AVALIAÇÃO DE SECAS HIDROLÓGICAS NA BACIA DO ALTO JAGUARIBE UTILIZANDO O MODELO SWAT+ E O ÍNDICE SDI

Tuany Kerolayne de Oliveira Ferreira[1];Alaine de Sousa Pereira[2]; Brian Tavares Moura[3]; Alexandro Medeiros Silva[4]; Richarde Marques da Silva[5] & Victor Hugo Rabelo Coelho[6]

RESUMO – As secas hidrológicas constituem um dos principais desafios para a gestão dos recursos hídricos em regiões semiáridas, devido aos seus impactos sobre a disponibilidade de água para o abastecimento humano. Nesse contexto, este estudo teve como objetivo avaliar as secas hidrológicas na bacia do Alto Jaguaribe, Ceará. Para isso foi empregado o modelo hidrológico SWAT+ e o índice de seca Streamflow Drought Index (SDI) nas escalas temporais de 3,6,9 e 12 meses. O modelo SWAT+ foi calibrado e validado para os postos fluviométricos Iguatu, Arneiroz e Malhada para o período de 1987 a 2024. As vazões simuladas pelo modelo SWAT+ para toda a bacia foram utilizadas como dados de entrada no índice SDI. Os resultados indicaram que os eventos de seca mais severos ocorreram no início da década de 1990 e, principalmente, entre 2012 e 2017. Verificou-se ainda que o aumento da escala temporal resultou em maior persistência dos déficits hidrológicos, especialmente nas escalas 9 e 12 meses. Entre os postos analisados, Arneiroz apresentou maior persistência das secas, enquanto Iguatu registrou os eventos de maior intensidade. Os resultados demonstram a eficiência do SDI na identificação e caracterização de secas hidrológicas em regiões semiáridas.

ABSTRACT– Hydrological droughts represent one of the major challenges for water resources management in semi-arid regions due to their impacts on water availability for human supply. In this context, this study aimed to assess hydrological droughts in the Upper Jaguaribe Basin, Ceará State, Brazil. To achieve this, the SWAT+ hydrological model and the Streamflow Drought Index (SDI) were applied at temporal scales of 3, 6, 9, and 12 months. The SWAT+ model was calibrated and validated for the Iguatu, Arneiroz, and Malhada streamflow gauging stations over the period from 1987 to 2024. Streamflow simulations generated by SWAT+ for the entire basin were used as input data for the SDI. The results indicated that the most severe drought events occurred during the early 1990s and, more notably, between 2012 and 2017. It was also observed that increasing the temporal scale led to greater persistence of hydrological deficits, particularly at the 9- and 12-month scales. Among the analyzed stations, Arneiroz exhibited the highest drought persistence, whereas Iguatu recorded the most intense drought events. The findings demonstrate the effectiveness of the SDI in identifying and characterizing hydrological droughts in semi-arid regions.

Palavras-Chave – SWAT, Índice de seca, semiárido

1. INTRODUÇÃO

As secas estão entre os desastres naturais mais complexos e menos compreendidos, com profundas implicações para os recursos hídricos, a agricultura e os ecossistemas, especialmente em regiões semiáridas (Singh et al., 2026). Esse efeito é intensificado sob a influência das mudanças

[1]) Universidade Federal da Paraíba, Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil e Ambiental, CT, João Pessoa – PB, thuanykerolayne@gmail.com
[2]) Universidade Federal da Paraíba, Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil e Ambiental, CT, João Pessoa – PB, alainejosefa.45@gmail.com
[3]) Universidade Federal da Paraíba, Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil e Ambiental, CT, João Pessoa – PB, briantavares926@gmail.com
[4]) Universidade Federal da Paraíba, Departamento de Geociências, CCEN, João Pessoa – PB, alexandro.medeiros@academico.ufpb.br
[5]) Universidade Federal da Paraíba, Departamento de Geociências, CCEN, João Pessoa – PB, richarde@geociencias.ufpb.br
[6]) Universidade Federal da Paraíba, Departamento de Geociências, CCEN, João Pessoa – PB, victor.coelho@academico.ufpb.br

climáticas, uma vez que o aumento das temperaturas tem provocado alterações significativas na frequência, duração e distribuição espacial de eventos climáticos extremos, resultando impactos socioeconômicas generalizadas (Bandh et al., 2021; Clarke et al., 2022).

Historicamente, o semiárido brasileiro apresenta elevada vulnerabilidade à ocorrência de secas devido à irregularidade espaço-temporal das precipitações, associada às altas taxas de evapotranspiração e à limitada disponibilidade hídrica superficial. Nesse contexto, a caracterização e o monitoramento das secas tornam-se fundamentais para o planejamento e a gestão sustentável, sobretudo em bacias hidrográficas sujeitas a frequentes eventos de escassez hídrica. Entretanto, a identificação e a previsão de secas hidrológicas ainda representam um desafio, devido à complexidade envolvida na análise de sua duração, severidade, recorrência e evolução temporal.

Diversos índices têm sido utilizados para monitorar eventos de seca em diferentes escalas e componentes do ciclo hidrológico. Entre os mais empregados no semiárido brasileiro destacam-se o Standardized Precipitation Index (SPI), o Palmer Drought Severity Index (PDSI) e o Streamflow Drought Index (SDI). Embora o SPI seja amplamente utilizado na avaliação de déficits de precipitação, esse índice não representa diretamente a disponibilidade de água superficial e subterrânea (Ojha et al., 2021; Gonçalves et al., 2021; Santos 2020;). De forma semelhante, o PDSI é voltado à avaliação de secas agrícolas com base na umidade do solo, contudo, não representa diretamente as condições de disponibilidade hídrica para fins de abastecimento. Dessa forma, índices baseados em vazão, como o SDI, apresentam maior potencial para representar os impactos sobre os sistemas superficiais.

Diversos estudos têm investigado o desempenho de índices de seca na identificação e caracterização desses eventos. Nesse contexto, Tareke e Awole (2022) compararam o Suface Water Supply Index (SWSI) e o SDI na análise de secas hidrológicas na Etiópia. Os resultados indicaram que ambos os índices são adequados para essa finalidade; entretanto, o SWSI apresentou maior sensibilidade na detecção de eventos em escalas temporais curtas, enquanto o SDI foi mais eficaz em identificar a gravidade da seca em escalas de tempos mais longas.

Apesar da ampla aplicação de índices de seca em diferentes regiões do mundo, ainda são limitados os estudos voltados à avaliação da aplicabilidade do SDI em bacias do semiárido, especialmente em áreas sujeitas à elevada variabilidade hidrológica e recorrentes eventos de escassez hídrica. Sendo assim, o presente artigo objetiva avaliar a aplicabilidade do SDI como instrumento de monitoramento, para identificar a frequência, intensidade e duração das secas hidrológicas na Bacia Hidrográfica do Alto Rio Jaguaribe, localizada no Ceará, Brasil.

2. METODOLOGIA

2.1. Área de estudo

A bacia hidrográfica do Alto Jaguaribe (BHAJ) localiza-se na porção sul do estado do Ceará, entre as latitudes 5,30º a 7,30º Sul e longitudes 38,30º a 40,50º Oeste, e corresponde à região de cabeceira do Rio Jaguaribe. Com área aproximada de 24.636 km², abrange cerca de 24 municípios e possui como principal curso d'água o Rio Jaguaribe, de regime intermitente. A bacia apresenta clima semiárido quente, caracterizado por elevada variabilidade espaço-temporal das chuvas, temperaturas entre 26ºC e 28ºC e máximas que podem ultrapassar 34ºC, além das altas taxas de evaporação, superiores a 2.000 mm, fatores que contribuem para frequentes déficits hídricos. A precipitação média anual varia entre 500 e 800mm, sendo inferior à evaporação potencial, o que reforçar a condição de escassez hídrica (COGERH, 2018).

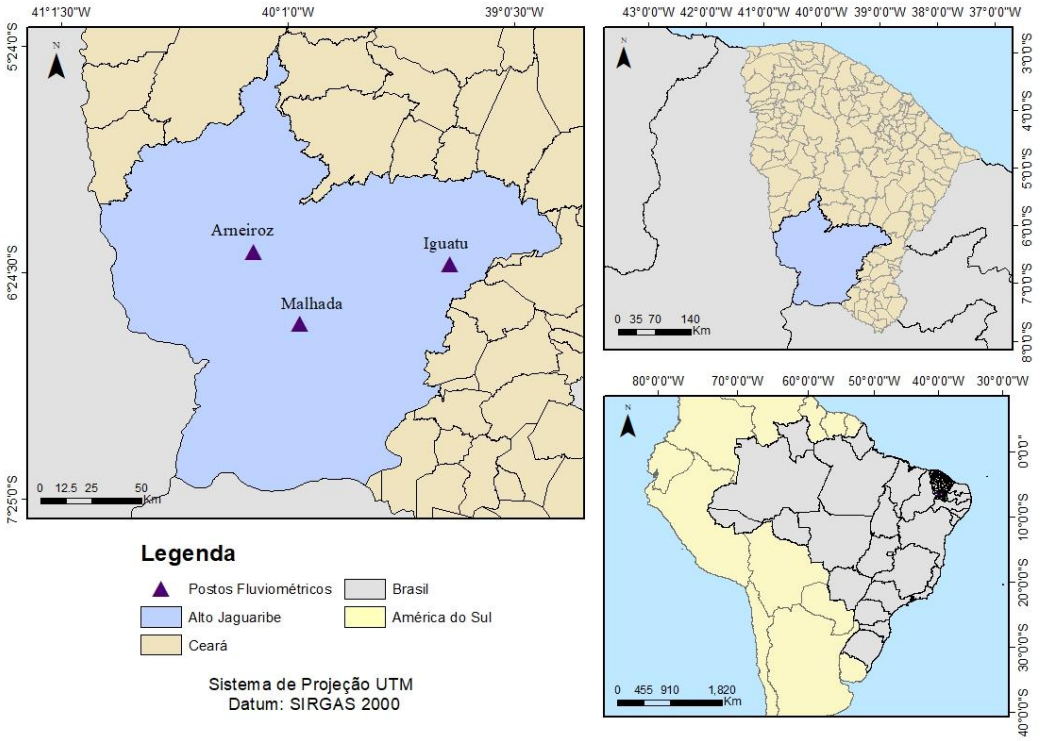


Figura 1 – Mapa de localização da Bacia Hidrográfica do Alto Jaguaribe

2.2. Dados utilizados

Os dados utilizados nesta pesquisa correspondem às informações necessários para a simulação hidrológica no modelo SWAT+, cujos resultados servirão de base para a aplicação SDI. Para a configuração do modelo SWAT foram utilizados cinco conjuntos de dados principais: (a) dados topográficos – obtido a partir da missão SRTM, com resolução espacial de 30 metros (USGS Earth Explorer); (b) informações de cobertura do solo – provenientes da Coleção 8 do MAPBIOMAS; (c) informações pedológicas – obtidas junto à FUNCEME e ao SISOLOS da EMBRAPA; (d) Dados

pluviométricos – 19 postos abrangendo o período de 1985 a 2023 e; (e) Dados de vazão – 3 postos fluviométricos (1985-2023).

2.3. Modelo SWAT

O modelo hidrológico baseia-se no princípio de que a equação do balanço hídrico constitui o mecanismo fundamental que controla os processos hidrológicos simulados em uma bacia hidrográfica, representando a base para a quantificação das entradas, saídas e variações de água ano sistema (Arnold et al., 1998; Neitsch et al., 2011) (Equação 1).

$$SW_t = SW_0 + \Sigma_{i=1}^{t}(R_{day} - Q_{surf} - E_a - W_{seep} - Q_{gw}) \quad (1)$$

onde: SW_t representa a quantidade final de água no solo (mm); SW_0, a quantidade inicial de água contida no solo no dia *i* (mm); *t* é o tempo em dias; R_{day}, a precipitação do dia *i* (mm); Q_{surf}, o escoamento superficial do dia *i* (mm); E_a, a evapotranspiração do dia i (mm); W_{seep}, indicando a quantidade de água que ingressa na zona vadosa no dia *i* (mm); e Q_{gw}, a quantidade de fluxo de retorno no dia *i* (mm).

O escoamento superficial pode ser calculado utilizando o método de Green e Ampt (1911) ou o método da Curva Número desenvolvido pelo *Soil Conservation Service* – SCS (1972). Neste estudo, optou-se pelo método da Curva Número (Equação 2), que foi desenvolvido para estimar o escoamento superficial considerando diferentes usos da terra e tipos de solo (Rallison e Miller, 1981).

$$Q_{surf} = \frac{(R_{day} - 0{,}2S)^2}{R_{day} - 0{,}8S} \quad (2)$$

onde: Q_{surf} representa o escoamento superficial acumulado em milímetros (mm), R_{day} é a precipitação diária em milímetros (mm), e *S* denota o parâmetro de retenção em milímetros (mm).

De acordo com Neitsch et al. (2011), esse parâmetro varia tanto espacialmente quanto temporalmente na bacia, sendo influenciado por mudanças no tipo de solo, uso e cobertura da terra, declividade e umidade, como definido pela Equação 3.

$$S = 25{,}4\ (\frac{1000}{CN} - 10) \quad (3)$$

No contexto da equação, CN é o número da curva diário (1-100) que representa a permeabilidade e a capacidade de retenção do solo, em que valores baixos indicam maior infiltração, enquanto valores altos indicam menor retenção e maior escoamento superficial.

2.4. Índice de seca hidrológica SDI

O índice SDI é amplamente utilizado para caracterização de secas hidrológicas, por basear-se diretamente em dados de vazão, refletindo de forma mais fiel a disponibilidade hídrica em corpos

d'água superficiais. Esse índice permite identificar a intensidade, duração e frequência de eventos de seca ao longo do tempo, sendo especialmente útil em estudos de gestão de recursos hídricos.

Para a caracterização das secas hidrológicas na BHRS, aplicou-se o SDI em três estações fluviométricas, conforme o procedimento proposto por Nalbantis e Tsakiris (2009). O índice é calculado a partir do volume acumulado de vazão, obtido pela soma das vazões médias mensais ($Q_{i,j}$) ao longo de períodos de referência predefinidos. Assim, para cada ano hidrológico i, a vazão acumulada ($V_{i,j}$) foi determinada conforme a Equação 4, servindo de base para o cálculo do SDI.

$$V_{ik} = \sum_{j=1}^{3k} Qi,j \quad i = 1,2,\dots T \quad j = 1,2,\dots,12 \quad k = 1,2,3,4 \tag{4}$$

onde $Q_{i,j}$ é a vazão mensal e $V_{i,k}$ é o volume acumulado de vazão para o i-ésimo ano hidrológico e o k-ésimo período de frequência; k=1 é usado para o período de setembro a novembro, k=2 é usado para o período de novembro a fevereiro, k=3 é usado para o período de setembro a maio e k=4 é usado para o período de setembro a agosto. Após calcular $V_{i,k}$, calcula-se o SDI para cada período de referência k de i anos.

Após a determinação dos volumes acumulados, os valores foram padronizados em diferentes escalas temporais para a obtenção do SDI, conforme a Equação 5:

$$SDI_{i,k} = \frac{V_{i,k} - \overline{V_k}}{k} \text{ i} = 1,2\dots\text{k} = 1,2,3,4 \tag{5}$$

onde $SDI_{i,k}$ é o índice de seca hidrológica para o período i e escala temporal k; $V_{i,k}$ é a vazão acumulada no período k no ano i; $\overline{V_k}$ é a média histórica da vazão acumulada no período k e S_K é o desvio padrão da vazão acumulada no período k.

Em geral, os dados de vazão para bacias pequenas não seguem uma distribuição normal e apresentam uma distribuição de probabilidade assimétrica (Habibi, 2024). De acordo com Nalbantis e Tsakiris (2009), Tabari et al. (2013) e Zamani et al (2015), uma distribuição log-normal é utilizada da seguinte forma para ajustar os dados de vazão para o cálculo do SDI (3):

$$SDI_{i,k} = \frac{y_{i,k} - \overline{y_k}}{S_{y,k}} \text{ i} = 1,2\dots\text{k} = 1,2,3,4 \tag{3}$$

Nesse caso,

$$y_{ik} = \ln(V_{i,k}) \quad i = 1,2,\dots T \quad k = 1,2,3,4 \tag{4}$$

onde Y_k e $S_{y,k}$ representam a média e o desvio padrão de V_i, e T é o número de anos.

De acordo com o impacto estudado, valores de SDI de 3 meses ou menos são úteis para o monitoramento rotineiro de seca; valores de SDI de 6 meses ou menos são úteis para o monitoramento do impacto agrícola e valores de SDI de 12 meses ou mais são úteis para detecção do impacto hidrológico (WMO, 2012). A interpretação do SDI segue uma classificação padronizada, no qual os valores negativos indicam condições de seca, enquanto valores positivos representam períodos

úmidos. Em geral, os eventos de seca são classificação conforme sua severidade, variando de seca leve a extrema, apresentados na Tabela 2.

Tabela 2 – Classificação do SDI

Intervalo do SDI	Classe
SDI ≥ 0,0	Não há seca
- 1,00 ≤ SDI < 0,0	Seca leve
-1,50 ≤ SDI < -1,00	Seca moderada
-2,00 ≤ SDI < -1,50	Seca severa
SDI ≤ -2,00	Seca extrema

Fonte: Nalbantis e Tsakiris (2009)

RESULTADOS E DISCUSSÃO

As Figuras 2 a 4 apresentam a evolução temporal do SDI nas escalas 3,6,9 e 12 meses para os postos Iguatu, Arneiroz e Malhada. De modo geral, os eventos de seca mais intensos ocorreram no início de 1990 e, principalmente, entre 2012 e 2016, período associado à prolongada estiagem que afetou grande parte do Nordeste brasileiro. Em todas as estações, os valores negativos do SDI tornaram-se mais persistentes com o aumento da escala temporal de acumulação, refletindo a resposta integrada do sistema hidrológico aos déficits prolongados.

No posto Iguatu (Figura 2), os resultados indicaram a ocorrência em diferentes períodos da série histórica. Na escala de 3 meses, destacou-se um evento de seca extrema (-3,2) em 1992/93. Outros episódios de seca severa foram observados em 2004/05 (-1,77) e 2019/20 (-1,57); e um evento de seca moderada em 2012/13 (-1,29).

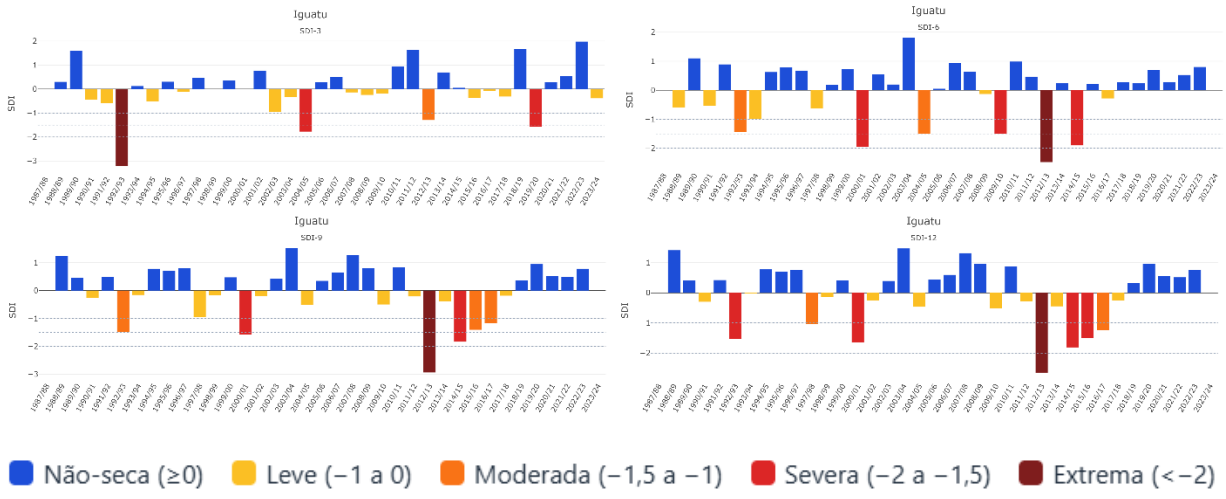


Figura 2 – SDI para os acumulados de vazão anual de outubro a dezembro (SDI-3), outubro a março (SDI-6), outubro a junho (SDI-9) e outubro a setembro (SDI-12) para o posto Iguatu (36160000).

Além disso, nas escalas 6,9 e 12, verificou-se maior continuidade temporal dos eventos secos. O período entre 2012 e 2016 apresentou os menores valores de SDI da série, especialmente nas escalas SDI-9 e SDI-12, com registros de valores próximos ou inferiores a -3, caracterizando uma seca hidrológica extrema e prolongada. Após 2018, observa-se uma recuperação gradual das condições hidrológicas, com predominância de valores positivos de SDI.

No posto Arneiroz (Figura 3), a série apresentou alternância entre períodos úmidos e secos, especialmente na escala SDI-3, com destaque para os anos 1991/92, 1992/93 e 2015/16 com valores de -2,15, -2,24 e -2,36 respectivamente, que apresentaram episódios de seca extrema. No SDI-6 observou-se predominância de eventos de seca moderada, sendo identificados sete eventos de seca moderada, ocorridos nos anos hidrológicos de 1990/91 (-1,05), 1997/98 (-1,28), 2008/09 (-1,33), 2009/10 (-1,41), 2013/14 (-1,32), 2015/16 (-1,15) e 2018/19 (-1,06). Além disso, apenas dois eventos atingiram a classe de seca severa, registrados nos anos de 1992/93 (-1,52) e 2012/13 (-1,83), sendo este último ano o evento de maior intensidade observado para a escala analisada.

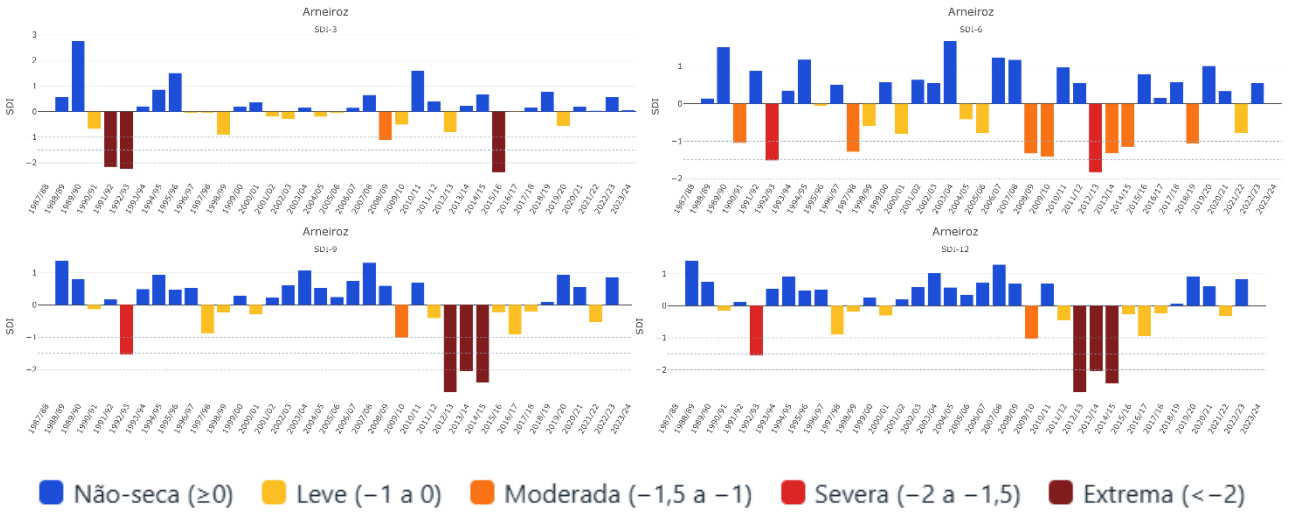


Figura 3 – SDI para os acumulados de vazão anual de outubro a dezembro (SDI-3), outubro a março (SDI-6), outubro a junho (SDI-9) e outubro a setembro (SDI-12) para o posto Arneiroz (36020000).

As escalas SDI-9 e SDI-12 apresentaram comportamento semelhante, com coincidência dos principais períodos de seca e recuperação hidrológica. Em ambas as escalas foi registrado um evento de seca moderada em 2009/10 (SDI-9= -1,01 e SDI-12= -1,03) e um evento de seca severa em 1992/93 (SDI-9= -1,53 e SDI-12= -1,56). Os eventos mais críticos, seca extrema, ocorreram em três anos consecutivos: 2012/13 (SDI-9= -2,70 e SDI-12= -2,69), 2013/14 (SDI-9= -2,06 e SDI-12= -2,05) e 2014/15 (SDI-9= -2,40 e SDI-12= -2,41). Esses resultados evidenciam a persistência dos déficits hidrológicos, refletida pela concordância entre as escalas de 9 e 12 meses.

No posto Malhada (Figura 4), observou-se maior discrepância entre os resultados obtidos nas escalas SDI-3 e SDI-6 quando comparado aos demais postos analisados. Enquanto o SDI-3 apresentou elevada variabilidade temporal, com alternância entre períodos secos e úmidos, o SDI-6 evidenciou eventos de seca mais persistentes e melhor definidos. Essa diferença indica que condições hidrológicas de curto prazo nem sempre foram mantidas ao longo de períodos mais extensos, refletindo a influência da acumilação temporal na caracterização dos eventos de seca.

De modo geral, o SDI-3 mostrou-se mais sensível às oscilações interanuais da vazão, enquanto o SDI-6 permitiu identificar com maior clareza os períodos de défcit hidrológico prolongado. Nessa escala, observa-se a ocorrência de secas mais intensas, com destaque para os eventos registrados em 1992/93 (-1,87), 2000/01 (-1,83), 2009/10 (-1,66) e 2012/13 (-1,77).

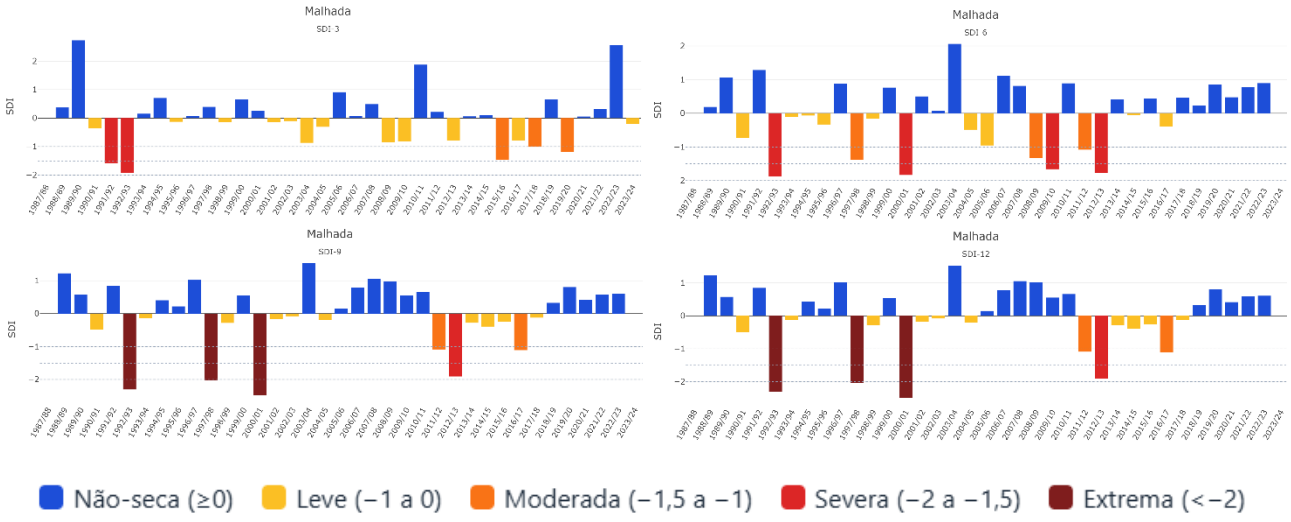


Figura 4 – SDI para os acumulados de vazão anual de outubro a dezembro (SDI-3), outubro a março (SDI-6), outubro a junho (SDI-9) e outubro a setembro (SDI-12) para o posto Malhada (36045000).

Além disso, foram identificados eventos secos distribuídos ao longo da série, sendo os de maior intensidade ocorridos, principalmente, nas escalas de 9 e 12 meses, nos anos de 1992/93 1997/98 e 2000/01, com valores de -2,30 , -2,03 e -2,49 respectivamente, em ambas as escalas. Outro período relevante ocorreu entre 2011 e 2017, com predominância de secas moderadas, com destaque para um evento de seca severa em 2012/13, com valores de SDI-9= -1,91 e SDI-12= -1,90, apresentando comportamento semelhante das escalas para o posto Malhada.

CONCLUSÃO

Os resultados obtidos para os três postos evidenciaram, que os eventos de seca hidrológica mais expressivos ocorreram em dois períodos principais, no início de 1990 e durante a seca regional de

2012 a 2017. Este último evento apresentou maior persistência temporal, sendo detectado simultaneamente em todas as estações fluviométricas e em todas as escalas de acumulação do SDI.

Entre os postos analisados, Arneiroz apresentou maior persistência dos déficits hidrológicos nas escalas de longo prazo (SDI-9 e SDI-12), enquanto Iguatu registrou os menores valores do índice, indicando eventos de maior intensidade. Por outro lado, Malhada maior variabilidade temporal, com episódios severos pontuais, porém com recuperação mais rápida após os períodos de estiagem.

De modo geral, os resultados demonstram a capacidade do SDI em identificar tanto secas de curta duração quanto eventos hidrológicos prolongados, permitindo avaliar a dinâmica temporal dos déficits de vazão e seus potenciais impactos sobre a disponibilidade hídrica regional. Além disso, a análise em diferentes escalas temporais mostrou-se fundamental para compreender a severidade e a persistência das secas hidrológicas na bacia estudada.

REFERÊNCIAS

ARNOLD, J.G.; SRINIVASAN, R.; MUTTIAH, R.S.; WILLIAMS, J.R. (1998). "Large area hydrologic modeling and assessment: Part I - model development". Journal of the American Water Resources Association 34(1), pp. 73-89.

BANDH, S.A.; SHAH, S.; PEERZADA, M.; REHMAN, T.; BASHIR, S.; WANI, S.A.; DAR, R. (2021). "Multidimensional analysis of global climate change: a review". Environmental Science and Pollution Research 28(20), pp. 24872-24888.

CLARKE, B.; OTTO, F.; STUART-SMITH, R.; HARRINGTON, L. (2022). "Extreme weather impacts of climate change: an attribution perspective". Environmental Research: Climate 1(1), 012001.

COGERH (2018). Caderno Regional da Sub-bacia do Alto Jaguaribe. Companhia de Gestão dos Recursos Hídricos, Fortaleza – CE.

GONÇALVES, S.T.N.; VASCONCELOS JUNIOR, F.C.; SAKAMOTO, M.S.; SILVEIRA, C.S.; MARTINS, E.S.P.R. (2021). "Índices e metodologias de monitoramento de secas: uma revisão". Revista Brasileira de Meteorologia 36(3), pp. 495-511.

GREEN, W.H.; AMPT, G.A. (1911). "Studies on soil physics. I. The flow of air and water through soils". The Journal of Agricultural Science 4(1), pp. 1-24.

HABIBI, B.; MEDDI, M.; ABDELKADER, M. (2024). "The frequency distribution and stochastic analysis of the hydrological drought in northern Algeria". Italian Journal of Agrometeorology 1, pp. 73-94.

NALBANTIS, I.; TSAKIRIS, G. (2009). "Assessment of hydrological drought revisited". Water Resources Management 23(5), pp. 881-897.

NEITSCH, S.L.; ARNOLD, J.G.; KINIRY, J.R.; WILLIAMS, J.R. (2011). Soil and Water Assessment Tool: Theoretical Documentation - Version 2009. Grassland, Soil and Water Research Laboratory - Agricultural Research Service; Blackland Research Center - Texas Agricultural Experiment Station, 647 p.

OJHA, S.S.; SINGH, V.; ROSHNI, T. (2021). "Comparison of meteorological drought using SPI and SPEI". Civil Engineering Journal 7, pp. 2130-2149.

RALLISON, R.E.; MILLER, N. (1981). "Past, present and future SCS runoff procedure", in Rainfall Runoff Relationship. Org. por Singh, V.P., Water Resources Publications, Littleton, Colorado, pp. 353-364.

RIENTJES, T.H.M.; MUTHUWATTA, L.P.; BOS, M.G.; BOOIJ, M.J.; BHATTI, H.A. (2013). "Multi-variable calibration of a semi-distributed hydrological model using streamflow data and satellite-based evapotranspiration". Journal of Hydrology 505, pp. 276-290.

SANTOS, K.M.S. (2020). Avaliação da Eficiência do Monitor de Secas para Definição de Secas em Sergipe. Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Sergipe, São Cristóvão – SE, 147 p.

SCS, SOIL CONSERVATION SERVICE. National Engineering Handbook. Section 4, SHRESTHA, S. et al. Integrated assessment of the climate and landuse change impact on hydrology and water quality in the Songkhram River Basin, Thailand. Science of the Total Environment, 2018. v. 643, p. 1610–1622.

SINGH, H.V.; JOSHI, N.; SURYAVANSHI, S. (2026). "Evaluating hydrological drought characteristics in a semi-arid river basin using the conditional copula approach under the changing climate". Journal of Earth System Science 135, 56.

TABARI, H.; NIKBAKHT, J.; HOSSEINZADEH TALAEE, P. (2013). "Hydrological drought assessment in Northwestern Iran based on Streamflow Drought Index (SDI)". Water Resources Management 27(1), pp. 137-151.

TAREKE, K.A.; AWOKE, A.G. (2022). "Comparing surface water supply index and streamflow drought index for hydrological drought analysis in Ethiopia". Heliyon 8(12), e12000.

WORLD METEOROLOGICAL ORGANIZATION (WMO); GLOBAL WATER PARTNERSHIP (GWP) (2017). Handbook of Drought Indicators and Indices. Integrated Drought Management Programme (IDMP), Integrated Drought Management Tools and Guidelines Series 2, Geneva, 52 p.

ZAMANI, R.; TABARI, H.; WILLEMS, P. (2015). "Extreme streamflow drought in the Karkheh river basin (Iran): probabilistic and regional analyses". Natural Hazards 76(1), pp. 327-346.