Análise temporal do índice de aridez em Araripina-PE

Ivanildo Batista da Silva Júnior [1] ; Gabriel Graciano de Mendonça[2]; Iris Lima Cruz[3]; Lucélia Kátia de Lima[4]; Antonio Samuel Alves da Silva[5]

RESUMO – Estudos que analisam a aridez são importantes para identificação de regiões suscetíveis a desertificação, como é o caso do Nordeste do Brasil. O objetivo desse estudo é analisar o comportamento temporal do índice de aridez para o município de Araripina, localizado no Sertão de Pernambuco. Os dados de precipitação e evapotranspiração potencial foram extraídos do conjunto de dados TerraClimate para o período de 1970 a 2019. Foram utilizados os testes Mann-Kendall modificado e Sen's slope para identificar presença de tendência nas séries temporais do índice de aridez mensal e a média anual, e das frequências anuais das categorias do índice de aridez. Os resultados mostram que as séries mensais e anuais do índice de aridez apresentaram uma tendência negativa significativa, e há mais anos classificados como áridos do que não áridos na série anual. Os anos de 1981, 1983, 1991, 1992, 2012 e 2019 foram os anos com eventos áridos e hiperáridos. As frequências das categorias hiperárido e úmido foram as únicas a apresentaram tendência significativas (valor-p < 0,05), respectivamente, positiva e negativa, indicando um aumento dos eventos extremos de aridez e uma queda na umidade em Araripina.

ABSTRACT– Studies analyzing aridity are important for identifying regions susceptible to desertification, such as the Northeast of Brazil. The objective of this study is to analyze the temporal behavior of the Aridity Index for the municipality of Araripina, located in the hinterland of Pernambuco State. Precipitation and potential evapotranspiration data were obtained from the TerraClimate dataset for the period from 1970 to 2019. The Modified Mann–Kendall test and Sen's slope estimator were applied to detect trends in the monthly and annual Aridity Index time series, as well as in the annual frequencies of the Aridity Index categories. The results showed that both the monthly and annual Aridity Index series exhibited a significant negative trend, and that more years were classified as arid than non-arid in the annual series. The years 1981, 1983, 1991, 1992, 2012, and 2019 were identified as years with arid and hyper-arid events. The frequencies of the hyper-arid and humid categories were the only ones that showed significant trends (p-value < 0.05), positive and negative, respectively, indicating an increase in extreme aridity events and a decline in humidity in Araripina.

Palavras-Chave – Tendência; Aridez; Desertificação

1) Afiliação: Doutorando programa de Programa de Pós-Graduação em Biometria e Estatística Aplicada da Universidade Federal Rural de Pernambuco, fone: (81) 99521-3607, e-mail: ivanildo.batista13@gmail.com.
2) Afiliação: Doutorando programa de Programa de Pós-Graduação em Biometria e Estatística Aplicada da Universidade Federal Rural de Pernambuco.
3) Afiliação: Graduanda do curso de Licenciatura em Matemática, Universidade Federal Rural de Pernambuco.
4) Afiliação: Docente da Universidade Federal de Pernambuco (UFRPE), Codai, São Lourenço da Mata, Pernambuco, Brasil.
5) Afiliação: Docente do Departamento de Estatística e Informática da Universidade Federal Rural de Pernambuco.

INTRODUÇÃO

A desertificação é um processo em ocorre a deterioração e perda da capacidade produtiva e afetando principalmente a agricultura e pecuária e o Nordeste do Brasil, sendo a região mais árida, é a mais suscetível a esse fenômeno (Moraes, Wanderley e Delgado, 2024). O Estado de Pernambuco, por exemplo, junto com Ceará, Piauí e Rio Grande do Norte, apresenta um dos núcleos de desertificação do Nordeste localizados em Belém do São Francisco, Cabrobó, Carnaubeira da Penha, Floresta e Itacuruba (Souza Souza, 2024). A mesorregiões do Sertão e do São Francisco de Pernambuco destacam-se com maior suscetibilidade a desertificação (Cerqueira, Rodrigues e Almeida, 2020).

O município de Araripina, localizado na mesorregião do Sertão de Pernambuco, está inserido na sub-bacia do Rio São Francisco (Arruda *et al*., 2015) e destaca-se, economicamente, por fazer parte do Polo Gesseiro, responsável por 90% da produção nacional de gipsita (Arruda e Barreto, 2015), um Produto Interno Bruto superior a R$ 1,7 bilhão (IBGE, 2025); e uma produção agrícola, conforme que compreende tomate, sorgo, milho, melão, melancia, mandioca, mamona, feijão, fava, batata doce, amendoim e algodão herbáceo, com um valor de produção de R$ 29.235.500,00 (valores de 2024) (IBGE, 2024). O município é marcado por um regime pluviométrico sazonal com uma longa estação seca (Barbosa *et al*., 2023), com tendências de aumento da temperatura máxima e redução da precipitação (Lacerda *et al*., 2016). Silva et al (2018) identificou, entre 1970 e 2012, uma queda nos eventos precipitações diárias acima de 5, 10, 20 e 30 mm.

O objetivo desse trabalho é avaliar o índice de aridez para o município de Araripina, entre 1970 e 2019, analisando a tendência por meio dos testes Mann-Kendall modificado e *Sen's slope* (ou inclinação de Sen), assim como para as frequências de cada categoria do índice ao longo dos anos e identificar quais são as categorias que mais cresceram ou decresceram no período de análise.

MATERIAL E MÉTODOS

Dados e região

O município de Araripina está localizado no Sertão de Pernambuco, na Latitude 7º 34' 34" Sul e Longitude 40º 29' 54" Oeste, compreende uma área de 1.906,3 km² e uma altitude de 622 m e apresenta um clima semiárido, com altas temperaturas (entre 30 e 34º) e uma precipitação média anual de 674 mm (Silva *et al.*, 2018; Lacerda *et al*., 2016).

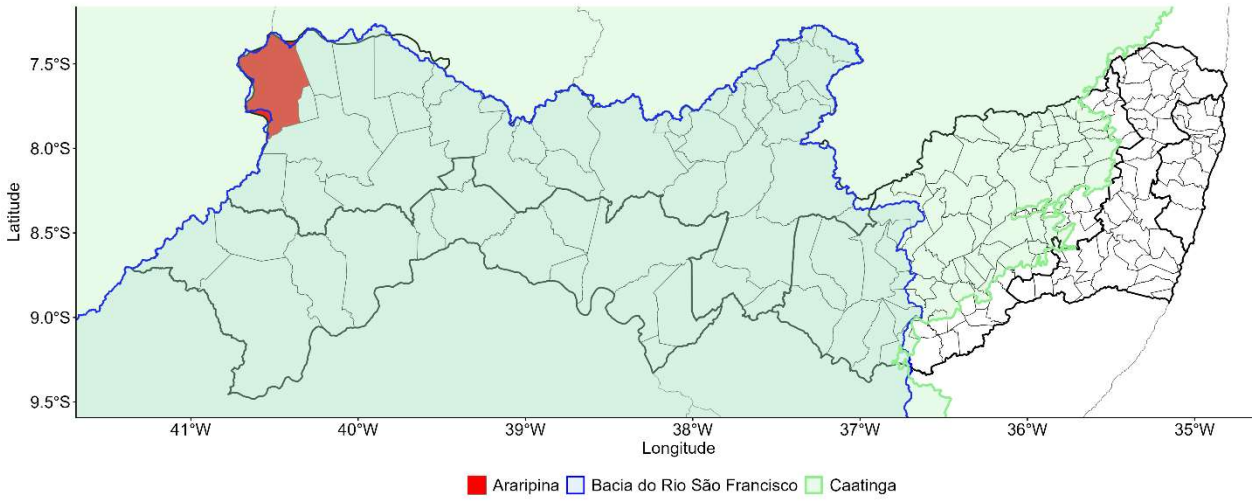


Figura 1 – Localização do município de Araripina

Os dados de precipitação e potencial de evapotranspiração usados nesse estudo foram extraídos do produto TerraClimate (Abatzoglou *et al.*, 2018), que é um conjunto de dados de alta resolução com diversas variáveis climáticas que podem ser usadas em estudos de hidrologia. As séries temporais de médias mensais foram extraídas a partir do pacote *brclimr* (Saldanha *et al.*, 2023) para o município de Araripina entre janeiro de 1970 a dezembro de 2019.

Índices de Aridez

O Índice de Aridez (IA) foi desenvolvido por Thornthwaite (1948), é recomendando para classificação climática da desertificação (Lopes et al., 2018). A sua fórmula é dada por $IA = \frac{P}{PET}$ onde P é a precipitação média mensal em mm e a oferta de água em nível de superfície e PET evapotranspiração potencial em mm e a demanda de água (Júnior e Bezerra, 2018). A categorização desse índice é da seguinte forma: Hiperárido (IA≤0,05), Árido (0,05< IA ≤ 0,20), Semiárido (0,20< IA ≤0,50), Subúmido Seco (0,50 < IA ≤ 0,65), Subúmido Úmido (0,65<IA<1,00) e Úmido (IA≥1,00).

Teste Mann-Kendall modificado (MMK)

O teste Mann-Kendall modificado (Yue e Wang, 2004) trata-se de um método estatístico não paramétrico usado para identificar possíveis tendências monotônicas em uma série temporal; no qual, para uma dada série temporal de n dados: $X = x_1, x_2, x_3, \dots, x_n$ a estatística S do teste é dada por

$$S = \sum_{i=1}^{n-1} \sum_{j=i+1}^{n} sgn(x_j - x_i), \text{com } sgn(x_j - x_i) = \begin{cases} 1, & if\ x_j > x_i \\ 0, & if\ x_j = x_i \\ -1, & if\ x_j < x_i \end{cases}$$

onde x_j e x_i são os valores de dados sequenciais. A estatística Z do teste MMK é dada por

$$Z = \begin{cases} \dfrac{S-1}{\sqrt{Var(S)^*}}, & S > 0 \\ 0, & S = 0 \\ \dfrac{S+1}{\sqrt{Var(S)^*}}, & S < 0 \end{cases}, \text{onde } Var(S)^* = Var(S).\frac{n}{n^*} \quad (2)$$

em que Var(S) é a variância do teste MMK, dada por

$$Var(S) = \frac{1}{18}\left[n\,(n-1)(2n-5) - \sum_{p=1}^{q} t_p\big(t_p-1\big)(2t_p+5)\right], \quad (3)$$

e o fator de correção $\frac{n}{n^*}$ é definido por $\frac{n}{n^*} = 1 + 2\sum_{k=1}^{n-1}(1 - k/n)\rho_k$, sendo n o número de dados da série temporal original, $\mathbf{n}^*$ o número efetivo de observações independentes e ρ_k o coeficiente de correlação serial populacional, que pode ser representado pelo coeficiente de correlação serial lag-k de amostra, como $\boldsymbol{r_k} = \frac{\frac{1}{n-k}\sum_{t=1}^{n-k}(X_t-\bar{X}_t)(X_{t+k}-\bar{X}_t)}{\frac{1}{n}\sum_{t=1}^{n}(X_t-\bar{X}_t)^2}$, em que k representa o intervalo de tempo (ou a distância) entre os pares correlacionados (X_t, X_{t+1}) e $\bar{X}_t = \frac{1}{n}\sum_{t=1}^{n} X_t$ é a média da amostra. Assim como o teste Mann-Kendall original, valores positivos (negativos) de Z indicam tendências crescentes (decrescentes). Para fins de teste, o valor p (ou *pv*) é calculado como $pv = 2\min[\varphi(Z), 1 - \varphi(Z)]$, em que φ é a função de distribuição acumulada da distribuição normal padrão. A hipótese nula é rejeitada quando *pv* é menor que o nível de significância α escolhido. Para séries temporais hidrometeorológicas, o valor comumente utilizado é α = 5% (também adotado no presente estudo).

Teste de inclinação de *Sen*

O estimador *Sen's slope* (Sen, 1968) é um método não paramétrico que foi proposto para estimar a verdadeira inclinação de uma tendência existente. Para realização do teste, calcula-se a inclinação $\mathrm{Q_{med}} = \mathrm{median}\left(\frac{x_j - x_i}{j-i}\right), i < j,$ onde x_j e x_i são valores nos tempos j e i, respectivamente, e $\mathrm{Q_{med}}$ reflete a inclinação da tendência. Os resultados do teste Mann-Kendall modificado e *Sen's slope* foram gerados por meio do pacote *modifiedmk* (Patakamuri e Patakamuri, 2020).

Frequência das categorias de aridez

A frequência das categorias de aridez anual é calculada pela razão entre o número de meses em que ocorreu uma determinada categoria e o número meses do ano (12). A fórmula é definida como $P_i = (n/12)\,.\,100\%$, onde n é o número de meses com a categoria de aridez e i é o ano.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

A figura 2 apresenta a séries do índice de aridez extraído das variáveis climáticas do produto TerraClimate para o período de 1970-2019. O índice variou entre 0 (hiperárido, ausência de precipitação) e 4,887 (úmido), com uma média de 0,5216 (condição semiárida). A condições hiperáridas, áridas e semiáridas (IA ≤ 0,65) corresponderam a 394 meses (65,66%) do período de análise. O teste Mann-Kendall modificado identificou uma tendência negativa (Z < 0) e significativa (valor-p < 0,05), indicando que uma redução da relação precipitação/evapotranspiração e um cenário de maior aridez em Araripina. A inclinação estimada da tendência (Sen's slope = -0,0001) mostrou que, entre 1970 e 2019, houve uma queda 11,5% do índice de aridez.

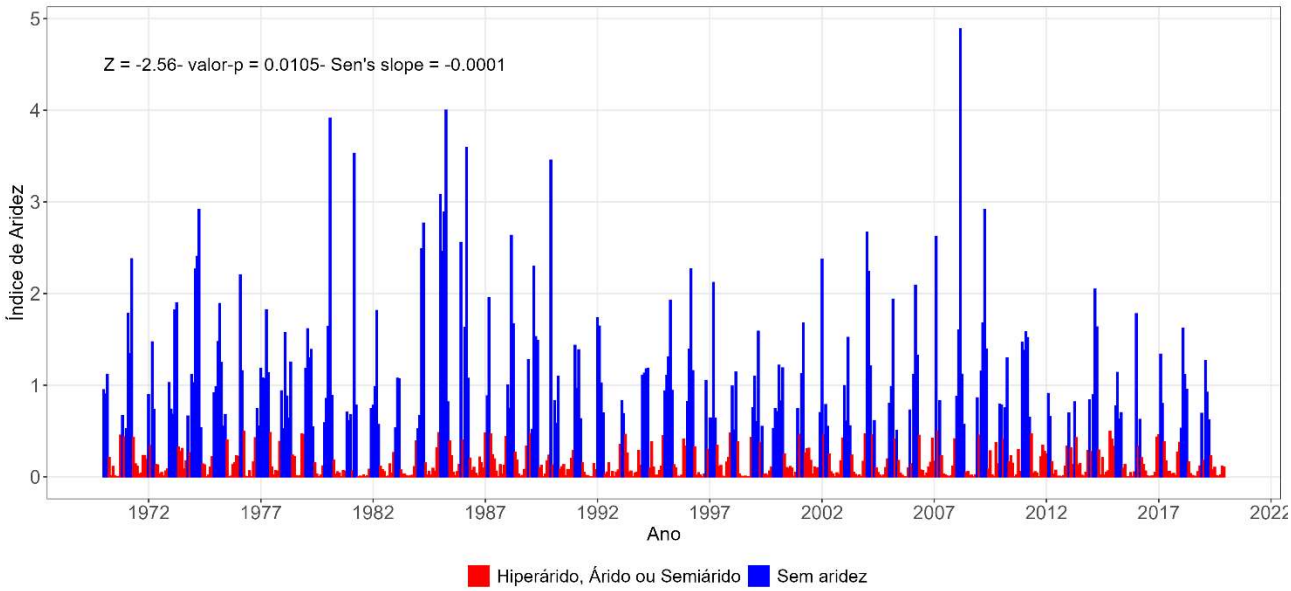


Figura 2 –Índice de aridez mensal entre 1970 e 2019

Na figura 3, o índice de aridez médio anual mostra uma presença maior de anos com alguma aridez (todos classificados como semiárido) ocorreu durante 29 dos 50 anos de análise. Existe uma sequência de não áridos que ocorreu de 1973 a 1980 e de 1984 a 1986, porém, em diante, a predominância é de anos classificados como semiáridos. O ano com menor valor de aridez ocorreu 2012 (IA = 0,212 - semiárido) e o maior valor foi de 1,38 (único ano úmido) em 1985, ano de La Niña (Correia Filho *et al*., 2019). A análise de tendência do teste Mann-Kendall modificado revelou uma tendência negativa (Z = -8,36) e significativa (valor-p < 0,001) com uma inclinação de Sen igual a -0,00435, que representa uma redução anual de quase 42% do índice de aridez. Na análise por década, mostra que apenas os períodos de 1990-1999 ($IA_{médio}$ = 0,442) e 2010-2019 ($IA_{médio}$ = 0,379) foram classificados na condição semiárida, enquanto que as demais décadas ($IA_{médio}$ > 0,5) foram classificadas como subúmidas secas.

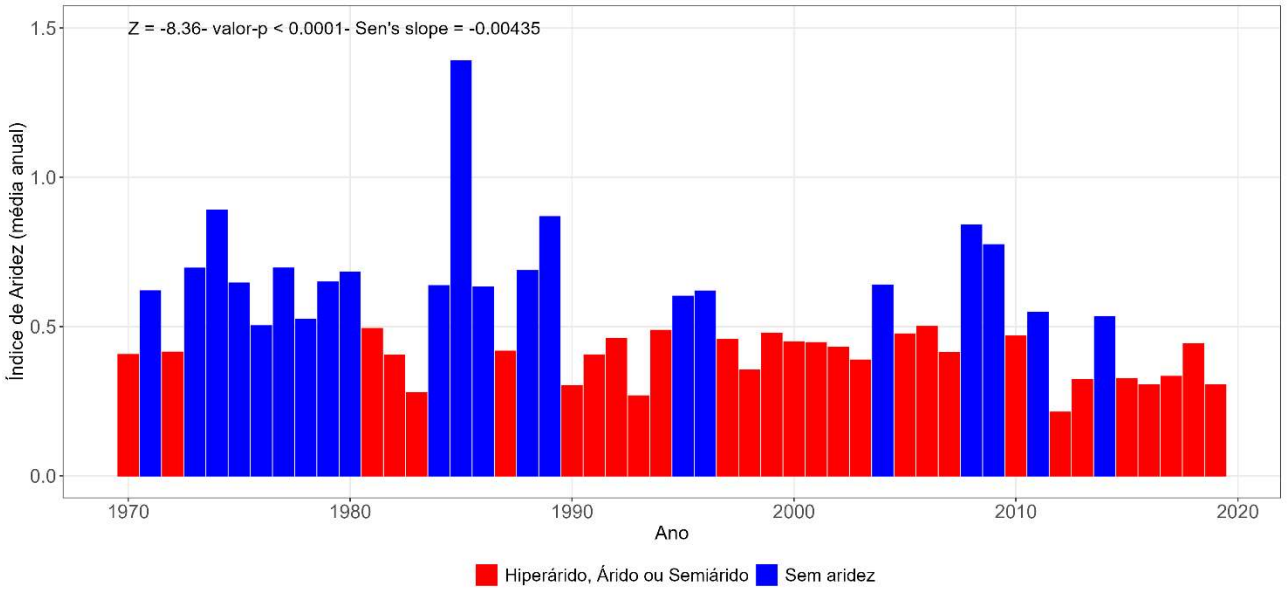


Figura 3 –Índice de aridez médio anual entre 1970 e 2019

A figura 4 mostra a proporção das categorias de aridez ao longo dos anos. Os anos com mais eventos áridos e hiperáridos foram 1981, 1983, 1991, 1992, 2012 e 2019, anos esses em que ocorreram grandes secas (Cunha *et al*., 2019; Pontes Filho *et al*., 2020). A análise por década mostra que a década de 2000-2009 apresentou mais anos com predominância de eventos áridos e hiperárido, com oito anos (2000,2002-2008), seguida pelas décadas de 1980 (7 anos: 1980-1984 e 1986-1987), 2010 (7 anos: 2012-2013 e 2015-2019), 1990 (6 anos: 1990-1994 e 1998) e 1970 com apenas um ano (1972).

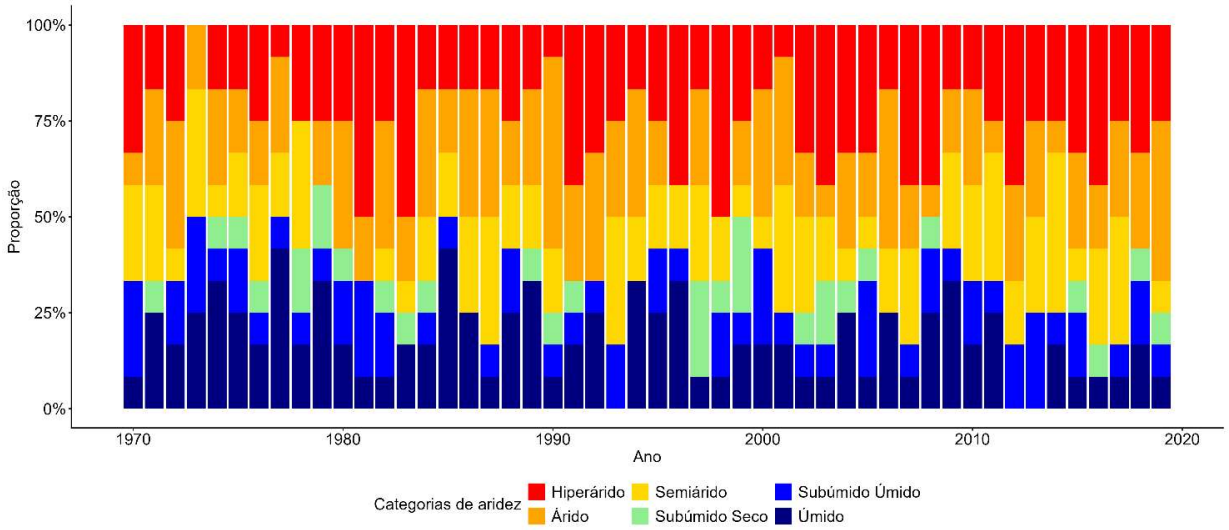


Figura 4 – Proporção de categorias do índice de aridez

A figura 5 apresenta as tendências das frequências das categorias do Índice de Aridez. A frequência da categoria hiperárida apresentou uma tendência positiva (Z = 2,16) e significativa (valor-p

= 0,0309), enquanto que a categoria úmida apresentou evidência para o inverso, com redução (Z = -5,99) significativa (valor-p < 0,05) da umidade em Araripina. Todas as outras frequências não apresentaram evidência para presença de tendência (valor-p > 0,05), ou seja, não há evidência de um comportamento de longo prazo. A tendência dessas frequências mostram que a piora das condições de aridez de Araripina é causada pelo eventos mais extremos.

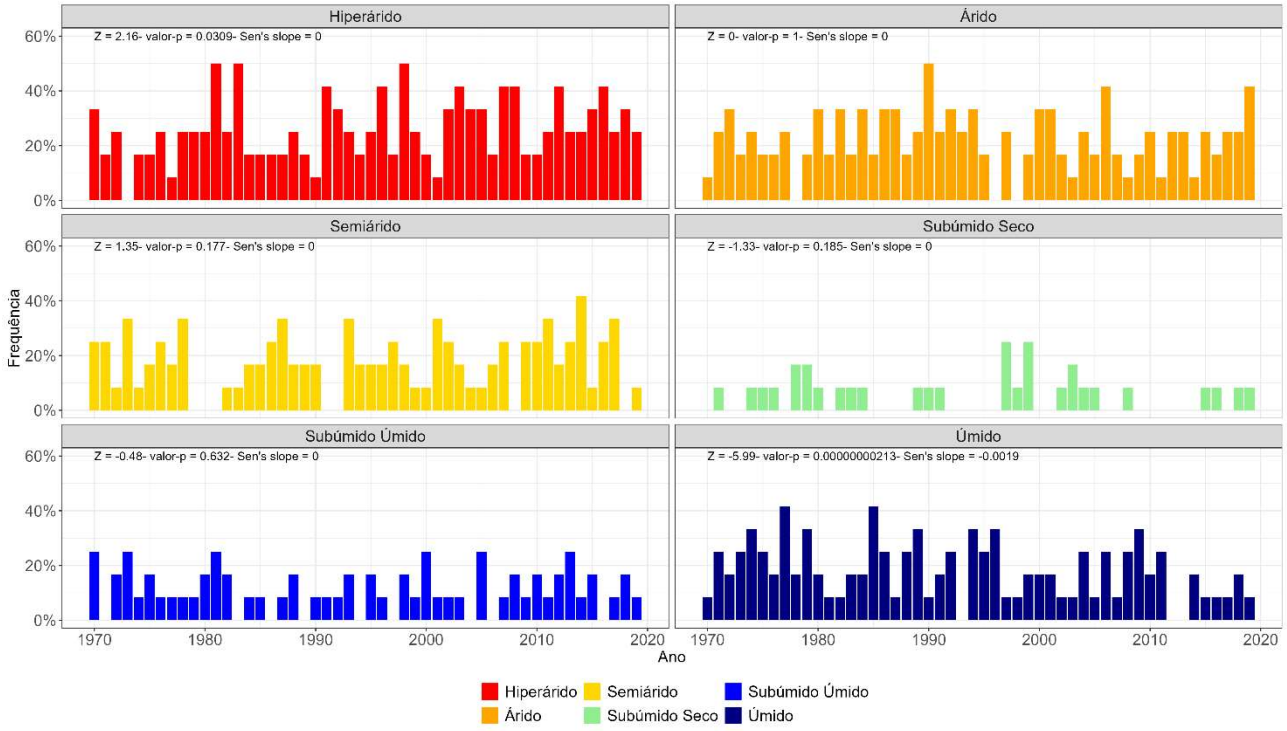


Figura 5 – Frequências das categorias do Índice de Aridez ao longo dos anos

CONCLUSÃO

Os resultados sugerem que o município de Araripina caminha gradativamente para condições mais áridas, com indícios de deterioração das condições hídricas, evidenciada pela tendência negativa do índice de aridez, nas escalas mensal e anual; indicando alterações na relação entre precipitação e evapotranspiração potencial ao longo do tempo, decorrentes da redução da precipitação, do aumento da evapotranspiração potencial ou da atuação simultânea de ambos os processos. Além disso, Araripina apresenta maior vulnerabilidade a condições climáticas mais extremas, durante anos de El Niño e períodos de seca, como o ocorrido entre 2012-2018, quando o índice de aridez apresentou os menores valores da série histórica. As frequências das categorias apresentaram tendência significativa para as mais extremas, revelando que os eventos hiperáridos têm se tornado mais frequentes ao longo dos anos (aumento) e os eventos úmidos são menos frequentes (diminuição).

Os resultados reforçam a necessidade de monitoramento contínuo das condições climáticas e hidrológicas do município, uma vez que o aumento da frequência de condições mais áridas pode

comprometer a disponibilidade hídrica, a produtividade agrícola e as condições socioeconômicas da população local. Nesse contexto, o índice de aridez mostrou-se uma ferramenta útil para a identificação de mudanças de longo prazo, fornecendo informações valiosas para o planejamento, para a implementação de estratégias de adaptação e mitigação frente aos impactos causados pela aridez, além de subsidiar o desenvolvimento de sistemas de alerta precoce.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à CAPES pela concessão de bolsa de Pós-Graduação e ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pelo apoio à pesquisa por meio da bolsa de produtividade em pesquisa (nº 306590/2024-7).

REFERÊNCIAS

Abatzoglou, J. T., Dobrowski, S. Z., Parks, S. A., & Hegewisch, K. C. (2018). *"TerraClimate, a high-resolution global dataset of monthly climate and climatic water balance from 1958–2015".* Scientific data, 5(1), 170191., p. 01-09.

Arruda, K. E. C., & Barreto, A. M. F. (2015). *"Índice de Geodiversidade do Município de Araripina-PE, Brasil"*. Estudos geológicos, v. 25, n. 1, p. 103-117.

Arruda, G. B. D., Correia, K. V., Oliveira, T. R. S. D., Brainer Neto, J. E., Araújo, F. P. D., & Carneiro, K. W. (2015). *"Análise da qualidade da água do riacho Moraes em área influenciada pela produção de gesso no município de Araripina, PE–Brasil"*. Revista de Geologia, Vol. 28, nº 1, 27-38.

Barbosa, W. G., de Moura Carvalho, J., da Silva, D. H. L., da Silva Júnior, A. N., da Silva Araújo, L., da Silva, A. S. A., & Stosic, T. (2023). *"Sazonalidade do regime de chuva nas mesorregiões do estado de Pernambuco, Brasil"*. Research, Society and Development, v. 12, n.12, e29121243835-e29121243835.

Cerqueira, M. A., Rodrigues, F. M., & de Almeida, G. V. L. (2020). *"Susceptibilidade à desertificação para o estado de Pernambuco"*. Revista GeoSul, v. 35 n. 76.

Correia Filho, W. L. F., De Oliveira-Júnior, J. F., De Barros Santiago, D., De Bodas Terassi, P. M., Teodoro, P. E., De Gois, G.,& Dos Santos, P. J. (2019). *"Rainfall variability in the Brazilian northeast biomes and their interactions with meteorological systems and ENSO via CHELSA product". Big Earth Data*, *3*(4), 315-337.

Cunha, A. P. M., Zeri, M., Deusdará Leal, K., Costa, L., Cuartas, L. A., Marengo, J. A., & Ribeiro-Neto, G. (2019). *"Extreme drought events over Brazil from 2011 to 2019".* Atmosphere, v. 10, n. 11, p. 642.

Freitas, P. A., Oliveira, L. M. M., de Sales Barbosa, R. F., & Montenegro, S. M. G. L. (2018). "*Evapotranspiração de referência diária por diferentes modelos na bacia hidrográfica do Rio Capibaribe (Pernambuco-Brasil)"*. Revista brasileira de meio ambiente, v. 4.

Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE). (2025). *"Produto Interno Bruto dos Municípios"*. Rio de Janeiro: IBGE. Disponível em: https://www.ibge.gov.br/estatisticas/economicas/contas-nacionais/9088-produto-interno-bruto-dos-municipios.html. Acesso em: 11 jun. 2026.

Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE). (2024). *"Produção Agrícola Municipal 2024"*. Rio de Janeiro: IBGE. Disponível em: https://www.ibge.gov.br/estatisticas/economicas/agricultura-e-pecuaria/9117-producao-agricola-municipal-culturas-temporarias-e-permanentes.html?=&t=resultados. Acesso em: 11 jun. 2026.

Júnior, J. B. C., & Bezerra, B. G. (2018). *"Análises da evapotranspiração de referência e do índice de aridez para o Nordeste do Brasil"*. Revista de Geociências do Nordeste, 4(1), 71-89.

Lacerda, F. F., Nobre, P., Sobral, M. D. C. M., Lopes, G. M. B., & Assad, E. D. (2016). *"Tendência do clima do semiárido frente as perspectivas das mudanças climáticas globais; o caso de Araripina, Pernambuco"*. Revista do Departamento de Geografia, 31, 132-141.

Lopes, I., de Melo, J. M. M., de Carvalho, A. A., de Albuquerque Moura, G. B., & Leal, B. G. (2018). *"Análise multivariada no estudo da variação do Índice de Aridez da Bahia e Pernambuco"*. Agrometeoros, v. 26, n. 1.

Medeiros, F. J., De Oliveira, C. P., & Torres, R. R. (2020). *"Climatic aspects and vertical structure circulation associated with the severe drought in Northeast Brazil (2012–2016)"*. Climate Dynamics, v. 55, n. 9, p. 2327-2341.

Moraes, J. B. D, Wanderley, H. S., & Delgado, R. C. (2024). *"Áreas suscetíveis a desertificação no Nordeste do Brasil e projeção para cenário de mudanças climáticas"*. Revista Brasileira de Geografia Física, v. 17, n. 6, p. 4003-4014

Morais, Y., França, L., De Queiroz, W., Souza, W., & Galvincio, J. (2016). Climate variability and extreme events occurrence in Petrolina-PE municipality. *Journal of Hyperspectral Remote Sensing*, *6*, 175-183.

PATAKAMURI, S. K., O'Brien, N., & PATAKAMURI, M. S. K. (2020). *Package 'modifiedmk'*. Cran. R-project.

Pontes Filho, J. D., Souza Filho, F. D. A., Martins, E. S. P. R., & Studart, T. M. D. C. (2020). *"Copula-based multivariate frequency analysis of the 2012–2018 drought in Northeast Brazil"*. Water, v. 12, n. 3, p. 834.

Saldanha, R., Akbarinia, R., Valduriez, P., Pedroso, M., Ribeiro, V., Cardoso, C., Pena, E., & Porto, F. (2023). *"Brclimr: Fetch zonal statistics of weather indicators for brazilian municipalities"* [https://rfsaldanha.github.io/brclimr/, https://github.com/rfsaldanha/brclimr].

Sen, P. K. (1968). *"Estimates of the regression coefficient based on Kendall's tau"*. Journal of the American statistical association, v. 63, n. 324, p. 1379-1389.

Silva, J. L. B., de Albuquerque Moura, G. B., da Silva, M. V., de Souza, R. V., Guedes, P. M. O. L., de França, Ê. F., & Hozana, A. (2020). *"Inferência Exploratória de Dados Espaço-Temporal da Precipitação Pluviométrica no Nordeste Brasileiro. Revista Brasileira de Geografia Física",* 13(05), 2019-2036.

Silva, M. D. P. B., de Oliveira, V. P. V., da Silva, M. L., da Silveira, V. L., de Oliveira, J. P., de Amorim Oliveira, M., & Assunção Filho, F. A. F. (2025). *"Drought in northeast brazil: history, climatic and social implications".* Revista Brasileira de Climatologia, *37*, 820-842.

Silva, R. O. B. D., Montenegro, S. M. G. L., & Souza, W. M. D. (2017). *"Tendências de mudanças climáticas na precipitação pluviométrica nas bacias hidrográficas do estado de Pernambuco".* Engenharia Sanitária e Ambiental, v. 22, n. 03, p. 579-589.

Silva, E. R. A. C., Galvíncio, J. D., Nascimento, K. R. P., de Santana, S. H. C., de Souza, W. M., & de Oliveira Costa, V. S. (2018). *"Análise da tendência temporal da precipitação pluviométrica inter-anual e intra-anual no semiárido pernambucano".* Revista Brasileira de Climatologia, 22.

Souza, A. G. S. S., Neto, A. R., & de Souza, L. L. (2021). *"Soil moisture-based index for agricultural drought assessment: SMADI application in Pernambuco State-Brazil".* Remote Sensing of Environment, 252, 112124.

Souza Souza, D. D. R. de, de Araújo Filho, J. C., de Araújo, M. D. S. B., & da Silva, D. F. (2024). *"Análise espaço-temporal do uso da terra em municípios do núcleo de desertificação de Cabrobó, Pernambuco".* Revista Contexto Geográfico, v. 9, n. 18, p. 133–142-133–142.

Thornthwaite, C. W. (1948). *"An approach toward a rational classification of climate"*. Geographical review, v. 38, n. 1, p. 55-94.

Yue, S.; Wang, C. (2004). *"The mann-kendall test modified by effective sample size to detect trend in serially correlated hydrological series"*. Water resources management, Springer, v. 18, n. 3, p. 201–218.