ANÁLISE DA VARIABILIDADE CLIMÁTICA E MONITORAMENTO DE SECAS NO MUNICÍPIO DE PETROLÂNDIA-PE

Fabrício Eduardo Silva de Lima[1]; Raquel Ferreira do Nascimento[1]; José Adson Andrade de Carvalho Filho[1]; Ana Gabriella dos Santos Batista de Menezes[1]; Otávio Gomes Tenório[1]; Thaise de Souza Santos [1];Leidjane Maria Maciel de Oliveira[1]; Sylvana Melo dos Santos[1]; Anderson Luiz Ribeiro de Paiva[1] & Jaime Joaquim da Silva Pereira Cabral[1,2]

RESUMO – As secas, caracterizadas pela redução prolongada das precipitações e consequente déficit hídrico, constituem um dos principais desafios ambientais e socioeconômicos do semiárido brasileiro. Neste contexto, o presente estudo avaliou o comportamento das secas meteorológicas no município de Petrolândia (PE), região marcada pela elevada vulnerabilidade climática e pela dependência dos recursos hídricos do Rio São Francisco para o desenvolvimento agrícola e econômico. O objetivo foi analisar a ocorrência e a persistência de eventos secos por meio do Índice de Precipitação Padronizado (SPI) nas escalas de 3, 6 e 9 meses (SPI-3, SPI-6 e SPI-9), utilizando dados pluviométricos processados pela plataforma XHIDRO e fundamentados na distribuição Gama. Os resultados indicaram que as condições normais de precipitação predominaram ao longo da série histórica, representando aproximadamente 66% dos registros. Entretanto, cerca de um terço da série esteve associado a condições anômalas, com frequências de seca variando entre 15,66% e 17,21%, dependendo da escala temporal analisada. Observou-se ainda que a ocorrência de secas aumenta nas escalas mais longas, evidenciando a persistência dos déficits pluviométricos na região. Conclui-se que o SPI constitui uma ferramenta eficiente para o monitoramento climático e a identificação de períodos críticos, fornecendo subsídios relevantes para a gestão dos recursos hídricos, o planejamento agrícola e a formulação de políticas públicas voltadas à adaptação às mudanças climáticas e à convivência sustentável com o semiárido.

ABSTRACT– Droughts, characterized by prolonged reductions in precipitation and the resulting water deficit, constitute one of the main environmental and socioeconomic challenges in the Brazilian semiarid region. In this context, the present study evaluated the behavior of meteorological droughts in the municipality of Petrolândia, Pernambuco State, a region marked by high climatic vulnerability and dependence on the water resources of the São Francisco River for agricultural and economic development. The objective was to analyze the occurrence and persistence of dry events using the Standardized Precipitation Index (SPI) at 3-, 6-, and 9-month timescales (SPI-3, SPI-6, and SPI-9), based on rainfall data processed through the XHIDRO platform and fitted to the Gamma distribution. The results indicated that normal precipitation conditions predominated throughout the historical series, accounting for approximately 66% of the records. However, nearly one-third of the series was associated with anomalous conditions, with drought frequencies ranging from 15.66% to 17.21%, depending on the timescale analyzed. Furthermore, drought occurrence increased at longer timescales, highlighting the persistence of

[1]) Universidade Federal de Pernambuco (UFPE), Av. Prof. Moraes Rego, 1235 – Cidade Universitária, Recife – PE, CEP 50670-901. E-mail: anderson.paiva@ufpe.br
2) Universidade de Pernambuco (UPE), Rua Arnóbio Marques, 310 – Santo Amaro, Recife – PE, CEP 50100-130. E-mail: jaime.cabral@ufpe.br

precipitation deficits in the region. It is concluded that the SPI is an effective tool for climate monitoring and the identification of critical periods, providing valuable support for water resources management, agricultural planning, and the formulation of public policies aimed at climate change adaptation and sustainable coexistence with semiarid conditions.

Palavras-Chave – Monitoramento de secas; Índice de Precipitação Padronizado (SPI); Semiárido.

1 - INTRODUÇÃO

Fenômenos naturais que podem ter impactos significativos na sociedade e meio ambiente, as secas ocorrem a partir de uma escassez prolongada de precipitações e um balanço hídrico negativo significativo. O ciclo de escassez das secas inicia a partir da diminuição da disponibilidade hídrica, posteriormente afetando toda a indústria dependente diretamente disso, resultando na diminuição da oferta de alimentos, energia e outros produtos e serviços (dos Santos, 2019; Gomes, 2019)

.

Desenvolvido por McKee *et al*. (1993), o Índice de precipitação padrão é calculado a partir da distribuição de probabilidade das precipitações em um local ao longo de um período de tempo específico. Na formulação original, foi utilizado uma função de distribuição de propriedades Gama. Diante desse cenário, os índices de seca são ferramentas, calculadas a partir de dados meteorológicos, utilizadas para monitoramento da gravidade, intensidade e extensão da seca em um determinado local (Inocêncio *et al*., 2021).

A eficácia do monitoramento de secas depende criticamente da escolha do período de referência, o qual estabelece a base para definir condições normais e anomalias climáticas. Contudo, a persistente variabilidade climática e a não estacionariedade das séries pluviométricas na região semiárida do Brasil impõem desafios significativos para a aplicação de métodos tradicionais, que frequentemente adotam uma janela fixa de 30 anos (Brasil Neto *et al*., 2026). Dada a alta suscetibilidade do Nordeste Brasileiro a extremos climáticos, é imperativo avaliar como diferentes recortes temporais de referência influenciam a detecção e a caracterização da severidade das secas, garantindo que o monitoramento reflita com maior precisão a realidade climática contemporânea e forneça subsídios robustos para a gestão de recursos hídricos e formulação de políticas públicas de mitigação (Inocêncio *et al*., 2021; Barbosa, 2024).

O município de Petrolândia, localizado no estado de Pernambuco, insere-se em uma região de alta suscetibilidade a eventos climáticos extremos, apresentando vulnerabilidade à escassez hídrica (Lima *et al*., 2024). Historicamente, esta área tem sido classificada como uma zona de ambiente seco, com características climáticas que favorecem a degradação e a desertificação quando submetidas a manejo inadequado (da Silva *et al*., 2023). Devido à sua posição geográfica

estratégica e à proximidade com o Rio São Francisco, o município destaca-se pela diversidade agrícola e potencial produtivo, fatores que, embora impulsionados pela irrigação, permanecem sensíveis à variabilidade das precipitações (Jardim *et al*., 2021).

Nesse cenário, a aplicação do Índice de Precipitação Padronizado (SPI) em Petrolândia revela-se uma ferramenta de monitoramento indispensável, pois permite a quantificação precisa da severidade e da persistência de períodos secos, fornecendo subsídios técnicos fundamentais para o planejamento agrícola, a gestão dos recursos hídricos e a implementação de políticas públicas voltadas à convivência com o semiárido, garantindo maior resiliência frente às oscilações climáticas (Inocêncio *et al*., 2021; Brasil Neto *et al*., 2026).

2 - METODOLOGIA

2.1 - Área de estudo

O município de Petrolândia está localizado no estado de Pernambuco (Figura 1), inserido no semiárido nordestino, uma região historicamente marcada por alta suscetibilidade a eventos climáticos extremos e vulnerabilidade à escassez hídrica. Sua climatologia é caracterizada como um ambiente seco, com condições edafoclimáticas que favorecem a desertificação sob manejo inadequado. Apesar dessa vulnerabilidade, o município possui posição geográfica estratégica, com proximidade ao Rio São Francisco, o que impulsiona a diversidade agrícola e o potencial produtivo através da irrigação, embora essas atividades permaneçam sensíveis à variabilidade pluviométrica da região.

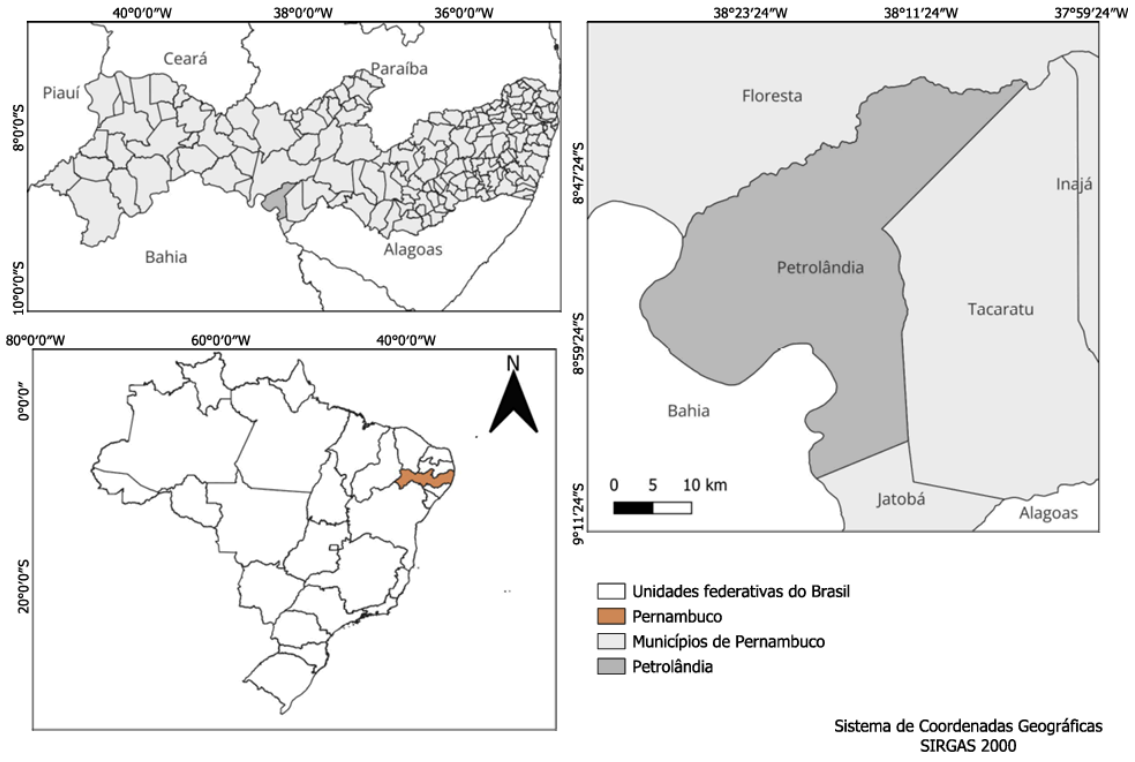


Figura 1 – Localização do município de Petrolândia

2.2 - Índice de precipitação padronizado

O Índice de Precipitação Padronizado para três, seis e nove meses (SPI-3, SPI-6 e SPI-9) foi utilizado para quantificar o desvio da precipitação observada em relação à média histórica local, a partir da plataforma XHIDRO, ecossistema integrado de ferramentas analíticas desenvolvido para otimizar o processamento de dados hidroclimáticos, conforme dos Santos Araujo *et al*. (2025). O cálculo do índice baseia-se na normalização dos dados pluviométricos, processo que permite a comparação de séries temporais em diferentes escalas de tempo. A metodologia de cálculo segue o procedimento descrito por McKee *et al*. (1993), estruturado nas etapas abaixo, descritos por dos Santos Araujo *et al*. (2025):

A precipitação acumulada mensal é ajustada a uma função de densidade de probabilidade Gama, definida por:

$$g(x) = \frac{X^{\alpha-1} . e^{\frac{-x}{\beta}}}{\beta^{\alpha} . \Gamma(\alpha)} \text{ , para } X > 0 \quad (01)$$

Onde α representa o parâmetro de forma, β o parâmetro de escala, e Γ(α) a função gama. Os parâmetros α e β são estimados para cada série temporal através de estimadores de máxima verossimilhança, onde:

$$\alpha = \frac{1}{4A}\left(1 + \sqrt{1 + \frac{4A}{3}}\right) \quad (2)$$

$$\beta = \frac{\bar{x}}{\alpha} \quad (3)$$

$$A = \ln(\bar{x}) - \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n} \ln(x_i) \quad (4)$$

Considerando que a distribuição Gama não é definida para precipitação nula (x = 0), a função de distribuição cumulativa é ajustada para incluir esses eventos:

$$H(x) = q + (1 - q).G(x) \quad (5)$$

Onde q representa a probabilidade de ocorrência de precipitação nula (razão entre o número de meses sem chuva e o total de observações) e G(x) é a distribuição cumulativa da função Gama.

Para finalizar, a probabilidade acumulada H(x) é convertida em um valor de SPI que segue a distribuição normal padrão (média zero e desvio-padrão um), utilizando a aproximação de Abramowitz e Stegun (1965):

Para $0 < H(x) < 0,5$:

$$SPI = -\left[t - \frac{c_0 + c_1 t + c_2 t^2}{1 + d_1 t + d_2 t^2 + d_3 t^3}\right] \quad (6)$$

$$t = \sqrt{ln\left(\frac{1}{(H(x))^2}\right)} \quad (7)$$

Para $0,5 < H(x) < 1,0$:

$$SPI = \left[t - \frac{c_0 + c_1 t + c_2 t^2}{1 + d_1 t + d_2 t^2 + d_3 t^3}\right] \quad (8)$$

$$t = \sqrt{ln\left(\frac{1}{(1 - H(x))^2}\right)} \quad (9)$$

Os coeficientes utilizados para esta transformação são: c0 = 2,515517, c1 = 0,802853, c2 = 0,010328, d1 = 1,432788, d2 = 0,189269 e d3 = 0,001308.

3 - RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 - Análise do SPI em Petrolândia

A série temporal do SPI-3, SPI-6 e SPI-9 para Petrolândia revela um regime climático marcado por alternâncias entre períodos de normalidade e eventos recorrentes de déficit hídrico, característicos do clima semiárido (Figuras 2, 3 e 4).

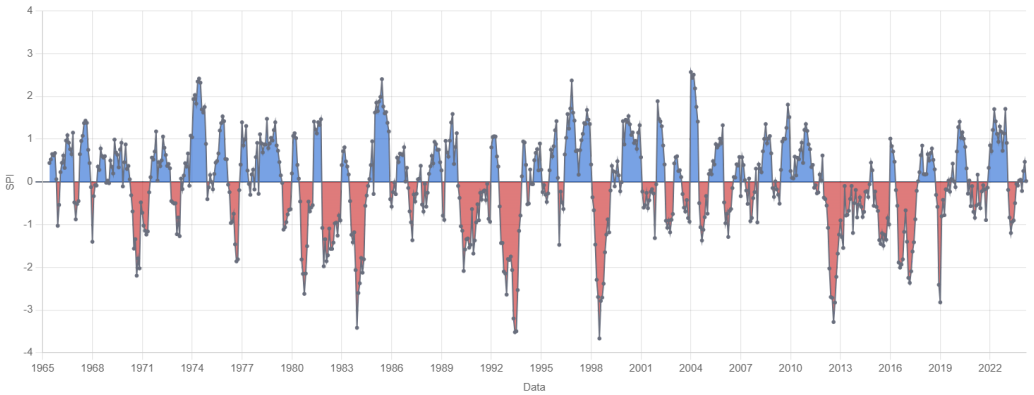


Figura 2 – SPI-3 Petrolândia (1965 - 2024)

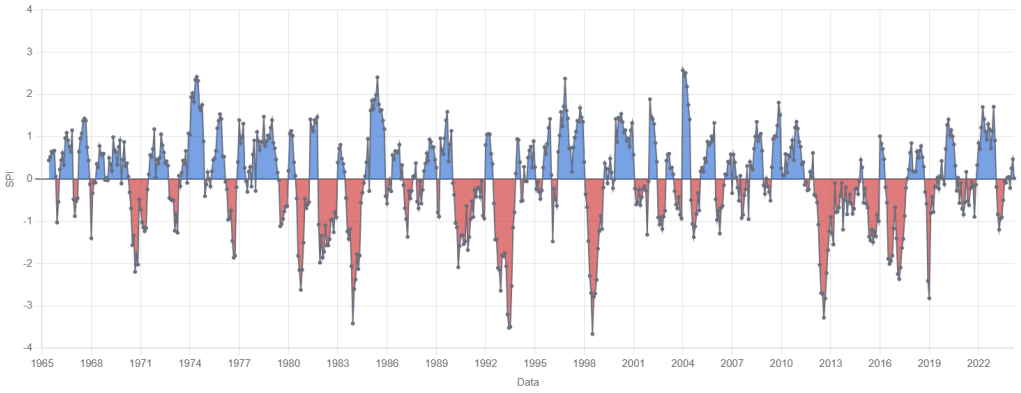


Figura 3 – SPI-6 Petrolândia (1965 - 2024)

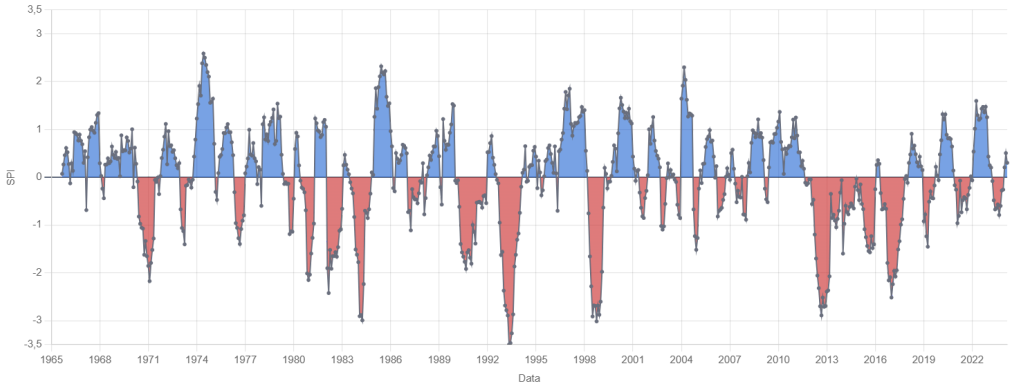


Figura 4 – SPI-9 Petrolândia (1965 - 2024)

A observação das séries temporais revela que, enquanto o SPI-3 apresenta oscilações mais frequentes e de curta duração, refletindo a volatilidade da precipitação no semiárido, as escalas de SPI-6 e SPI-9 demonstram uma maior persistência de eventos secos. Esse comportamento corrobora os achados de Inocêncio et al. (2021), que ao investigarem a propagação de secas em Pernambuco, destacaram que a "memória" do sistema hídrico regional é sensível à escala temporal, onde deficiências acumuladas em períodos mais longos (como os captados pelo SPI-9) possuem maior correlação com impactos severos na segurança hídrica e no esgotamento de reservatórios.

Além disso, os períodos de seca severa observados em Petrolândia alinham-se aos padrões de variabilidade climática identificados por Jardim et al. (2021), cujas análises espaciotemporais em Pernambuco indicam que o sertão pernambucano, onde se localiza o município, apresenta uma heterogeneidade pluviométrica acentuada, frequentemente exacerbada por fenômenos de grande escala.

Também pode ser verificada a correspondência entre os eventos de seca identificados pelo SPI e os episódios historicamente registrados no Nordeste brasileiro, especialmente aqueles ocorridos nas décadas de 1980, 1990 e durante a prolongada seca iniciada em 2012. Observa-se que os maiores déficits registrados nas escalas de seis e nove meses coincidem com períodos reconhecidos por seus impactos sobre a disponibilidade hídrica, a produção agrícola e o armazenamento dos reservatórios da região, evidenciando a capacidade dessas escalas em representar secas de caráter mais persistente. Em contrapartida, o SPI-3 apresenta respostas mais rápidas às oscilações da precipitação, identificando eventos de curta duração que nem sempre evoluem para secas hidrológicas significativas. Dessa forma, os resultados reforçam a importância da utilização conjunta de diferentes escalas temporais do SPI, uma vez que cada uma representa distintas fases da evolução da seca, desde os déficits meteorológicos iniciais até os impactos acumulados sobre os recursos hídricos, fornecendo uma avaliação mais abrangente da variabilidade climática em Petrolândia.

3.2 - Comportamento estatístico da série

A distribuição das categorias do SPI (Tabela 1) evidencia um comportamento relativamente equilibrado entre as diferentes escalas temporais analisadas (SPI-3, SPI-6 e SPI-9). Em todas elas, a maior parte dos registros concentra-se na faixa de normalidade climática (SPI entre -0,99 e 0,99), representando aproximadamente 64% a 67% dos valores observados. Esse resultado indica que as condições pluviométricas habituais predominam ao longo da série histórica, característica esperada em índices padronizados. De forma agregada, os dados demonstram que, em Petrolândia, cerca de 66% do tempo a precipitação permanece dentro da faixa considerada normal.

Tabela 1 – Tabela de frequência dos intervalos do SPI

Categoria do SPI	SPI-3	SPI-6	SPI-9	Interpretação
≥ 1,0	17,49%	19,26%	15,93%	Períodos úmidos
- 0,99 a 0,99	66,85%	64,16%	66,86%	Condições normais
≤ -1,0	15,66%	16,57%	17,21%	Eventos de Seca

Os períodos úmidos (SPI ≥ 1,0) corresponderam a 17,49% dos registros no SPI-3, 19,26% no SPI-6 e 15,93% no SPI-9. Em contrapartida, os eventos de seca (SPI ≤ -1,0) representaram 15,66%, 16,57% e 17,21% dos registros para SPI-3, SPI-6 e SPI-9, respectivamente. Esses

resultados revelam uma distribuição relativamente equilibrada entre condições úmidas e secas, característica típica das regiões semiáridas, marcadas pela elevada variabilidade interanual das precipitações.

Observa-se que a escala intermediária (SPI-6) apresentou a maior frequência de eventos úmidos, sugerindo que os excedentes de precipitação tendem a ser mais evidentes quando analisados em uma janela temporal semestral. Por outro lado, verifica-se um aumento gradual da frequência de secas à medida que a escala temporal se amplia, com o SPI-9 registrando a maior proporção de eventos secos. Esse comportamento indica que os déficits pluviométricos tendem a persistir ao longo do tempo, tornando-se mais evidentes em escalas temporais mais longas, nas quais os efeitos acumulados da precipitação são melhor representados.

De modo geral, aproximadamente um terço da série histórica esteve associado a condições anômalas, sejam elas úmidas ou secas. Além disso, a redução da frequência relativa de períodos úmidos e o aumento da ocorrência de secas nas escalas temporais mais longas sugerem que os impactos dos déficits pluviométricos possuem caráter persistente no município de Petrolândia. Tal comportamento é compatível com as características climáticas do semiárido brasileiro, onde a irregularidade espacial e temporal das chuvas favorece a ocorrência recorrente de secas e seus impactos sobre a disponibilidade hídrica.

A análise detalhada da série histórica permitiu ainda identificar períodos críticos em que o SPI-3 atingiu valores inferiores a -1,5, classificados como seca severa. Esses episódios evidenciam a vulnerabilidade hídrica do município e coincidem com períodos de anomalias climáticas registradas na região Nordeste. Como o SPI-3 responde rapidamente às variações da precipitação e da umidade do solo, sua aplicação mostra-se particularmente relevante como ferramenta de monitoramento e alerta precoce para o planejamento agrícola e a gestão dos recursos hídricos locais.

Os resultados obtidos corroboram os achados de Inocêncio *et al.* (2021), que destacam a relação entre a ocorrência de secas meteorológicas e o aumento da insegurança hídrica em Pernambuco. A frequência expressiva de eventos classificados como seca moderada a severa (SPI $\leq$ -1,0) reforça a necessidade de estratégias permanentes de convivência com o semiárido, especialmente no que se refere ao manejo das áreas irrigadas, à gestão dos reservatórios e à utilização sustentável dos recursos hídricos associados ao Rio São Francisco.

4 - CONCLUSÃO

A aplicação do Índice de Precipitação Padronizado (SPI) nas escalas de 3, 6 e 9 meses permitiu caracterizar a variabilidade climática do município de Petrolândia ao longo do período de 1965 a 2024, evidenciando a alternância entre períodos úmidos e secos e a recorrência de eventos de seca de diferentes intensidades. Os resultados demonstraram que o SPI-3 apresentou maior sensibilidade às oscilações de curto prazo da precipitação, enquanto os índices SPI-6 e SPI-9 demonstraram maior persistência dos déficits hídricos, permitindo identificar eventos prolongados de seca com maior potencial de impacto sobre os recursos hídricos. Além disso, os períodos de seca mais severa identificados pelo índice mostraram concordância com episódios historicamente registrados no semiárido pernambucano, indicando que o SPI representa adequadamente a dinâmica climática da região.

Os resultados obtidos reforçam que a compreensão da frequência, intensidade e duração dos eventos de seca é fundamental para avaliar o planejamento e a gestão dos recursos hídricos em regiões semiáridas. Nesse contexto, o SPI mostrou-se uma importante ferramenta para o monitoramento das condições climáticas, permitindo quantificar a severidade dos eventos de forma objetiva e fornecer informações úteis para o acompanhamento da variabilidade pluviométrica.

Conclui-se, portanto, que a integração de indicadores climáticos, como o SPI, ao planejamento municipal pode contribuir para o fortalecimento da capacidade de adaptação às condições climáticas adversas. A utilização dessas informações favorece a antecipação de períodos críticos, o aperfeiçoamento das estratégias de gestão dos recursos hídricos e o desenvolvimento de políticas públicas mais compatíveis com a dinâmica climática de Petrolândia, tornando o município mais resiliente aos impactos decorrentes da variabilidade climática e das mudanças climáticas.

AGRADECIMENTOS

CAPES, FACEPE, CNPQ pelas bolsas, e os projetos: Processo 409474/2023-1 e Processo nº 140531/2026-2, FACEPE Processos: APQ -1339- 3.07/22 e IBPG-1398-3.01/24, COMPESA, XHIDRO e Grupo NERHIS.

REFERÊNCIAS

ABRAMOWITZ, M.; STEGUN, I. A. (1965). *Handbook of mathematical functions with formulas, graphs, and mathematical tables*. 4. ed. New York: Dover Publications, 1046 p.

BARBOSA, H. A. (2024). "Understanding the rapid increase in drought stress and its connections with climate desertification since the early 1990s over the Brazilian semi-arid region". *Journal of Arid Environments*, 222.

BRASIL NETO, R. M.; CUNHA, A. P. M. DO A.; SILVA, R. M. DA; OLIVEIRA, G.; SANTOS, C. A. G. (2026). "How does the reference period influence meteorological drought analysis and monitoring? A case study in Northeast Brazil using a century of data". *Science of the Total Environment*, 1010.

DA SILVA, A. S. A.; STOSIC, T.; ARSENIĆ, I.; MENEZES, R. S. C.; STOSIC, B. (2023). "Multifractal analysis of standardized precipitation index in Northeast Brazil". *Chaos, Solitons and Fractals*, 172.

DOS SANTOS, S. R. Q.; CUNHA, A. P. M. DO A.; RIBEIRO-NETO, G. G. (2019). "Avaliação de dados de precipitação para o monitoramento do padrão espaço-temporal da seca no Nordeste do Brasil". *Revista Brasileira de Climatologia*, 25, pp. 80–100.

DOS SANTOS ARAUJO, D. C.; BANDEIRA RODRIGUES, A.; MENEZES DE FARIAS, V. E. (2025). *HidroTools - Integrated Tools for Hydroclimatic Data Analysis (1.0)*. Zenodo.

GOMES, A. R. DOS S. et al. (2019). "Estudo da relação entre a variabilidade dos índices de vegetação e temperatura da região Nordeste do Brasil". *Revista Brasileira de Meteorologia*, v. 34, n. 3, pp. 359–368.

INOCÊNCIO, T. DE M.; RIBEIRO NETO, A.; OERTEL, M.; MEZA, F. J.; SCOTT, C. A. (2021). "Linking drought propagation with episodes of climate-induced water insecurity in Pernambuco state - Northeast Brazil". *Journal of Arid Environments*, 193.

JARDIM, A. M. DA R. F. et al. (2021). "Spatiotemporal climatic analysis in Pernambuco State, Northeast Brazil". *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, 223.

LIMA, S. et al. (2024). "Economic vulnerability and its effects on conditional convergence clubs in the semi-arid region of Pernambuco, Northeast Brazil". *Papers in Regional Science*, v. 103, n. 3.

MCKEE, T. B.; DOESKEN, N. J.; KLEIST, J. (1993). "The relationship of drought frequency and duration to the time scales". In: *Anais do CONFERENCE ON APPLIED CLIMATOLOGY*, 8., 1993, Anaheim. Boston: American Meteorological Society, pp. 179-184.

SILVA, J. R. I. et al. (2022). "Morphometric characterization and land use of the Pajeú river basin in the Brazilian semi-arid region". *Journal of South American Earth Sciences*, 118.