

XXVI SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HIDRÍCOS

MONITORAMENTO DE SECA ENTRE 2007 E 2024 NA BACIA DO CÓRREGO SÃO PEDRO (MG) COM SPI E SPEI BASEADOS EM DADOS OBSERVACIONAIS E REMOTOS

Pâmella Ferreira da Silva¹; Dioline Araujo Reis²; Celso Bandeira de Melo Ribeiro³; Ricardo Guimarães Andrade⁴ & Marcos Cicarini Hott⁵

Abstract: This study assessed the occurrence and intensity of extreme drought events in the São Pedro Basin, located in Juiz de Fora, Minas Gerais (Brazil), from 2007 to 2024. A comparative analysis was conducted using the Standardized Precipitation Index (SPI) and the Standardized Precipitation Evapotranspiration Index (SPEI), based on both observational and climate reanalysis datasets. Precipitation and evapotranspiration data were sourced from multiple platforms, including the local INMET weather station and the CHIRPS and ERA5-Land products. Two methodological approaches were applied: R-based statistical scripting and the cloud-based Google Earth Engine (GEE) platform. The indices were computed at various temporal scales (3, 6, 9, 12, and 24 month time series), enabling the detection of seasonal patterns, interannual trends, and prolonged drought episodes. The results revealed strong agreement between the two approaches, with GEE offering broader spatial coverage and faster processing, while R provided more granular, site-specific insights. Notably, the years 2014, 2017 and 2021 were identified as critical periods, marked by severe hydrological deficits. The integrated approach adopted in this study proved to be effective in characterizing regional climatic variability and offers a robust framework for supporting water resource management and planning in the context of increasing climate variability. The findings underscore the potential of combining different data sources and analytical platforms to enhance drought monitoring. Future efforts should consider extending this methodology to additional basins and incorporating other drought-related indices to strengthen hydrological monitoring and planning efforts.

Resumo: O estudo avaliou a ocorrência e a intensidade de secas extremas na Bacia do córrego São Pedro, localizada em Juiz de Fora (MG), no período de 2007 a 2024. A análise foi realizada por meio da aplicação comparativa dos índices SPI (Standardized Precipitation Index) e SPEI (Standardized Precipitation Evapotranspiration Index), com base em dados observacionais e de reanálise climática. Os dados foram coletados de diferentes fontes, incluindo a estação meteorológica local do INMET, além dos produtos CHIRPS e ERA5-Land, que foram processados utilizando duas abordagens metodológicas: scripts em linguagem R e a plataforma Google Earth Engine (GEE). Os índices foram calculados em diferentes escalas temporais (séries temporais de 3, 6, 9, 12 e 24 meses), permitindo a identificação de padrões sazonais, tendências interanuais e eventos prolongados de seca. As análises revelaram boa concordância entre os métodos, com destaque para a capacidade do GEE em oferecer

1)Universidade Federal de Juiz de Fora, (32) 2102-3429, pamella.ferreira@estudante.ufjf.br

2) Universidade Federal de Juiz de Fora (32) 2102-3429, dioline.araujo@estudante.ufjf.br

3) Universidade Federal de Juiz de Fora, (32) 2102-3429, celso.bandeira@ufjf.br

4) Embrapa, (32) 3311-7405, ricardo.andrade@embrapa.br

5) Embrapa, (32) 3311-7405, marcos.hott@embrapa.br

uma visão espacial ampla e do RStudio em fornecer detalhamento estatístico pontual. Os anos de 2014, 2017 e 2021 foram identificados como críticos, com déficits hídricos significativos. A abordagem integrada adotada demonstrou-se eficaz para a caracterização da variabilidade climática regional, sendo uma ferramenta útil para subsidiar a gestão dos recursos hídricos e o planejamento de ações de mitigação frente às mudanças climáticas. O estudo recomenda a expansão dessa análise para outras bacias da região e a incorporação de novos índices climáticos que possam enriquecer o monitoramento e a compreensão da dinâmica hidrológica local.

Palavras-Chave – Secas; Índices Climáticos; Monitoramento.

1. INTRODUÇÃO

Eventos hidrológicos extremos, como as secas, representam desafios crescentes em escala global, impactando negativamente diversos setores, como agricultura, abastecimento de água e ecossistemas (CEMADEN, 2024). No Brasil, a recorrência e a intensidade desses eventos têm se acentuado, exigindo estudos aprofundados para a compreensão de suas dinâmicas e o desenvolvimento de estratégias de mitigação e adaptação. A bacia hidrográfica do córrego São Pedro, localizada em Juiz de Fora, Minas Gerais, insere-se nesse contexto de vulnerabilidade, sendo suscetível aos impactos da escassez hídrica.

A modelagem de eventos extremos é uma ferramenta crucial para a gestão de recursos hídricos, permitindo a análise de padrões de precipitação e seus efeitos na disponibilidade de água. Nesse sentido, índices de seca, como o *Standardized Precipitation Index* (SPI), desenvolvido por McKee et al. (1993), e o *Standardized Precipitation Evapotranspiration Index* (SPEI), proposto por Vicente-Serrano et al. (2010), têm se mostrado eficientes na caracterização da seca em diferentes escalas temporais. Esses índices utilizam dados de estações meteorológicas para avaliar a anomalia de precipitação (SPI) e o balanço hídrico, considerando precipitação e evapotranspiração (SPEI).

A bacia do Córrego do São Pedro está localizada em Juiz de Fora, na Zona da Mata Mineira, e faz parte da bacia do Rio Paraíba do Sul, uma das mais importantes da região sudeste (ANA, 2020). Com um relevo marcado por áreas montanhosas e um clima tropical úmido (IBGE, 2022), essa bacia exerce um papel essencial para a cidade, contribuindo tanto para o abastecimento de água quanto para a drenagem de áreas urbanas (CEMIG, 2019). Ao mesmo tempo, por atravessar regiões de crescimento urbano e atividades agropecuárias, a bacia acaba sendo bastante impactada pela ação humana, o que exige atenção especial ao monitoramento da qualidade da água e do uso do solo (IGAM, 2020).

Ainda que a bacia do córrego São Pedro seja o ponto de interesse geográfico, a análise da seca requer uma abordagem mais abrangente, utilizando dados de estações meteorológicas regionais que integram sistemas de monitoramento. A correlação entre os dados dessas estações e os registros históricos de reservatórios, como a represa de Chapéu D'Uvas, que possui uma série temporal mais extensa, é fundamental para inferir a relação entre os índices de seca e as condições reais de armazenamento hídrico. A represa integra o sistema de abastecimento do município de Juiz de Fora, pois seu reservatório contribui para o controle do regime hidrológico do Rio Paraibuna, afluente do Paraíba do Sul. Tal abordagem permite uma compreensão mais sólida da severidade e da frequência dos eventos de seca na região de Juiz de Fora e arredores.

2. OBJETIVO

Avaliar a ocorrência e intensidade de eventos extremos de seca na bacia hidrográfica do córrego São Pedro, em Juiz de Fora (MG), por meio da aplicação comparativa dos índices SPI e SPEI.

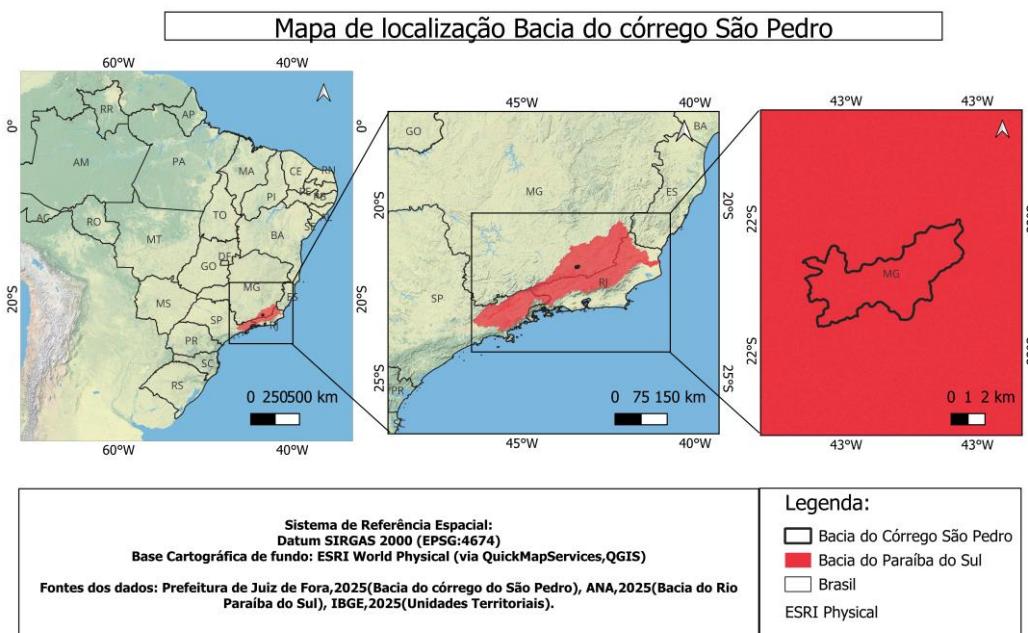
2.1. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- I. Coletar e processar dados de precipitação e evapotranspiração provenientes de fontes observacionais e de reanálise (INMET, ERA5-Land e CHIRPS).
- II. Calcular os índices SPI e SPEI em diferentes escalas temporais (3, 6, 9, 12 e 24 meses) para o período de 2007 a 2024.
- III. Comparar os resultados obtidos pelas abordagens via linguagem R e Google Earth Engine, analisando as vantagens e limitações de cada método.
- IV. Identificar os anos mais críticos em termos de seca, relacionando os índices com registros históricos e possíveis impactos regionais.
- V. Investigar a variação espacial e temporal da seca na bacia, contribuindo para a compreensão da dinâmica hídrica regional.

3. METODOLOGIA

Para a análise comparativa dos índices de seca SPI e SPEI, foram utilizados dados observacionais e reanálises climáticas referentes à bacia do córrego São Pedro (figura 1), situada na Zona da Mata Mineira. A estação meteorológica A518 - Juiz de Fora operada pelo Instituto Nacional de Meteorologia (INMET), foi selecionada como referência local para os dados de precipitação.

Figura 1 – Mapa de Localização da bacia do córrego São Pedro



E a estação 2143016 -Chapéu D'Uvas foi utilizada para complementar os valores faltantes por meio de uma regressão linear no software R, por ter uma base de dados mais robusta e devido à proximidade do local estudado e sua influência.

Os dados de precipitação e evapotranspiração empregados no cálculo dos índices SPI e SPEI foram obtidos a partir de produtos de reanálise do modelo ERA5-Land, disponibilizados pelo ECMWF (*European Centre for Medium-Range Weather Forecasts*), com resolução mensal e cobertura global. Complementarmente, os dados de precipitação do produto CHIRPS (*Climate Hazards Group InfraRed Precipitation with Station data*), com resolução espacial de 0,05°, foram utilizados para enriquecer a análise espacial da bacia hidrográfica.

O cálculo dos índices foi realizado com duas abordagens metodológicas. A primeira foi implementada em linguagem R, por meio de scripts específicos que processaram os dados da estação do INMET (precipitação) e do ERA5-Land (evapotranspiração), com o uso de bibliotecas estatísticas e hidrológicas. Foram gerados índices SPI e SPEI em múltiplas escalas de tempo (3, 6, 9, 12 e 24 meses).

A segunda abordagem foi desenvolvida na plataforma GEE, com scripts em JavaScript para o processamento dos dados climatológicos sobre a bacia. O shapefile da bacia do córrego São Pedro, obtido a partir do sistema de informações cartográficas da prefeitura de Juiz de Fora (PJF,2025), foi importado para a plataforma como asset e simplificado, com o objetivo de otimizar o tempo de processamento. A partir disso, foram extraídas e convertidas as séries mensais de precipitação total (mm) e evapotranspiração total (mm) do ERA5-Land, além da precipitação do CHIRPS.

A metodologia incluiu a acumulação de valores mensais para os diferentes períodos de análise e, posteriormente, o cálculo dos índices SPI e SPEI com base na padronização das séries acumuladas, utilizando o método z-score (subtração da média e divisão pelo desvio-padrão). Os resultados foram apresentados por meio de séries temporais que refletem a média espacial dos índices. Ademais, ao final os resultados foram submetidos ao teste de Mann-Kendall para verificar a tendência dos dados e se a mesma foi significativa.

4.RESULTADOS

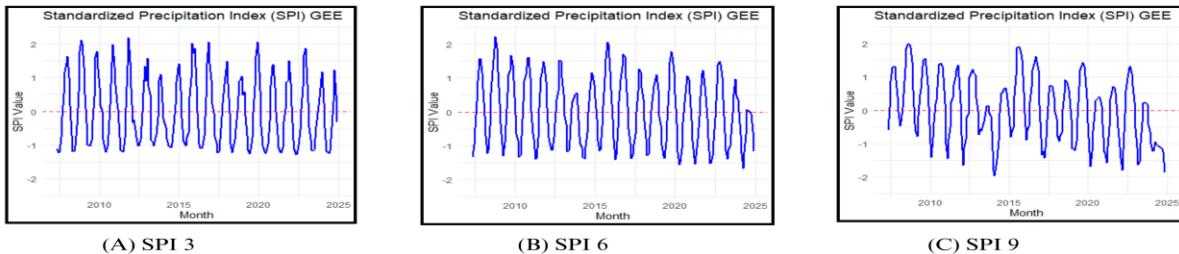
4.1. SPI

A comparação dos índices SPI (Figura 2) em diferentes escalas temporais (3, 6, 9 e 12 meses) foi realizada utilizando duas fontes de dados: (i) informações espaciais derivadas de produtos de sensoriamento remoto via satélite e (ii) séries históricas obtidas de estação meteorológica de referência (A518).

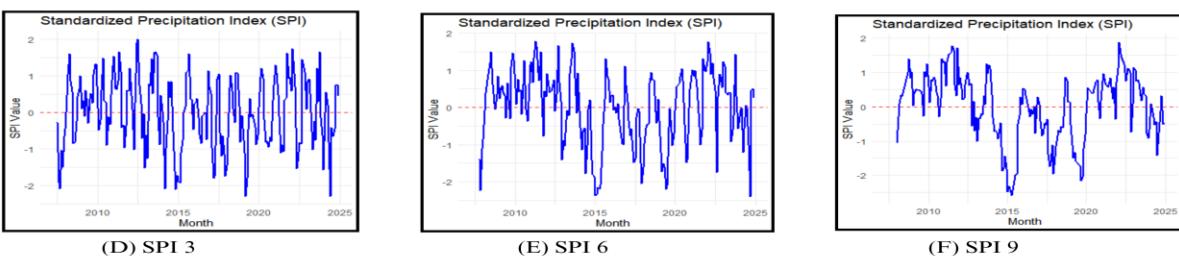
Observa-se que os padrões gerais de variabilidade temporal dos índices SPI são consistentes entre as duas abordagens, refletindo os períodos de déficit e excesso hídrico ao longo da série histórica analisada. Entretanto, as séries oriundas da estação apresentam maior variabilidade, refletindo o caráter pontual da medição e, portanto, mais precisos, garantindo um olhar mais minucioso para cada momento, enquanto os dados dos satélites mostram mais claramente a sazonalidade dos valores, que em um primeiro olhar parecem não se modificarem com frequência com exceção de alguns picos.

Figura 2– Séries temporais do índice SPI (3, 6, 9 e 12 meses) obtidas a partir de observações orbitais e observacionais locais

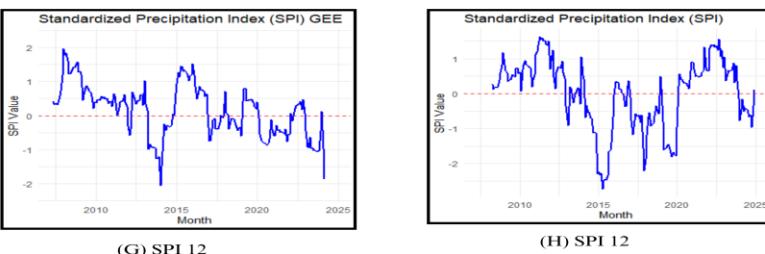
Dados de Satélite GEE



Dados das Estações



Dados de Satélite



Para a escala de 3 meses (SPI-3), ambos os métodos evidenciam a forte sazonalidade da precipitação na região, com variações rápidas e respostas mais sensíveis aos eventos de curto prazo. As oscilações apresentadas nos gráficos (A) e (D) indicam boa concordância, embora pequenas diferenças nos valores extremos possam ser atribuídas à diferença entre a média espacial da bacia e o ponto de medida da estação.

Na escala de 6 meses (SPI-6), os gráficos (B) e (E) demonstram uma suavização das flutuações e maior capacidade de identificar tendências sazonais e interanuais. Ambos os métodos capturam eventos secos significativos, como os registrados em torno de 2014-2015 e no período de 2021-2022, bem como períodos de recuperação hídrica.

Para o SPI-9, representado nos gráficos (C) e (F), nota-se uma maior desestabilidade na série, como a identificação de eventos de seca prolongada entre 2015 e 2020 e picos de mais chuvas entre 2009 e 2012, e em 2021 a 2022. A correspondência entre as séries se mantém adequada, reforçando a robustez dos resultados obtidos a partir das duas metodologias.

De modo geral, os resultados evidenciam a consistência entre os índices calculados a partir de dados espacializados e os obtidos por meio de séries pontuais, o que valida a utilização da abordagem baseada em reanálises e GEE para estudos regionais, especialmente em bacias com escassez de estações de medição.

Os gráficos (Figura 2) (G) e (H) abaixo apresenta os resultados dos índices SPI para a escala de 12 meses, obtidos tanto a partir da média espacial da bacia no GGE, quanto a partir da série pontual da estação meteorológica em R (gráficos I e J). Estes dados reforçam as observações feitas anteriormente.

Vale ressaltar que, o começo do gráfico deve ser desconsiderado pois necessitamos de pelo menos 2 pontos para iniciar e analisar o valor, no caso de 12 meses, devemos analisar apenas a partir de 2008. Como esperado, o índice de maior escala temporal apresenta séries mais suavizadas, evidenciando tendências hidrológicas de médio e longo prazo. No SPI-12 (G e H), observa-se uma boa correspondência entre as duas abordagens, com destaque para os períodos de seca severa em torno de 2014-2015 e para a recuperação gradual da umidade nos anos subsequentes. As oscilações de menor frequência capturam de forma consistente os períodos de anomalia negativa prolongada.

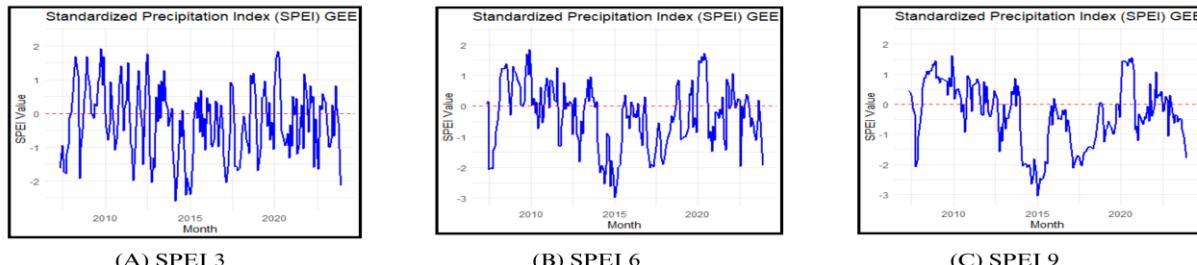
As diferenças pontuais observadas entre as séries podem ser atribuídas à natureza dos dados utilizados: enquanto o GEE processa uma média espacial da bacia, o cálculo em R reflete uma série pontual da estação, que pode captar eventos localizados de forma distinta. Ainda assim, a consistência geral entre os resultados reforça a confiabilidade do uso de produtos para o monitoramento de secas em escala de bacia. Análises estatísticas, incluindo o teste de Mann-Kendall, apontaram tendência decrescente nos valores do SPI ($p=0,03694$), sugerindo agravamento das condições de seca na bacia. Correlações elevadas ($>0,8$) foram obtidas entre as séries nas escalas de 3, 6 e 9 meses, enquanto no SPI-12 a concordância foi moderada, refletindo diferenças metodológicas na captação dos extremos.

4.1. SPEI

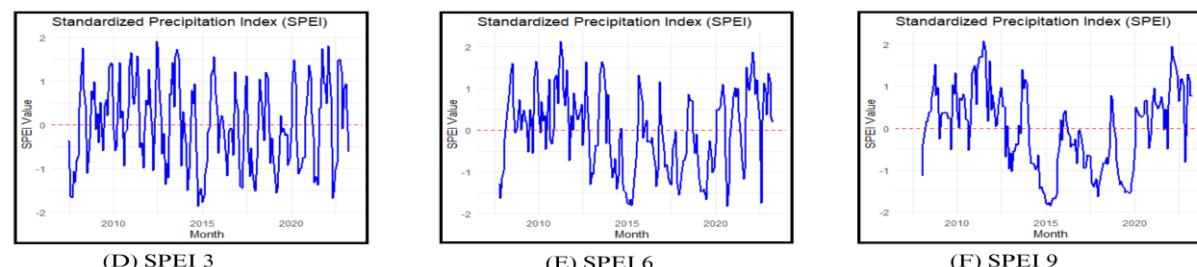
O SPEI foi avaliado a partir das mesmas fontes de dados (satélite e estação meteorológica), possibilitando a análise conjunta do balanço hídrico considerando tanto precipitação quanto evapotranspiração, e revelou um comportamento consistente entre as séries temporais, especialmente nas escalas mais curtas (3 e 6 meses). Os gráficos (A) a (F) ilustram essa concordância na figura 3. Em ambas as abordagens, os padrões sazonais e interanuais foram bem capturados, com variações positivas e negativas que refletem os períodos de excesso ou déficit hídrico observados ao longo da série histórica.

Figura 3 – Séries temporais do índice SPEI (3, 6, 9 e 12 meses) obtidas a partir de observações orbitais e medições in situ.

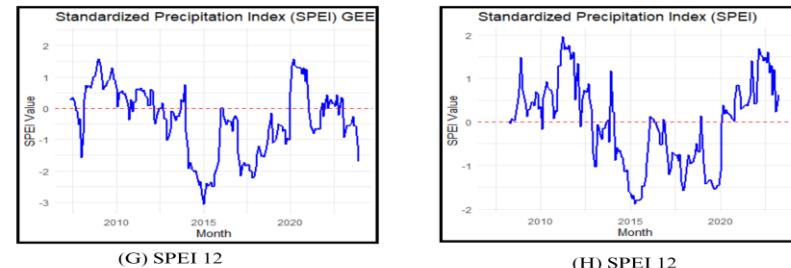
Dados de Satélite GEE



Dados das Estações



Dados de Satélite GEE



Nas escalas SPEI-3 e SPEI-6 na Figura 3 (Figuras A–B e D–E), destaca-se a forte variabilidade inter-anual, com oscilações frequentes que indicam a sensibilidade desses índices a eventos de curto prazo. Observa-se uma boa correspondência na identificação de eventos secos, como aqueles registrados entre 2014 e 2015, e de períodos mais úmidos, como em 2011 e 2020.

Já no SPEI-9 (Figuras C e F), a suavização dos ciclos hidrológicos se torna mais evidente, com uma resposta mais amortecida em relação às escalas anteriores. Ainda assim, a comparação entre os dois métodos aponta para uma coerência satisfatória na detecção de tendências de médio prazo, como o prolongado período seco entre 2014 e 2017.

Nas escalas de SPEI-12 na figura 3 (Figuras G–H), que reflete a acumulação hidrológica de longo prazo, o comportamento das séries apresenta diferenças mais perceptíveis entre os métodos, embora as principais tendências sejam mantidas. Ambas as abordagens capturam a transição para um período úmido no início da série (2008–2011) e o agravamento das condições de seca entre 2014 e 2017.

De modo geral, a análise indica que, embora pequenas discrepâncias sejam observadas nas escalas mais longas (possivelmente relacionadas a diferenças nos métodos de cálculo ou na resolução espacial dos dados de entrada), a consistência global entre os resultados obtidos pelos produtos de sensoriamento remoto e pelos registros obtidos de redes meteorológicas terrestres reforça a confiabilidade de ambas as ferramentas para o monitoramento da variabilidade climática na bacia estudada.

O teste de Mann-Kendall indicou tendência negativa significativa ($p=0,04709$), corroborando a intensificação das secas ao longo do período analisado. A análise estatística revelou alta correlação entre as fontes para escalas curtas e divergências maiores em escalas longas, reforçando a importância de combinar diferentes tipos de dados no monitoramento de secas.

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

O presente estudo alcançou seu objetivo de avaliar a ocorrência e intensidade de eventos extremos de seca na Bacia do córrego São Pedro, em Juiz de Fora (MG), por meio da aplicação comparativa dos índices SPI e SPEI. Foram processados e analisados dados de precipitação e evapotranspiração provenientes de fontes observacionais e de reanálise, permitindo o cálculo dos índices em diferentes escalas temporais ao longo do período de 2007 a 2024.

A comparação entre os resultados obtidos resultou em uma forte coerência entre as duas fontes de dados e os índices gerados, especialmente nas escalas de 3, 6 e 9 meses. Essas escalas apresentaram maior sensibilidade para identificar rapidamente eventos de seca e recuperação hídrica, permitindo detectar oscilações sazonais e interanuais com elevada precisão. Além disso, mostraram-se eficazes para caracterizar impactos hidrológicos de curta e média duração, essenciais para o manejo agrícola, planejamento de abastecimento e implementação de medidas preventivas. Em escalas mais longas, pequenas divergências foram observadas, destacando a importância de considerar as particularidades de cada abordagem metodológica. Cada ferramenta demonstrou vantagens distintas: os dados da estação oferecem maior controle estatístico e detalhamento na análise temporal, enquanto os dados de satélites proporcionam agilidade no processamento espacial e integração de grandes volumes de dados.

A análise histórica identificou períodos críticos de seca, notadamente em 2014, 2017 e 2021, com valores fortemente negativos dos índices, corroborando a ocorrência de déficits hídricos relevantes para os setores agrícola e de abastecimento da região. A comparação estatística reforçou a robustez dos resultados, demonstrando correlações elevadas entre as séries e confirmando que ambas as fontes de dados se complementam no monitoramento climático.

De forma geral, a abordagem integrada adotada neste estudo ampliou a compreensão da variabilidade hidrológica da bacia e evidenciou o potencial dos índices SPI e SPEI como ferramentas essenciais para a gestão de recursos hídricos e a mitigação de impactos associados a eventos extremos. Como perspectivas, recomenda-se a aplicação dessa metodologia em outras bacias hidrográficas, bem como a incorporação de índices adicionais e análises multivariadas que permitam aprofundar a compreensão da interação entre variabilidade climática e disponibilidade hídrica.

AGRADECIMENTOS - À Universidade Federal de Juiz de Fora (UFJF), ao CNPQ e a Embrapa pelo incentivo à pesquisa por meio da concessão da bolsa de Iniciação Científica, que foi

fundamental para a realização deste trabalho. Além disso, reconhecemos a importância das instituições que tornaram possível o acesso gratuito a dados e ferramentas indispensáveis para este estudo, como o Instituto Nacional de Meteorologia (INMET), o CEMADEN, o grupo CHIRPS, o ECMWF com seus dados do ERA5-Land, e a equipe responsável pela plataforma Google Earth Engine. O trabalho desenvolvido por essas instituições é valioso para a ciência e contribui diretamente para pesquisas como esta.

6. REFERÊNCIAS

aANA – Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico. *Conjuntura dos Recursos Hídricos no Brasil 2020: Informe anual*. Brasília: ANA, 2020. Disponível em: <https://www.gov.br/ana/pt-br>. Acesso em: 23 jun. 2025.

CENTRO NACIONAL DE MONITORAMENTO E ALERTAS DE DESASTRES NATURAIS (CEMADEN). (2024). *Secas*. Disponível em: <https://www.gov.br/cemaden/pt-br/paginas/ameacas-naturais/secas>. Acesso em: 16 maio 2025.

CEMIG – Companhia Energética de Minas Gerais. *Relatório de Gestão Hídrica: Reservatório de Chapéu D'Uvas*. Belo Horizonte: CEMIG, 2019. Disponível em: <https://www.cemig.com.br>. Acesso em: 23 jun. 2025.

GORELICK, N.; HANCHER, M.; DIXON, M.; ILYUSHCHENKO, S.; THAU, D.; MOORE, R. (2017). “Google Earth Engine: Análise geoespacial em escala planetária para todos”. *Remote Sensing of Environment*, v. 202, pp. 18–27. Disponível em: <https://earthengine.google.com>. Acesso em: 15 maio 2025.

IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. *Bases cartográficas e climáticas do Brasil*. Rio de Janeiro: IBGE, 2022. Disponível em: <https://www.ibge.gov.br>. Acesso em: 23 jun. 2025.

IGAM – Instituto Mineiro de Gestão das Águas. *Relatório de Monitoramento da Qualidade das Águas Superficiais de Minas Gerais – 2020*. Belo Horizonte: IGAM, 2020. Disponível em: <https://www.igam.mg.gov.br>. Acesso em: 23 jun. 2025.

INSTITUTO NACIONAL DE METEOROLOGIA (INMET). *Catálogo automático de dados meteorológicos*. Disponível em: <https://portal.inmet.gov.br/paginas/catalogoaut>. Acesso em: 10 maio 2025.

MCKEE, T. B.; DOESKEN, N. J.; KLEIST, J. (1993). “The relationship of drought frequency and duration to time scales”. In: *Conference on Applied Climatology*, 8., 1993, Anaheim. *Proceedings...* Boston: American Meteorological Society, pp. 179–183. Disponível em: https://www.droughtmanagement.info/literature/AMS_Relationship_Drought_Frequency_Duration_Time_Scales_1993.pdf. Acesso em: 16 maio 2025.

PREFEITURA DE JUIZ DE FORA (PJF). *Sistema de Informações Hidrográficas*. Disponível em: https://www.pjf.mg.gov.br/desenvolvimentodoterritorio/sistema_informacoes/hidrografico.php. Acesso em: 10 maio 2025.

VICENTE-SERRANO, S. M.; BEGUERÍA, S.; LÓPEZ-MORENO, J. I. (2010). “A multiscalar drought index sensitive to global warming: the SPEI”. *Journal of Climate*, Boston, v. 23, n. 7, pp. 1696–1718. Disponível em: <https://journals.ametsoc.org/view/journals/clim/23/7/2009jcli2909.1.xml>. Acesso em: 16 maio 2025.