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.

O efeito da seca meteorológica sobre a seca hidrológica ocorre quase que simultaneamente, este efeito pode ser explicado pela pequena área considerada (4100 km²). Para o clima presente as comparações das secas meteorológica (SPI) e hidrológica (SSFI) indicaram que a seca meteorológica apresenta uma resposta mais rápida na BHRV.

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.

AGRADECIMENTOS

Ao apoio financeiro recebido da Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (ANA), TED ANA/UFLA nº 011/2020, Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) e Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais (FAPEMIG) (Processo: 429247/2018-4, 305295/2021-7 e APQ-00709-21).

AUTORIZAÇÕES/RECONHECIMENTO

Ao submeter o trabalho, os autores assumem a responsabilidade por todo o conteúdo da obra.

REFERÊNCIAS

- ABBASPOUR, K. C. et al. 2007. Modelling hydrology and water quality in the pre-alpine/alpine Thur watershed using SWAT. **Journal of Hydrology**, v. 333, p. 413–430. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2006.09.014>
- ALVARENGA, L. A. et al. Impacts of climate change on the hydrology of a small brazilian headwater catchment using the distributed Hydrology-Soil-Vegetation model. **American Journal of Climate Change**, v. 7, p. 355-366, 2018. <https://doi.org/10.4236/ajcc.2018.72021>
- ALVARENDA, L. A. et al. Hydrological simulation with SWAT and VIC Models in the Verde River Watershed, Minas Gerais. **Revista Ambiente e Água**, v. 15, n. 4, e2492, 2020. <https://doi.org/10.4136/1980-993X>
- ANDERSON, T. W.; DARLING, D. A. A test goodness of fit. **Journal of American Statistics Association**. v. 49, p. 756-769, 1954. <https://doi.org/10.1080/01621459.1954.10501232>
- ARORA, V. K.; MATTHEWS, H. D. Characterizing uncertainty in modeling primary terrestrial ecosystem processes. **Global Biogeochemical Cycles**, v. 23, e-GB2016, 2009. <https://doi.org/10.1029/2008GB003398>
- BRITO, S. S. B. et al. Frequency, duration and severity of drought in the Semiarid Northeast Brazil region. **International Journal of Climatology**, v. 38, n. 2, p. 517-529, 2018. <https://doi.org/10.1002/joc.5225>
- BUENO, E.; SILVA, C.; ALVES, G. Evaporação do reservatório da usina hidrelétrica de Camargos: water footprint characterization. **Revista Brasileira De Recursos Hídricos**, v. 21, n. 3, p. 570–575, 2016. <https://doi.org/10.1590/2318-0331.011616021>
- CAMARGO, M. B. P. The impact of climatic variability and climate change on arabic coffee crop in Brazil. **Bragancia**, v. 69, n. 1, p. 239-247, 2010. <https://doi.org/10.1590/S0006-87052010000100030>
- CHOU, S. et al. Evaluation of the ETA simulations nested in three global climate models. **American Journal of Climate Change**, v. 3, p. 438-454, 2014. <https://doi.org/10.4236/ajcc.2014.35039>
- CHYLEK, P. et al. Observed and model simulated 20th century Arctic temperature variability: Canadian Earth System Model CanESM2. **Atmospheric Chemistry and Physics**, v. 11, p. 22893–22907, 2011. <https://doi.org/10.5194/acpd-11-22893-2011>
- COELHO, C. A. S.; CARDOSO, D. H. F.; FIRPO, M. A. F. Precipitation diagnostics of an exceptionally dry event in São Paulo, Brazil. **Theoretical and Applied Climatology**, v. 125, n. 3-4, p. 769–784, 2015. <https://doi.org/10.1007/s00704-015-1540-9>
- COLLINS, W.J. et al. Development and evaluation of an Earth-System model – HadGEM. **Geoscientific Model Development**, v. 4, p. 1051–1075, 2011. <https://doi.org/10.5194/gmd-4-1051-2011>
- COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO - CONAB, 2021. **Acompanhamento da Safra Brasileira - Café**. Safra 2021. Segundo Levantamento. Brasília, v. 8, n. 2, p. 1-63, Maio de 2021.
- CUARTAS, L. A. et al. Recent hydrological droughts in Brazil and their impact on hydropower generation. **Water**, v. 14, n. 4, 601-618, 2022. <https://doi.org/10.3390/w14040601>
- DAI, A.; ZHAO, T.; CHEN, J. Climate change and drought: a precipitation and evaporation perspective. **Current Climate Change Reports**, v. 4, p. 301–312, 2018. <https://doi.org/10.1007/s40641-018-0101-6>

DAMATTA, F. M.; RAMALHO, J. D. C. Impacts of drought and temperature stress on coffee physiology and production: a review. **Brazilian Journal of Plant Physiology**, v. 18, p. 55-81, 2006. <https://doi.org/10.1590/S1677-04202006000100006>

FREITAS, A. A. et al. Drought assessment in São Francisco River Basin, Brazil: Characterization through SPI and Associated Anomalous Climate Patterns. **Atmosphere**, v. 13, n. 41, p. 1-20, 2022. <https://doi.org/10.3390/atmos13010041>

GONÇALVES, S. T. N. et al. Avaliação de índices de Seca no Monitoramento Hidrológico de Reservatórios Estratégicos do Ceará, Brasil. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 38, e38230018, 2023. <https://doi.org/10.1590/0102-77863810018>

HAYES, M. et al. The Lincoln declaration on drought indices: universal meteorological drought index recommended. **Bulletin of the American Meteorological Society**, v. 92, n. 4, p. 485–488, 2011. <https://doi.org/10.1175/2010BAMS3103.1>

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA – IBGE. **Cidades do Sul de Minas Gerais**. Governo do Brasil. 2019. Disponível em: <https://cidades.ibge.gov.br/brasil/mg/bandeira-do-em/panorama>. Acesso em: 25 maio 2024.

IPCC - Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas. Summary for policymakers. In: MASSON-DELMOTTE, V. et al. (Eds.) **Climate Change 2021: The Physical Science Basis**. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge, UK: Cambridge University Press, 2021.

JONES, C. D. et al. The HadGEM2-ES implementation of CMIP5 centennial simulations. **Geoscientific Model Development**, v. 4, p. 543–570, 2011. <https://doi.org/10.5194/gmd-4-543-2011>

LENDERINK, G.; BUISHAND, A.; VAN DEURSEN, W. Estimates of future discharges of the river Rhine using two scenario methodologies: Direct versus delta approach. **Hydrology and Earth System Sciences**, v. 11, n. 3, p. 1145–1159, 2007. <https://doi.org/10.5194/hess-11-1145-2007>

LIANG, X. et al. A Simple hydrologically based model of land surface water and energy fluxes for GSMS. **Journal of Geophysical Research**, v. 99, n. 14, p. 415-428, 1994. <https://doi.org/10.1029/94JD00483>

LIANG, X.; WOOD, E. F.; LETTENMAIER, D. P. Surface soil moisture parameterization of the VIC-2L model: evaluation and modification. **Global and Planetary Change**, v. 13, n. 1-4, p. 195-206, 1996. [https://doi.org/10.1016/0921-8181\(95\)00046-1](https://doi.org/10.1016/0921-8181(95)00046-1)

LYRA, A. et al. Projections of climate change impacts on central America tropical rainforest. **Climatic Change**, v. 141, n. 1, p. 93–105, 2017. <https://doi.org/10.1007/s10584-016-1790-2>

MANNING, C. et al. Soil moisture drought in Europe: a compound event of precipitation and potential evapotranspiration on multiple time scales. **Journal of Hydrometeorology**, v. 19, n. 8, p. 1255–1271, 2018. <https://doi.org/10.1175/JHM-D-18-0017.1>

MARENGO, J. A. et al. 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**, v. 38, p. 1829–1848, 2012. <https://doi.org/10.1007/s00382-011-1155-5>

MCKEE, T. B.; DOESKEN, N. J.; LEIST, J. **The relationship of drought frequency and duration to time scales**. Preprints 8th Conference on Applied Climatology. 17-22 de janeiro, Anaheim, California, p. 179–184, 1993.

MCVICAR, T. R. et al. Evaluation of the Standardized Streamflow Index for characterizing streamflow drought: a case study using historical records across Australia. **Advances in Water Resources**, v. 52, p. 240-251, 2012. <https://doi.org/10.1016/j.advwatres.2012.09.001>

MELO, P. A. et al. Analysis of hydrological impacts caused by climatic and anthropogenic changes in Upper Grande River Basin, Brazil. **Environmental Earth Sciences**, v. 81, 504, 2022. <https://doi.org/10.1007/s12665-022-10631-2>

MESINGER, F. et al. An upgraded version of the Eta Model. **Meteorology and Atmospheric Physics**, v. 116, p. 63-79, 2012.

NEITSCH, S. L. et al. **Soil and Water Assessment Tool theoretical documentation**. Washington: USDA-ARS, 2005.

OLIVEIRA, C. M. M. et al. Hydrological Model Performance in the Verde River Basin, Minas Gerais, Brazil. **Resources**, v. 12, n. 87, p. 1-13, 2023. <https://doi.org/10.3390/resources12080087>

OLIVEIRA, V. A. et al. Modeling the effects of climate change on hydrology and sediment load in a headwater basin in the Brazilian Cerrado biome. **Ecological Engineering**, v. 133, p. 20-31, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2019.04.021>

OMS-WHO – ORGANIZAÇÃO MUNDIAL DA SAÚDE. **Consumo vampírico está esgotando a água no mundo, afirma secretário-geral da ONU**. WHO, 2022. <https://news.un.org/pt/story/2023/03/1811747>

PARMESAN, C. et al. Terrestrial and freshwater ecosystems and their services. In: PÖRTNER, H. O. et al. **Climate Change 2022: Impacts, Adaptation and Vulnerability**. New York: Cambridge University Press, 2022. pp. 197–377. <https://doi.org/10.1017/9781009325844.004>

PLANO DIRETOR DE RECURSOS HÍDRICOS DA BACIA DO RIO VERDE – PDRH - RIO VERDE. **Relatório executivo do PDRH Rio Verde**. Belo Horizonte: Consórcio ECOPLAN–LUME, 2010.

PESQUERO, J. F. et al. Climate downscaling over South America for 1961-1970 using the Eta Model. **Theoretical and Applied Climatology**, v. 99, p. 75–93, 2010. <https://doi.org/10.1007/s00704-009-0123-z>

RODRIGUES, J. A. M. et al. Climate change impacts under representative concentration pathway scenarios on streamflow and droughts of basins in the Brazilian Cerrado biome. **International Journal of Climatology**, v. 40, n. 5, p. 2511-2526, 2020. <https://doi.org/10.1002/joc.v40.510.1002/joc.6347>

SANTOS, C. A. S. et al. Using a hydrologic model to assess the performance of regional climate models in a semi-arid watershed in Brazil. **Water**, v. 11, n. 1, p. 1-17, 2019. <https://doi.org/10.3390/w11010170>

SHAMSHIRBAND, S. et al. Predicting Standardized Streamflow index for hydrological drought using machine learning models. **Engineering Applications of Computational Fluid Mechanics**, v. 14, n. 1, p. 339-350, 2020. <https://doi.org/10.1080/19942060.2020.1715844>

SILVA, V.; MELLO, C. R. Meteorological droughts in part of southeastern Brazil: Understanding the last 100 years. **Academia Brasileira de Ciências**, v. 93, e20201130, 2021. <https://doi.org/10.1590/0001-3765202120201130>

SILVA, V. O.; DE MELLO, C. R.; CHOU, S. C. Projections of severe droughts in future climate in Southeast Brazil: A case study in southern Minas Gerais state, Brazil. **Theoretical and Applied Climatology**, v. 1, n. 14, p. 1289–1302, 2022. <https://doi.org/10.1007/s00704-022-03993-x>

SRINIVASAN, R.; ARNOLD, J. G. Integration of a basin-scale water quality model with Gis. **Water Resources Bulletin**, v. 30, n. 3, 1994. <https://doi.org/10.1111/j.1752-1688.1994.tb03304.x>

TAYE, M. T.; WILLEMS, P.; BLOCK, P. Implications of climate change on hydrological extremes in the Blue Nile basin: a review. **Journal of Hydrology: Regional Studies**, v. 4, p. 280-293, 2015. <https://doi.org/10.1016/j.ejrh.2015.07.001>

THORNTHWAITE, C. W. An approach toward a rational classification of climate. **Geographical Review**, v. 38, n. 1, p. 55-94, 1948. <https://doi.org/10.2307/210739>

TODINI, E. The ARNO rainfall-runoff model. **Journal of Hydrology**, v. 175, p. 339–382, 1996. [https://doi.org/10.1016/S0022-1694\(96\)80016-3](https://doi.org/10.1016/S0022-1694(96)80016-3)

VAN HIEU, N. et al. Assessment of hydrological drought using the Standardized Streamflow Index (SSI): A case study of the tien yen River Basin of Quang Ninh Province, Vietnam. **Journal of Geoscience and Environment Protection**, v. 10, p. 309-326, 2022. <https://doi.org/10.4236/gep.2022.108019>

VAN LOON, A. F.; LAAHA, G. Hydrological drought severity explained by climate and catchment characteristics. **Journal of Hydrology**, v. 526, n. 3–14, 2014. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2014.10.059>

VICENTE-SERRANO, S. M. et al. Daily atmospheric circulation events and extreme precipitation risk in northeast Spain: Role of the North Atlantic Oscillation, the Western Mediterranean Oscillation, and the Mediterranean Oscillation. **Journal of Geophysical Research: Atmospheres**, v. 114, n. D8, p. 1-19, 2009. <https://doi.org/10.1029/2008JD011492>

VICENTE-SERRANO, S. M. et al. Accurate computation of a Streamflow Drought Index. **Journal of Hydrologic Engineering**, v. 17, n. 2, p. 318–332, 2012. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)HE.1943-5584.0000433](https://doi.org/10.1061/(ASCE)HE.1943-5584.0000433)

VICENTE-SERRANO, S. M. et al. Global drought trends and future projections. **Philosophical Transactions of the Royal Society A**, v. 380, 20210285, 2022. <https://doi.org/10.1098/rsta.2021.0285>

VICENTE-SERRANO, S. M.; SANTIAGO, B.; JUAN, I. L. M. A multiscalar drought index sensitive to global warming: The Standardized Precipitation Evapotranspiration Index. **Journal of Climate**, v. 23, n. 7, p. 1696–1718, 2010. <https://doi.org/10.1175/2009JCLI2909.1>

VIEIRA, N. P. A. et al. Climate change impacts on water resources of the largest hydropower plant reservoir in southeast Brazil. **Water**, v. 13, 1560, 2021. <https://doi.org/10.3390/w13111560>

VUILLE, M. et al. Impact of the global warminghiatus on Andean temperature. **Journal of Geophysical Research: Atmospheres**, v. 120, p. 3745–3757, 2015. <https://doi.org/10.1002/2015JD023126>

WATANABE, M. et al. Improved climate simulation by MIROC5: mean states, variability, and 618 climate sensitivity. **Journal of Climate**, v. 23, n. 23, p. 6312–6335, 2010. <https://doi.org/10.1175/2010jcli3679.1>

WMO - World Meteorological Organization. **In Standardized precipitation index user guide**. Geneva, Switzerland: World Meteorological Organization, 2012.

ZÁKHIA, E. M. S. et al. Impactos das mudanças climáticas em uma bacia hidrográfica no sul do estado de Minas Gerais. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 36, p. 1-15, 2021. <https://doi.org/10.1590/0102-7786360002>