



CONCEIÇÃO DE MARIA MARQUES DE OLIVEIRA

**SIMULAÇÃO HIDROLÓGICA E AVALIAÇÃO DOS ÍNDICES
DE SECA METEOROLÓGICA E HIDROLÓGICA
UTILIZANDO PROJEÇÕES CLIMÁTICAS NA BACIA
HIDROGRÁFICA DO RIO VERDE**

**LAVRAS – MG
2023**

CONCEIÇÃO DE MARIA MARQUES DE OLIVEIRA

**SIMULAÇÃO HIDROLÓGICA E AVALIAÇÃO DOS ÍNDICES DE SECA
METEOROLÓGICA E HIDROLÓGICA UTILIZANDO PROJEÇÕES CLIMÁTICAS
NA BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO VERDE**

Tese apresentada à Universidade Federal de Lavras, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Recursos Hídricos, área de concentração em Recursos Hídricos e Sistemas Agrícolas, para a obtenção do título de Doutor.

Profa. Dra. Lívia Alves Alvarenga
Orientadora

Dr. Vinicius Oliveira Silva
Coorientador

**LAVRAS – MG
2023**

Ficha catalográfica elaborada pelo Sistema de Geração de Ficha Catalográfica da Biblioteca Universitária da UFLA,
com dados informados pelo(a) próprio(a) autor(a).

Oliveira, Conceição de Maria Marques de.

Simulação hidrológica e avaliação dos índices de seca meteorológica e hidrológica utilizando projeções climáticas na bacia hidrográfica do Rio Verde / Conceição de Maria Marques de Oliveira. – 2023.

84 p. : il.

Orientadora: Lívia Alves Alvarenga.

Coorientador: Vinicius Oliveira Silva

Tese (Doutorado) - Universidade Federal de Lavras, 2023.

Bibliografia.

1. Modelos hidrológicos. 2. Impactos das mudanças climáticas.
3. Segurança hídrica. I. Alvarenga, Lívia Alves. II. Silva, Vinicius Oliveira. III. Título.

CONCEIÇÃO DE MARIA MARQUES DE OLIVEIRA


**SIMULAÇÃO HIDROLÓGICA E AVALIAÇÃO DOS ÍNDICES DE SECA
METEOROLÓGICA E HIDROLÓGICA UTILIZANDO PROJEÇÕES
CLIMÁTICAS NA BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO VERDE**

**HYDROLOGICAL SIMULATION AND EVALUATION OF
METEOROLOGICAL AND HYDROLOGICAL DROUGHT INDEXES USING
CLIMATE PROJECTIONS IN THE VERDE RIVER BASIN**

Tese apresentada à Universidade Federal de Lavras, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Recursos Hídricos, área de concentração em Recursos Hídricos e Sistemas Agrícolas, para a obtenção do título de Doutor.

APROVADA em 03 de outubro de 2023.

Prof. Dr. Carlos Rogério Mello	UFLA
Dr. Vinicius Oliveira Silva	UFLA
Prof. Dr. Samuel Beskow	UFPEL
Prof. Dr. José Alves Junqueira Júnior	IF Sudeste de MG

Documento assinado digitalmente
 LIMA ALVES ALVARENGA
Data: 07/11/2023 08:49:01-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Profa. Dra. Livia Alves Alvarenga
Orientadora

Dr. Vinicius Oliveira Silva
Coorientador

**LAVRAS – MG
2023**

AGRADECIMENTOS

A Deus pela oportunidade de realizar o doutorado, em um período de extrema dificuldade, luta pela vida, mediante uma pandemia. A Deus graças e honra.

Aos meus pais, Maria do Socorro e Boanerges João (*in memoriam*), por terem me ensinado o caminho da educação e valorização do aprendizado.

À professora, Livia Alves Alvarenga, pela orientação, paciência, boa vontade, oportunidades e gratidão que tenho por ter sido sua orientada.

Ao coorientador, Vinicius Oliveira da Silva, por ter sido paciente, nos dias em que precisei dos ensinamentos e construção dos trabalhos de pesquisa, além da amizade construída.

À Universidade Federal de Lavras (UFLA), em especial, ao Departamento de Recursos Hídricos e Saneamento, pela oportunidade que me foi dada.

À minha Universidade Estadual do Maranhão (UEMA), pela minha liberação e apoio nos recursos financeiros à pesquisa.

Parte desta pesquisa foi financiada pela Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (ANA), TED ANA/UFLA nº 011/2020.

Essa pesquisa recebeu apoio financeiro do Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) e da Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais (FAPEMIG) (Processo: 429247/2018-4, 305295/2021-7 e APQ-00709-21).

Aos colegas da pós-graduação, em especial, Alice Caminha, Rubens Junqueira, Marina e Miguel e demais colegas. E também à Pâmela Melo pela ajuda no desenvolvimento inicial e conhecimento do MHD-INPE.

Aos amigos que conquistei, em Lavras-MG, Luciano França, Viviane Felizardo pela ajuda nos trabalhos da tese e pela certeza de amizades verdadeiras.

Às colegas Zandra Cunha, Marcelle Martins e ao professor Samuel Beskow pela ajuda e conhecimento do LASH.

A todos os funcionários e professores do Departamento de Recursos Hídricos e Saneamento o meu carinho e consideração.

Ao meu filho, Anderson Oliveira, que me fez companhia, durante todos esses anos e que agradeço a Deus pela sua existência comigo.

RESUMO

Os impactos causados pelas mudanças climáticas podem afetar o ciclo da água causando danos à economia, sociedade e meio ambiente. Esta proposta de pesquisa tem quatro objetivos centrais: analisar o desempenho dos modelos hidrológicos Lavras *Simulation of Hydrology* (LASH), Modelo Hidrológico Distribuído (MHD-INPE), *Variable Infiltration Capacity* (VIC) na Bacia hidrográfica do Rio Verde-BHRV; analisar o comportamento e a frequência da seca meteorológica e seus impactos, utilizando as projeções climáticas dos cenários RCP4.5 e RCP8.5 e o ensemble dos três modelos globais (HadGEM2-ES, MIROC5 e CanESM2), regionalizados pelo modelo Eta na BHRV; e analisar o comportamento e a frequência da seca hidrológica, a partir das vazões simuladas pelos modelos VIC e SWAT na BHRV, utilizando as projeções climáticas dos RCPs. A BHRV está localizada, no Sul do estado de Minas Gerais, inserida na Serra da Mantiqueira, uma das regiões hidrográficas de cabeceiras mais importantes do Brasil. A análise de desempenho dos três modelos hidrológicos (LASH, MHD e VIC) foram comparadas por meio de índices estatísticos. Foram utilizados os índices SPI e SPEI, para secas meteorológicas e o índice SSFI, para secas hidrológicas, com base em vazões simuladas pelos modelos hidrológicos SWAT e VIC. Os resultados da calibração e validação mostraram uma boa performance dos modelos LASH e MHD-INPE, em simular a vazão da BHRV, no passo de tempo diário. A análise de desempenho dos modelos hidrológicos mostrou que o LASH e o MHD-INPE simularam melhor as vazões médias, do período seco e chuvoso, quando comparados aos resultados da simulação com o VIC. Esses resultados justificam a indicação do uso do LASH e MHD-INPE em estudos relacionados com a previsão de vazão no período seco e chuvoso da região. Nesta pesquisa, foi possível diagnosticar os possíveis impactos da seca na região, utilizando os índices de seca, índice de precipitação padronizado (SPI), índice padronizado de precipitação e evapotranspiração (SPEI) e índice padronizado de vazão (SSFI), a partir de projeções climáticas dos cenários RCP4.5 e RCP8.5. No clima presente, foi encontrada uma forte correlação entre secas meteorológicas (SPI) e hidrológicas (SSFI) o que indica uma rápida resposta da bacia às secas meteorológicas. No clima futuro (2005-2099), o SPI apresentou distribuições de frequência das secas simuladas semelhantes para o RCP4.5 e o RCP8.5. O SPEI forneceu resultados diferentes entre os cenários, especialmente para o RCP8.5, no qual foi evidenciado sério risco no futuro de ocorrência de megasseca pela diminuição da precipitação e aumento da temperatura. No clima futuro, por sua vez, o SSFI simulou secas extremas para o RCP4.5 e, para o RCP8.5, secas moderadas seguidas por secas severas. Esses resultados poderão ser utilizados por gestores, na tomada de decisão, para minimizar os impactos de seca severa, que poderão atingir o meio ambiente, o agronegócio e afetar o nível de reservatórios e a geração de energia hidrelétrica da região.

Palavras-chave: Modelos hidrológicos. Impactos das mudanças climáticas. Segurança hídrica.

ABSTRACT

The impacts caused by climate change can affect the water cycle causing damage to the economy, society and the environment. This research proposal has four main objectives: To analyze the performance of the hydrological models Lavras Simulation of Hydrology (LASH), Distributed Hydrological Model (MHD-INPE), Variable Infiltration Capacity (VIC) in the Rio Verde-BHRV watershed; Analyze the behavior and frequency of meteorological drought and its impacts using the climate projections of the RCP4.5 and RCP8.5 scenarios and the ensemble of the three global models (HadGEM2-ES, MIROC5 and CanESM2) regionalized by the Eta model in the BHRV; and Analyze the behavior and frequency of hydrological drought from the flows simulated by the VIC and SWAT models in the BHRV, using the climate projections of the RCPs. BHRV is located in the south of the state of Minas Gerais, inserted in the Serra da Mantiqueira, one of the most important headwater hydrographic regions in Brazil. The performance analysis of the three hydrological models (LASH, MHD and VIC) were compared using statistical indices. The SPI and SPEI indices were used for meteorological droughts and the SSFI index for hydrological droughts, based on flows simulated by the SWAT and VIC hydrological models. The calibration and validation results showed a good performance of the LASH and MHD-INPE models in simulating the BHRV flow in the daily time step. The performance analysis of the hydrological models showed that LASH and MHD-INPE better simulated the average discharges, in the dry and rainy seasons, when compared to the simulation results with the VIC. These results justify the indication of the use of LASH and MHD-INPE in studies related to the prediction of flow in the dry and rainy season in the region. In this research, it was possible to diagnose the possible impacts of drought in the region using the drought indices standardized precipitation index (SPI), standardized precipitation and evapotranspiration index (SPEI) and standardized flow index (SSFI), based on climate projections of the RCP4.5 and RCP8.5 scenarios. In the present climate, a strong correlation was found between meteorological (SPI) and hydrological (SSFI) droughts, which indicates a rapid response of the basin to meteorological droughts. In the future climate (2005-2099), the SPI presented similar simulated drought frequency distributions for RCP4.5 and RCP8.5. The SPEI provided different results between the scenarios, especially for RCP8.5, in which a serious risk in the future of occurrence of megadrought due to the decrease in precipitation and increase in temperature was evidenced. In the future climate, in turn, SSFI simulated extreme droughts for RCP4.5 and, for RCP8.5, moderate droughts followed by severe droughts. These results can be used by managers in decision-making to minimize the impacts of severe drought that could affect the environment, agribusiness and affect the level of reservoirs and hydroelectric power generation in the region.

Keywords: Analysis of drought rates. SPI. SPEI. SSFI. Impacts of climate change. Hydrological models. Water security.

SUMÁRIO

	PRIMEIRA PARTE	8
1	INTRODUÇÃO	8
2	OBJETIVO	11
2.1	Geral.....	11
2.2	Objetivos específicos	11
3	ORGANIZAÇÃO DO TEXTO.....	12
4	REFERENCIAL TEÓRICO.....	13
4.1	Modelagem hidrológica	13
4.2	Os modelos hidrológicos	14
4.2.1	Lavras Simulation of Hydrology (LASH).....	14
4.2.2	Modelo Hidrológico Distribuído MHD-INPE	15
4.2.3	Variable Infiltration Capacity (VIC).....	17
4.3	Modelos climáticos globais e regionais.....	18
4.4	Impactos das mudanças climáticas sobre os recursos hídricos.....	19
4.5	Índice de seca meteorológica e hidrológica.....	22
	REFERÊNCIAS	25
	SEGUNDA PARTE - ARTIGOS.....	35
	ARTIGO 1 - HYDROLOGICAL MODEL PERFORMANCES IN THE VERDE RIVER BASIN, MINAS GERAIS, BRAZIL.....	35
	ARTIGO 2 - PROJEÇÃO DE EVENTOS DE SECA METEOROLÓGICA E HIDROLÓGICA NA BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO VERDE	52

PRIMEIRA PARTE

1 INTRODUÇÃO

As mudanças climáticas têm sido debatidas no sentido de entender e avaliar seus impactos. Essas mudanças podem ser relacionadas com a variabilidade natural ou ações antrópicas (JIANG *et al.*, 2021) e podem alterar a disponibilidade e distribuição temporal da vazão nos rios (INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE - IPCC, 2013).

As mudanças climáticas são consideradas como as alterações do clima devido à variabilidade natural e/ou resultado das ações antrópicas (MCCARTHY *et al.*, 2001). Os efeitos e os impactos das mudanças climáticas sobre os recursos hídricos são estudados, a partir do Projeto de Intercomparação de Modelos Acoplados, fase 5 (CMIP5), que compreende os modelos climáticos que são empregados, para projetar o clima ou simular as características gerais do clima futuro, para décadas ou séculos, levando em consideração as alterações antropogênicas (KNUTTI; SEDLÁČEK, 2012; TAYLOR; STOUFFER; MEEHL, 2012).

Os efeitos das mudanças climáticas, nos recursos hídricos, em diferentes cenários, podem ser destacados, na região Sul do Estado de Minas Gerais (Representative Concentration Pathways – RCPs) (MOSS *et al.*, 2010), que levam em conta os impactos das emissões (CARVALHO *et al.*, 2021; ZÁKHIA *et al.*, 2021). Estudos nessa região, como o realizado no Alto Rio Grande, evidenciam uma redução na vazão durante todos os períodos simulados com cenários do *Fourth Assessment Report - AR4* (VIOLA *et al.*, 2015). Oliveira *et al.* (2017), utilizando o modelo hidrológico *Soil and Water Assessment Tool* (SWAT) e os dados do clima presente e de projeções futuras dos modelos climáticos ETA-HadGEM2-ES e ETA-MIROC5, quanto aos RCP's 4.5 e 8.5, verificaram, para ambos os modelos climáticos e RCP's, indícios de que haverá uma redução considerável na vazão e, por consequência, diminuição no potencial de geração de energia, ao longo do século XXI.

Vale destacar que os eventos extremos têm ocorrido com maiores frequências, em todo o mundo, ocasionando inundações ou cheias e, em outros casos, secas severas (SWAIN *et al.*, 2020). Nos anos de 2014 e 2015, o estado de São Paulo enfrentou uma intensa seca, afetando a disponibilidade de água, produção de alimentos e energia (CAVALCANTI *et al.*, 2017). Já no verão 2019/2020, a região Sul do Brasil apresentou uma das maiores secas dos últimos anos (FERNANDES *et al.*, 2021). Esses eventos de secas podem alterar as vazões dos rios, as taxas de evaporação e influenciar na capacidade dos reservatórios (FERNANDES *et al.*, 2017).

Para melhor compreensão dos impactos produzidos pelas mudanças climáticas, em nível da bacia hidrográfica, os modelos hidrológicos são importantes instrumentos para projeções e têm sido utilizados, para melhor compreender os impactos das alterações futuras, no balanço hídrico associado às mudanças climáticas e de uso do solo (ALVARENGA *et al.*, 2018). Todavia vale ressaltar a dificuldade de empregar esses modelos hidrológicos, em regiões com baixa qualidade dos dados, assim, alguns estudos utilizam a validação dos modelos hidrológicos, fazendo uso de dados de outras áreas (BRESSIANI *et al.*, 2015; FERREIRA, 2017).

Modelos hidrológicos, com distintas fundamentações matemáticas, têm sido utilizados, em bacias hidrográficas brasileiras, tais como o SWAT, considerado um modelo semidistribuído, desenvolvido, para simular o impacto da mudança do uso do solo, em bacias hidrográficas de diferentes escalas e o *Variable Infiltration Capacity* (VIC) que é um modelo semidistribuído que permite simular o balanço de água e o balanço energético na macroescala. Esses modelos já foram utilizados na simulação hidrológica na Bacia Hidrográfica do Rio Verde-MG, apresentando resultados satisfatórios na avaliação de desempenho. Os resultados também sugerem que os modelos hidrológicos podem ser uma boa opção para avaliar os impactos de diferentes cenários sobre os componentes do ciclo hidrológico dessa Bacia (ALVARENGA *et al.*, 2020).

O Modelo Hidrológico Distribuído (MHD-INPE) (RODRIGUEZ; TOMASELLA, 2016) é um modelo distribuído, desenvolvido no Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), que consiste numa adaptação do Modelo de Grandes Bacias (MGB-IPH) do Instituto de Pesquisas Hidráulicas (IPH). O MHD-INPE tem sido aplicado, em bacias de diferentes escalas de 5 km² a 1,4 milhões de km² (FALCK *et al.*, 2015; MELO *et al.*, 2022; MOHOR *et al.*, 2015; ZÁKHIA *et al.*, 2021), em estudos de mudança de uso e de cobertura do solo (OLIVEIRA *et al.*, 2022), mudanças climáticas e hidroenergia (MICHELS-BRITO *et al.*, 2021), prognóstico de vazões (FALCK *et al.*, 2021), sustentabilidade hídrica (CARNEIRO *et al.*, 2022) e com resultados satisfatórios quanto ao seu desempenho em bacias hidrográficas.

O LASH é um modelo semidistribuído e pode ser utilizado em diferentes aplicações, já foi testado para bacias hidrográficas, nos estados de Minas Gerais, Rio Grande do Sul, Amazonas e Tocantins, representando diferentes biomas, escalas e condições edafoclimáticas (BESKOW, 2009; CALDEIRA, 2016; CUNHA, 2021).

Os modelos hidrológicos podem apresentar desempenho semelhante, no entanto a resposta da vazão média pode variar por diferenças na estrutura do modelo hidrológico e nas equações dos processos. Nesse contexto, esta pesquisa propõe-se a trabalhar na Bacia

Hidrográfica do Rio Verde (4100 km²), localizada geograficamente no Sul de Minas Gerais, inserida no bioma Mata Atlântica, na Serra da Mantiqueira. Essa é uma importante região para conservação da biodiversidade. A Serra da Mantiqueira detém várias regiões de cabeceiras que formam rios importantes, para o abastecimento de água, irrigação e geração de energia elétrica, a partir de fontes hidráulicas.

Este estudo faz parte do projeto de pesquisa intitulado “Simulação hidrológica e avaliação dos impactos das mudanças climáticas e do uso do solo na bacia hidrográfica do rio Verde-MG”, financiado pelo Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico. Os dados obtidos neste estudo poderão auxiliar na formulação de política apropriada e tomadas de decisão futuras com relação à hidrologia da bacia e projeções de disponibilidade hídrica.

2 OBJETIVO

2.1 Geral

Avaliar o desempenho de três modelos hidrológicos, o Lavras *Simulation of Hydrology* (LASH), o *Variable Infiltration Capacity* (VIC) e o Modelo Hidrológico Distribuído (MHD-INPE) na bacia hidrográfica do Rio Verde. Posteriormente, avaliar as projeções do clima na hidrologia da bacia hidrográfica do Rio Verde, a partir de índices de seca hidrológica e meteorológica, utilizando os modelos hidrológicos SWAT e o VIC.

2.2 Objetivos específicos

- a) Avaliar o desempenho dos três modelos hidrológicos (LASH, MHD, VIC), em passo de tempo diário, na Bacia Hidrográfica do Rio Verde;
- b) Analisar o comportamento e a frequência dos índices de seca meteorológica (SPI e SPEI) e seus impactos, considerando as projeções climáticas dos cenários RCP4.5 e RCP8.5, utilizando o ensemble dos modelos Eta-HadGEM2-ES, Eta-MIROC5-ES e Eta-CanESM2-ES na Bacia Hidrográfica do Rio Verde;
- c) Avaliar o comportamento e a frequência do índice de seca hidrológica (SSFI), a partir do ano hidrológico das vazões simuladas pelos modelos hidrológicos VIC e SWAT e verificar a interação com a seca meteorológica e hidrológica, utilizando as projeções climáticas dos RCP 4.5 e RCP 8.5.

3 ORGANIZAÇÃO DO TEXTO

Na primeira parte, está apresentada a revisão da literatura acerca da modelagem hidrológica com a descrição de cada modelo hidrológico que foi utilizado na pesquisa: LASH, MHD-INPE e VIC. Também estão relacionados, nesse mesmo item, uma abordagem sobre os modelos globais e regionais e os impactos das mudanças climáticas sobre os recursos hídricos na bacia hidrográfica do Rio Verde e os aspectos dos índice de seca meteorológica (SPI e SPEI) e hidrológica (SSFI), utilizando as projeções climáticas RCP 4.5 e RCP 8.5 e seus impactos futuros na bacia.

Na segunda parte, está o primeiro artigo com resultados da pesquisa intitulada: SEMI-DISTRIBUTED HYDROLOGICAL MODEL PERFORMANCE ON THE RIO VERDE BASIN, MINAS GERAIS STATE e também encontra-se o artigo 2 intitulado: PROJEÇÃO DE EVENTOS DE SECA METEOROLÓGICA E HIDROLÓGICA EM UMA BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO VERDE.

4 REFERENCIAL TEÓRICO

4.1 Modelagem hidrológica

A bacia hidrográfica pode ser subdividida em unidades de resposta hidrológica. A gestão de bacias hidrográficas e o uso equilibrado de seus recursos devem ser priorizados (SADEGHI *et al.*, 2023). Para tanto, os modelos hidrológicos têm sido muito utilizados, como ferramentas importantes, para entender melhor os processos hidrológicos e auxiliar nas tomadas de decisões referentes à gestão das bacias hidrográficas (BESKOW *et al.*, 2016; MORAES, 2003).

Os modelos hidrológicos são classificados, em diferentes tipos, que podem ser, de acordo com as variáveis utilizadas na modelagem (estocásticos ou determinísticos), quanto à sua formulação (empíricos ou conceituais); de acordo com a forma de representação dos dados (discretos ou contínuos); em relação à variabilidade espacial dos parâmetros na bacia hidrográfica (concentrados ou distribuídos); e considerando a dependência temporal (estacionários ou dinâmicos) (BRIGHENTI, 2015; LUCAS *et al.*, 2009; MARINHO FILHO *et al.*, 2012; MOREIRA, 2005; TUCCI, 2005).

Os modelos hidrológicos distribuídos podem ser utilizados, a fim de prever a vazão em cenários de mudanças climáticas e de cobertura da terra na resposta da bacia. Esses modelos utilizam, como dados de entrada, uma grande quantidade de informações. São necessárias informações quanto à variabilidade espacial e temporal dos parâmetros e variáveis que descrevam a heterogeneidade do comportamento hidrológico (CALDEIRA *et al.*, 2019; PAIVA, 2009; TUCCI, 1998). Assim, quanto maior a complexidade do modelo, maior o número de parâmetros de calibração, sendo necessárias maiores informações de entrada (BEVEN, 2004).

A escolha do modelo hidrológico é um passo importante, conforme a objetividade do estudo e, dessa forma, deverá passar por etapas, como análise de sensibilidade, calibração, validação e predição. A análise de sensibilidade é um processo necessário, para identificar os parâmetros-chave, sendo os mais sensíveis os que propiciam as maiores mudanças, quando tem seus valores alterados (LELIS *et al.*, 2012).

No processo de calibração, os valores dos parâmetros são definidos. Dessa forma, a calibração consiste em ajustar os parâmetros do modelo, para que os dados simulados possam se aproximar dos dados observados. Alguns autores ressaltam que o modelo hidrológico desconhece as condições iniciais de simulação, portanto é necessário um período de aquecimento (AJAMI *et al.*, 2004; ERCAN *et al.*, 2014; LI *et al.*, 2015).

Após a etapa da calibração, segue a validação dos processos hidrológicos que devem estar fundamentados a partir de testes avaliados por coeficientes estatísticos. A validação é realizada com os parâmetros finais da calibração do modelo (ARNOLD *et al.*, 2012; PEREIRA *et al.*, 2014). Após a fase de validação, se o modelo atingir um desempenho satisfatório, torna-se possível realizar as simulações, de acordo com as diferentes aplicações que se pretende avaliar (MAREK *et al.*, 2016).

4.2 Os modelos hidrológicos

4.2.1 Lavras Simulation of Hydrology (LASH)

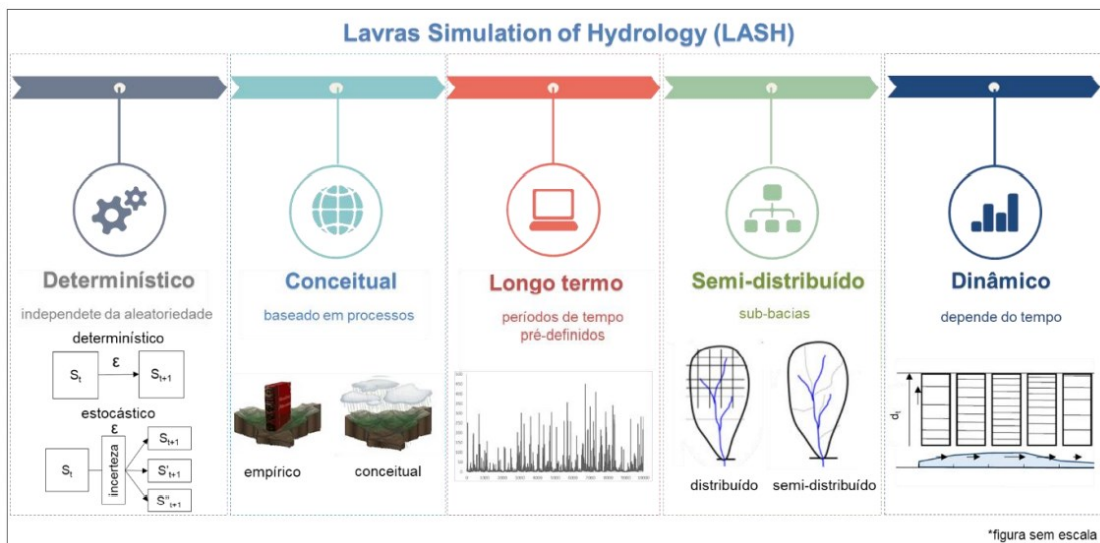
O modelo hidrológico *Lavras Simulation of Hydrology* (LASH) teve seu desenvolvimento iniciado, em 2008, por meio de uma parceria entre pesquisadores da Universidade Federal de Lavras, em Minas Gerais e a Universidade de Purdue, nos Estados Unidos (CALDEIRA, 2016). A primeira versão do LASH foi desenvolvida por Mello *et al.* (2008), considerado um modelo hidrológico chuva-vazão semiconceitual, determinístico, de longo termo e semidistribuído por sub-bacias hidrográficas. Nessa versão, sua abordagem de discretização espacial concentrada foi avaliada pelo autor, ao passo de simulação diária, em duas bacias hidrográficas da região do Alto Rio Grande, em Minas Gerais e apresentou resultados satisfatórios.

O modelo LASH, com o passar dos anos, ganhou a forma de um programa de computador, quando Beskow (2009) apresentou uma versão com várias adaptações e aprimoramentos. Nessa versão, a principal diferença é atribuída à distribuição espacial que pode ser distribuída por células. Além disso, foi introduzido um algoritmo, para a calibração automática dos parâmetros do modelo. Foi nessa segunda versão que o modelo passou, oficialmente, a ser denominado “*Lavras Simulation of Hydrology*”.

Caldeira *et al.* (2019) relatam que foi implementado ao modelo um módulo de calibração automática, empregando o algoritmo genético *Shuffled Complex Evolution* (SCE-UA) (DUAN; SOROOSHIAN; GUPTA, 1992); a versão anterior contava com calibração manual ou por intermédio de um algoritmo de propósito geral (LASDON *et al.*, 1978). O modelo apresenta resultados promissores, no tocante à sua acurácia e, com pequeno número de parâmetros a serem calibrados, o que se considera o princípio da parcimônia, que é a representação adequada do comportamento de um processo ou de um sistema por um modelo com o menor número possível de parâmetros (TUCCI, 2005).

Na terceira versão do LASH, em Delphi, foi possível acoplar ao modelo os módulos de banco de dados temporal e espacial, sendo eles, respectivamente, o *System of Hydrological Data Acquisition and Analysis* (SYHDA) (VARGAS *et al.*, 2019) e o ArcLASH (SANTOS *et al.*, 2019). A Figura 1 representa a nova estrutura do LASH, em sua versão atual, de acordo com Vargas (2021).

Figura 1 - Esquematisação dos conceitos hidrológicos da atual versão do modelo LASH



Fonte: Vargas (2021).

Várias pesquisas já foram realizadas, utilizando o Modelo hidrológico LASH, em estudos com mudanças de uso e ocupação do solo (CUNHA, 2021; MELLO *et al.*, 2008), com projeções de mudanças climáticas (CALDEIRA *et al.*, 2019), concepção do modelo hidrológico LASH, na implantação do MATLAB, aprimoramento da propagação em rios e da calibração (VARGAS *et al.*, 2023). Assim, o modelo LASH vem sendo aplicado com sucesso em bacias hidrográficas brasileiras de diferentes escalas.

4.2.2 Modelo Hidrológico Distribuído MHD-INPE

O MHD-INPE foi desenvolvido pelo Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), a partir do Modelo de Grandes Bacias do Instituto de Pesquisas Hidráulicas (MGB-IPH), o qual recebeu modificações nas rotinas para a estimativa da evaporação e da separação de fluxos (FALCK *et al.*, 2015). É um modelo determinístico e distribuído, originalmente foi desenvolvido para aplicação de estudos das mudanças do uso do solo e cobertura da terra na resposta hidrológica na Amazônia (RODRIGUEZ; TOMASELLA, 2016). O modelo tem sido

usado em estudos como prognóstico de vazões (FALCK *et al.*, 2015). O modelo também apresenta resultados satisfatórios ao simular condições históricas de previsão de vazão em bacias de grande escala (MOHOR *et al.*, 2015).

No MHD-INPE, os processos de geração de escoamento e a separação de fluxos são simulados pela combinação de conceitos de distribuição probabilística da capacidade de armazenamento, utilizada no modelo Xinanjiang (ZHAO, 1992; ZHAO; LIU, 1995), com os princípios utilizados no TopModel (BEVEN; KIRKBY, 1979). Ambas as metodologias correlacionam a resposta hidrológica da bacia com padrões de auto-organização observados na grande escala (SIVAPALAN, 2006).

O MHD-INPE tem sido aplicado com sucesso, em estudos de mudanças climáticas e consegue interagir com modelos atmosféricos, em estudos de mudanças ambientais globais. A bacia é subdividida, em uma grade de células regulares, o que facilita o intercâmbio de informações entre modelos. O tamanho da célula pode variar, de acordo com a região onde está sendo aplicado (MOHOR *et al.*, 2015; SIQUEIRA JÚNIOR; TOMASELLA; RODRIGUEZ, 2015). Em cada célula podem ser considerados diversos tipos de Unidades de Resposta Hidrológica (URHs), resultantes da combinação de características locais da paisagem, como, por exemplo, o uso e cobertura do solo e os tipos de solo. Cada URH possui parâmetros associados que determinam os processos de geração de escoamento.

A estimativa da evapotranspiração na bacia é obtida pelo método proposto por Penman-Monteith (ALLEN *et al.*, 1998), utilizando, como dados de entrada, as variáveis meteorológicas: temperatura do ar, velocidade do vento, pressão atmosférica, radiação solar e umidade relativa do ar.

A parametrização da geração de escoamento, utilizando conceitos topográficos, foi concebida para bacias em que os principais mecanismos de geração de escoamento correspondem a excesso de saturação e escoamento subsuperficial. Na parametrização proposta, o fluxo de base é obtido, considerando a existência de uma relação entre a profundidade do lençol freático e o índice topográfico.

A perda d'água por interceptação é simulada no modelo, por meio da metodologia proposta por Gash, Lloyd e Lachaud (1995). A captura d'água da vegetação desde o solo é resolvida considerando o modelo de distribuição de raízes de Jarvis (1989). Cada célula do modelo possui um canal, ao qual são entregues excedentes do balanço d'água, por reservatórios lineares simples. O transporte d'água entre células é realizado exclusivamente pela rede de canais, considerando a metodologia de Muskingum-Cunge para o traslado da onda (TUCCI, 1998).

O modelo MHD-INPE também conta com duas rotinas de calibração automática, uma baseada no método de otimização SCE-UA (*Shuffled Complex Evolution Method*), proposto por Duan *et al.* (1992); e uma segunda que usa o algoritmo SPEA2 (*Strength Pareto Evolutionary Algorithm 2*), para problemas de otimização multiobjetivo (ZITZLER *et al.*, 2002, 2004). É importante salientar que a calibração automática não é obrigatória, na implementação do modelo, mas é desejável, tendo em vista as características singulares das bacias hidrográficas.

4.2.3 Variable Infiltration Capacity (VIC)

O VIC é um modelo hidrológico de superfície terrestre distribuído, baseado em grade regular, que consiste em dois modelos: transformação chuva-vazão (LIANG *et al.*, 1994; LIANG; WOOD; LETTENMAIER, 1996; LIANG; XIE, 2001); e propagação de vazão (LOHMANN *et al.*, 1998; LOHMANN; NOLTE-HOLUBE; RASCHKE, 1996) que propaga a vazão usando as equações linearizadas de Saint-Venant. O VIC é baseado na curva de capacidade de infiltração.

O modelo hidrológico VIC representa os processos hidrológicos, na superfície e na subsuperfície, em uma base espacialmente distribuída (por célula). Em aplicações típicas, o tamanho de cada célula varia de 7,5' a 2,0° de resolução, porém alguns autores trabalharam com resolução igual a 3,75', podendo ser utilizadas variações de escalas de cada célula, para as características do solo e vegetação (BECKERS; SMERDON; WILSON, 2009).

O modelo inclui três camadas de solo e uma camada única de vegetação, podendo simular processos em uma etapa de tempo subdiária (BECKERS; SMERDON; WILSON, 2009). Os processos de infiltração e de escoamento superficiais são empíricos em razão de sua natureza macro. A infiltração é simulada pela curva de capacidade variável de infiltração, enquanto os escoamentos superficiais, sub-superficiais e o de base são incorporados para simular o total de cada célula (LIANG *et al.*, 1994).

O autor Gao (2010) informa que, usualmente, o processo de calibração envolve a modificação de seis parâmetros, a saber.

Parâmetro de infiltração ($b_{infiltr}$): controla o particionamento da precipitação entre infiltração e escoamento superficial, em que altos valores irão fornecer baixa infiltração, proporcionando maior escoamento superficial.

$Depth2$ e $depth3$: são as profundidades da segunda e da terceira camada do solo, que afetam a transpiração e o escoamento subterrâneo, respectivamente. Camadas espessas de solo

têm respostas mais lentas ao escoamento superficial (predominância de escoamento subterrâneo) com alta evapotranspiração, porém resultam em grande retenção de umidade e altos fluxos de base em períodos secos.

D_s , D_{smax} e W_s : são parâmetros de controle do escoamento subterrâneo e são estimados via calibração. Esses três parâmetros determinam quão rápido a água armazenada, na terceira camada do solo, será percolada como escoamento subterrâneo.

No que se refere à entrada dos dados meteorológicos, o VIC requer, no mínimo, dados de precipitação, temperatura máxima e mínima e velocidade do vento. As demais variáveis climáticas necessárias são estimadas por meio do algoritmo MTCLIM (KIMBALL; RUNNING; NEMANI, 1997). O modelo também pode considerar a heterogeneidade espacial da precipitação, decorrente de tempestades convectivas frontais/locais ou heterogeneidade topográfica.

O processamento dos dados é realizado célula por célula, em que se calcula uma de cada vez, durante um período desejado, para a produção de séries temporais de escoamento superficial, escoamento subterrâneo e evapotranspiração. O escoamento superficial e subterrâneo de cada célula é modelado de forma a serem transferidos para as células a jusante. Não há transferência horizontal de água de célula para célula, portanto um modelo de roteamento (transporte lateral) deve ser usado como uma ferramenta de pós-processamento, para calcular as vazões, como uma composição de ambos os escoamentos, o superficial e o de base (BECKERS; SMERDON; WILSON, 2009).

4.3 Modelos climáticos globais e regionais

Os Modelos de Circulação Global (GCMs) são baseados em modelos matemáticos hidrodinâmicos, que têm o intuito de recriar os processos químicos e físicos que impulsionam o clima da Terra (UNITED STATES DEPARTMENT OF COMMERCE - U.S. DEPARTMENT OF COMMERCE, 2021). Esses modelos fazem simulações do clima, em diferentes escalas de tempo e, por conseguinte, projeções de futuras alterações climáticas (IPCC, 2013). Os Modelos de Circulação Geral (MCGs) usam de complexas relações matemáticas para descrever os processos físicos que ocorrem no sistema. Para tanto, são empregados métodos matemáticos com o intuito de gerar dados de projeções futuras dos elementos meteorológicos que compõem o clima (BETTS *et al.*, 2011).

Há um grande número de MCGs advindos de diversos centros de pesquisa, ao redor do mundo, que podem apresentar os mais variados níveis de precisão (SRIVASTAV;

SCHARDONG; SIMONOVIC, 2014). Os modelos climáticos globais possuem resolução espacial horizontal de centenas de quilômetros, não sendo capazes de resolver fenômenos atmosféricos, em escalas menores, como fenômenos de mesoescala e locais.

Assim, a técnica do *downscaling* permite a pesquisa com os modelos climáticos regionais (MCRs), com resolução espacial, na ordem de dezenas de quilômetros, permitindo enxergar e resolver características do sistema terrestre não elencadas nos MCGs, tais como: topografia, vegetação heterogênea, entre outros (SALES *et al.*, 2015).

4.4 Impactos das mudanças climáticas sobre os recursos hídricos

As mudanças climáticas são também evidenciadas pela variação da distribuição espacial e temporal da precipitação e aumento das temperaturas, o que pode causar grande alteração na disponibilidade dos recursos hídricos. Alguns efeitos dessas mudanças são as alterações na variabilidade da precipitação, maior ocorrência e magnitude de eventos extremos, como secas prolongadas, cheias e mudança na frequência das vazões (BELL *et al.*, 2007; HAGUMA *et al.*, 2014). Os impactos nos recursos hídricos podem afetar a produção de alimentos, geração de energia, abastecimento público, lazer e outros.

O sexto relatório do Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (IPCC) destaca que as mudanças climáticas estão se intensificando rapidamente como resultado da ação humana. Os modelos climáticos globais que participaram da fase 6 do Projeto *Coupled Model Intercomparison* (CMIP6) buscam trabalhar com melhorias, na eficiência computacional, nos processos físicos e na maior resolução espacial.

Na pesquisa de Kim *et al.* (2019), os modelos climáticos do CMIP6 foram avaliados quanto ao seu desempenho na simulação de índices climáticos extremos. Os padrões globais de climatologia dos índices simulados pelos modelos CMIP6 (32 modelos) foram comparados com observações do HadEX3 (dados interpolados), quatro conjuntos de dados de reanálise e dados do conjunto de modelos do CMIP5 (35 modelos). Aplicou-se o erro quadrado médio para o período 1981-2000.

Os resultados mostram que os modelos CMIP6, em geral, capturam os padrões globais e regionais observados de extremos de temperatura com melhorias limitadas em comparação aos modelos do CMIP5. No caso da precipitação, as habilidades dos modelos do CMIP6, para os índices de frequência e intensidade, também, são amplamente comparáveis aos dos modelos do CMIP5, mas as simulações da intensidade da precipitação foram melhoradas com a redução do viés de seca.

Almazroui *et al.* (2021) avaliaram um conjunto de modelos climáticos globais do CMIP6, na América do Sul, para um período de referência, sendo um passado recente (1995-2014), além de examinar as mudanças nas projeções de precipitação e temperatura, ao longo do século XXI. As projeções futuras foram obtidas dos quatro cenários-*Shared Socioeconomic Pathways* (SSPs, SSP1–2.6, SSP2–4.5, SSP3–7.0 e SSP5–8.5).

Verificou-se que os MCGs do CMIP6 capturaram com sucesso as principais características do clima para a América do Sul. No entanto esses modelos exibem habilidades variadas, na distribuição espaço-temporal da precipitação e temperatura, na escala sub-regional, principalmente em latitudes e altitudes altas.

Como os modelos climáticos globais são capazes de simular realisticamente as características em uma escala maior de circulação atmosférica, existem muitas limitações, no uso desses modelos na escala da bacia hidrográfica, para estudos regionais. Nesse sentido, a técnica de *downscaling* dinâmico, utilizando modelos climáticos regionais, tem grande importância nos estudos dos impactos das mudanças climáticas na hidrologia de uma região.

Portanto o acoplamento de um modelo hidrológico a um modelo de clima regional de alta resolução é apropriado para pesquisas com foco na hidrologia. Assim, esta investigação ressalta os trabalhos regionais com o quinto relatório do IPCC e os RCPs (*Representative Concentration Pathway*). Em se tratando do impacto das mudanças climáticas sobre os recursos hídricos, em escala de bacia hidrográfica, simulações por *downscaling*, acoplando um MCR a um MCG, são amplamente empregadas (HASSON *et al.*, 2014; HIRPA *et al.*, 2018; KUMAR *et al.*, 2017; MARHAENTO; BOOIJ; HOEKSTRA, 2018; VIOLA *et al.*, 2015).

Alvarenga *et al.* (2018) avaliaram os impactos das mudanças climáticas, no regime hidrológico de uma pequena bacia, na região de cabeceira do Rio Grande, localizada na Serra da Mantiqueira, região Sudeste do Brasil. A análise das possíveis mudanças, na vazão média sazonal e do balanço de água mensal, foi realizada, partindo-se do modelo hidrológico *Distributed Hydrology Soil Vegetation Model* (DHSVM). Os resultados obtidos neste estudo foram redução da vazão sazonal, durante todos os períodos simulados, sob as condições dos RCPs, quando comparados ao clima presente (1961-1990). Houve, ainda, uma redução da vazão, no verão de 80,35%, no período de 2011-2040 e 74,24%, no período de 2071-2099, sob o RCP4.5 e o RCP8.5, respectivamente.

Oliveira *et al.* (2017) utilizaram as projeções dos modelos climáticos ETA-HadGEM2-ES e ETA-MIROC5 sob os cenários RCP4.5 e RCP8.5 (CHOU *et al.*, 2014), como entrada no modelo hidrológico *Soil and Water Assessment Tool* (SWAT), para avaliar os impactos das mudanças climáticas, na vazão dos rios e potencial hidrelétrico da bacia do Alto Rio Grande,

Sudeste do Brasil. Os resultados encontrados por Oliveira *et al.* (2017) sugerem que haverá uma redução considerável na vazão e, por consequência, no potencial de geração de energia, ao longo do século XXI.

Mello *et al.* (2021) avaliaram os impactos das mudanças climáticas, no potencial de geração de energia elétrica, na Usina Hidrelétrica de Furnas (UHE-Furnas) na Bacia Hidrográfica Rio Grande, utilizando os modelos climáticos regionais RCMs (Eta-HadGEM-ES, Eta-MIROC5 e Eta-CanESM2) e consideraram adequado o desempenho do modelo LASH para realizar as simulações hidrológicas. Os resultados mostraram que os RCMs projetaram uma redução das precipitações e redução da vazão média mensal ao longo do século XXI. As projeções, usando Eta-HadGEM2-ES, causaram as reduções mais significativas. No primeiro período (2007–2040), utilizando o RCP4.5, a redução no escoamento foi de até 63% (janeiro); no segundo período (2041–2070) e terceiro período (2071–2099), as reduções foram de –56% e –50%, respectivamente. Somado a isso, os autores verificaram que o Eta-MIROC5 apresentou desempenho superior em estudos de seca. Em geral, as projeções dos RCMs indicam um provável aumento na ocorrência de frequência de graves secas hidrológicas com uma provável redução na ocorrência de anos hidrológicos úmidos.

Carvalho *et al.* (2021) utilizaram os modelos hidrológicos SWAT e VIC com entradas dos RCMs (Eta-CanESM2, Eta-HadGEM2-ES e Eta-MIROC5), assim, simularam a vazão mensal na Bacia hidrográfica do Rio Verde, utilizando os cenários RCP4.5 e RCP8.5. Os resultados mostraram que, na vazão mensal, as entradas do Eta-HadGEM2-ES e o Eta-CanESM2 indicaram redução, no cenário RCP8.5, variando de 7,2 a 66,3% (modelo VIC) e 37,0 a 64,7% (modelo SWAT). Em geral, o Eta-MIROC5 apresentou mais divergências quanto às direções das simulações. Assim, os efeitos combinados de modelos climáticos, estruturas de modelos hidrológicos e cenários de mudanças climáticas devem ser considerados nas avaliações de incertezas dos impactos das mudanças climáticas.

Karlsson *et al.* (2016) realizaram um estudo, em uma bacia hidrográfica do Rio Odense, localizado na região central da Dinamarca. O estudo teve a finalidade de avaliar os efeitos combinados na hidrologia, utilizando quatro modelos climáticos regionais (ARPEGE–RM5.1, ECHAM5–HIRHAM5, ECHAM5–RCA3 e HadCM3–HadRM3), três modelos hidrológicos (NAM, SWAT e MIKE SHE) e cenários de uso e ocupação do solo. Os autores obtiveram os seguintes resultados: a escolha do modelo climático domina as incertezas em um cenário futuro. Também foi enfatizado que, para as simulações das vazões extremas, a escolha do modelo hidrológico é ainda mais importante. Provavelmente, isso está relacionado ao fato de que a distribuição da vazão, nas três componentes do escoamento (escoamento superficial

direto, escoamento subsuperficial e escoamento base), foram diferentes para os três modelos hidrológicos.

4.5 Índice de seca meteorológica e hidrológica

Ondas de calor, enchentes, chuvas intensas, desmoronamento de taludes, secas e incêndios florestais são exemplos de eventos extremos que representam riscos à saúde humana, ao meio ambiente. Nas últimas décadas, os desastres naturais associados a eventos climáticos vêm se tornando cada vez mais frequentes. De 1998 a 2017, mais de 4,4 bilhões de pessoas foram feridas, tiveram suas casas destruídas, perderam suas vidas ou precisaram de assistência em razão de eventos extremos (CUARTAS *et al.*, 2022).

Entre os eventos extremos, que causam mais perdas, as secas ganham papel de destaque. Segundo dados da Organização Mundial da Saúde (WORLD HEALTH ORGANIZATION - WHO, 2022), a escassez de água impacta diretamente 40% da população mundial, com a possibilidade de que 700 milhões de pessoas em risco sejam removidas de suas casas até 2030.

A seca é um fenômeno em cuja definição não há consenso. De acordo com Vicente-Serrano *et al.* (2022), secas ocorrem, quando os recursos hídricos são insuficientes para atender as necessidades das pessoas ou do meio-ambiente e, como resultado, tem impacto negativo em ambos. Segundo Dai *et al.* (2020), secas podem ser compreendidas como o déficit prolongado de precipitação sobre uma região. Secas podem ser tipicamente divididas em: i) meteorológica: refere-se à falta prolongada de precipitação sobre uma grande área; ii) hidrológica: refere-se à redução dos níveis de água dos recursos hídricos superficiais e subterrâneos; iii) agrária: refere-se ao déficit da umidade do solo que limita o crescimento vegetal; iv) socioeconômica: refere-se ao déficit dos recursos hídricos ligados à qualidade de vida da população; e v) ecológica: refere-se a um episódio de seca que força os ambientes aos seus limiares de vulnerabilidade e que impacta diretamente os serviços ecológicos (AGHAKOUCHAK *et al.*, 2015; CUARTAS *et al.*, 2022; MISHRA; SINGH, 2010; VICENTE-SERRANO; BEGUERÍA; LÓPEZ-MORENO, 2010).

A avaliação da severidade das secas, bem como sua variabilidade espacial e suas tendências, vem sendo estudada por meio de diversos índices (BRITO *et al.*, 2018). Índices de seca são representações numéricas da severidade da seca, usando variáveis ou parâmetros, que são usados para descrever as condições de seca (VAN HIEU *et al.*, 2022). A complexidade dos índices é definida, por meio da quantidade de variáveis de entrada, que podem ser a precipitação, a evapotranspiração, a umidade do solo, a vazão e/ou a vegetação (DAI; ZHAO;

CHEN, 2018; MANNING *et al.*, 2018; VAN LOON, 2015; VICENTE-SERRANO *et al.*, 2022).

Vicente-Serrano *et al.* (2012) pontuam que os índices possibilitam a comparação das secas entre diferentes regiões, independentemente das características climáticas locais. Diversos índices foram construídos, utilizando-se métodos de padronização, como o Índice de Seca Padronizada (*Standardized Precipitation Index – SPI*) (MCKEE; DOESKEN; KLIEST, 1993), o Índice Padronizado de Precipitação-Evapotranspiração (SPEI, *Standardized Precipitation Evapotranspiration Index*) (VICENTE-SERRANO; BEGUERÍA; LÓPEZ-MORENO, 2010) e o Índice Padronizado de Vazão (SSFI, *Standardized Streamflow Index*) (MODARRES, 2007; VICENTE-SERRANO *et al.*, 2011).

A Organização Meteorológica Mundial (WMO) considera o SPI, entre todos os índices, como o índice-padrão para a determinação de secas (HAYES *et al.*, 2011). O SPI é um índice desenvolvido por McKee, Doesken e Kleist (1993) que se baseia no déficit de precipitação acumulado em um determinado período. No Brasil, muitos estudos têm utilizado o SPI, o qual vem sendo concentrado na região Sudeste (COELHO; CARDOSO; FIRPO, 2015; MARENGO *et al.*, 2015; SILVA; MELLO, 2021; SOBRAL *et al.*, 2018) e no Nordeste (BRITO *et al.*, 2018; COSTA *et al.*, 2020; FREITAS *et al.*, 2022). Adicionalmente, por acrescentar a demanda atmosférica de água pelo acréscimo da evapotranspiração, o SPEI vem se mostrando um índice mais complexo e eficaz no diagnóstico de tendências de secas (VICENTE-SERRANO *et al.*, 2022). No Brasil, o SPEI vem sendo aplicado, para estudos no semiárido do Nordeste (MEDEIROS *et al.*, 2022), em Minas Gerais (SILVA; MELLO; CHOU, 2022) e na região Amazônica (MILLÁN; MACÍAS; RABELO-LIMA, 2022; VEGA; LIMA; CERNAK, 2019).

Para avaliar a transição das secas meteorológicas, para as secas hidrológicas, o SSFI vem se mostrando uma importante ferramenta, uma vez que permite comparações das condições hidrológicas de um curso d'água (SHAMSHIRBAND *et al.*, 2020). No Brasil, diversos estudos vêm sendo conduzidos, utilizando-se o SSFI. Cuartas *et al.* (2022) aplicaram o SSFI, para diversas bacias da região Sudeste, a fim de verificar os impactos da seca de 2014/2015 e verificaram que seus efeitos são sentidos até hoje.

A compreensão de eventos extremos de seca, os processos que levam à sua ocorrência e as projeções de seus impactos sobre uma região podem ser feitos por meio de Modelos Climáticos Globais (GCMs). No entanto eventos de seca extremos são desafiadores, para serem modelados, uma vez que são, por definição, raros e ocorrem numa resolução menor que as apresentadas pelos GCMs (PARMESAN *et al.*, 2022). Nesse aspecto, os modelos hidrológicos, geralmente acoplados a modelos regionais (RCMs), são importantes instrumentos para

projeções e têm sido utilizados, para melhor compreender os impactos das alterações futuras, no balanço hídrico associado às mudanças climáticas (ALVARENGA *et al.*, 2018).

No Brasil, RCMs vêm sendo aplicados para a projeção e análise da recorrência de eventos de seca. Estudos vêm utilizando o SPI (FREITAS *et al.*, 2022; LYRA *et al.*, 2018; SILVA; MELLO, 2021; SILVA; MELLO; CHOU, 2022) e o SPEI (CUARTAS *et al.*, 2022; NOGUEIRA *et al.*, 2017; SILVA; MELLO; CHOU, 2022), para a verificação de possíveis impactos de seca em diferentes regiões do Brasil. Por outro lado, modelos hidrológicos, como o VIC (VARIABLE INFILTRATION CAPACITY MODEL) (GUO *et al.*, 2009) e o SWAT (*Soil and Water Assessment Tool*) (ARNOLD *et al.*, 1998; SRINIVASAN *et al.*, 1998), vêm sendo aplicados para a projeção de secas hidrológicas até o final do século XXI (CUARTAS *et al.*, 2022; JUNQUEIRA *et al.*, 2020; RODRIGUES *et al.*, 2019; SIQUEIRA *et al.*, 2020).

REFERÊNCIAS

- AGHAKOUCHAK, A. *et al.* Water and climate: recognize anthropogenic drought. **Nature**, London, v. 524, n. 7566, p. 409-411, 2015.
- AJAMI, N. K. *et al.* Calibration of a semi-distributed hydrologic model for streamflow estimation along a river system. **Journal of Hydrology**, Amsterdam, v. 298, n. 1, p. 112-135, 2004.
- ALLEN, R. G. *et al.* **Crop evapotranspiration: guidelines for computing crop water requirements**. Rome: FAO, 1998. (FAO Irrigation and Drainage, 56).
- ALMAZROUI, M. *et al.* Assessment of CMIP6 performance and projected temperature and precipitation changes over South America. **Earth Systems and Environment**, Jidá, v. 5, p. 155-183, 2021.
- ALVARENGA, L. A. *et al.* Hydrological simulation with SWAT and VIC Models in the Verde River Watershed, Minas Gerais. **Revista Ambiente & Água**, Taubaté, v. 15, n. 4, p. 1-10, 2020.
- 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**, New York, v. 7, p. 355-366, 2018.
- ARNOLD, J. G. *et al.* Large area hydrologic modeling and assessment part II: model application. **Journal of the American Water Resources Association**, Herndon, v. 34, n. 1, p. 73-89, 1998.
- ARNOLD, J. G. *et al.* SWAT: model use, calibration, and validation. **Transactions of the ASABE**, Saint Joseph, v. 55, n. 4, p. 1491-1508, 2012.
- BECKERS, J.; SMERDON, B.; WILSON, M. **Review of hydrologic models for forest management and climate change applications in British Columbia and Alberta**. Kamloops: FOREX, 2009.
- BELL, V. A. *et al.* Use of a grid-based hydrological model and regional climate model outputs to assess changing flood risk. **International Journal of Climatology**, Chichester, v. 27, n. 12, p. 1657-1671, 2007.
- BESKOW, S. **LASH model: a hydrological simulation tool in GIS framework**. 2009. 118 f. Tese (Doutorado em Engenharia Agrícola) - Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2009.
- BESKOW, S. *et al.* Agricultural watershed modeling: a review for hydrology and soil erosion processes. **Ciência e Agrotecnologia**, Lavras, v. 40, n. 1, p. 7-25, jan./fev. 2016.
- BETTS, R. *et al.* Como modelamos o clima. *In*: MARENGO, J. A. *et al.* **Riscos das mudanças climáticas no Brasil: análise conjunta Brasil-Reino Unido sobre os impactos das mudanças climáticas e do desmatamento na Amazônia**. Brasília, DF: MCT/INPE/MOHC, 2011. p. 62-28.

- BEVEN, K. J. **Rainfall-Runoff modelling: the primer**. Chichester: John Wiley, 2004. 360 p.
- BEVEN, K. J.; KIRKBY, M. J. A physically based variable contributing area model of basin hydrology. **Hydrological Sciences Bulletin**, Oxford, v. 24, p. 43-69, 1979.
- BRESSIANI, D. A. *et al.* Review of Soil and Water Assessment Tool (SWAT) applications in Brazil: challenges and prospects. **International Journal of Agricultural and Biological Engineering**, Beijing, v. 8, n. 3, p. 9-35, 2015.
- BRIGHENTI, T. M. **Modelagem hidrológica e avaliação de diferentes métodos de calibração para o modelo SWAT**. 2015. 116 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental) - Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2015.
- BRITO, S. S. B. *et al.* Frequency, duration and severity of drought in the Semiarid Northeast Brazil region. **International Journal of Climatology**, Chichester, v. 38, n. 2, p. 517-529, Feb. 2018.
- CALDEIRA, T. L. **Aprimoramento computacional do modelo Lavras Simulation of Hydrology (LASH): aplicação em duas bacias do Rio Grande do Sul**. 2016. 247 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia) - Universidade Federal de Pelotas, Pelotas, 2016.
- CALDEIRA, T. L. *et al.* LASH hydrological model: an analysis focused on spatial discretization. **Catena**, Amsterdam, v. 173, p. 183-193, 2019.
- CARNEIRO, A. *et al.* Assessment of water policies contributions for sustainable water resources management under climate change scenarios. **Journal of Hydrology**, Amsterdam, v. 608, p. 127690, 2022.
- CARVALHO, V. S. O. *et al.* Impact of climate change on monthly streamflow in the Verde River Basin using two hydrological models. **Revista Ambiente & Água**, Taubaté, v. 18, n. 4, p. 1-17, 2021.
- CAVALCANTI, I. F. A. *et al.* On the opposite relation between extreme precipitation over west Amazon and southeastern Brazil: observations and model simulations. **International Journal of Climatology**, Chichester, v. 37, n. 9, p. 3606-3618, 2017.
- CHOU, S. *et al.* Evaluation of the ETA simulations nested in three global climate models. **American Journal of Climate Change**, New York, v. 3, p. 438-454, 2014.
- 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**, Wien, v. 125, n. 4, p. 769-784, 2015. DOI: 10.1007/s00704-015-1540-9.
- COSTA, M. S. *et al.* Rainfall extremes and drought in Northeast Brazil and its relationship with El Niño-Southern Oscillation. **International Journal of Climatology**, Chichester, v. 41, p. E2111-E2135, 2020.
- CUARTAS, L. A. *et al.* Recent hydrological droughts in Brazil and their impact on hydropower generation. **Water**, Gezina, v. 14, n. 601, p. 1-22, 2022.

CUNHA, Z. A. **Avaliação dos impactos de cenários de mudanças no uso do solo na hidrologia da bacia hidrográfica do rio Xingu**. 2021. 129 f. Dissertação (Mestrado em Recursos Hídricos) - Universidade Federal de Pelotas, Pelotas, 2021.

DAI, A.; ZHAO, T.; CHEN, J. Climate change and drought: a precipitation and evaporation perspective. **Current Climate Change Reports**, Lausanne, v. 4, p. 301-312, 2018.

DAI, M. *et al.* Assessing agricultural drought risk and its dynamic evolution characteristics. **Agricultural Water Management**, Amsterdam, v. 231, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2020.106003>.

DUAN, Q. *et al.* Effective and efficient global optimization for conceptual rainfall-runoff models. **Water Resources Research**, Tucson, v. 28, n. 4, p. 1015-1031, 1992.

DUAN, Q.; SOROOSHIAN, S.; GUPTA, V. Effective and efficient global optimization for conceptual rainfall-runoff models. **Water Resources Research**, Tucson, v. 28, n. 4, p. 1015-1031, 1992.

ERCAN, M. B. *et al.* Calibration of SWAT models using the cloud. **Environmental Modelling & Software**, Oxfordshire, v. 62, n. 1, p. 188-196, 2014.

FALCK, A. S. *et al.* Applying a precipitation error model to numerical weather predictions for probabilistic flood forecasts. **Journal of Hydrology**, Copenhagen, v. 598, July 2021. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2021.126374>.

FALCK, A. S. *et al.* Propagation of satellite precipitation uncertainties through a distributed hydrologic model: a case study in the Tocantins-Araguaia basin in Brazil. **Journal of Hydrology**, Copenhagen, v. 527, p. 943-957, 2015.

FERNANDES, R. O. *et al.* Incotercomparação das vazões regularização de grandes reservatórios da bacia do Rio Jaguaripe-CE em cenários de mudanças climáticas. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, Porto Alegre, v. 22, n. 11, 2017. DOI: <https://doi.org/10.1590/2318-0331.011716033>.

FERNANDES, V. R. *et al.* Secas e os impactos na região Sul do Brasil. **Revista Brasileira de Climatologia**, Presidente Prudente, ano 17, v. 28, p. 561-584, 2021.

FERREIRA, P. S. **Modelagem hidrológica para estimativa da vazão na bacia hidrográfica do rio brígida e a disponibilidade hídrica frente às mudanças climáticas**. 2017. 89 f. Tese (Doutorado em Desenvolvimento e Meio Ambiente) - Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2017.

FREITAS, A. A. *et al.* Drought assessment in São Francisco River Basin, Brazil: characterization through SPI and Associated Anomalous Climate Patterns. **Atmosphere**, Toronto, v. 13, n. 41, p. 1-20, 2022.

GAO, H. Registro de Orçamento de Água da Capacidade de Infiltração Variável (VIC). *In*: ALGORITHM theoretical basis document. Seattle: University of Washington Press, 2010. p. 120-173.

GASH, J. H. C.; LLOYD, C. R.; LACHAUD, G. Estimating sparse forest rainfall interception with an analytical model. **Journal of Hydrology**, Copenhagen, v. 170, n. 1/4, p. 79-86, 1995.

GUO, S. L. *et al.* VIC distributed hydrological model to predict climate change impact in the Hanjiang Basin. **Science China Technological Sciences**, Beijing, v. 52, n. 11, p. 3234-3239, Dec. 2009.

HAGUMA, D. *et al.* Optimal hydropower generation under climate change conditions for a Northern Water Resources System. **Water Resources Management**, Reidel, v. 28, n. 13, p. 4631-4644, 2014.

HASSON, S. *et al.* Seasonality of the hydrological cycle in major South and Southeast Asian river basins as simulated by PCMDI/CMIP3 experiments. **Earth System Dynamics**, Amsterdam, v. 5, p. 67-87, 2014.

HAYES, M. J. *et al.* Monitoring the 2010-2011 drought using the Standardized Precipitation Index. In: HAYES, M. J. (ed.). **Understanding the drought phenomenon**. Lincoln: University of Nebraska, 2011. p. 159-170.

HIRPA, F. A. *et al.* Finding sustainable water futures in data-sparse regions under climate change: insights from the Turkwel River basin, Kenya. **Journal of Hydrology: regional studies**, Amsterdam, v. 19, p. 124-135, 2018.

INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE. **Climate change 2013: the physical science basis**. Cambridge: Cambridge University, 2013.

JARVIS, N. J. A simple empirical model of root water uptake. **Journal of Hydrology**, Copenhagen, v. 107, p. 57-72, 1989.

JIANG, S. *et al.* Development of a comprehensive framework for quantifying the impacts of climate change and human activities on river hydrological health variation. **Journal of Hydrology**, Copenhagen, v. 600, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2021.126566>.

JUNQUEIRA, R. *et al.* Hydrological response to drought occurrences in a Brazilian Savanna Basin. **Resources**, Washington, DC, v. 9, n. 10, p. 1-11, 2020.

KARLSSON, I. B. *et al.* Combined effects of climate models, hydrological model structures and land use scenarios on hydrological impacts of climate change. **Journal of Hydrology**, Copenhagen, v. 535, p. 301-317, 2016.

KIM, J. *et al.* Quantitative vulnerability assessment of water quality to extreme drought in a changing climate. **Ecological Indicators**, London, v. 103, p. 688-697, 2019.

KIMBALL, J. S.; RUNNING, S. W.; NEMANI, R. An improved method for estimating surface humidity from daily minimum temperature. **Agricultural and Forest Meteorology**, Amsterdam, v. 85, n. 1/2, p. 87-98, 1997.

KNUTTI, R.; SEDLACEK, J. Robustness and uncertainties in the new CMIP5 climate model projections. **Nature Climate Change**, New York, v. 3, n. 4, p. 369-373, 2012.

- KUMAR, N. *et al.* Impact of climate change on water resources of upper Kharun catchment in Chhattisgarh, India. **Journal of Hydrology: regional studies**, Amsterdam, v. 13, p. 189-207, 2017.
- LASDON, L. S. *et al.* Design and testing of a generalized reduced gradient code for nonlinear programming. **ACM Transactions on Mathematical Software**, New York, v. 4, n. 1, p. 34-50, 1978.
- LELIS, T. A. *et al.* Análise de sensibilidade e calibração do modelo SWAT aplicado em bacia hidrográfica da região sudeste do Brasil. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v. 36, p. 623-634, 2012.
- LI, Q. *et al.* A new parallel framework of distributed SWAT calibration. **Journal of Arid Land**, Lausanne, v. 7, n. 1, p. 122-131, 2015.
- LIANG, X. *et al.* A Simple hydrologically based model of land surface water and energy fluxes for GSMs. **Journal of Geophysical Research**, Washington, DC, v. 99, n. 14, p. 415-428, 1994.
- LIANG, X.; WOOD, E. F.; LETTENMAIER, D. P. Surface soil moisture parameterization of the VIC-2L model: evaluation and modification. **Global and Planetary Change**, New York, v. 13, n. 1/4, p. 195-206, 1996.
- LIANG, X.; XIE, Z. A new surface runoff parameterization with subgrid-scale soil heterogeneity for land surface models. **Advances in Water Resources**, Southampton, v. 24, p. 1173-1193, 2001.
- LOHMANN, D. *et al.* Regional scale hydrology: I., formulation of the VIC2L model coupled to a routing model. **Hydrological Sciences Journal**, Oxford, v. 43, n. 1, p. 131-141, 1998.
- LOHMANN, D.; NOLTE-HOLUBE, R.; RASCHKE, E. Um modelo de roteamento horizontal em larga escala a ser acoplado a esquemas de parametrização da superfície terrestre. **Tellus**, Stockholm, v. 48, p. 708-721, 1996.
- LUCAS, E. W. M. *et al.* Modelagem hidrológica determinística e estocástica aplicada à região hidrográfica do Xingu-Pará. **Revista Brasileira de Meteorologia**, Brasília, DF, v. 24, n. 3, p. 308-322, 2009.
- LYRA, A. *et al.* Climate change projections over three metropolitan regions in Southeast Brazil using the non-hydrostatic Eta regional climate model at 5-km resolution. **Theoretical and Applied Climatology**, Wien, v. 132, n. 1/2, p. 663-682, 2018.
- MANNING, C. *et al.* Soil moisture drought in Europe: a compound event of precipitation and potential evapotranspiration on multiple time scales. **Journal of Hydrometeorology**, Washington, DC, v. 19, p. 1255-1271, 2018.
- MAREK, G. W. *et al.* Calibration and validation of SWAT model for predicting daily ET over irrigated crops in Texas high plains using lysimetric data. **Transactions of the ASABE**, Saint Joseph, v. 59, n. 2, p. 611-622, 2016.

MARENGO, J. *et al.* A seca e a crise hídrica de 2014-2015 em São Paulo. **Revista USP**, São Paulo, v. 206, n. 1, p. 31-44, 2015.

MARHAENTO, H.; BOOIJ, M. J.; HOEKSTRA, A. Y. Hydrological response to future landuse change and climate change in a tropical catchment. **Hydrological Sciences Journal**, Oxford, v. 63, p. 1368-1385, 2018.

MARINHO FILHO, G. M. *et al.* Modelos hidrológicos: conceitos e aplicabilidades. **Revista de Ciências Ambientais**, Canoas, v. 6, n. 2, p. 35-47, 2012.

MCCARTHY, J. J. *et al.* (ed.). **Climate change 2001: impacts, adaptation and vulnerability**. Cambridge; New York: Cambridge University Press, 2001.

MCKEE, T. B.; DOESKEN, N. J.; KLIEST, J. The relationship of drought frequency and duration to time scales. *In*: CONFERENCE ON APPLIED CLIMATOLOGY, 8., 1993, Anaheim. **Proceedings** [...]. Boston: American Meteorological Society, 1993. p. 179-184.

MEDEIROS, F. J. *et al.* Meteorological droughts and water resources: historical and future perspectives for Rio Grande do Norte state, Northeast Brazil. **International Journal of Climatology**, Chichester, v. 42, n. 13, p. 6976-6995, Nov. 2022.

MELLO, C. R. *et al.* Climate change impacts on water resources of the largest hydropower plant reservoir in southeast Brazil. **Water**, Gezina, v. 13, n. 1560, p. 1-22, 2021.

MELLO, C. R. *et al.* Development and application of a simple hydrologic model simulation for a Brazilian headwater basin. **Catena**, Amsterdam, v. 75, n. 3, p. 235-247, 2008.

MELO, P. A. *et al.* On the performance of conceptual and physically based modelling approach to simulate a headwater catchment in Brazil. **Journal of South America Earth Sciences**, New York, v. 114, Mar. 2022. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jsames.2021.103683>.

MICHELS-BRITO, A. *et al.* The climate change potential effects on the run-of-river plant and the environmental and economic dimensions of sustainability. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, Golden, v. 147, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2021.111238>.

MILLÁN, H.; MACÍAS, I.; RABELO-LIMA, J. Hurst scaling with crossover of a drought indicator: a case study in Belem and Manaus, Brazil. **Natural Hazards**, Perugia, v. 110, n. 1, p. 69-93, 2022.

MISHRA, A. K.; SINGH, V. P. A review of drought concepts. **Journal of Hydrology**, Copenhagen, v. 391, n. 1/2, p. 202-216, Sept. 2010.

MODARRES, R. Streamflow drought time series forecasting. **Stochastic Environmental Research and Risk Assessment**, New York, v. 21, p. 223-233, 2007.

MOHOR, G. S. *et al.* Exploratory analyses for the assessment of climate change impacts on the energy production in an Amazon run-of-river hydropower plant. **Journal of Hydrology: regional studies**, Amsterdam, v. 4, p. 41-59, 2015.

MORAES, J. M. Propriedades físicas dos solos na parametrização de um modelo hidrológico. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, Porto Alegre, v. 8, n. 1, p. 61-70, 2003.

MOREIRA, I. A. **Modelagem hidrológica chuva-vazão com dados de radar e pluviômetros**. 2005. 81 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Hidrológica) - Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2005.

MOSS, R. H. *et al.* The next generation of scenarios for climate change research and assessment. **Nature**, London, v. 463, n. 7282, p. 747-756, 2010.

NOGUEIRA, J. M. P. *et al.* Spatial pattern of the seasonal drought/burned area relationship across Brazilian biomes: sensitivity to drought metrics and global remote-sensing fire products. **Climate**, Berlin, v. 5, n. 2, p. 42, 2017.

OLIVEIRA, K. D. *et al.* Impacts of sugarcane expansion on water availability in a river basin in southeastern Brazil. **Catena**, Amsterdam, v. 216, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.catena.2022.106437>.

OLIVEIRA, V. A. *et al.* 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**, Chichester, v. 37, p. 5005-5023, 2017.

PAIVA, R. C. D. **Modelagem hidrológica e hidrodinâmica de grandes bacias: estudo de caso: bacia do rio Solimões**. 2009. 181 f. Dissertação (Mestrado em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2009.

PARMESAN, C. *et al.* Terrestrial and freshwater ecosystems and their services. *In*: PÖRTNER, H. O. (ed.). **Climate change 2022: impacts, adaptation and vulnerability: contribution of Working Group II to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change**. Cambridge; New York: Cambridge University Press, 2022. p. 197-377.

PEREIRA, D. R. *et al.* Hydrological simulation using SWAT model in headwater basin in southeast Brazil. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v. 34, n. 4, p. 789-799, 2014.

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**, Chichester, v. 40, n. 5, p. 2511-2526, 2019.

RODRIGUEZ, D. A.; TOMASELLA, J. On the ability of large-scale hydrological models to simulate land use and land cover change impacts in Amazonian basins. **Hydrological Sciences Journal**, Cachoeira Paulista, v. 61, n. 10, p. 1831-1846, 2016.

SADEGHI, S. H. *et al.* Watershed health and ecological security modeling using anthropogenic, hydrologic, and climatic factors. **Natural Resource Modeling**, Tempe, v. 36, n. 3, Aug. 2023. DOI: <https://doi.org/10.1111/nrm.12371>.

SALES, D. C. *et al.* Projeções de mudanças na precipitação e temperatura no Nordeste brasileiro utilizando a técnica de Downscaling dinâmico. **Revista Brasileira de Meteorologia**, Fortaleza, v. 30, n. 4, p. 435-456, 2015.

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**, Gezina, v. 11, n. 1, p. 170, 2019.

SHAMSHIRBAND, S. *et al.* Predicting Standardized Streamflow index for hydrological drought using machine learning models. **Engineering Applications of Computational Fluid Mechanics**, London, v. 14, n. 1, p. 339-350, 2020.

SILVA, V. O.; MELLO, C. R. de. Meteorological droughts in part of southeastern Brazil: understanding the last 100 years. **Academia Brasileira de Ciências**, Rio de Janeiro, v. 93, p. 1-17, 2021. Suplemento 4.

SILVA, V. O.; MELLO, C. R. de; 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**, Wien, v. 1, n. 14, p. 1289-1302, 2022.

SIQUEIRA, V. A. *et al.* Potential skill of continental-scale, medium-range ensemble streamflow forecasts for flood prediction in South America. **Journal of Hydrology**, Copenhagen, v. 590, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2020.125430>.

SIQUEIRA JÚNIOR, J. L.; TOMASELLA, J.; RODRIGUEZ, D. A. Impacts of future climatic and land cover changes on the hydrological regime of the Madeira River basin. **Climatic Change**, Dordrecht, v. 129, p. 117-129, 2015.

SIVAPALAN, M. Pattern, process and function: elements of a unified theory of hydrology at the catchment scale. *In: ENCYCLOPEDIA of hydrological sciences*. Sidney: John Wiley, 2006. p. 1-27.

SOBRAL, B. S. *et al.* Spatial variability of SPI and RDIst drought indices applied to intense episodes of drought occurred in Rio de Janeiro State, Brazil. **International Journal of Climatology**, Chichester, v. 38, n. 10, p. 3896-3916, 2018.

SRINIVASAN, R. *et al.* Large area hydrologic modeling and assessment part II: model application. **Journal of the American Water Resources**, Herndon, v. 34, n. 1, p. 91-101, 1998.

SRIVASTAV, R. K.; SCHARDONG, A.; SIMONOVIC, S. P. Equidistance quantile matching method for updating IDF Curves under climate change. **Water Resources Management**, Oxford, v. 28, p. 2539-2562, 2014.

SWAIN, D. L. *et al.* Attributing extreme events to climate change: a new frontier in a warming world. **One Earth**, Philadelphia, v. 2, n. 6, p. 522-527, 2020.

TAYLOR, K. E.; STOUFFER, R. J.; MEEHL, G. A. An overview of CMIP5 and the experiment design, B. **American Meteorologic Society**, Washington, DC, v. 93, p. 485-498, 2012.

TUCCI, C. E. M. **Modelos hidrológicos**. Porto Alegre: Editora UFRGS; ABRH, 1998. 669 p.

TUCCI, C. E. M. **Modelos hidrológicos**. 2. ed. Porto Alegre: Editora UFRGS; ABRH, 2005.

678 p.

UNITED STATES DEPARTMENT OF COMMERCE. National Oceanic & Atmospheric Administration. **Trends in atmospheric carbon dioxide**. Disponível em: <https://gml.noaa.gov/ccgg/trends/>. Acesso em: 10 jul. 2021.

VAN HIEU, N. *et al.* 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**, Los Angeles, v. 10, p. 309-326, 2022.

VAN LOON, A. F. Hydrological drought explained. **Wiley Interdisciplinary Reviews: water**, New York, v. 2, n. 4, p. 359-392, July/Aug. 2015.

VARGAS, M. M. **Concepção do modelo hidrológico LASH em MATLAB aprimoramento da propagação em rios e da calibração**. 2021. 171 f. Dissertação (Mestrado em Recursos Hídricos) - Universidade Federal de Pelotas, Pelotas, 2021.

VARGAS, M. M. *et al.* M-LASH: Hydrological and computational enhancements of the LASH model. **Environmental Modelling & Software**, Oxford, v. 167, Sept. 2023. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2023.105774>.

VARGAS, M. M. *et al.* SYHDA - System of Hydrological Data Acquisition and Analysis. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, Porto Alegre, v. 24, p. 1-10, 2019.

VEGA, H. M.; LIMA, J. R.; CERNAK, S. N. SPEI and Hurst analysis of precipitation in the Amazonian area of Brazil. **Revista Brasileira de Meteorologia**, São José dos Campos, v. 34, p. 325-334, 2019.

VICENTE-SERRANO, S. M.; BEGUERÍA, S.; LÓPEZ-MORENO, J. I. A multiscalar drought index sensitive to global warming: the standardized precipitation evapotranspiration index. **Journal of Climatology**, Copenhagen, v. 23, n. 7, p. 1696-1718, 2010.

VICENTE-SERRANO, S. M. *et al.* Accurate computation of a streamflow drought index. **Journal of Hydrologic Engineering**, Reston, v. 17, n. 2, p. 318-332, 2011.

VICENTE-SERRANO, S. M. *et al.* Global drought trends and future projections. **Philosophical Transactions of the Royal Society A**, London, v. 380, n. 2238, Oct. 2022. DOI: <https://doi.org/10.1098/rsta.2021.0285>.

VICENTE-SERRANO, S. M. *et al.* Performance of drought indices for ecological, agricultural, and hydrological applications. **Earth Interaction**, Miami, v. 16, p. 1-27, 2012.

VIOLA, M. R. *et al.* Assessing climate change impacts on Upper Grande River Basin hydrology, Southeast Brazil. **International Journal of Climatology**, Chichester, v. 35, p. 1054-1068, 2015.

WORLD HEALTH ORGANIZATION. **Consumo vampírico está esgotando a água no mundo, afirma secretário-geral da ONU**. Disponível em: <https://brasil.un.org/pt-br/224386-consumo-vamp%C3%ADrico-est%C3%A1-esgotando-%C3%A1gua-no-mundo-afirma-secret%C3%A1rio-geral-da->

SEGUNDA PARTE - ARTIGOS

**ARTIGO 1 - HYDROLOGICAL MODEL PERFORMANCES IN THE VERDE RIVER
BASIN, MINAS GERAIS, BRAZIL**

Artigo publicado na revista Resources.

Hydrological Model Performances in the Verde River Basin, Minas Gerais, Brazil

Conceição de M. M. de Oliveira^{a,b}; Livia A. Alvarenga^a; Samuel Beskow^c; Zandra Almeida da Cunha^c; Marcelle Martins Vargas^c; Pâmela A. Melo^a; Javier Tomasella^d; Ana Carolina N. Santos^d; Vinicius S. O. Carvalho^e; Vinicius Oliveira Silva^a

¹ Department of Water Resources, Federal University of Lavras, Lavras, 37200-000, Minas Gerais, Brazil.

² State University of Maranhão, Cidade Universitária Paulo VI., São Luis, 65055-310, Maranhão, Brazil.

³ Center for Technological Development/Water Resources Engineering, Federal University of Pelotas, Pelotas, 96010-610, Rio Grande do Sul, Brazil.

⁴ National Institute for Space Research (INPE), National Center for Monitoring and Early Warning of Natural Disasters (CEMADEN), Postal Code 01, Cachoeira Paulista, 12630-970, São Paulo, Brazil

⁵ Institute of Natural Resources, Federal University of Itajubá, Itajubá, 37500-903, Minas Gerais, Brazil

* Correspondence: Department of Water Resources, Federal University of Lavras, Lavras, 37200-000, Minas Gerais, Brazil. E-mail: livia.aalvarenga@ufla.br

Abstract: In hydrological modelling, it is important to consider the uncertainties related to the model structures and parameters when different hydrological models are used to represent the system. Therefore, an adequate analysis of daily discharge forecasts that takes into account the performance of hydrological models can assist in identifying the best extreme discharge forecasts. In this context, this study aims to evaluate the performance of three hydrological models - Lavras Simulation of Hydrology (LASH), Variable Infiltration Capacity (VIC), and Distributed Hydrological Model (MHD-INPE) in the Verde River basin. The performance analysis results showed that LASH and MHD-INPE simulated average discharges more accurately, both in the dry and rainy seasons, when compared to VIC. These results justify the use of LASH and MHD-INPE in studies related to discharge forecasting in the region.

Keywords: LASH; VIC; MHD-INPE; performance; hydrological models

Citation Conceição de M. M. de Oliveira^{a,b}; Livia A. Alvarenga^a; Samuel Beskow^c; Zandra Almeida da Cunha^c; Marcelle Martins Vargas^c; Pâmela A. Melo^a; Javier Tomasella^d; Ana Carolina N. Santos^d; Vinicius S. O. Carvalho^e; Vinicius Oliveira Silva^a. *Resources* 2023, 11, x.
<https://doi.org/10.3390/xxxxx>

Received: date

Accepted: date

Published: date

Publisher's Note: MDPI stays neutral with regard to jurisdictional claims in published maps and institutional affiliations.



Copyright: © 2023 by the authors. Submitted for possible open access publication under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY) license (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).

1. Introduction

Hydrological models have proven to be effective instruments for enhancing the comprehension of hydrological phenomena in basins [1]. These models exhibit versatile applications, including discharge prediction, evaluation of water availability, and investigation of climate and land-use modifications' impacts [2-5].

The selection of a hydrological model should be based on the intended application, as each model has its own assumptions and limitations. The use of conceptual distributed and distributed hydrological models is based on the argument that these models can satisfactorily represent the physical processes occurring within a basin, while taking into account the spatial variability of physical and meteorological parameters [6,7]. Therefore, the availability of data in the region, the number of parameters required, and the level of description of the hydrological processes must all be considered.

The Soil and Water Assessment Tool (SWAT) [8,9] and the Variable Infiltration Capacity (VIC) models [10-12] are semi-distributed models that have been utilized in hydrological simulations of the Verde River basin in Minas Gerais state, Brazil [5,7]. These models produced satisfactory results in the monthly time step, implying that further research can be conducted to assess the impacts of climate and land-cover changes [7]. It is important to note that these studies simplify some numerical processes, as the objective is to evaluate hydrological impacts in average terms. In contrast, the estimation of daily discharge is a more dynamic and complex process, which can represent extreme discharge events, as well as periods of drought, in the daily time step. Hence, good performance of hydrological models in the daily time step is essential.

The Lavras Simulation of Hydrology (LASH) model has been tested in various basins located in different states of Brazil, including Minas Gerais, Rio Grande do Sul, Amazonas, and Tocantins, which represent various biomes, scales, and edaphoclimatic conditions. For example, Viola et al. [13], Mello et al. [14] and Beskow et al. [15] have conducted research using LASH in connection with the headwaters of the Rio Grande basin. Although various applications of LASH can be highlighted, no study has been published on using the model to compare the performance of different hydrological models (LASH, VIC, and MHD-INPE) at the daily time step. A comparison of the performance of different hydrological models can lead to a more robust analysis of the peak and recession discharge magnitudes.

In addition to the hydrological models mentioned (SWAT, VIC, and LASH), the Distributed Hydrological Model (MHD-INPE) is also a viable option for discharge forecasting. The MHD-INPE [16] is a distributed model developed at the Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), which is an adaptation of the Large Basin Model at the Instituto de Pesquisas Hidráulicas (MGB-IPH). The MHD-INPE has been applied in basins of varying sizes, ranging from 5 to 1.4 million km², in studies of land-use and land-cover changes, climate change and hydropower, discharge forecasting, and water sustainability, and has produced satisfactory results in these basins [17-21].

The Rio Verde watershed (4,100 km²), geographically located in the southern region of Minas Gerais, is situated within the Atlantic Forest biome in the Serra da Mantiqueira. The basin is part of the Serra da Mantiqueira mountain range, which is a significant region for biodiversity conservation within the Atlantic Forest biome. The Serra da Mantiqueira region contains several headwater regions that contribute to important rivers for water supply, irrigation, and hydropower generation. Additionally, this region holds great economic importance in agricultural development, particularly in coffee production, in the southern part of Minas Gerais state.

Hydrological models may exhibit similar performances, but the average discharge response may vary. Thus, studies utilizing various hydrological models can reveal potential sources of uncertainty in discharge forecasting, which could stem from differences in calibration methodologies, model structures, process equations, and input data availability, among other factors. Thus, this study's novelty was to assess the performance of three hydrological models (LASH, VIC, and MHD) on a daily time step in the Verde River Basin, a region with economic and biodiversity importance from the Minas Gerais State, and Brazil. The study sought to answer three key questions: (i) Is there any difference

between the models performance? (ii) Are the models suitable for simulating peak and low discharge at Verde River Basin? (iii) Are the models suitable for water resources management at Verde River Basin? These questions aim to understand the performance of hydrology models in South of Minas Gerais state and their possible application over the region.

2. Material and Methods

2.1. Study Area

The Verde River Basin (VRB) is situated in the southern part of Minas Gerais state (Figure 1), making it a crucial region for biodiversity conservation. With a drainage area of approximately 4100 km² and an altitude range of 809 m to 2742 m, the VRB has a predominantly Cwb climate, and the average annual temperature is 18 °C [23,24].

Regarding soil classes in the VRB, Argisol (65.3%), Latosol (23.3%), and Cambisol (8.9%) predominate (Figure 1B), with rocky (1.3%) and Neosol (1.2%) being less common. The basin's predominant land-use and land-cover patterns are as follows: pasture (69.2%), native forest (21.3%), rocky field (1.7%), eucalyptus (0.2%), agriculture (7%), and urbanization (6%).

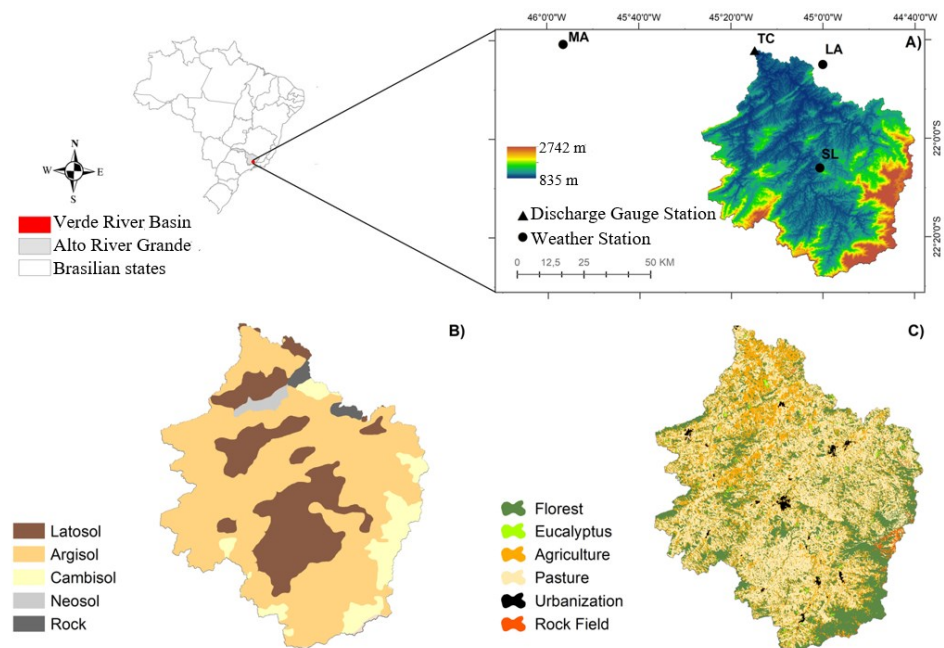


Figure 1. Verde River Basin, in the Minas Gerais state, Brazil; digital terrain model. (A) climate stations location; (B) soil map; (C) land use and land cover map.

For each specified soil class in the watershed, an input information such as soil depth (Z), soil moisture at saturation point (θ_s), and soil moisture at permanent wilting point (θ_{pwp}). Table 1 presents the values of Z , θ_s , and θ_{pwp} according to the literature.

Table 1. Values adopted for depth, saturation point moisture (θ_s), and permanent wilting point moisture (θ_{pwp}) for each soil class in the Rio Verde watershed.

Soil Class	Depth (cm)	θ_s	θ_{pwp}
		($\text{m}^3.\text{m}^{-3}$)	($\text{m}^3.\text{m}^{-3}$)
Cambisol (CX)	100	0.597	0.171
Latosol (LVA)	110	0.555	0.240
Argisol (PVAD)	80	0.45	0.19
Neosol (RY)	20	0.574	0.183
Rock (AR)	0	0	0

Source: adapted of Junqueira Junior [22]

Certain vegetation attributes required by the models include leaf area index (LAI), rooting depth, albedo, surface resistance, and height. Table 2 presents the parameters extracted from the literature for each vegetation cover class. By utilizing land use map information, the system will allow for the identification of parameters associated with vegetation required by the LASH hydrological model, namely: albedo, vegetation canopy height, surface resistance, rooting depth, and leaf area index.

Table 2. Parameters extracted from the literature for each vegetation cover class and their respective references.

Vegetation	LAI	Height	Albedo	Surface Resistance	Rooting Depth (mm)
	$\text{m}^2.\text{m}^{-2}$	(m)		($\text{s}.\text{m}^{-1}$)	
Agriculture	0.3-7.0	0 -1.52	0.15-0.20	40	500
Pasture	1.86-3.99	0.5	0.20-0.26	70	600
Florest	6.25	10	0.13-0.18	100	2000
Cerrado	1.9	5	0.13-0.18	150	2000
Eucalyptus	3.5	5	0.13-0.18	100	1500
RockField	0	0	0.10-0.35	545.3	500

Source: Viola [25]

2.2. Hydrology Models

The Lavras Simulation of Hydrology (LASH) is a semi-distributed hydrological model that uses the modified SCS-CN model [26] as the basis. The model incorporates the equation of Brooks and Corey to estimate subsurface flows and base flows, and the Muskingum-Cunge linear model for drainage network routing [27]. The LASH operates on the principle of the water balance equation (Equation 1):

$$\frac{A_t - A_{t-1}}{\Delta t} = \frac{[(P + D_t - ET_R - D_B - D_{SS} - D_S)]}{\Delta t}$$

where, A_t is the current soil water storage at time t ; A_{t-1} is the soil water storage in the time interval immediately preceding t ; P is the average precipitation, discounted from interception (IT); D_t is the capillary

rise; ET_R is the actual evapotranspiration; D_B is the base runoff; D_{SS} is the subsurface runoff; D_S is the surface runoff; and Δt is the time interval.

The Variable Infiltration Capacity (VIC) is a distributed hydrological model comprising two modules: (i) a rainfall-runoff transformation module [10-12]; and (ii) a base-discharge routing module [28,29] that utilizes linearized Saint-Venant equations to propagate base discharge. The VIC model's underlying principle is based on the variable infiltration curve (Equation 2):

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

where i is the point infiltration capacity and i_m is the the maximum soil infiltration capacity; A is the fractional soil area with the infiltration capacity less than i and b_i is the infiltration shape parameter.

The Distributed Hydrological Model of the National Institute for Space Research (MHD-INPE) was developed by Rodriguez and Tomasella [16] and Siqueira Júnior et al. [30], and it comprises four modules: (i) vertical water balance in the soil, (ii) evapotranspiration, (iii) surface, subsurface, and groundwater flows, and (iv) propagation in channels. The MHD-INPE model considers the following variables: groundwater flux (Q_{sub}) estimated by Equation 3, subsurface flux (Q_{ss}) from this layer estimated by Equation 4, and aquifer recharge (Q_r) estimated by Equation 5.

$$Q_{Sub} = \frac{T_{sub} * \tan\beta}{\lambda_\mu^\mu} \left[1 - \frac{S_{max} - S_t}{S_{max}(1 - \xi)} \right]^\mu = \frac{T_{sub} \tan\beta}{\lambda_\mu^\mu} \left[\frac{S_t - \xi S_{max}}{S_{max}(1 - \xi)} \right]^\mu \quad (3)$$

$$Q_{ss} = \frac{\alpha D_1 K_{ss} \tan\beta}{\lambda_\eta^\eta} \left(\frac{SS_t}{SS_{max}} \right)^\eta \quad (4)$$

$$Q_r = K_{ss} \left(\frac{SR_t}{SR_{max}} \right)^\eta \quad (5)$$

where T_{sub} is the transmissivity when the water table is at the surface; $\tan\beta$ is the slope of the local topography; μ is a parameter that defines the shape of the relationship between transmissivity and soil depth; ξ is the drainable porosity; S_{max} is the maximum capacity of water storage in the cell and λ_μ is the average contribution area per contour unit, assuming a potential profile for transmissivity. The topographic parameter, λ_μ , is solved independently for each regular grid-cell. S_{max} is solved for the bottom soil layer in the model considering its depth, D_3 , and soil porosity, φ . K_{ss} is the saturated hydraulic conductivity in the upper soil layer; D_1 is the thickness of the top soil layer; SS_{max} is the maximum water storage in this layer; η is the Brooks-Corey parameter; α includes the soil anisotropy in the equation; SS_t is the average water storage in the upper layer and λ_η is the average value of the contribution area per contour unit raised to the $1/\eta$ potency. SR_{max} is the maximum storage capacity in the middle tier, SR_t is the average storage in the middle tier grid at time t .

2.3. Observed Data

Meteorological data were obtained from the National Institute of Meteorology [31], with three conventional stations used (Figure 1A): the São Lourenço station (SL; 22° 07' 48" S and 45° 02' 24" W), located within

the VRB, and the Machado (MA; 210 40'48" S; 450 56'24" W) and Lavras (LV; 210 13' 34" S, 440 58' 47" W) stations, located outside the basin's boundaries. Fluviometric data were collected from the Três Corações station (TC; -210 42' 11" S and 450 14' 51" W) through the National Water and Basic Sanitation Agency. The LASH, VIC, and MHD models require the maximum and minimum daily temperature ($^{\circ}\text{C}$), wind speed ($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$), precipitation (mm), global solar radiation ($\text{MJ}/\text{day}\cdot\text{m}^{-2}$), relative humidity, dew point temperature ($^{\circ}\text{C}$), and surface-level atmospheric pressure (mb) as input. Therefore, we used the meteorological and discharge gauge station data for the period of 1990 to 2005 for the prospection.

The Digital Elevation Model was obtained from the Shuttle Radar Topography Mission (SRTM), providing altitudes ranging from 835 to 2742 m for the VRB. The spatialization of the basin's soil classes was developed based on the new map of Brazil [32]. To input the required vegetation parameters in the LASH, VIC, and MHD models, we gathered data from the literature [19-21,27,33-39] on leaf area index, root depth, albedo, surface resistance, and height. Notably, the vegetation parameters were held constant throughout the model calibration process.

In terms of the LASH model, we divided the study basin into 57 sub-basins, each with a drainage area ranging from 1.14 km^2 to 215.65 km^2 . We defined upper and lower limits for each parameter during calibration using the SCE-UA algorithm [40], as outlined by Beskow et al. [15]. The model's seven most sensitive parameters were identified as follows: (a) the initial abstraction coefficient (λ); (b) hydraulic conductivity of the shallow saturation zone reservoir (KB); (c) hydraulic conductivity of the subsurface reservoir (KSS); (d) maximum flow returning to soil by capillary rise (KCR); (e) response time parameter of the surface reservoir (CS); (f) response time parameter of the subsurface reservoir (CSS); and (g) baseflow recession time (CB). The λ parameter is directly linked to initial rainfall abstraction, which corresponds to the portion of rainfall loss that occurs before direct surface runoff generation [15]. We emphasize that the results of the prospection are published in this scientific magazine for further analysis and discussion.

For VIC modeling, the basin's surface was represented by grid cells, with a resolution of 0.01° defined (3768 grid cells). The VIC calibration was conducted manually by changing each parameter individually, following the methods of Gao et al. [41] and Liang et al. [10]. The following parameters were considered for calibration: D_s (fraction of maximum baseflow velocity where non-linear baseflow begins), W_s (fraction of maximum soil moisture where non-linear baseflow occurs), bi (variable infiltration curve), h_3 (thickness of the third layer), C (kinematic wave celerity), and D (kinematic wave diffusion coefficient).

For MHD, a resolution of 0.0450 was defined (166 grid cells). The automatic calibration process utilized the Hydrologic Response Unit (HRU) derived from the combination of land-use and soil type [17]. Calibration was performed using the Strength Pareto Evolutionary Algorithm- SPEA2 method [42]. Ten parameters were adjusted during the calibration process, including soil layer depths (D_1 , D_2 , and D_3), the hydraulic conductivity multiplier of the upper layer, maximum transmissivity of the bottom layer (T_{sub}), decay of transmissivity with the thickness of the saturated zone (μ), ratio of field capacity to porosity (ξ), coefficient of anisotropy (α), and the Routing water storage parameter for surface and subsurface flows (C_{sup}) and baseflow (C_{sub}).

2.4. Hydrological Models Application, Calibration and Validation

The hydrological simulation in the VRB using LASH, VIC, and MHD was conducted for the period between 1990-2005, with calibration performed between 1993-1999 and validation between 2000-2005. The initial hydrological conditions had uncertainties; therefore, the first three years were considered as a warm-up period. The simulated discharges were compared with the observed discharges using statistical indices such as Nash-Sutcliffe [43], logarithmic version LNASH, R^2 [44], and *PBIAS* [45] (Equations 6, 7, 8, and 9, respectively).

$$NASH = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (Q_{oi} - Q_{si})^2}{\sum_{i=1}^n (Q_{oi} - \bar{Q}_o)^2} \quad (6)$$

$$LNASH = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (\log(Q_{oi}) - \log(Q_{si}))^2}{\sum_{i=1}^n (\log(Q_{oi}) - \log(\bar{Q}_o))^2} \quad (7)$$

$$R^2 = \left\{ \frac{\sum_{i=1}^n (Q_{oi} - \bar{Q}_o) (Q_{si} - \bar{Q}_s)}{\sum_{i=1}^n [(Q_{oi} - \bar{Q}_o)^2]^{0,5} [(Q_{si} - \bar{Q}_s)^2]^{0,5}} \right\}^2 \quad (8)$$

$$PBIAS = \frac{\sum_{i=1}^n Q_{si} - \sum_{i=1}^n Q_{oi}}{\sum_{i=1}^n Q_{oi}} * 100 \quad (9)$$

where, Q_{si} is the simulated discharge at time i ; Q_{oi} is the observed discharge at time i , \bar{Q}_o is the average observed discharge, \bar{Q}_s is the average simulated discharge and n is the total number of observed data.

The NASH coefficient is used to determine the model's ability to reproduce observed discharge series and has a strong influence on maximum discharges, whereas LNASH is more influenced by minimum discharges. The R^2 indicates the degree of correlation between simulated and observed values [16,17,46]. *PBIAS* measures the average tendency of the simulated discharge to either overestimate or underestimate the observed discharge [44]. *PBIAS* values close to zero indicate that the model showed no tendency, while negative values indicate underestimated discharges, and positive values indicate overestimated discharges [45]. Generally, hydrological model performance can be classified according to Table 3, proposed by Moriasi et al. [47].

Table 3. Statistical indices classification to evaluate the hydrological model performances.

Statistical indices	Range	Performance classification
---------------------	-------	----------------------------

		Very good	Good	Satisfactory	Not satisfactory
NASH and LNASH	$-\infty$ a 1	>0.80	0.70 a 0.80	0.50 a 0.70	≤ 0.50
R^2	0 a 1	>0.85	0.75 a 0.85	0.60 a 0.75	<0.60
<i>PBIAS</i>	$-\infty$ a 100	$<5\%$	5 a 10%	10 a 15%	$> 15\%$

Source: Adapted of Moriasi et al. [47].

3. Results and Discussion

Table 4 presents the optimized parameters utilized in the VIC, LASH, and MHD hydrological models. The parameters used for calibration were determined to be the most sensitive based on the studies by Gao et al. [41] and Liang et al. [10] for VIC, Beskow et al. [15] for LASH, and Rodriguez and Tomasella [16] and Siqueira Júnior et al. [30] for MHD. Following calibration, the validation process was carried out by utilizing the optimized parameters obtained in the calibration phase.

Table 4. Calibration parameters of the VIC, LASH and MHD hydrological models, as well as their physical meaning and final values.

Parameter	Description	Unit	Range	Final values
VIC				
b_i	Variable Infiltration Curve	-	0.001- 0.4	0.35
D_S	Fraction of maximum velocity of baseflow where non-linear baseflow begins	Fraction	0.001-0.99	0.01
W_S	Fraction of maximum soil moisture where non-linear baseflow occurs	Fraction	0.001-0.99	0.05
H_3	Thickness of the third layer	m	0.05-2	0.5
C	Kinematic wave celerity	$m\ s^{-1}$	0.5-3	0.5
D	Kinematic wave diffusion coefficient	$S\ m^{-1}$	200-400	2200
LASH				
λ	Initial abstraction coefficient	-	0.01-0.5	0.07
K_B	Hydraulic conductivity of shallow saturates zone reservoir	$mm\ day^{-1}$	0.0-6	3.33
K_{SS}	Hydraulic conductivity of subsurface reservoir	$mm\ day^{-1}$	0-250	245.41
K_{CR}	Maximum flow returning to soil by capillary rise	$mm\ day^{-1}$	0-5	1.03
C_S	Response time parameter of the surface reservoir	-	-	84.45
C_{SS}	Response time parameter of the sub-surface reservoir	-	-	16677.22
C_B	Baseflow recession time	day	-	105.46
MDH-INPE				
D_1	Thickness of the upper layer	m	0-10	3.8
D_2	Thickness of the intermediate layer	m	0-10	0.35
D_3	Thickness of the bottom layer	m	0-30	0.09
K_{SS}	Saturated hydraulic conductivity	$mm\ day^{-1}$	0.01-10	0.37
T_{sub}	Maximum transmissivity of the bottom layer	$m^2\ day^{-1}$	0.01-1000	0.48
μ	Decay of transmissivity with the thickness of the saturated zone	-	0.01-4	0.0005
C_{sup}	Routing water storage parameter for surface and subsurface flows	day	0.001-10	25.39
C_{sub}	Routing water storage parameter for baseflow	day	0.001-2000	272.4252
ξ	Ratio of field capacity to porosity	-	-	-
α	Coefficient of anisotropy	-	1-10000	394.7182

Table 5 presents the accuracy statistics results used to evaluate the performances of the three hydrological models (LASH, VIC, and MHD-INPE). The results indicate that the LASH and MHD-INPE models performed better than the VIC model. All statistical indices showed satisfactory performances in calibration and validation, according to the classification proposed by Moriasi et al. [47]. The performance analysis of the VIC model revealed a significant challenge in simulating discharges during the dry period, with LNASH values below 0.50. Although the PBIAS values were satisfactory, they indicated a tendency to overestimate the observed discharge in both calibration and validation. Overall, the NASH values indicated good performance by all three hydrological models in simulating peak discharges, with the LASH and MHD-INPE models demonstrating the best simulated peak discharge values.

Table 5. Statistical indices of the hydrological models for daily discharges.

Statistical indices	Calibration			Validation		
	LASH	VIC	MHD	LASH	VIC	MHD
<i>NASH (C_{NS})</i>	0.85	0.79	0.79	0.80	0.77	0.87
<i>LNASH (logC_{NS})</i>	0.89	0.22	0.84	0.81	0.35	0.86
<i>R²</i>	0.85	0.85	0.79	0.85	0.85	0.88
<i>P_{BIAS}</i>	0.60	14.85	0.80	6.80	14.48	-7.30

Table 5 shows that the hydrological models MHD and LASH achieved satisfactory results for the VRB. Similar results were also reported by other authors who evaluated hydrological model performance in the southern region of the state of Minas Gerais. Melo et al. [19] obtained satisfactory results in the daily time step using the MHD-INPE and DHSVM models, with NASH, LNASH, and *Pbias* values of 0.80, 0.75, and -8.0, respectively. Zackia et al. [20] also reported NASH values above 0.7 for MHD-INPE in calibration and validation in the daily time step. Viola et al. [48] applied LASH to four headwater catchments (Aiuruoca River, Grande River, Sapucaí River, and Verde River) and reported NASH values between 0.7 and 0.86 for monthly simulations.

The daily discharge simulated by LASH, VIC, and MHD, as well as the observed discharge, are presented in Figures 2 and 3 for both the calibration and validation periods. The recession periods demonstrated that the hydrological models MHD and LASH successfully reproduced the storage processes present in the watershed, as indicated by the recession curve extending over time intervals equivalent to the observed flows. This resulted in a very good evaluation of the *logCNS* coefficient. The results of this coefficient confirmed high reliability in simulating the recession periods of the hydrograph, according to the classifications by Moriasi et al. [47]. In contrast, the simulated flows by VIC were unable to accurately represent the observed data during the dry period, indicating a certain limitation and underestimation of flows during the recession period. The adjustment of the VIC hydrological model may be related to the inherent difficulties of the manual calibration process, which requires longer processing time.

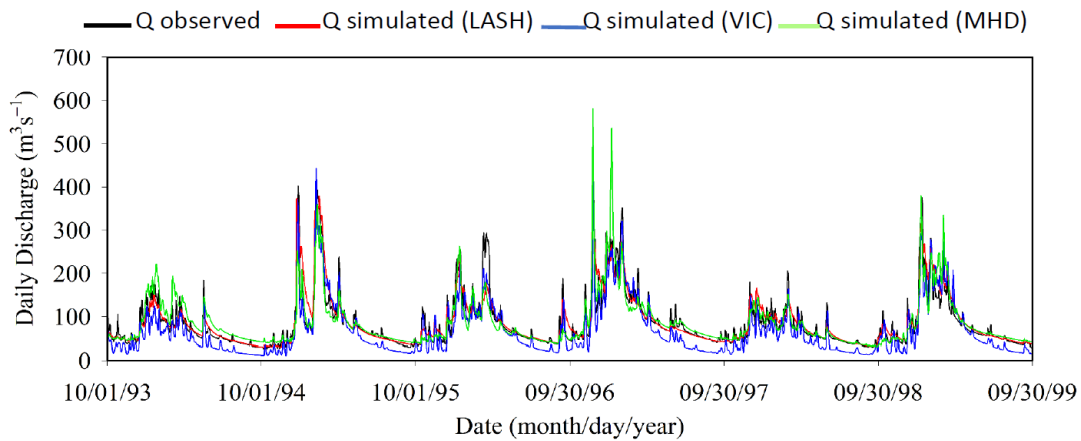


Figure 2. Daily discharge observed and simulated by LASH, MHD and VIC during the calibration.

In Figure 3, during the validation phase, the hydrological models MHD-INPE, LASH, and VIC showed good agreement between simulated and observed data, as assessed by the NASH coefficient (CNS), which is associated with the efficiency of peak flow estimation in the hydrograph. The following results were obtained: 0.87, 0.80, and 0.77, respectively, which is considered very good according to the classification by Moriasi et al. [47]. When analysing the minimum flows, the $\log CNS$ yielded satisfactory results only for the MHD-INPE and LASH models, which were able to reproduce the observed daily flows. Therefore, the results obtained for the VRW confirm that the MHD-INPE and LASH models were able to adequately represent the values of minimum and maximum flows during the calibration and validation periods. The obtained $Pbias$ values were -7.30%, 6.80%, and 14.48% for MHD-INPE, LASH, and VIC, respectively, indicating satisfactory performance. Similar results were found by Carvalho et al. [5], who achieved good performance using the LASH model, and Melo et al. [19], who used the MHD-INPE model in a headwater watershed.

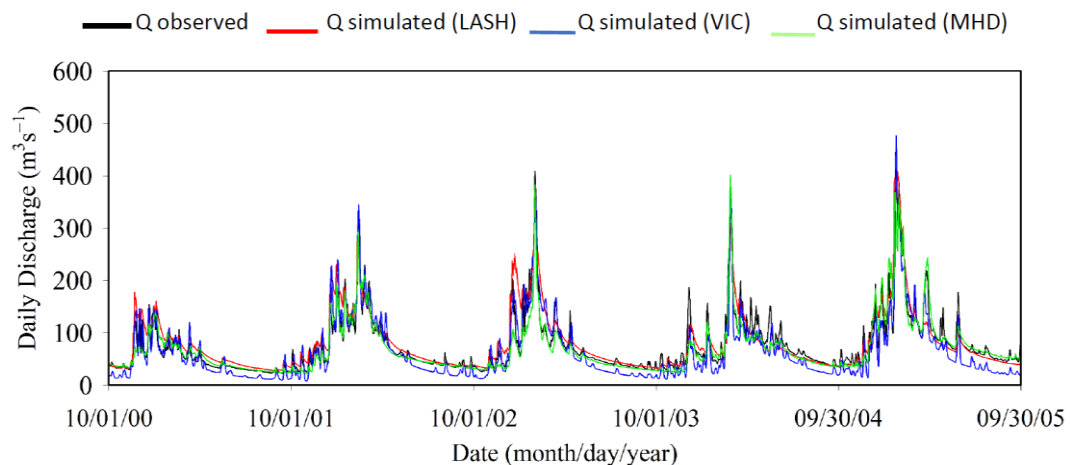


Figure 3. Daily discharge observed and simulated by LASH, MHD and VIC during the validation.

Overall, when compared to the observed data, the daily discharge simulated by the LASH and MHD-INPE models showed better results than those simulated by VIC. The poorer performance of VIC may be attributed to the manual calibration process used, as this calibration methodology requires a significant amount of processing time to achieve the best parameter combination, which is done individually. Moreover, manual calibration requires an inter-parameter analysis, typically done by fixing one parameter and altering the others to determine which parameter is more sensitive. In general, when comparing the adjustment of observed and simulated values, the effect was better for the MHD-INPE and LASH models compared to the VIC model. These differences in the simulated flow results by the MHD-INPE, LASH, and VIC models indicate the need to assess the uncertainties of hydrological simulations obtained from different hydrological models. Singh and Marcy [49] and Orth et al. [6] emphasized that performance evaluation across different hydrological models can reduce uncertainties stemming from the different structures and complexities of the chosen hydrological models.

Figure 4 depicts the behavior of the flow duration curve for the observed and simulated flows by the three models used. The flow duration curve provides an estimate of the time frequency at which a given flow is equaled or exceeded. In this context, considering water resources management, it is an important tool to represent the frequency of maximum and minimum reference flows simulated by the hydrological models. It can be observed that both models exhibited a similar frequency distribution to the observed data. The MHD-INPE and LASH models demonstrated better performance and closely approximated the observed flow values for lower flows. On the other hand, it is evident that the minimum flows from the curve representing the VIC model deviated from the observed flows. Overall, the VIC model tended to underestimate the flow values.

The minimum discharges estimated by the VIC model were found to be underestimated compared to the observed discharges. For instance, the observed Q_{90} (the flow that is exceeded or equalled 90% of the time) value was $35.03 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$, while the simulated Q_{90} discharges for LASH, VIC, and MHD models were $43.87 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$, $18.03 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$, and $35.89 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$, respectively. Similarly, the observed Q_{10} (the flow that is exceeded or equalled 10% of the time) value was $151.61 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$, while the Q_{10} simulated by LASH, VIC, and MHD were $162.78 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$, $144.84 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$, and $147.17 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$, respectively. Overall, the permanence curve of the daily discharges simulated by LASH and MHD provided the best fit. The MHD-INPE and LASH models have been assessed in several studies regarding their accuracy in estimating the flow duration curve, consistently demonstrating good performance with minimal discrepancies in minimum flows [15,19,34].

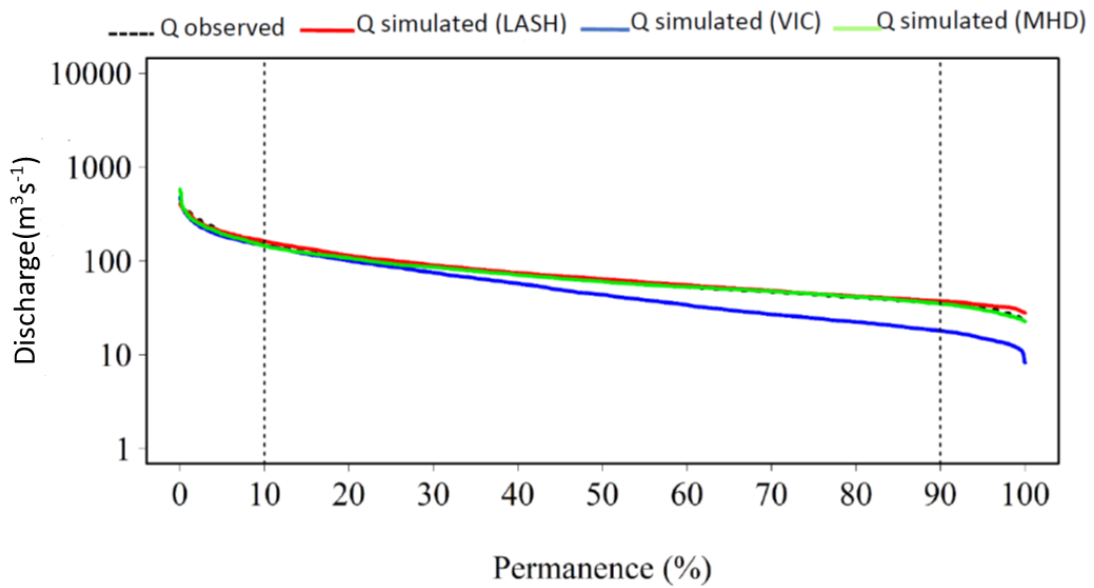


Figure 4. Permanence curve of the observed and simulated discharges (LASH, MHD and VIC).

Figure 5 displays the cumulative daily runoff data, with the simulated data by LASH and MHD showing high levels of agreement when compared to the observed data. The cumulative runoff values were 7.036 mm (observed), 7.252 mm (simulated by LASH), 7.016 mm (simulated by MHD), and 5.892 mm (simulated by VIC). At the end of the evaluation period, the values simulated by LASH were slightly above the observed values. On the other hand, the simulated data by VIC were generally below the observed data.

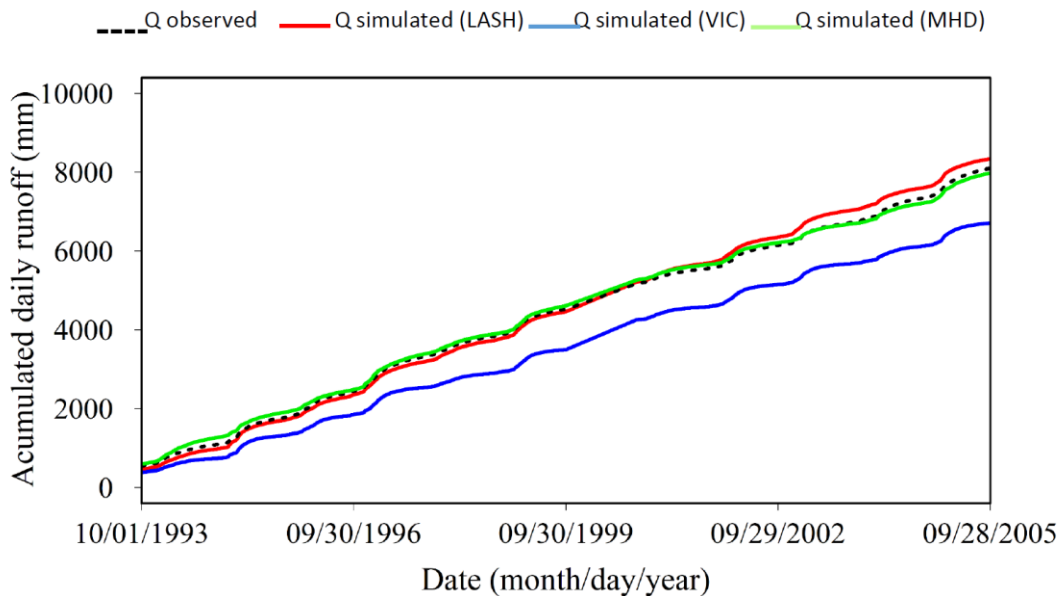


Figure 5. Cumulative runoff in the VRB.

Table 6 displays the results of the observed and simulated annual vertical water balance components using LASH, VIC, and MHD hydrological models. The simulated evapotranspiration-to-precipitation ratios averaged from 44 to 57%, 53 to 78%, and 37 to 64% with LASH, VIC, and MHD, respectively. The higher average values of annual evapotranspiration simulated by VIC may indicate an underestimation of runoff. These findings align with the study by Alvarenga et al. [7], which showed reasonable performance in discharge simulation in the Verde River basin using SWAT and VIC. The authors reported average annual values of evapotranspiration ranging from 57.9 to 65.7% of precipitation. The cited paper revealed that VIC outperformed SWAT. In contrast, this study demonstrated that LASH and MHD performed better than VIC.

Table 6. Annual water balance components (1993-2005) in the VRB.

YEA R	P (mm)	LASH			VIC			MHD		
		ET (mm)	P-ET (mm)	ET/P (mm)	ET (mm)	P-ET (mm)	ET/P (mm)	ET (mm)	P-ET (mm)	ET/P (mm)
1993	1451.60	733.93	717.67	0.51	841.37	610.23	0.58	764.67	686.93	0.53
1994	1348.97	653.72	695.26	0.48	888.92	460.05	0.66	754.17	594.80	0.56
1995	1504.59	744.24	760.35	0.49	995.91	508.67	0.66	772.98	731.61	0.51
1996	1843.76	846.76	997.00	0.46	1081.74	762.02	0.59	844.41	999.36	0.46
1997	1419.88	754.78	665.10	0.53	1009.85	410.03	0.71	825.20	594.68	0.58
1998	1318.14	795.86	522.29	0.60	1033.46	284.68	0.78	842.22	475.92	0.64
1999	1468.56	640.74	827.82	0.44	861.59	606.97	0.59	773.43	695.12	0.53
2000	1672.63	750.00	922.63	0.45	979.26	693.37	0.59	812.50	860.13	0.49
2001	1336.06	757.36	578.70	0.57	998.82	337.25	0.75	820.93	515.14	0.61
2002	1383.37	734.38	648.99	0.53	952.58	430.79	0.69	791.17	592.20	0.57
2003	1295.67	664.15	631.52	0.51	922.92	372.74	0.71	784.95	510.71	0.61
2004	1621.56	795.08	826.48	0.49	1001.45	620.11	0.62	818.89	802.68	0.50
2005	1596.35	753.36	842.99	0.47	847.35	749.00	0.53	591.49	1004.86	0.37

4. Conclusion

The performance analysis of the LASH, MHD, and VIC hydrological models was conducted in the Verde River basin. The model performance can vary greatly depending of the hydrological conditions, such as in the floods and droughts. Overall, the hydrological models were able to simulate the average daily discharges in the basin. During calibration and validation, LASH and MHD demonstrated better performance when compared to VIC, which presented significant problems in simulating the dry period. As a result, the results of LNASH were less than 0.5 in this case.

Several aspects regarding the results obtained by VIC reflect the calibration type (manual and with defined limits), as well as uncertainties related to different model structures, which led to unsatisfactory results. Nevertheless, the model has the potential for use as a tool to prediction of peak flows and can be important for a decision of support for flood management.

The results demonstrated that LASH and MHD were able to simulate discharges with a high degree of accuracy, making them important tools for managing water resources in the basins in this study region.

Author Contributions Conceptualization, Conceição de M. M. de Oliveira; Lívia A. Alvarenga; Methodology, Conceição de M. M. de Oliveira; Lívia A. Alvarenga; Samuel Beskow; Zandra Almeida da Cunha; Marcelle Martins Vargas; Pâmela A. Melo; Javier Tomasella; Ana Carolina N. Santos; Vinicius S. O. Carvalho; Validation, Conceição de M. M. de Oliveira; Lívia A. Alvarenga; Samuel Beskow; Zandra Almeida da Cunha; Marcelle Martins Vargas; Javier Tomasella; Formal Analysis, Conceição de M. M. de Oliveira; Lívia A. Alvarenga; Vinicius S. O. Carvalho; Vinicius Oliveira Silva; Investigation, Conceição de M. M. de Oliveira; Writing – Original Draft Preparation, Conceição de M. M. de Oliveira; Lívia A. Alvarenga; Writing – Review & Editing, Conceição de M. M. de Oliveira; Lívia A. Alvarenga; Samuel Beskow; Zandra Almeida da Cunha; Marcelle Martins Vargas; Pâmela A. Melo; Javier Tomasella; Ana Carolina N. Santos; Vinicius S. O. Carvalho; Vinicius Oliveira Silva; Supervision, Lívia A. Alvarenga.

References

- Pacheco, F.A.L. Regional Groundwater flow in hard rocks. *SCI. Total Environ.* **2015**, 506-507, 182-195; DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2014.11.008>.
- Alvarenga, L.A.; Mello, C.R.; Colombo, A.; Cuartas, L.A.; Chou, S.C. Hydrological responses to climate changes in a headwater watershed. *Ciênc. Agrotec.* **2016**, 40, 647-657; DOI: <https://doi.org/10.1590/1413-70542016406027716>.
- Alvarenga, L.A.; Mello, C.R.; Colombo, A.; Cuartas, L.A. Performance of a distributed hydrological model based on soil and moisture zone maps. *Rev. Bras. Cienc. Solo.* **2017**, 41, e0160551; DOI: <https://doi.org/10.1590/18069657rbc20160551>.
- Martínez-Santiago, S.; López-Santos, A.; González-Cervantes, G.; Esquivel-Arriaga, G. Evaluating the impacts of climate change on soil erosion rates in central Mexico. *AIMS Geosci.* **2017**, 3, 327-351.
- Carvalho, V.S.O.; da Cunha, Z.A.; Alvarenga, L.A.; Beskow, S.; de Mello, C.R.; Martins, M.A.; Oliveira, C.M.M. Assessment of land use changes in the Verde River basin using two hydrological models. *J. South Am. Earth Sci.* **2022**, 118, 103954; DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jsames.2022.103954>.
- Orth, R.; Staudinger, M.; Seneviratne, S.I.; Seibert, J.; Zappa, M. Does model performance improve with complexity? A case study with three hydrological models. *J. Hydrol.* **2015**, 523, 147-159; DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2015.01.044>.
- Alvarenga, L.A.; Carvalho, V.S.O.; Oliveira, V.A.; Mello, C.R.; Colombo, A.; Tomasella, J.; Melo, P.A. Hydrological simulation with SWAT and VIC Models in the Verde River Watershed, Minas Gerais. *Rev. Ambient. Água.* **2020**, 15, e2492; DOI: <https://doi.org/10.4136/1980-993X>.
- Arnold, J.G.; Srinivasan, R.; Mutiah, R.S.; Williams, J.R. Large area hydrologic modeling and assessment part I: model development. *J. Am. Water Resour. Assoc.* **1998**, 34, 73-89; DOI: <https://doi.org/10.1111/j.1752-1688.1998.tb05961.x>.
- Neitsch, S.L.; Arnold, J.G.; Kiniry, J.R.; Williams, J.R. *Soil and water assessment tool theoretical documentation version 2009*. Texas: College Station, Texas Water Resources Institute, 2011.
- Liang, X.; Lettenmaier, D.P.; Wood, E.F.; Burges, S.J. A simple hydrologically based model of land surface water and energy fluxes for general circulation models. *J. Geophys. Res.* **1994**, 99, 14415-14428; DOI: <https://doi.org/10.1029/94JD00483>.

11. Liang, X.; Wood, E.F.; Lettenmaier, D.P. Surface soil moisture parameterization of the VIC-2L model: evaluation and modification. *Glob. Planet. Change*. **1996**, *13*, 195-206; DOI: [https://doi.org/10.1016/0921-8181\(95\)00046-1](https://doi.org/10.1016/0921-8181(95)00046-1).
12. Liang, X.; Xie, Z. A new surface runoff parameterization with subgrid-scale soil heterogeneity for land surface models. *Adv. Water Resour.* **2001**, *24*, 1173-1193; DOI: [https://doi.org/10.1016/S0309-1708\(01\)00032-X](https://doi.org/10.1016/S0309-1708(01)00032-X).
13. Viola, M.R.; De Mello, C.R.; Chou, S.C.; Yanagi, S.N.; Gomes, J.L. Assessing climate change impacts on Upper Grande River basin hydrology, southeast Brazil. *Int. J. Climatol.* **2015**, *35*, 1054-1068; DOI: <https://doi.org/10.1002/joc.4038>.
14. Mello, C.R.; Vieira, N.P.; Guzman, J.A.; Viola, M.R.; Beskow, S.; Alvarenga, L.A. Climate change impacts on water resources of the largest hydropower plant reservoir in Southeast Brazil. *Water*. **2021**, *13*, 1560; DOI: <https://doi.org/10.3390/w13111560>.
15. Beskow, S.; Mello, C.R.; Norton, L.D. Development, sensitivity and uncertainty analysis of LASH model. *Sci. Agric.* **2011**, *68*, 265-274; DOI: <https://doi.org/10.1590/S0103-90162011000300001>.
16. Rodriguez, D.A.; Tomasella, J. On the ability of largescale hydrological models to simulate land use and land cover change impacts in Amazonian basins. *Hydrol. Sci. J.* **2016**, *61*, 1831-1846; DOI: <https://doi.org/10.1080/02626667.2015.1051979>.
17. Falck, A.S.; Maggioni, V.; Tomasella, J.; Vila, D.A.; Diniz, F.L. Propagation of satellite precipitation uncertainties through a distributed hydrologic model: A case study in the Tocantins-Araguaia basin in Brazil. *J. Hydrol.* **2015**, *527*, 943-957; DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2015.05.042>.
18. Mohor, G.S.; Rodriguez, D.A.; Tomasella, J.; Júnior, J.L.S. Exploratory analyses for the assessment of climate change impacts on the energy production in an Amazon run-of-river hydropower plant. *J. Hydrol. Reg. Stud.* **2015**, *4*, 41-59; DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ejrh.2015.04.003>.
19. Melo, P.A.; Alvarenga, L.A.; Tomasella, J.; Santos, A.C.; Mello, C.R.; Colombo, A. On the performance of conceptual and physically based modelling approach to simulate a headwater catchment in Brazil. *J. South Am. Earth Sci.* **2022**, *114*, 103683; DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jsames.2021.103683>.
20. Zákha, E.M.S.; Alvarenga, L.A.; Tomasella, J.; Martins, M.A.; Santos, A.C.N.; Melo, P.A. Impactos das mudanças climáticas em uma bacia hidrográfica no Sul do Estado de Minas Gerais. *Rev. Bras. Meteorol.* **2022**, *36*, 667-681; DOI: <https://doi.org/10.1590/0102-7786360002>.
21. Oliveira, K.D.; Tomasella, J.; de Oliveira Caram, R.; Falck, A.S. Impacts of sugarcane expansion on water availability in a river basin in southeastern Brazil. *Catena*. **2022**, *216*, 106437; DOI: <https://doi.org/10.1016/j.catena.2022.106437>.
22. Junqueira Júnior, J. A. *Escoamento de nascentes associado à variabilidade espacial de atributos físicos e uso do solo em uma bacia hidrográfica de cabeceira do Rio Grande, MG*. Tesis. Lavras, Brazil, Federal University of Lavras, **2006**.
23. Mello, C.R.; Norton, L.D.; Curi, N.; Yanagi, S.N.M. Sea surface temperature (SST) and rainfall erosivity in the Upper Grande River Basin, Southeast Brazil. *Ciênc. Agrotec.* **2012**, *36*, 53-59; DOI: <http://dx.doi.org/10.1590/S1413-70542012000100007>.
24. Alvares, C.A.; Stape, J.L.; Sentelhas, P.C.; de Moraes Gonçalves, J.L.; Sparovek, G. Köppen's climate classification map for Brazil. *Meteorol. Z.* **2013**, *22*, 711-728; DOI: <https://doi.org/10.1127/0941-2948/2013/0507>.
25. Viola, M.R. *Simulação hidrológica na cabeceira da Bacia Hidrográfica do Rio Grande de cenários de usos do solo e mudanças climáticas A1B*. Tesis. Lavras, Brazil, Federal University Federal of Lavras, **2011**.
26. Mishra, S.K.; Tyagi, J.V.; Singh, V.P.; Singh, R. SCS-CN-based modeling of sediment yield. *J. Hydrol.* **2006**, *324*, 301-322; DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2005.10.006>.
27. Mello, C.D.; Viola, M.R.; Norton, L.D.; Silva, A.M.; Weimar, F.A. Development and application of a simple hydrologic model simulation for a Brazilian headwater basin. *Catena*. **2008**, *75*, 235-247; DOI: <https://doi.org/10.1016/j.catena.2008.07.002>.
28. Lohmann, D.; Nolte-Holube, R.; Raschke, E. Um modelo de roteamento horizontal em larga escala a ser acoplado a esquemas de parametrização da superfície terrestre. *Tellus*. **1996**, *48*, 708-721.
29. Lohmann, D.; Raschke, E.; Nijssen, B.; Lettenmaier, D.P. Hidrologia em escala regional: II. Aplicação do modelo VIC-2L ao rio Weser, Alemanha. *Rev. Hidrol. Cienc.* **1998**, *43*, 143-158.
30. Siqueira Júnior, J.L.; Tomasella, J.; Rodriguez, D.A. Impacts of future climatic and land cover changes on the hydrological regime of the Madeira River basin. *Clim. Change*. **2015**, *129*, 117-129; DOI: <https://doi.org/10.1007/s10584-015-1338-x>.
31. INMET. *Webpage*. 2019. Available online: <http://www.inmet.gov.br/portal> (accessed on 24 April 2022).

32. Santos, H.G.; Jacomine, P.K.T.; Anjos, L.H.C.; Oliveira, V.A.; Lumbrreras, J.F.; Coelho, M.R., Almeida, J.A.; Araujo Filho, J.C.; Oliveira, J.B.; Cunha, T.J.F. *Sistema Brasileiro de Classificação de Solos*. Rio de Janeiro: EMBRAPA Solos, 2018.
33. Beskow, S.; Norton, L.D.; Mello, C.R. Previsão Hidrológica em uma bacia hidrográfica dominada por Oxisols usando um modelo hidrológico distribuído. *Water Res.* **2013**, *27*, 341-363.
34. Caldeira, T.L; Mello, C.R; Beskow, S; Timm, L.C; Viola, M.R. LASH hydrological model: An analysis focused on spatian discretization. *Catena.* **2019**, *173*, 183-193; DOI: <https://doi.org/10.1016/j.catena.2018.10.009>.
35. Marques Filho, A.O.; Dallarosa, R.G.; Pachêco, V.B. Radiação solar e distribuição vertical de área foliar em floresta: reserva biológica do Cuieiras, ZF2, Manaus. *Acta Amazon.* **2005**, *35*, 427-436; DOI: <https://doi.org/10.1590/S0044-596720050004000007>.
36. Miranda, A.C.; Miranda, H.S.; Lloyd, J.; Grace, J.; Mcyntire, J.A.; Meir, P.; Riggan, P.; Lockwood, R.; Brass, J. O dióxido de carbono fluxes sobre um cerrado sensu stricto no centro do Brasil. In: Gash, J.H.C.; Nobre, C.A.; Roberts, J.M., Victoria, R.L. (eds) *Desmatamento amazônico e clima*. New York, Estados Unidos: Scariot & Sevilha, **1996**. pp. 353-364.
37. Almeida, A.C.; Soares, J.V. Comparação entre uso de água em plantações de eucalipto grandis e floresta ombrófila densa (mata Atlântica) na costa leste do Brasil. *Rev. Arvore.* **2003**, *27*, 159-170; DOI: <https://doi.org/10.1590/S0100-67622003000200006>.
38. Shuttleworth, W.J. Evaporation. In: Maidment, D.R. *Handbook of hydrology*. New York: McGraw-Hill, **1993**. pp. 1-53.
39. Tomasella, J.; Sene Gonçalves, A.; Schneider Falck, A.; Oliveira Caram, R.; Rodrigues Diniz, F.L.; Rodriguez, D.A.; Chagas Siquiera, G. Probabilistic flood forecasting in the Doce Basin in Brazil: Effects of the basin scale and orientation and the spatial distribution of rainfall. *J. Flood Risk Manag.* **2019**, *12*, e12452; DOI: <https://doi.org/10.1111/jfr3.12452>.
40. Duan, Q.; Sorooshian, S.; Gupta, V. Otimização global eficaz e eficiente para modelos conceituais de escoamento de chuvas. *Pesq. Recur. Híd.* **1992**, *28*, 1015-1031.
41. Gao, H.; Tang, Q.; Shi, X.; Zhu, C.; Bohn, T.; Su, F.; Sheffield, J.; Pan, M.; Lettenmaier, D.; Wood, E.F. Registro de Orçamento de Água da Capacidade de Infiltração Variável (VIC). In: *Algorithm Theoretical Basis Document*. Seattle, Estados Unidos: Universidade de Washington, **2010**. pp. 120-173.
42. Zitzler, E.; Laumanns, M.; Thiele, L. SPEA2: Improving the strength Pareto evolutionary algorithm. *TIK-report.* **2001**, *103*, 1-21; DOI: <https://doi.org/10.3929/ethz-a-004284029>.
43. Nash, J.E.; Sutcliffe, J.V. River flow forecasting through conceptual models part I—A discussion of principles. *J. Hydrol.* **1970**, *10*, 282-290; DOI: [https://doi.org/10.1016/0022-1694\(70\)90255-6](https://doi.org/10.1016/0022-1694(70)90255-6).
44. Yapo, P.O.; Gupta, H.V.; Sorooshian, S. Automatic calibration of conceptual rainfall-runoff models: Sensitivity to calibration data. *J. Hydrol.* **1996**, *181*, 23-48; DOI: [https://doi.org/10.1016/0022-1694\(95\)02918-4](https://doi.org/10.1016/0022-1694(95)02918-4).
45. Gupta, H.V.; Sorooshian, S.; Yapo, P.O. Estado de calibração automática para modelos hidrológicos: Comparação com calibração de especialistas multinível. *Diário do Engenheiro Hidrológico*, **1999**, *4*, 135-143.
46. Gupta, H.V.; Kling, H.; Yilmaz, K.K.; Martinez, G.F. Decomposition of the mean squared error and NSE performance criteria: Implications for improving hydrological modelling. *J. Hydrol.* **2009**, *377*, 80-91; DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2009.08.003>.
47. Moriasi, D.N.; Gitau, M.W.; Pai, N.; Daggupati, P. Hydrologic and water quality models: Performance measures and evaluation criteria. *Trans. ASABE.* **2015**, *58*, 1763-1785; DOI: <https://doi.org/10.13031/trans.58.10715>.
48. Viola, M.R.; de Mello, C.R.; Beskow, S.; Norton, L.D. Applicability of the LASH model for hydrological simulation of the Grande River Basin, Brazil. **2013**, *18*, 1639-1652.
49. Singh, S.K.; Marcy, N. Comparison of Simple and Complex Hydrological Models for Predicting Catchment Discharge Under Climate Change. *AIMS Geosciences.* **2017**, *3*, 467-49; DOI: <http://dx.doi.org/10.3934/geosci.2017.3.467>.

**ARTIGO 2 - PROJEÇÃO DE EVENTOS DE SECA METEOROLÓGICA E
HIDROLÓGICA NA BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO VERDE**

**Artigo redigido conforme a NBR 6022 (ABNT, 2018) e formatado de acordo com o
Manual da UFLA de apresentação de teses e dissertações.**

RESUMO

A seca é um fenômeno natural danoso que, associado aos efeitos da mudança climática, pode gerar prejuízos, em diversas atividades produtivas, principalmente as que são dependentes dos recursos hídricos. Esta pesquisa objetiva analisar o comportamento e a frequência das secas meteorológicas e hidrológicas, 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 meteorológicas e o SSFI, para secas hidrológicas, a partir de vazões simuladas pelos modelos hidrológicos SWAT e VIC. Para o clima presente (1961-2005), os índices SPEI e SPI apresentaram resultados semelhantes com relação a eventos extremos de seca. Para o clima futuro (2005-2099), o SPI apresentou distribuições e frequência de secas simuladas semelhantes para o RCP4.5 e o RCP8.5, enquanto o SPEI, por sua vez, simulou comportamentos diferentes entre os cenários, especialmente o RCP8.5, para o qual foi indicado um sério risco de ocorrência de megasseca, a partir de 2079/2080, pela diminuição da precipitação e aumento da temperatura. No clima futuro, o SSFI simulou secas extremas, para o RCP4.5 e, para o RCP8.5, secas moderadas seguidas por secas severas. 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 por causa da dimensão da bacia. Uma vez que a região possui setores fortemente dependentes dos recursos hídricos, esses resultados podem contribuir para a tomada de decisões, fornecendo subsídios ao planejamento de políticas e estratégias que visem minimizar os impactos das secas na região.

Palavras-chave: Mudanças climáticas. Seca meteorológica. Seca hidrológica. SWAT, VIC.

1 INTRODUÇÃO

Os efeitos 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 (Rana et al., 2014; Taye et al., 2015). A seca é considerada um fenômeno natural complexo com efeito danoso que pode atingir vários setores produtivos (Liu e Zhang 2002; Gao e Yang 2009). Desde as últimas décadas, esses desastres naturais têm se tornado cada vez mais frequentes, expondo bilhões de pessoas a riscos significativos. 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 40% da população mundial, com a possibilidade de que até 700 milhões de pessoas sob risco sejam deslocadas de suas residências até o ano de 2030.

A seca é um fenômeno para cuja definição não há consenso. Vicente Serrano et al. (2022) afirmam que secas ocorrem, quando os recursos hídricos são insuficientes, para atender as necessidades das pessoas ou do meio ambiente e, como resultado, há um impacto negativo em ambos. Por outro lado, Dai et al. (2020) definem secas como um déficit prolongado de precipitação sobre uma região.

Secas podem ser tipicamente divididas em cinco categorias: i) meteorológica, que se refere à falta prolongada de precipitação sobre uma grande área; ii) hidrológica, que se refere à redução dos níveis de água dos recursos hídricos superficiais e subterrâneos; iii) agrária, que se refere ao déficit da umidade do solo que limita o crescimento vegetal; iv) socioeconômica, que se refere ao déficit dos recursos hídricos ligados à qualidade de vida da população; e v) ecológica, que se refere a um episódio de seca que força os ambientes aos seus limites de vulnerabilidade e que impacta diretamente os serviços ecológicos (Agha Kouchak et al., 2015; Cuartas et al., 2022; Mishra e Singh, 2010; Vicente-Serrano et al., 2010).

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 (Dai et al., 2018; Manning et al., 2018; Van Loof, 2015; Vicente Serrano et al., 2022).

De acordo com Vicente-Serrano et al. (2012), índices de seca permitem a comparação de eventos de seca, entre diferentes regiões, independentemente de suas características climáticas locais. Vários índices foram desenvolvidos, usando métodos de padronização, como o Índice de Precipitação Padronizada (*Standardized Precipitation Index* – SPI, McKee et al., 1993), o Índice Padronizado de Precipitação-Evapotranspiração (SPEI, *Standardized Precipitation Evapotranspiration Index*, Vicente-Serrano et al., 2010) e o Índice Padronizado de Vazão (SSFI, *Standardized Streamflow Index*, Modarres, 2007; Vicente-Serrano et al., 2011).

Desenvolvido por McKee, Doesken e Kleist (1993), o Índice de Precipitação Padronizado (SPI) é amplamente utilizado, para avaliar o déficit ou superávit de precipitação, em um determinado local e tem sido aplicado em muitos estudos sobre secas (Junqueira et al., 2020; Kattelus et al., 2016; Kwon et al., 2019; Preethi et al., 2019; Rodrigues et al., 2019; Junqueira et al., 2022, Silva et al., 2022). Além disso, o SPI é capaz de monitorar o déficit de precipitação, em várias escalas temporais, o que o torna uma ferramenta valiosa para a avaliação da severidade das secas (Pai et al., 2011; Stricevic et al., 2011).

A Organização Meteorológica Mundial (WMO) considera o SPI como o índice padrão para a determinação de secas (Hayes et al., 2011). No Brasil, os estudos que utilizam o SPI têm se concentrado na região Sudeste (Coelho et al., 2015; Marengo et al., 2015; Silva e Mello, 2021, Sobral et al., 2018) e Nordeste (Brito et al., 2017; Costa et al., 2020; Freitas et al., 2022). Além disso, por considerar a demanda atmosférica de água, por meio da evapotranspiração, o SPEI tem se mostrado um índice mais complexo e eficaz no diagnóstico de tendências de secas (Vicente Serrano et al., 2022). No Brasil, o SPEI tem sido aplicado, em estudos no semiárido do Nordeste (Medeiros et al., 2022), em Minas Gerais (Silva et al., 2022) e na região Amazônica (Vega et al., 2019, Millán et al., 2022).

O índice SSFI tem sido uma importante ferramenta, para avaliar a transição de secas meteorológicas para secas hidrológicas, permitindo comparações das condições hidrológicas em um curso d'água (Shamshirband et al., 2020). No Brasil, diversos estudos têm sido conduzidos utilizando o SSFI. Cuartas et al. (2022) aplicaram o índice, para diversas bacias na região Sudeste, a fim de verificar os impactos da seca de 2014/2015 e constataram que os efeitos são sentidos até hoje. Junqueira et al. (2020) avaliaram a bacia do rio Tocantins e observaram que a ocorrência de secas meteorológicas impacta diretamente as vazões, em longo prazo, ou seja, há uma forte correlação entre o SPI e o SSFI.

A compreensão dos eventos extremos de seca, dos processos que levam à sua ocorrência e das projeções de seus impactos, em uma região, pode ser realizada por meio de Modelos Climáticos Globais (GCMs). No entanto esses eventos são desafiadores para serem modelados, uma vez que são raros e ocorrem em uma resolução menor que a apresentada pelos GCMs (Parmesan et al., 2022). Nesse sentido, os modelos hidrológicos, geralmente acoplados a modelos regionais (RCMs), são importantes ferramentas para projeções e têm sido utilizados para melhor compreender os impactos das alterações futuras no balanço hídrico associado às mudanças climáticas (Alvarenga et al., 2018).

No Brasil, os modelos regionais de clima (RCMs) 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 o Índice de Precipitação Padronizada (SPI), como mostrado em estudos anteriores (Silva et al., 2022; Silva e Mello, 2021; Lyra et al., 2018; Freitas et al., 2022) e o Índice Padronizado de Evapotranspiração e Precipitação (SPEI) (Silva et al., 2022; Nogueira et al., 2017; Cuartas et al., 2022).

Além disso, modelos hidrológicos, como o Modelo de Capacidade de Infiltração Variável (VIC) (Guo et al., 2009) e a Ferramenta de Avaliação de Água e Solo (SWAT) (Arnold et al., 1998; Srinivasan et al., 1998), têm sido utilizados para projetar secas hidrológicas até o final do século XXI em localidades brasileiras (Siqueira et al., 2020; Cuartas et al., 2022; Junqueira et al., 2020; Rodrigues et al., 2019).

Com base no exposto acima, este trabalho objetivava trazer, como novidade, a aplicação de índices de seca que buscam avaliar as tendências das secas meteorológicas e hidrológicas, no passado e no futuro, por meio da aplicação de modelos climáticos regionais, para a bacia do rio Verde, Minas Gerais, Brasil. Este estudo almeja, ainda, diagnosticar os possíveis impactos da seca na região, que atualmente é importante como produtora de energia e como polo de agronegócio.

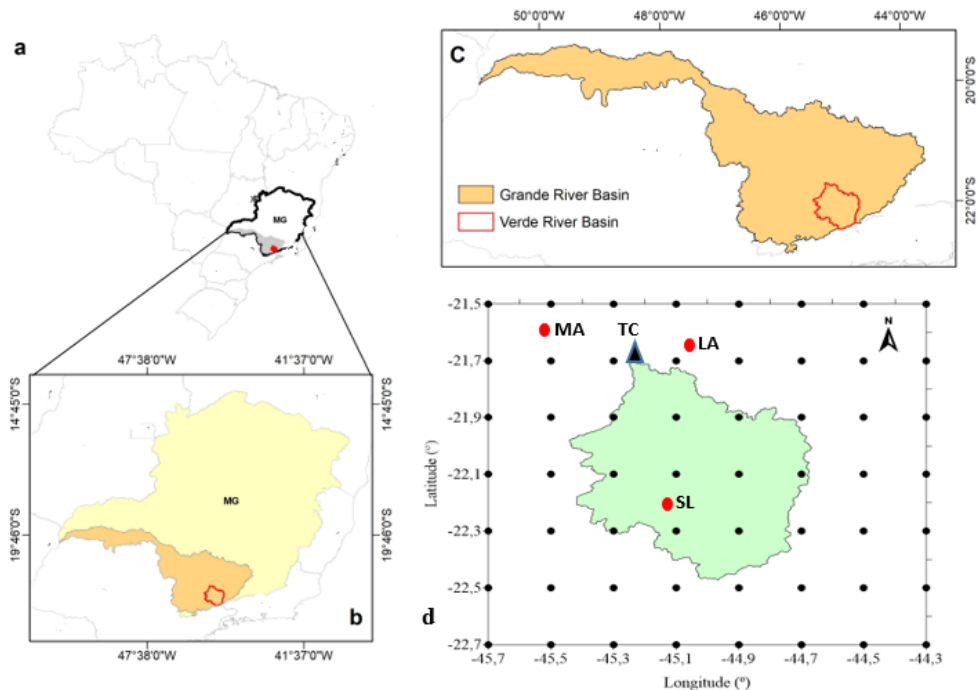
Portanto é necessário: (i) Analisar o comportamento e a frequência da seca meteorológica, a partir de projeções climáticas dos cenários RCP4.5 e RCP8.5, utilizando o ensemble dos modelos Eta-HadGEM2-ES, Eta-MIROC5 e Eta-CanESM2 na bacia hidrográfica do Rio Verde e (ii) Analisar o comportamento e a frequência 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.

2 METODOLOGIA

2.1 Bases de dados empregados

A bacia hidrográfica do Rio Verde (BHRV) situa-se, no sul do estado de Minas Gerais, Brasil, 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 2600 metros, próxima à divisa dos estados de Minas Gerais, São Paulo e Rio de Janeiro. O rio segue em direção a 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 809 m acima do nível do mar (PDRH-Rio Verde, 2010).

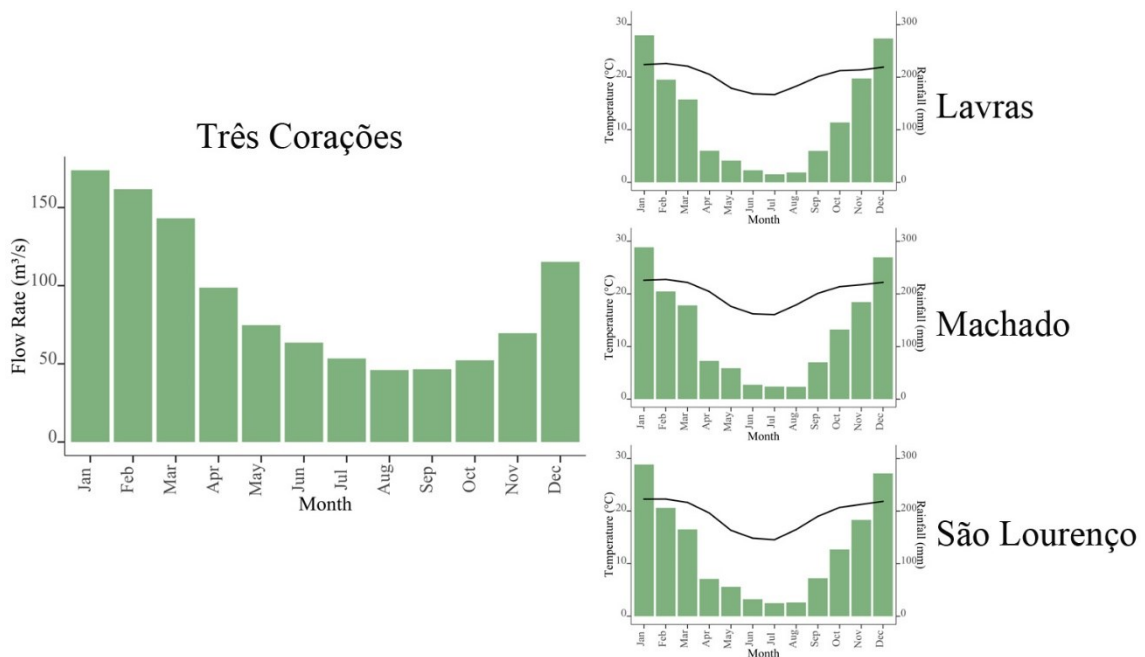
Figura 1 – a) Localização do Estado de Minas Gerais –MG - Brasil; b) Localização na Bacia Hidrográfica do Rio Grande -MG; c) Localização da Bacia Hidrográfica do Rio Verde; d) Estações climatológicas (LV - Lavras; MA - Machado; SL - São Lourenço) e estação fluviométrica Três Corações (TC) na Bacia hidrográfica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



Fonte: Da autora (2023).

Foram utilizados dados de temperatura e precipitação do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET), referentes a 3 (três) estações convencionais (Figura 1D). A estação de São Lourenço (SL; 22° 07' 48" S e 45° 02' 24" O) está localizada, no interior da bacia 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 a estação Três Corações (TC; 21° 42' 11" S, 45°14'51" O), cuja vazão média, em longo termo, corresponde a 91,7 m³/s. Os valores médios mensais de vazão, para Três Corações e os dados de precipitação e temperatura mensais, para Lavras, Machado e São Lourenço, podem ser observados na Figura 2.

Figura 2 – Gráfico das vazões médias mensais da estação fluviométrica Três Corações (1932-2014) e dados mensais de temperatura e precipitação para as estações climáticas de Lavras, Machado e São Lourenço (1961-2022).



Fonte: Da autora (2023).

As temperaturas, na região da bacia hidrográfica do Rio Verde, são predominantemente amenas, ao longo de todo o ano, com média anual, em torno de 18 a 19 °C, principalmente, em razão da orografia local. No verão, as temperaturas apresentam médias inferiores a 22 °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 (PDRH-Rio Verde, 2010).

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

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 (Guttman, 1999; Hayes et al., 2011; IPCC, 2021; Masson-Delmotte et al., 2021). O índice é calculado, a partir da distribuição de probabilidade gama da precipitação observada, em um período de tempo específico, geralmente mensal, 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. Para estimar a evapotranspiração potencial, é 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, constante psicrométrica), utilizando as temperaturas mensais (Vicente-Serrano, 2019). 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, geralmente mensal, 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, normalmente calculada em escala mensal ou anual. 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 (Gao et al., 2015).

Foi utilizada a distribuição gama 3 parâmetros 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 (WMO, 2012) (Tabela 1).

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

Classificação	Intervalo
Seca moderada	-1,00 a -1,49
Seca severa	-1,50 a -1,99
Seca extrema	$\leq -2,00$

Fonte: Adaptado de Mckee, Doesken e Kleist (1993); WMO (2012).

Para fins de comparação entre os índices, foi realizada uma análise de correlação linear de Pearson, para indicar a existência ou não de relação entre as variáveis, por meio do coeficiente de correlação (r), uma grandeza adimensional que varia entre -1 e +1. Se o coeficiente for positivo, as variáveis estão diretamente relacionadas e, se negativo, estão inversamente relacionadas. A Tabela 2 apresenta as faixas de classificação e interpretação do coeficiente de correlação de Pearson (r), considerando as correlações positivas.

2.3 Modelos hidrológicos VIC e SWAT

O modelo hidrológico de macroescala Variable Infiltration Capacity (VIC), desenvolvido por Liang et al. (1994, 1996), é semidistribuído 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 de base.

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). A evapotranspiração (transpiração da vegetação, evaporação do dossel e evaporação do solo nu) é baseada na equação de Penman-Monteith.

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

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.

O SWAT (*Soil & Assessment Water Tool*), desenvolvido pelo *Agricultural Research Service (ARS)* (Neitsch et al., 2005), é um modelo de simulação de base hidrológica e base semiconceitual que permite a análise de diferentes processos, em bacias hidrográficas, a partir de parâmetros espacialmente distribuídos em nível de sub-bacias. Tem como objetivo analisar os impactos das alterações, no uso e ocupação do solo sobre o escoamento superficial e subterrâneo, produção de sedimentos e qualidade da água (Srinivasan e Arnold, 1994).

As simulações SWAT são baseadas no balanço hídrico (Equação 2), realizado 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 URH e encaminhado para estimar o fluxo em cada sub-bacia.

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

em que 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.

A Tabela 2 apresenta um sumário dos modelos hidrológicos VIC e SWAT. Mais detalhes sobre a descrição das entradas, parâmetros e desempenho do SWAT e VIC podem ser encontrados em Alvarenga et al. (2020), Carvalho et al. (2021), Oliveira et al. (2018) e Oliveira et al. (2023).

Tabela 2 – Resumo geral modelos VIC e SWAT

CARACTERÍSTICAS	VIC	SWAT
Discretização	Semidistribuído (Liang et al., 1994)	Semidistribuído (Arnold et al., 1998)
Passo do tempo	Mensal	Mensal
Dados climáticos	Precipitação, temperatura do ar (máxima e mínima), velocidade dos ventos (Kimball et al., 1997)	Precipitação, temperatura do ar (máxima e mínima), radiação solar, umidade relativa e velocidade do vento (Arnold et al., 2012)
Módulo de calibração utilizado	Calibração manual	Calibração automática. SUFI-2 (Abbaspour et al., 2007)
Cálculo da evapotranspiração potencial	Penman-Monteith (1965)	Penman- Monteith (1965)
Cálculo da infiltração e escoamento superficial	Curva de infiltração variável (Zhao et al., 1980). A propagação do escoamento superficial e subterrâneo é feita por meio do modelo Route (Lohmann et al., 1996, 1998)	Equação de infiltração de Green-Ampt e Método SCS
Desenvolvido e aplicado	Em grandes bacias (Beckers; Smerdon; Wilson, 2009; Liang et al., 1994)	Em pequenas a grandes bacias (Abbaspour et al., 2015; Bressiani et al., 2015)

Fonte: Da autora (2023).

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 Abbaspur et al. (2007). A resolução espacial de 30 m foi utilizada, com um total de 57 sub-bacias e 1503 unidades de resposta hidrológica.

Na Tabela 3 constam os índices estatísticos utilizados, para a avaliação do desempenho dos modelos VIC e SWAT, nas etapas de calibração e validação, obtidos anteriormente por Carvalho et al. (2021). Segundo os autores, os valores de R^2 e NSE maiores que 0,5, Pbias menor que |25%| e Log NSE acima de 0,4 indicaram um desempenho satisfatório dos modelos para a previsão da vazão mensal na BHRV.

Tabela 3 - Índices estatísticos utilizados para a avaliação do desempenho dos modelos SWAT e VIC aplicados à BHRV.

Índices Estatísticos	Modelos Hidrológicos			
	SWAT		VIC	
	Calibração	Validação	Calibração	Validação
NSE	0,86	0,81	0,86	0,83
NSELog	0,84	0,78	0,54	0,42
R ²	0,87	0,84	0,92	0,93
Pbias (%)	0,45	-8,29	14,8	13,88

Fonte: adaptado de Carvalho et al. (2021).

2.4 Projeção de mudanças climáticas

As projeções de mudança do clima presente e futuro foram obtidas na Plataforma de Projeções de Mudança do Clima para a América do Sul. As simulações climáticas utilizadas nesta 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 et al., 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 (Chou et al., 2012; Marengo et al., 2012; Mesinger et al., 2012; Pesquero et al., 2010).

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. De acordo com o Sexto Relatório de Avaliação do Painel

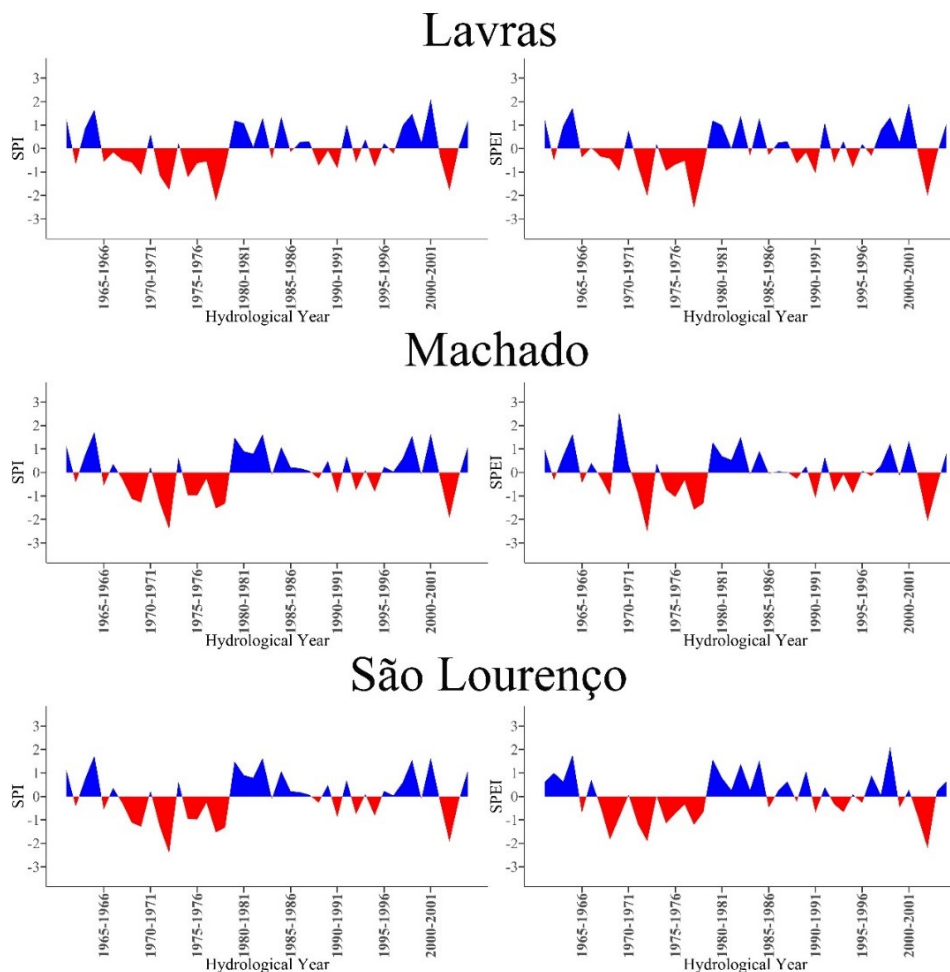
Intergovernmental sobre Mudanças Climáticas (IPCC, 2021), o uso de ensemble é essencial, para avaliar as incertezas nos resultados das simulações climáticas, especialmente em áreas em que a projeção é particularmente difícil. Dessa forma, valores médios dos três modelos regionais (Eta/HadGEM2-ES, Eta/CANES e Eta/MIROC5) foram utilizados, para o cálculo do Índice de Precipitação Padronizado (SPI) e do Índice Padronizado de Precipitação e Evapotranspiração (SPEI) e *Standardized Streamflow Index* (SSFI), para o clima presente e clima futuro, tanto para o RCP4.5, quanto para o RCP8.5.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 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 3). 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 mais precisos e confiáveis.

Figura 3 - Comportamento dos Índices de Seca SPI e SPEI no Clima Presente (1961-2005) para as estações Lavras, Machado e São Lourenço na BHRV.



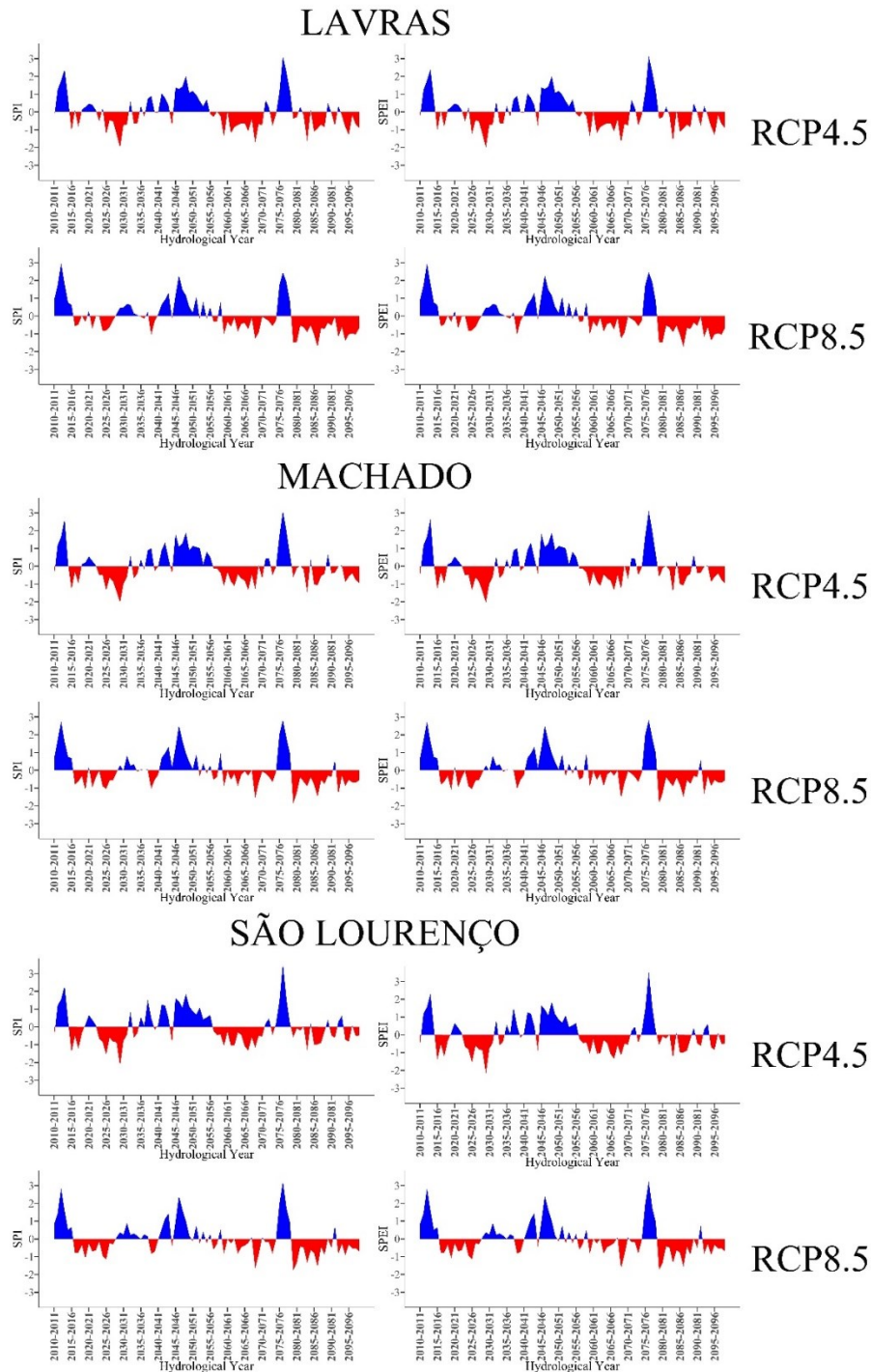
Fonte: Da autora (2023).

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.

A análise dos resultados mostrou que os valores do SPEI foram geralmente menores 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, cujos valores do SPEI foram de 10 a 20% inferiores, em relação aos valores do SPI, no mesmo ano. Esse resultado permite inferir que a inclusão da evapotranspiração nos índices de seca pode melhorar a caracterização dos eventos de seca (Gao et al., 2019, Silva e Mello, 2022).

A Figura 4 apresenta o comportamento dos índices SPI (*Standardized Precipitation Index*) e SPEI (*Standardized Precipitation Evapotranspiration Index*), 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 4 - Comportamento do Índice Seca SPI e SPEI no Clima futuro (2005-2099) nas estações Lavras, Machado e São Lourenço na BHRV.



Fonte: Da autora (2023).

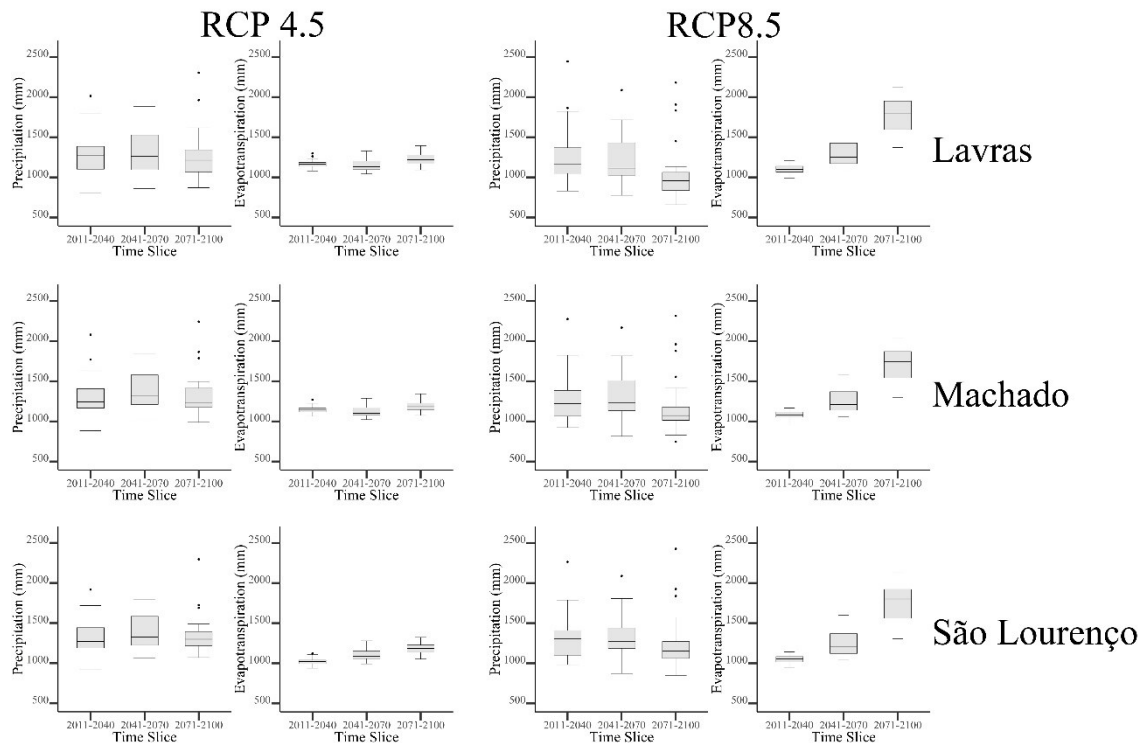
Ao analisar o SPEI, observa-se que o comportamento entre os dois cenários foi diferente. Considerando o cenário RCP4.5, foram observados eventos extremos de seca, nos anos hidrológicos de 2083/2084 (SPEI = -2.38, -2.76, -2.06) e 2098/2099 (SPEI = -2.40, -2.36, -2.27) para as cidades de Lavras, Machado 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. 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 8.5 podem ser explicadas pela análise de Box-plot da precipitação e da evapotranspiração apresentados na Figura 5. 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.

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, visto 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, conjuntamente, duas variáveis que intensificam a presença de secas no final do século XXI. Assim, essas alterações poderão afetar a disponibilidade de água no futuro (Martins et al., 2023), com a redução da precipitação, a diminuição hídrica na bacia hidrográfica, podendo levar à escassez de água para todos os setores dependentes dos recursos hídricos na região, em especial, ao 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 em função da falta de água potável e proliferação de doenças de veiculação hídrica (Viola et al., 2015; Oliveira et al., 2019; Rodrigues et al., 2020; Vieira et al., 2021).

Figura 5 - Representação do comportamento dos índices de seca, por meio do boxplot, em cada cenário RCP4.5 e RCP8.5, para as localidades Lavras, Machado e São Lourenço.



Fonte: Da autora (2023).

Os impactos socioeconômicos de uma megasseca podem ser devastadores para uma região, podendo atingir grandes extensões dependendo de sua duração. Esse 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 (Garreaud et al., 2017; Vuille et al., 2015).

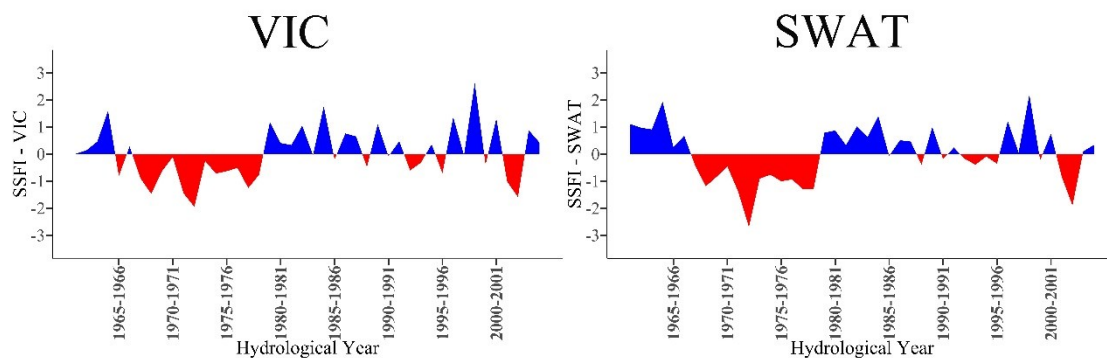
A BHRV está localizada no Sul do estado, região considerada um dos polos da produção de café. O efeito do aumento da temperatura pode levar à redução da produtividade em diferentes estágios fisiológicos da cultura do café (Carmargo, 2009). Isso porque as fases de crescimento e amadurecimento dos frutos podem ser aceleradas, muitas vezes, resultando em perda de qualidade do grão, crescimento ou anormalidades, como o amarelecimento das folhas (Damatta e Ramalho, 2006). A fase de floração também pode ser afetada, especialmente em uma condição de seca prolongada, podendo resultar no aborto de flores (Carmargo, 2009).

3.2 Projeção dos impactos da seca hidrológica

Dada a localização da área de estudo, em uma região associada à atividade agropecuária e à produção de energia hidroelétrica, aprimorar a sustentabilidade, na gestão dos recursos hídricos e buscar o equilíbrio em seus usos, torna-se de extrema importância. A eficácia do gerenciamento dos recursos hídricos depende da identificação precoce da ocorrência de secas hidrológicas e da obtenção de informações para alerta de emergências.

A Figura 6 apresenta a série histórica de SSFI simulados para BHRV. Verificou-se que apenas um valor de seca extrema (SSFI = -2.69; 1972/1973) foi simulada, por meio do modelo hidrológico SWAT, enquanto nenhuma foi obtida, por meio do modelo hidrológico VIC.

Figura 6 - Evolução temporal do índice (SSFI) considerando o clima presente (1961-2005) na BHRV.



Fonte: Da autora (2023).

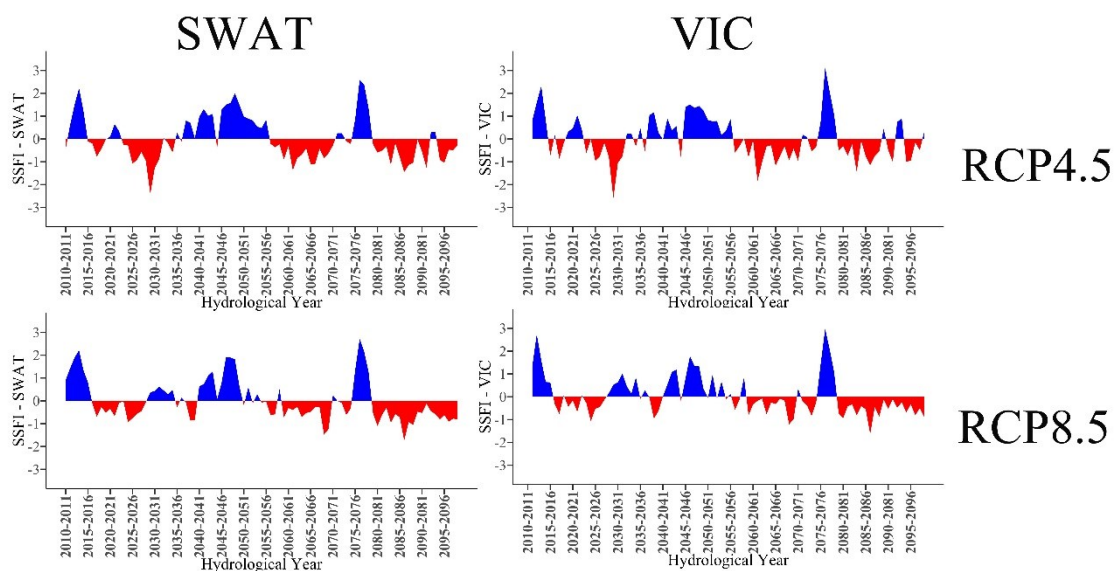
Li et al. (2020) estudaram a propagação da seca meteorológica para a seca hidrológica na bacia do Rio Shaying, China, dividindo-a em quatro sub-bacias com dimensões diferentes. Os autores constataram que a bacia com menor dimensão apresentou tempo de propagação mais curto. Porém os autores enfatizam que o tempo de propagação da seca meteorológica, para a seca hidrológica, não depende apenas do tamanho da bacia, mas também do tempo de concentração da vazão, que pode ser afetado pela elevação, inclinação e uso e ocupação do solo. Dessa forma, o efeito da seca meteorológica sobre a seca hidrológica na BHRV ocorre quase simultaneamente pela dimensão da bacia (4.100km²), além de outros fatores como o uso e ocupação do solo, além de outros aspectos físicos da bacia.

Os resultados obtidos para o SSFI, no clima futuro (2005-2099), para os cenários RCP4.5 e RCP8.5 (Figura 7), 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, apenas de intensidade severa.

Figura 7 - Representação dos modelos hidrológicos SWAT e VIC, para o Índice seca hidrológica (SSFI), considerando o clima presente (2005-2099) para a BHRV.



Fonte: Da autora (2023).

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. Oliveira et al. (2017) utilizaram o modelo hidrológico SWAT, para simulação do comportamento hidrológico da cabeceira da Bacia do Rio Grande, a fim de avaliarem os impactos das mudanças climáticas nas vazões e no potencial hidrelétrico da região. Os autores observaram uma redução da precipitação e vazão para os cenários RCP4.5 e RCP8.5, sendo os maiores impactos relacionados às mudanças climáticas durante o terceiro período

(2071-2099). Os resultados indicaram reduções no potencial hidrelétrico, com diminuições na produção anual de energia que variaram de 6,1 a 58,6% ao longo do século XXI.

Carvalho et al. (2021) analisaram a simulação da vazão mensal, utilizando os modelos VIC e SWAT, nos cenários RCP4.5 e RCP 8.5. Os autores verificaram que, para o modelo SWAT, a vazão média anual apresentou uma diminuição de 12,6% (RCP4.5) e 51,5% (RCP8.5) para o final do século. No mesmo período, o modelo VIC indicou uma redução de 39,6% em relação ao RCP8.5 e um aumento de 12,1% no RCP4.5, que ocorreu entre janeiro e agosto.

Rodrigues et al. (2019) analisaram o comportamento das secas meteorológicas e hidrológicas, utilizando cenários RCP4.5 e RCP8.5, nas bacias hidrográficas do Cerrado, a fim de identificarem os impactos das mudanças climáticas na vazão. Os resultados mostraram uma diminuição dos valores nos rios analisados para todos os cenários projetados. Grandes eventos de secas extremas meteorológicas e hidrológicas foram registrados, a partir dos anos de 2000, os quais afetaram a região Sudeste e Nordeste do Brasil (Melo et al., 2016; Marengo et al., 2017; Brito et al., 2021). Esses eventos, nesse período de grande intensidade, não foram identificados na BHRV.

Algumas alterações ou modificações no tipo de uso da terra poderão acelerar e intensificar a seca meteorológica, influenciando os processos hidrológicos. Alguns autores relatam que as características das secas hidrológicas não são bem explicadas pelas secas meteorológicas, porém as atividades terrestres (desmatamento e uso da terra) e ações antropogênicas climáticas podem influenciar nos processos hidrológicos e, conseqüentemente, intensificarem a seca (Van Loon; Laanh, 2014; Bagley et al., 2014; Melo et al., 2016, Melo et al., 2022).

Analisando o comportamento dos índices de seca, para uma mesma escala de tempo, a seca meteorológica pode ter influenciado a seca hidrológica, gerando redução da vazão do rio quase simultaneamente. Cunha et al. (2019) ressaltam que geralmente é necessário um longo período sem precipitação para que seu efeito possa ser refletido na vazão. Nesse caso, como a bacia do Rio Verde é muito pequena, o efeito da seca meteorológica foi praticamente refletido simultaneamente pela seca hidrológica.

4 CONCLUSÃO

Este estudo investigou os efeitos das secas na Bacia Hidrográfica do Rio Verde, inserida em uma região importante para a produção de café e geração de energia hidrelétrica no Sul de Minas Gerais. Utilizando projeções climáticas dos cenários RCP4.5 e RCP8.5, buscou-se analisar a frequência e comportamento das secas. Os índices SPI e SPEI foram empregados, para a análise das secas meteorológicas e o índice SSFI, para secas hidrológicas, com base em vazões simuladas pelos modelos hidrológicos SWAT e VIC.

No clima presente (1961-2005), o SPEI apresentou valores ligeiramente menores, em comparação ao SPI, o que contribuiu para inferir que a inclusão da evapotranspiração, no cálculo do SPEI, pode aprimorar a caracterização das secas meteorológicas, porém a precipitação continua sendo o fator determinante para a ocorrência ou não das secas.

No clima futuro (2005-2099), as distribuições de frequência de secas, simuladas pelo SPI, foram semelhantes para ambos os cenários. No entanto o SPEI apresentou resultados diferentes entre os cenários, especialmente para o RCP8.5, para o qual as simulações sugeriram um sério risco de ocorrência de megasseca na região, resultado da diminuição das precipitações e aumento da temperatura.

Considerando o cenário RCP4.5, por sua vez, os resultados mostraram que a precipitação é o principal fator para a caracterização do comportamento das secas. Para o cenário RCP8.5, a redução da precipitação, associada a um aumento da temperatura, são, simultaneamente, duas variáveis que intensificam a ocorrência de secas no final do século.

Para o clima presente, as comparações das secas meteorológicas (SPI) e hidrológicas (SSFI) indicaram que, na BHRV, a seca meteorológica apresenta uma resposta mais rápida. Já para o clima futuro, o SSFI apresentou comportamentos distintos, nos dois cenários avaliados, simulando secas extremas e severas para o RCP4.5 ao longo do período. Para o RCP8.5, inicialmente, foram simuladas secas mais moderadas seguidas por secas mais severas no final do século.

Com base no comportamento dos índices de seca para uma mesma escala temporal, a seca meteorológica pode ter influenciado a seca hidrológica, refletindo na redução da vazão do rio quase simultaneamente pela pequena extensão da 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 e frequência das secas 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., Modelling hydrology and water quality in the pre-alpine/alpine Thur watershed using SWAT. *Journal Hydrology*. 333, 413–430, 2007. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2006.09.014>
- ABBASPOUR, K. C; ROUHOLAHNEJAD, E.; VAGHEFI, S.; SRINIVASAN, R.; YANG, H.; KLØVE, B. A continental-scale hydrology and water quality model for Europe: Calibration and uncertainty of a high-resolution large-scale SWAT model. *Journal Hydrology*, 524, 733-752, 2015. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jhydrol.2015.03.027>
- AGHAKOUCHAK A, FARAHMAND A, MELTON FS, TEIXEIRA J, ANDERSON MC, WARDLOW BD AND HAIN C R (2015) Remote sensing of drought: Progress, challenges and opportunities, *Reviews Geophysics*, 53, 452–480. doi.org/10.1002/2014RG000456.
- 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.
- ALVARENDA, L.A.; CARVALHO, V.S.O.; OLIVEIRA, V.O.; MELLO, C. R.; COLOMBO, A.; TOMASELLA, J.; MELO, P.A. Hydrological simulation with SWAT and VIC Models in the Verde River Watershed, Minas Gerais. *Rev. Ambient. Água* vol. 15 n. 4, e2492 - Taubaté 2020. [doi:10.4136/1980-993X](https://doi.org/10.4136/1980-993X).
- ANDERSON, T.W.; DARLING, D.A. A test goodness of fit. *Journal of American Statistics Association*. vol.49, p.756-769,1954.
- ARNOLD JG, SRINIVASAN R, MUTTIAH RS, WILLIAMS JR. 1998. Large area hydrologic modeling and assessment part I: model development. *J. Am. Water Resour. Assoc.* 34(1): 73–89. <https://doi.org/10.1111/j.1752-1688.1998.tb05961.x>.
- ARNOLD, J. G. et al. SWAT: model use, calibration, and validation. **Transactions of the ASABE**, v. 55, n. 4, p. 1491-1508, 2012.
- ARORA, V. K.; MATTHEWS, H. D. Characterizing uncertainty in modeling primary terrestrial ecosystem processes. *Global Biogeochemical Cycles*, vol. 23, e-GB2016, 2009 [doi:10.1029/2008GB003398](https://doi.org/10.1029/2008GB003398).
- BAGLEY, J. E.; DESAI, A. R.; HARDING, K. J.; SNYDER, P. K.; FOLEY, J. A. 2014. Drought and deforestation: Has land cover change influenced recent precipitation extremes in the Amazon? *Journal of Climatology*, 27, 345–361. <https://doi.org/10.1175/JCLI-D-12-00369.1>.
- BECKERS, J.; SMERDON, B.; WILSON, M. Review of hydrologic models for forest management and climate change applications in British Columbia and Alberta. *Kamloops: FOREX*, v. 25, 2009

BRESSIANI, D. A.; GASSMAN, P. W.; FERNANDES, J. G.; GARBOSSA, L. H. P.; SRINIVASAN, R.; BONUMÁ, N. B.; MENDIONDO, E. M. Review of soil and water assessment tool (SWAT) applications in Brazil: Challenges and prospects. *International Journal of Agricultural and Biological Engineering*, v. 8, n.3, 2015.

BRITO, S. S. B.; CUNHA, A. P. M. A.; CUNNINGHAM, C. C.; ALVALÁ, R. C.; MARENGO, J. A.; CARVALHO, M. A. Frequency, duration and severity of drought in the Semiarid Northeast Brazil region. *International Journal of Climatology*, v. 38, n. 2, p. 517–529, fev. 2017. doi:10.1002/joc.5225.

BRITO, S. S. B., CUNHA, A. P. M., CUNNINGHAM, C. C., ALVALÁ, R. C., MARENGO, J. A., CARVALHO, M. A. Frequency, duration and severity of drought in the Semiarid Northeast Brazil region. *International Journal of Climatology*, 38(2), 517-529, 2018.

BRITO, Y.M.A., RUFINO, I.A.A., BRAGA, C.F.C., MULLIGAN, K., 2021. The Brazilian drought monitoring in a multi-annual perspective 193 (1). <https://doi.org/10.1007/s10661-020-08839-5>

CAMARGO, M.B.P. Mudanças climáticas na cafeicultura arábica no Brasil. *Bragancia, Campinas*, 69(1), 239-247, 2010.

CARVALHO, V. S. O. et al. Impact of climate change on monthly streamflow in the Verde River Basin using two hydrological models. *Revista Ambiente & Água*, v. 18, n. 4, p. 1-17, 2021.

CHOU S., LYRA A., MOURÃO C., DEREZYNSKI C., PILOTTO I. Evaluation of the ETA simulations nested in three global climate models. *American Journal of Climate Change*. 3, 438-454, 2014. DOI:10.4236/ajcc.2014.35039.

CHOU, S. C.; MARENGO, J.; LYRA, A. A.; SUEIRO, G.; PESQUERO, J. F.; ALVES, L. M. et al. Downscaling of South America present climate driven by 4-member HadCM3 runs. *Climate Dynamics*, v. 38, p. 635–653, 2012. <https://doi.org/10.1007/s00382-011-1002-8>.

CHYLEK P, LI J, DUBEY MK, WANG M LESINS G. Observed and model simulated 20th century Arctic temperature variability: Canadian Earth System Model CanESM2. *Atmos. Chem. Phys. Discuss.*, 11, 22893–22907, 2011 www.atmos-chem-phys-discuss.net/11/22893/2011/ doi:10.5194/acpd-11-22893-2011.

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), 769–784. doi: <https://doi.org/10.1007/s00704-015-1540-9>.

COLLINS, W. J. et al. Development and evaluation of an Earth-System model – HadGEM. *Geosci. Model Dev.*, 4, 1051–1075, 2011. www.geosci-model-dev.net/4/1051/2011/ doi:10.5194/gmd-4-1051-2011.

COSTA, M. DA S., OLIVEIRA-JÚNIOR, J. F. DE, SANTOS, P. J. DOS, CORREIA FILHO, W. L. F., GOIS, G. DE, BLANCO, C. J. C., ... JARDIM, A. M. DA R. F. Rainfall extremes and drought in Northeast Brazil and its relationship with El Niño–Southern Oscillation. *International Journal of Climatology*, 41(S1), 2020. doi: <https://doi.org/10.1002/joc.6835>

CUARTAS, L.A.; CUNHA, A.P.M.D.A.; ALVES, J.A.; PARRA, L.M.P.; DEUSDARÁ-LEAL, K.; COSTA, L.C.O.; MOLINA, R.D.; AMORE, D.; BROEDEL, E.; SELUCHI, M.E.; et al. Recent Hydrological Droughts in Brazil and Their Impact on Hydropower Generation. *Water* 2022, 14, 601. <https://doi.org/10.3390/w14040601>.

CUNHA, A. P. M. A.; ZERI, M.; DEUSDARÁ LEAL, K.; COSTA, L.; CUARTAS, L. A.; MARENGO, J. A.; TOMASELLA, J.; VIEIRA, R. M.; BARBOSA, A. A.; CUNNINGHAM, C.; CAL GARCIA, J. V.; BROEDEL, E.; ALVALÁ, R.; RIBEIRO-NETO, G. Extreme Drought Events over Brazil from 2011 to 2019. *Atmosphere*, v. 10, n. 11, p. 642, 24 out. 2019.

DAI, M., HUANG, S., HUANG, Q., et al., 2020. Assessing agricultural drought risk and its dynamic evolution characteristics. *Agricultural Water Management*. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2020.106003>.

DAI A, ZHAO T, CHEN J. 2018 Climate change and drought: a precipitation and evaporation perspective. *Curr. Clim. Chang. Rep.* 4, 301–312. (doi: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.

FREITAS, A.A.; DRUMOND, A.; CARVALHO, V.S.B.; REBOITA, M.S.; SILVA, B.C.; UVO, C.B. Drought Assessment in São Francisco River Basin, Brazil: Characterization through SPI and Associated Anomalous Climate Patterns. *Atmosphere* 2022, 13, 41. <https://doi.org/10.3390/atmos13010041>.

GAO, Z., LIU, J., ZHENG, H. et al. Evaluating the Standardized Streamflow Index as a tool to characterize and compare drought severity across the conterminous United States. *Journal of Hydrology*, v. 524, p. 67-77, 2015. doi: 10.1016/j.jhydrol.2015.02.023.

GUO, Y., HUANG, S., HUANG, Q., WANG, H., WANG, L., FANG, W., 2019. Copulas-based bivariate socioeconomic drought dynamic risk assessment in a changing environment. *J. Hydrol.* 575, 1052–1064. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2019.06.010>

GARREAUD, R.; ALVAREZ-GARRETON, C.; BARICHIVICH, J.; BOISIER, J.P.; CHRISTIE, D.A.; GALLEGUILLOS, M.; LEQUESNE, C.; MCPHEE, J.; ZAMBRANO-BIGIARINI, M. The 2010-2015 mega drought in Central Chile: Impacts on regional hydroclimate and vegetation. *Hydrol. Earth Syst. Sci. Discuss.* **2017**.

GUO S L, GUO J, ZHANG J, ET AL. VIC distributed hydrological model to predict climate change impact in the Hanjiang Basin. *Sci China Ser E-Tech Sci*, 2009, 52(11): 1-?, doi: 10.1007/s11431-009-0355-2.

GUTTMAN, N. B. Accepting the Standardized Precipitation Index: A calculation algorithm. *Journal of the American Water Resources Association*, 35(2), 311-322.1999.

HAYES, M., SVOBODA, M., WALL, N. AND WIDHALM, M. The Lincoln declaration on drought indices: universal meteorological drought index recommended. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 92(4), 485–488, 2011.

HINKLE DE, WIERSMA W, JURIS SG. *Applied statistics for the behavioral sciences*. 5th ed. Boston, MA: Houghton Mifflin; 2003.

IPCC. (2021) Summary for policymakers. In: Masson-Delmotte, V., Zhai, P., Pirani, A., Connors, S.L., Péan, C., Berger, S., Caud, N., Chen, Y., Goldfarb, L., Gomis, M.I., Huang, M., Leitzell, K., Lonnoy, E., Matthews, J.B.R., Maycock, T.K., Waterfield, T., Yelekçi, O., Yu, R. and Zhou, B. (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. In Press.

JONES, C. D. et al. The HadGEM2-ES implementation of CMIP5 centennial simulations, *Geosci. Model Dev.*, 4, 543–570, doi:10.5194/gmd-4-543-2011, 2011.

JUNQUEIRA, R.; AMORIM, J.D.S.; VIOLA, M.R.; DE MELLO, C.R.; Uddameri, V.; Prado, L.F. Drought occurrences and impacts on the upper Grande river basin, Brazil. *Meteorol. Atmos. Phys.* 2022, 134, 45.

JUNQUEIRA, R. et al. Hydrological response to drought occurrences in a Brazilian Savanna Basin. *Resources*, v. 9, n. 10, p. 1–11, 2020.

KATTELUS, M.; SALMIVAARA, A.; MELLIN, I.; VARISA, O.; KUMMUA, M. An evaluation of the Standardized Precipitation Index for assessing inter-annual rice yield variability in the Ganges–Brahmaputra–Meghna region. *INTERNATIONAL JOURNAL OF CLIMATOLOGY Int. J. Climatol.* 36: 2210–2222 (2016) Published online 14 September 2015 in Wiley Online Library (wileyonlinelibrary.com) DOI: 10.1002/joc.4489.

KIMBALL, J. S.; RUNNING, S. W.; NEMANI, R. An improved method for estimating surface humidity from daily minimum temperature. *Agricultural and Forest Meteorology*, Amsterdam, v. 85, n. 1-2, 1997.

KWON, M.; KWON, H.; HAN, D. Spatio-temporal drought patterns of multiple drought indices based on precipitation and soil moisture: A case study in South Korea. *Int. J. Clim.* 2019, 39, 4669–4687.

LENDERINK, G.; BUISSAND, 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>

LI, Q.; HEA, P.; HEC, H.; HANA, X.; ZENGA, T.; LUD, G.; WANGE, H. Investigation to the relation between meteorological drought and hydrological drought in the upper Shaying River Basin using wavelet analysis. *Atmospheric Research* 234(2020)104743. <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2019.104743>

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.

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.

LOHMANN, D.; NOLTE-HOLUBE, R.; RASCHKE, E. Um modelo de roteamento horizontal em larga escala a ser acoplado a esquemas de parametrização da superfície terrestre. *Tellus*, v. 48, p. 708-721, 1996.

LOHMANN, D. et al. Regional Scale Hydrology: I. Formulation of the VIC2L Model Coupled to a Routing Model. *Hydrological Sciences Journal*, v. 43, n. 1, p. 131-141, 1998.

LYRA A, TAVARES P, CHOU S, SUEIRO G, DERECZYNSKI C, et al. Climate change projections over three metropolitan regions in Southeast Brazil using the non-hydrostatic ETA regional climate model at 5km resolution. *Theoretical and Applied Climatology*, 132(1-2):663-682. 2018. doi 10.1007/s00704017-2067-z.

LYRA, A.; IMBACH, P.; RODRIGUEZ, D.; CHOU, S. C.; GEORGIU, S.; GAROFOLO, L. 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, p. 1255–1271, 2018.

MARENGO, J.A. & BERNASCONI, M. (2015) Regional differences in aridity/drought conditions over Northeast Brazil: present state and future projections. *Climatic Change*, 129, 103–115.

MARENGO, J. A.; CHOU, S. C.; KAY, G.; ALVES, L. M.; PESQUERO, J. F.; SOARES, W. R. 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>

MARENGO, J.A.; TORRES, R.R.; ALVES A, L.M. Drought in Northeast Brazil—past, present, and future. *Theor Appl Climatol* (2017) 129:1189–1200 DOI 10.1007/s00704-016-1840-8.

MASSON-DELMOTTE, V., P. ZHAI, A. PIRANI, S. L. CONNORS, C. PÉAN, S. BERGER, N. CAUD, Y. CHEN, L. GOLDFARB, M. I. GOMIS, M. HUANG, K. LEITZELL, E. LONNOY, J.B.R. MATTHEWS, T. K. MAYCOCK, T. WATERFIELD, O. YELEKÇI, R. YU AND B. ZHOU. The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. *Climate Change 2021*. Cambridge University Press. In Press.

MCKEE TB, DOESKEN NJ, LEIST J (1993) The relationship of drought frequency and duration to time scales. *Preprints 8th Conference on Applied Climatology*. 17:179–184.

- MCVICAR, T. R., VAN NIJNATTEN, C. L., FAIRWEATHER, I., LI, L. T. 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. doi: 10.1016/j.advwatres.2012.09.001.
- MEDEIROS, F. J., GOMES, R. D. S., COUTINHO, M. D. L., & LIMA, K. C. (2022). Meteorological droughts and water resources: Historical and future perspectives for Rio Grande do Norte state, Northeast Brazil. *International Journal of Climatology*.
- MELO, D. DE C. D., SCANLON, B. R., ZHANG, Z., WENDLAND, E., YIN, L., 2016. Reservoir storage and hydrologic responses to droughts in the Paran´ a River basin, southeastern Brazil, 20, 4673–4688, <https://doi.org/10.5194/hess-20-4673-2016>.
- Melo, PA, Alvarenga, LA, Tomasella, J. et al. Analysis of hydrological impacts caused by climatic and anthropogenic changes in Upper Grande River Basin, Brazil. *Environ Earth Sci*, 81, 504 (2022). <https://doi.org/10.1007/s12665-022-10631-2>
- MESINGER, F.; CHOU, S. C.; GOMES, J. L.; JOVIC, D.; BASTOS, P.; BUSTAMANTE, J. F.; LAZIC, L.; LYRA, A. A.; MORELLI, S.; RISTIC, I.; VELJOVIC, K. An upgraded version of the Eta model. *Meteorology and Atmospheric Physics*, v. 116, p. 63-79, 2012. <https://doi.org/10.1007/s00703-012-0182-z>
- MILLÁN, H., MACÍAS, I., RABELO-LIMA, J. (2022). Hurst scaling with crossover of a drought indicator: a case study in Belem and Manaus, Brazil. *Natural Hazards*, 110(1), 69-93.
- MISHRA, A. K.; SINGH, V. P. A review of drought concepts. *Journal of Hydrology*, v. 391, n. 1–2, p. 202–216, set. 2010.
- MARTINS, M. A.; TOMASELLA, J.; BASSANELLI, H. R.; PAIVA, A. C. E.; VIEIRA, R. M. P.; CANAMARY, E. A.; ALVARENGA, L.A. On the sustainability of paddy rice cultivation in the Paraíba do Sul river basin (Brazil) under a changing climate. *Journal of Cleaner*. volume 386.135760.2023. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.135760>.
- MODARRES, R., 2007: Streamflow drought time series forecasting. *Stochastic Environmental Research and Risk Assessment*, 21: 223–233.
- NEITSCH, S. L.; ARNOLD, J. G.; KINIRY, J. R.; WILLIAMS, J. R. Soil and Water Assessment Tool theoretical documentation. Washington: USDA-ARS, 2005. 494 p.
- NOGUEIRA, J. M. P. et al. Spatial pattern of the seasonal drought/burned area relationship across Brazilian biomes: Sensitivity to drought metrics and global remote-sensing fire products. *Climate*, v. 5, n. 2, p. 42, 2017
- OLIVEIRA, V. A. et al. 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*, Lavras, v. 37, n. 15, p. 5005-5023, 2017.
- OLIVEIRA, V. A.; MELLO, C. R.; VIOLA, M. R.; SRINIVASAN, R. Land-use change impacts on the hydrology of the upper Grande River Basin, Brazil. *Cerne*, v. 24, n. 4, p. 334–343, 2018. <http://dx.doi.org/10.1590/01047760201824042573>

OLIVEIRA, V.A.; MELLO, C.R.; BESKOW, S.; VIOLA, M.R.; SRINIVASAN, R. Modeling the effects of climate change on hydrology and sediment load in a headwater basin in the Brazilian Cerrado biome. *Ecological Engineering*. Volume 133, agosto de 2019, páginas 20-31 <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>

PAI D.S., SRIDHAR L, GUHATHAKURTA P, HATWAR HR . 2011. Climatologia da seca em todo o distrito da temporada de monções do sudoeste na Índia com base no índice de precipitação padronizado (SPI). *Nat. Perigos* 59(3): 1797 – 1813

PARMESAN, C., M.D. MORECROFT, Y. TRISURAT, R. ADRIAN, G.Z. ANSHARI, A. ARNETH, Q. GAO, P. GONZALEZ, R. HARRIS, J. PRICE, N. STEVENS, AND G.H. TALUKDARR, 2022: Terrestrial and Freshwater Ecosystems and Their Services. In: *Climate Change 2022: Impacts, Adaptation and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [H.-O. PÖRTNER, D.C. ROBERTS, M. TIGNOR, E.S. POLOCZANSKA, K. MINTENBECK, A. ALEGRÍA, M. CRAIG, S. LANGSDORF, S. LÖSCHKE, V. MÖLLER, A. Okem, B. Rama (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, UK and New York, NY, USA, pp. 197–377, doi:10.1017/9781009325844.004.

PLANO DIRETOR DE RECURSOS HÍDRICOS DA BACIA DO RIO VERDE. RELATÓRIO EXECUTIVO DO PDRH RIO VERDE, 2010. CONSÓRCIO ECOPLAN–LUME.

MONTEITH, J. L. 1965. Evaporation and Environment. In: *The state and movement of water in living organism*. 19th Symp. Soc. Exptl. Biol. P. 205-234

PESQUERO, J. F.; CHOU, S. C.; NOBRE, C. A.; MARENGO, J. A. 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>

PREETHI, B., RAMYA, R., PATWARDHAN, SK et al. Variability of Indian summer monsoon droughts *Clim Dyn* 53, 1937–1962 (2019). <https://doi.org/10.1007/s00382-019-04752-x>.in CMIP5 climate models

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, 2019.

RODRIGUES, J.A.M., VIOLA, M.R., ALVARENGA, L.A., MELLO, C.R., CHOU, S.C., OLIVEIRA, V.A., UDDAMERI, V., MORAIS, M.A.V., 2020. Climate change impacts under representative concentration pathway scenarios on streamflow and droughts of basins in the Brazilian Cerrado biome 40 (5), 2511–2526. <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, Vitória da Conquista*, v. 11, n. 1, p. 170, 2019.

SHAMSHIRBAND, S.; HASHEMI, S.; SALIM, H.; SAMADIANFARD, S.; ASADI, E; SHADKANI, S.; KARGAR, K.; MOSA; A.; NABIPOU, N.; CHAU, KWOK-W. Predicting Standardized Streamflow index for hydrological drought using machine learning models. *Engineering Applications of Computational Fluid Mechanics*, 14:1, 339-350, DOI: 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*. Vol. 93, e20201130, 2021 doi. org/ 10. 1590/ 0001- 3765202120 201130.

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.

SILVA, V. O., DE MELLO, C. R., & CHOU, S. C. (2022). Projections of severe droughts in future climate in Southeast Brazil: a case study in Southern Minas Gerais State, Brazil. *Theoretical and Applied Climatology*, *148*(3), 1289-1302.

SIQUEIRA, V. A., FAN, F. M., DE PAIVA, R. C. D., RAMOS, M.-H., & COLLISCHONN, W. (2020). Potential skill of continental-scale, medium-range ensemble streamflow forecasts for flood prediction in South America. *Journal of Hydrology*, 125430. doi:10.1016/j.jhydrol.2020.125430

SOBRAL, B. S., OLIVEIRA-JÚNIOR, J. F., DE GOIS, G., & PEREIRA-JÚNIOR, E. R. (2018). Spatial variability of SPI and RD1st drought indices applied to intense episodes of drought occurred in Rio de Janeiro State, Brazil. *International Journal of Climatology*, *38*(10), 3896–3916. doi:10.1002/joc.5542

SRINIVASAN R, RANABARAYANAN TS, ARNOLD JG, BEDNARZ ST. 1998. Large area hydrologic modeling and assessment part II: model application. *J. Am. Water Resour. Assoc.* 34(1): 91–101. <https://doi.org/10.1111/j.1752-1688.1998.tb05962.x>.

SRINIVASAN, R; ARNOLD, J.G. Integration of a basin-scale water quality model with Gis.1994. *WATER RESOURCES BULLETIN VOL. 30, N.:3 AMERICAN WATER RESOURCES ASSOCIATION.*

STRICEVIC, R; DJUROVICA, N; DJUROVIC; Z. Drought classification in Northern Serbia based on SPI and statistical pattern recognition. *METEOROLOGICAL APPLICATIONS Meteorol. Appl.* 18: 60–69 (2011) Published online 14 July 2010 in Wiley Online Library (wileyonlinelibrary.com) DOI: 10.1002/met.20.

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

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).

- TOKARCZYK, T & SZALIŃSKA, W. Combined analysis of precipitation and water deficit for drought hazard assessment (2014). *Hydrological Sciences Journal*, 59:9, 1675-1689, DOI: 10.1080/02626667.2013.862335.
- 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, 309-326. <https://doi.org/10.4236/gep.2022.108019>.
- VAN LOON, A.F., LAAHA, G., 2014. Hydrological drought severity explained by climate and catchment characteristics. *J. Hydrol.* 526, 3–14. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2014.10.059>.
- VAN LOON, A. F. Hydrological drought explained. *Wiley Interdisciplinary Reviews: Water*, v. 2, n. 4, p. 359–392, jul. 2015.
- VEGA, H. M., LIMA, J. R., & CERNAK, S. N. (2019). SPEI and Hurst analysis of precipitation in the Amazonian Area of Brazil. *Revista Brasileira de Meteorologia*, 34, 325-334.
- VICENTE-SERRANO, SERGIO M., SANTIAGO BEGUERÍA, e JUAN I. LÓPEZ-MORENO. 2010. “A Multiscalar Drought Index Sensitive to Global Warming: The Standardized Precipitation Evapotranspiration Index”. *Journal of Climate* 23 (7): 1696–1718. <https://doi.org/10.1175/2009JCLI2909.1>.
- VICENTE-SERRANO SM, PEÑA-ANGULO D, BEGUERÍA S, DOMÍNGUEZ-CASTRO F, TOMÁS-BURGUERA M, NOGUERA I, GIMENO-SOTELO L, EL KENAWY A. 2022 Global drought trends and future projections. *Phil. Trans. R. Soc. A* 380: 20210285. <https://doi.org/10.1098/rsta.2021.0285>.
- VICENTE-SERRANO, S. M., LÓPEZ-MORENO, J. I., BEGUERÍA, S., LORENZO-LACRUZ, J., AZORIN-MOLINA, C., & MORÁN-TEJEDA, E. (2011). Accurate Computation of a Streamflow Drought Index. *Journal of Hydrologic Engineering*, 17, 318-332. [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. Accurate Computation of a Streamflow Drought Index. *Journal of Hydrologic Engineering*, v. 17, n. 2, p. 318–332, 2012.
- VICENTE-SERRANO SM et al. 2019 Climate, irrigation, and land-cover change explain streamflow trends in countries bordering the Northeast Atlantic. *Geophys. Res. Lett.* 46, 10 821–10 833. (doi:10.1029/2019GL084084)
- VIEIRA, N. P. A; MELLO, C R.; G, J. A.; VIOLA, M. R.; Beskow, S.; ALVARENGA, L. A. Climate Change Impacts on Water Resources of the Largest Hydropower Plant Reservoir in Southeast Brazil. *Water* 2021, 13, 1560. <https://doi.org/10.3390/w13111560>
- VIOLA, M. R. et al. Assessing climate change impacts on Upper Grande River Basin hydrology, Southeast Brazil. *International Journal of Climatology*, v. 35, p. 1054-1068, 2015.

VUILLE, M.; FRANQUIST, E.; GARREAUD, R.; Lavado Casimiro, W.S.; Cáceres, B. Impact of the global warming hiatus on Andean temperature. *J. Geophys. Res. Atmos.* 2015, *120*, 3745–3757.

WATANABE M et al. Improved Climate Simulation by MIROC5: Mean States, Variability, and 618 Climate Sensitivity. *Journal of Climate*, vol. 23, n.23, pp. 6312–6335, 619 2010 doi:10.1175/2010jcli3679.1.

WMO. 2012 In Standardized precipitation index user guide (eds M Svoboda, M Hayes, D Wood). Geneva, Switzerland: World Meteorological Organization

ZHAO, R. J. et al. The Xinanjiang model. In: *Hydrological Forecasting Proceedings Oxford Symposium*, Washington DC, April, 1980. IASH-AISH Publ., 1980, 129, pp. 351-356