
ARTIGO

Padrões Espaço Temporais de Episódios de Secas na Microrregião de Barreiras-BA**Spatiotemporal Patterns of Drought Episodes in the Microregion of Barreiras-BA**

Welinagila Grangeiro de Sousa¹; Madson Tavares Silva²; Célia Campos Braga³; Mariana da Silva Siqueira⁴; Antônia Silânia de Andrade⁵; Santana Livia de Lima⁶.

DOI: <https://10.52719/bjas.v5i2.6535>

Resumo

A seca é um fenômeno natural originado a partir da ausência de precipitação ao longo de certo período capaz de causar danos ao desenvolvimento de diferentes atividades da sociedade e denotam o tipo mais complexo e prejudicial de desastre natural e, vem afetando diversas regiões. Para analisar e monitorar esses fenômenos nas áreas mais susceptíveis e que são destaque no cenário agrícola nacional estão sendo utilizados diversos índices, dentre eles o Índice Padronizado de Precipitação e Evapotranspiração (SPEI) considerado um dos mais difundidos no mundo, que permite a avaliação das secas em diferentes escalas de tempo. Portanto, objetivou-se através deste trabalho identificar a variabilidade espaço temporal de eventos de secas ocorridas na microrregião de Barreiras por meio de técnicas de análise de série temporais. Utilizou-se séries de dados históricos mensais de precipitação e temperatura do ar para o período de 1961 a 2018 provenientes das reanálises do CRU-TS-4.03. A caracterização da seca se deu através do Índice Padronizado de Precipitação e Evapotranspiração-SPEI em distintas escalas temporais (3, 6, 12, 24 e 48 meses). Os testes de tendência não-paramétricos de Mann-Kendall e Sen's foram usados para verificar os padrões temporais para a região. Através da variabilidade das secas na região, foi possível observar o aumento progressivo de

¹ Bolsista de Doutorado, Programa de Pós-Graduação em Meteorologia, Universidade Federal de Campina Grande (UFCG), Campina Grande-PB, Brasil, welinagilagrangheiro@gmail.com.

² Ph.D., Unidade Acadêmica de Ciências Atmosféricas (UACA), Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, PB, Brasil, madson.tavares@professor.ufcg.edu.br.

³ Dra., Unidade Acadêmica de Ciências Atmosféricas (UACA), Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, PB, Brasil, celia.braga@ufcg.edu.br.

⁴ Bolsista de Doutorado, Programa de Pós-Graduação em Meteorologia, Universidade Federal de Campina Grande (UFCG), Campina Grande-PB, silva.siqueira@estudante.ufcg.edu.br.

⁵ Bolsista de Doutorado, Programa de Pós-Graduação em Meteorologia, Universidade Federal de Campina Grande (UFCG), Campina Grande-PB, silaniaandrade21@gmail.com.

⁶ Bolsista de Doutorado, Programa de Pós-Graduação em Meteorologia, Universidade Federal de Campina Grande (UFCG), Campina Grande-PB, livialima24s@gmail.com.

intensidade e frequência desse evento nas escalas temporais maiores, com destaque para os períodos mais recentes. A análises de tendências, possibilitou verificar que todas as escalas temporais analisadas apresentaram tendências decrescentes significativas, ou seja, aumento do fenômeno extremo das secas na região durante os anos avaliados.

Palavras-chave: SPEI. Variabilidade. Tendência.

Abstract

Drought is a natural phenomenon arising from the absence of precipitation over a certain period, capable of causing damage to the development of different activities in society and denoting the most complex and harmful type of natural disaster and has been affecting several regions. To analyze and monitor these phenomena in the most susceptible areas and which are highlighted in the national agricultural scenario, several indices are being used, including the Standardized Precipitation and Evapotranspiration Index (SPEI), considered one of the most widespread in the world, which allows the assessment of droughts. on different time scales. Therefore, the objective of this work was to identify the spatial and temporal variability of drought events occurring in the Barreiras microregion using time series analysis techniques. A series of monthly historical data on precipitation and air temperature were used for the period from 1961 to 2018 from CRU-TS-4.03 reanalyses. The drought was characterized using the Standardized Precipitation and Evapotranspiration Index-SPEI on different time scales (3, 6, 12, 24 and 48 months). The Mann-Kendall and Sen's non-parametric trend tests were used to verify temporal patterns for the region. Through the variability of droughts in the region, it was possible to observe the progressive increase in intensity and frequency of this event on longer temporal scales, with emphasis on more recent periods. Trend analysis made it possible to verify that all temporal scales analyzed showed significant decreasing trends, that is, an increase in the extreme phenomenon of droughts in the region during the years evaluated.

Keywords: SPEI. Variability. Trend.

Introdução

A seca é um perigo natural em decorrência da falta de chuvas vindo a minimizar consequentemente o abastecimento de água. É um dos principais desastres naturais enfrentados pela sociedade humana, e que tem um grande impacto na produção de alimentos, na economia social, na saúde humana e no ecossistema (Ma et al., 2021; Schumacher et al., 2022, & Zhao et al., 2022). Com o crescente desenvolvimento da sociedade, esse fenômeno está se agravando, em decorrência da influência das atividades humanas (Zhang et al., 2022).

Devido à complexidade dos eventos de seca, não existe uma definição unificada de seca que se aplique a todos os cenários. As definições de seca geralmente são agrupadas em dois tipos: conceitual e operacional, onde a conceitual fornece descrições gerais sem especificar as propriedades quantitativas da seca e a operacional visa determinar e analisar quantitativamente a frequência, gravidade, início e duração com base em indicadores de seca selecionados dentro

de registros históricos. Assim o fenômeno extremo da seca pode ser configurado em quatro categorias: agrícola, hidrológica, meteorológica e socioeconômica, onde, cada uma das quais detecta diferentes tipos de seca (Zhang et al., 2023).

A seca meteorológica é tipicamente uma expressão do desvio da precipitação normal durante um período específico, a hidrológica refere-se a deficiências no abastecimento de água superficial e subterrânea com base em medições de vazões e níveis de lagos, reservatórios e lençóis freáticos, enquanto a seca agrícola ocorre quando não há umidade suficiente no solo para atender às necessidades de uma determinada cultura em um período específico, a deficiência de precipitação por um período prolongado, a socioeconômica ocorre quando a escassez física de água começa a afetar as pessoas, individual e coletivamente (Kamruzzaman et al., 2019).

Ao longo da história esse fenômeno vem sendo observado em praticamente todas as regiões do planeta. Contudo, nas últimas décadas tem-se verificado elevações em sua frequência e intensidade em diversas partes do globo terrestre, com destaque para as regiões semiáridas (Meza et al., 2020 & Blain et al. 2022).

É primordial destacar a região nordestina como a mais afetada por fenômenos de seca, cuja ocorrência deste evento climático juntamente aos inúmeros problemas socioambientais, acumulados ao longo da história do semiárido, pode resultar em perda agrícola decorrente de períodos de escassez de hídrica. Portanto, entende-se que para os estudos climáticos, compreender o comportamento relacionado à seca no semiárido do Brasil é de grande relevância para os desafios da segurança hídrica (Brito et al., 2022).

Sendo assim, a região Oeste da Bahia vem se destacando nas últimas décadas em decorrência do agravamento intensos dos processos de alteração no seu uso e ocupação do solo para o desenvolvimento da agricultura de grãos em larga escala (Santos et al., 2014). Esse processo de alteração no seu uso favorece o fenômeno extremo da seca, fato este que podem vir a impactar diretamente no setor econômico da região (Liu et al., 2016 & Zylstra et al., 2016.)

Portanto, para compreender as características de um período de seca faz-se necessário possuir um acervo de informações atuais e históricas a respeito das condições climáticas e hidrológicas de uma determinada região. Este entendimento se torna imprescindível para identificar as áreas propensas a esse evento, reconhecer as condições de seca emergente e antecipar informações sobre o estado hídrico das regiões (Gonçalves et al., 2021).

Representar as características de longo prazo dos eventos de seca, como a sua duração, intensidade, gravidade e extensão espacial é de grande relevância, e estão sendo exploradas através de índices baseados em dados de séries temporais (Sobhani & Zengir, 2020, &

Gonçalves et al., 2021). Sendo assim, dentre os diversos índices com essa funcionalidade destaca-se o Índice Padronizado de Precipitação e Evapotranspiração - SPEI que é baseado na análise estatística de series de dados tanto atuais quanto históricos (Yang et al., 2017), e que permite comparações das condições de seca em distintas regiões climáticas em diferentes escalas de tempo (Mostafazadeh & Zabihi, 2016).

Todavia, destacam-se as análises de tendências que também contribuem no conhecimento do padrão das secas, favorecendo sua compreensão assim como variações futuras. Em relação às secas, os testes não paramétricos de Mann-Kendall e Sen's Slope são úteis para identificar e caracterizar as suas tendências em várias escalas de tempo (Mcgree et al., 2016; Dashtpgerdi et al., 2018, & Khan et al., 2018). Estas ferramentas podem ser utilizadas como parâmetros para gerenciar os riscos em períodos de ocorrência ou recorrência desses fenômenos extremos para a região desejada (Gonçalves et al., 2021).

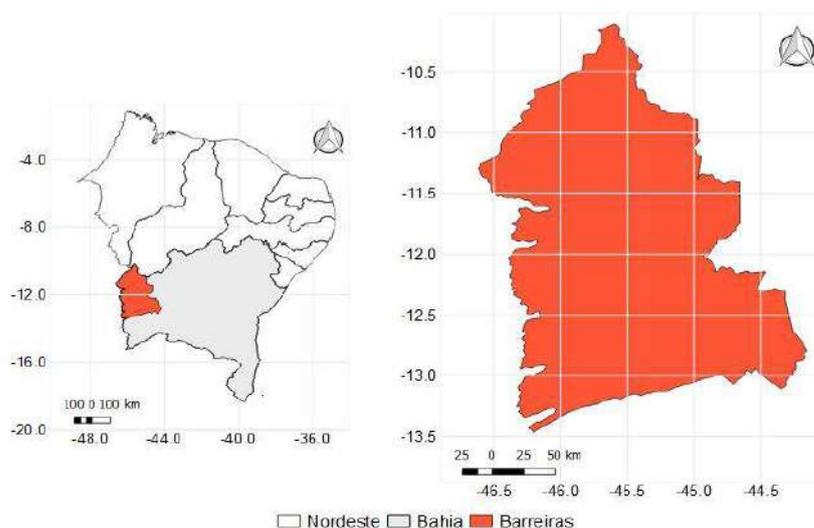
Estudos a respeito do entendimento sobre o comportamento das secas é um trabalho de grande pertinência, uma vez que cria subsídios para o mapeamento de áreas susceptíveis a esse evento, além de ajudar no planejamento das atividades agrícolas e no gerenciamento dos recursos hídricos. Diante do exposto o presente estudo tem como objetivo analisar a variabilidade espaço temporal de eventos de secas ocorridas na microrregião de Barreiras, no período de 1961 a 2018 mediante Índice Padronizado de Precipitação e Evapotranspiração- SPEI em diferentes escalas de tempo.

Material e Métodos

A microrregião de Barreiras, situada no oeste do estado da Bahia (Figura 1), possui grande destaque no cenário agrícola nacional. A região faz parte da fronteira agrícola denominada MATOPIBA, criada com as iniciais dos estados do Maranhão, Tocantins, Piauí e Bahia. Sendo uma microrregião com uma agricultura moderna e especializada, principalmente em áreas de cultivo de soja, milho e algodão herbáceo (Rubens et al., 2020).

Figura 1

Localização da Área de Estudo



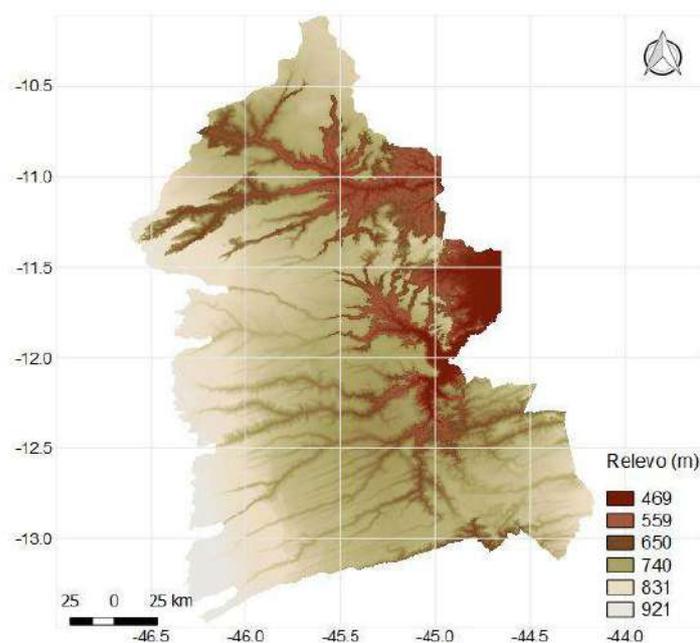
Fonte: própria autoria.

A microrregião de Barreiras possui aproximadamente 53.000 km², cuja temperatura média anual varia de 22° a 27°C (Malheiros, 2016), sendo o clima classificado como do tipo Aw, conforme a classificação climática de Köppen-Geiger (Álvares et al., 2013). O bioma da microrregião é o Cerrado, sendo caracterizado por possuir épocas do ano bem definidas, com chuvas de primavera/verão e período seco no outono/inverno, e o clima na maioria da extensão é tropical de caráter subúmido (Bastos et al., 2010).

O relevo da região caracteriza-se por suas elevadas altitudes, apresentando extensas serras com planaltos, estendendo-se em geral no sentido leste-oeste, com altitude média de 750m acima do mar (Figura 2). As principais serras são: da Bandeira, do Mimo, do Boqueirão, da Gameleira, da Ondina, de São Vicente e no extremo oeste na divisa com o Estado do Tocantins, a Serra Geral (Bastos et al., 2010).

Figura 2

Relevo da microrregião de Barreiras.



Fonte: própria autoria.

Dados

Os dados meteorológicos utilizados nesse estudo constam dos valores históricos mensais de temperatura mínima e máxima (°C) e precipitação total (mm) para o período que compreende de janeiro de 1961 a dezembro de 2018. Esses dados são reformatados das reanálises do Climatic Research Unit - CRU-TS-4.03 (dados em pontos de grade com resolução espacial de 0,5°) pela Unidade de Pesquisa Climática da Universidade de East Anglia, usando o WorldClim 2.1 para correção de viés (Fick & Hijmans, 2017).

Os dados do CRU-TS-4.03 são produzidos usando a interpolação de ponderação de distância angular (ADW), fornecendo dados em campos de grade mensais baseados em valores observacionais mensais obtidos a partir de dados diários ou subdiários pelos Serviços Meteorológicos Nacionais e outros agentes externos (Harris & Jones, 2020).

Fez-se uso dos acumulados mensais de precipitação pluvial e médias mensais de temperatura do ar para o cálculo da evapotranspiração potencial (ETP), para em seguida dar procedimento a determinação dos valores do Índice Padronizado de Precipitação e Evapotranspiração (SPEI) para as microrregiões que compõem a região do oeste baiano.

Índice Padronizado de Precipitação e Evapotranspiração (SPEI)

O SPEI (Índice Padronizado de Precipitação e Evapotranspiração) desenvolvido por Serrano et al. (2010), permite comparar a severidade da seca através do tempo e do espaço, podendo ser aplicado a variados climas. Seu cálculo se dá pela diferença entre a precipitação pluvial (P) e evapotranspiração potencial (ETP), estimando, assim, a descrição da severidade das condições de seca em determinadas regiões (Li et al., 2017).

A evapotranspiração potencial (ETP), é estimada a partir da equação de Thornthwaite, como descrito em (Ometto et al., 1981), conforme equações (1- 4):

$$ETP = 16K \left(\frac{10T}{I} \right)^m \quad (1)$$

$$I = \sum_{i=1}^{12} \left(\frac{T_i}{5} \right)^{1,514} \quad (2)$$

$$K = \left(\frac{N}{12} \right) \left(\frac{NDM}{30} \right) \quad (3)$$

$$m = 6,75 \times 10^{-7} I^3 - 7,71 \times 10^{-5} I^2 + 1,79 \times 10^{-2} I + 0,492 \quad (4)$$

em que: ETP é a evapotranspiração potencial; T é a temperatura média mensal ($^{\circ}\text{C}$); I é o índice de calor, que é calculado como a soma de 12 valores mensais do índice (i); T_i é derivado da temperatura média mensal; K é um coeficiente de correção, calculado em função da latitude e mês, e m é um coeficiente baseado no índice de calor I ; NDM é o número de dias do mês e N é o número máximo de horas de Sol.

Portanto, a medida simples do excedente ou déficit de água para o período analisado é expressa pela diferença (D_i) entre a precipitação pluvial (P_i) e a evapotranspiração potencial (ETP $_i$) para o mês i obtido a partir da Equação (5):

$$D_i = P_i - ETP_i \quad (5)$$

Os valores de D_i calculados são agregados em diferentes escalas de tempo para detecção de padrões temporais da seca (Equação 6). Sendo assim, os valores SPEI são calculados para as escalas mensal, trimestral, semestral e anual (SPEI-1, SPEI-3, SPEI-6, SPEI-12, SPEI-24 e SPEI-48).

$$D_n^k = \sum_{i=0}^{k-1} (P_{n-1-i} - ETP_{n-1-i}), \quad n \geq k \quad ((6))$$

em que: n é a frequência de cálculo e k é a escala de tempo.

O balanço hídrico, expresso por D_i é então normalizado utilizando a função densidade de probabilidade da distribuição log-logística para calcular a série temporal do SPEI, como segue a Equação (7):

$$f(x) = \frac{\beta}{\alpha} \left(\frac{x-\gamma}{\alpha}\right)^{\beta-1} \left(1 + \left(\frac{x-\gamma}{\alpha}\right)^\beta\right)^{-2} \quad (7)$$

em que: α , β e γ são parâmetros de escala, forma e origem, respectivamente, para valores de D no intervalo ($\gamma > D < \infty$). A função de distribuição de probabilidade $F(x)$ da série temporal do índice D_i é então definida mediante Equação (8):

$$F(x) = \int_0^x f(t) dt = \left[1 + \left(\frac{\alpha}{x-\gamma}\right)^\beta\right]^{-1} \quad (8)$$

O SPEI é obtido como os valores padronizados de $F(x)$ segundo (Serrano et al., 2010; Li et al., 2015) a partir da Equação (9):

$$SPEI = W - \frac{C_0 + C_1 W + C_2 W^2}{1 + d_1 W + d_2 W^2 + d_3 W^3} \quad (9)$$

em que: $W = (-2\ln(p))^{0.5}$, para $p \leq 0,5$, sendo p a probabilidade de exceder um valor D determinado, $p = 1-F(x)$. Se $p > 0,5$, p é substituído por $1-p$ e o sinal do SPEI resultante é invertido. As constantes são: $C_0 = 2,515517$, $C_1 = 0,802853$, $C_2 = 0,010328$, $d_1 = 1,432788$, $d_2 = 0,189269$, $d_3 = 0,001308$.

A partir de então o SPEI torna-se uma variável padronizada (média 0 e o desvio padrão 1) podendo ser comparada com outros valores de SPEI ao longo do tempo e do espaço de acordo com as categorias de seca descritas pelo índice (Tabela 1) (Mckee et al., 1993, & Tan et al., 2015).

Tabela 1

Classificação da seca com base no SPEI.

Classificação da seca	SPEI
Sem seca	$\geq -0,5$
Seca suave	(-1,0; -0,5)
Seca moderada	(-1,5; -1,0)
Seca severa	(-2,0; -1,5)

Fonte: própria autoria.

Teste de Mann-Kendall

O teste de Mann-Kendall foi derivado dos estudos propostos por Mann (1945) e Kendall (1945), sendo amplamente utilizado na análise de tendências de secas hidrológicas e meteorológicas (Yeh, 2019). Esse teste verifica a existência de uma tendência em uma determinada série temporal, identificando eventuais variações nas tendências ao longo do tempo.

A estatística usada é calculada dada uma série temporal t_1, t_2, \dots, t_n e sua sequência de dados correspondentes x_1, x_2, \dots, x_n , sendo n o número de pontos de dados. A hipótese nula do teste indica uma amostra com variáveis aleatórias e identicamente distribuídas, enquanto a hipótese alternativa indica distribuições não idênticas para X_i e X_j (Kazemzade & Malekian, 2018), calculado como:

$$S = \sum_{i=j}^{n-1} \sum_{j=1+i}^n \operatorname{sgn}(x_j - x_i) \quad (10)$$

em que: x_i e x_j são valores de dados para os anos; n o número de pontos de dados usados, i e j ($j > i$), respectivamente, e $\operatorname{sgn}(x_j - x_i)$ é a função do sinal, dada como:

$$\operatorname{sgn}(x_j - x_i) = \begin{cases} +1 & \text{if } x_j - x_i > 0 \\ 0 & \text{if } x_j - x_i = 0 \\ -1 & \text{if } x_j - x_i < 0 \end{cases} \quad (11)$$

A variância dessa distribuição é calculada pelas Equações 12 e 13:

$$\operatorname{var}(S) = \frac{n(n-1)(2n+5) - \sum_{i=1}^p t_i(t_i-1)(2t_i+5)}{18} \quad (12)$$

em que: p é o número de grupos empatados, o sinal de soma (p) indica a soma de todos os grupos vinculados, e t_i é o número de valores no grupo (Piyooosh & Ghosh, 2017).

$$Z_s = \begin{cases} \frac{s-1}{\sqrt{s}} & \text{if } S > 0 \\ 0 & \text{if } S = 0 \\ \frac{s+1}{\sqrt{s}} & \text{if } S < 0 \end{cases} \quad (13)$$

em que: Z caracteriza se existe tendência no teste para os dados utilizados. Os valores Z positivos indicam uma tendência crescente e os valores Z negativos indicam uma tendência decrescente. Se o valor de Z for 0, não há tendência.

O Tau Kendall (Kendall, 1938, Kendall, 1948) mede a força da relação monotônica entre x e y . O coeficiente de correlação tau de Kendall é dado por:

$$\tau = \frac{x_i - x_j}{i - j} \text{ for all } j < i \quad (14)$$

Estimador de inclinação de Sen's slope (Sen)

O teste de inclinação não paramétrico de Sen foi desenvolvido por Sen (1968) cujo intuito é calcular a magnitude das tendências. Para o cálculo de Sen's slope, computam-se todas as curvaturas de todos os pares dos valores apresentados em determinada série temporal. É um método insensível a outliers e dados ausentes, sendo mais rigoroso do que a curvatura da regressão linear, provendo uma medida mais real das tendências em séries temporais (Silva et. al., 2015). A inclinação é obtida através da Equação (15):

$$Q_i = \frac{x_j - x_k}{j - k} \text{ for } i = 1, \dots, n \quad (15)$$

em que: x_j e x_k são os valores nos tempos j e k ($j > k$), respectivamente. Se houver n valores de x na série temporal, obtemos até $N = n(n - 1) / 2$ estimativas de inclinação Q_i . Os valores N de Q_i são classificados do menor ao maior, e o estimador de inclinação de Sen é a mediana dos valores N de Q_i ; este valor é estimado conforme Equação (16):

$$= \left\{ \begin{array}{ll} Q\left(\frac{n+1}{2}\right) & \text{se } N \text{ for impar} \\ \frac{Q\left(\frac{n}{2}\right) + Q\left(\frac{n+2}{2}\right)}{2} & \text{se } N \text{ for par} \end{array} \right. \quad (16)$$

O sinal de Q_{med} retrata a tendência dos dados, sendo o valor a inclinação da tendência. Para determinar se a inclinação média é significativamente diferente de zero, o intervalo de confiança de Q_{med} deve ser obtido em uma probabilidade específica. Conforme Gilbert, (1987) o intervalo de confiança levando em conta a inclinação de tempo, pode ser calculado conforme Equação (17):

$$Ca = Z_{1-\alpha/2} - a/2 \sqrt{\text{var}(s)} \quad (17)$$

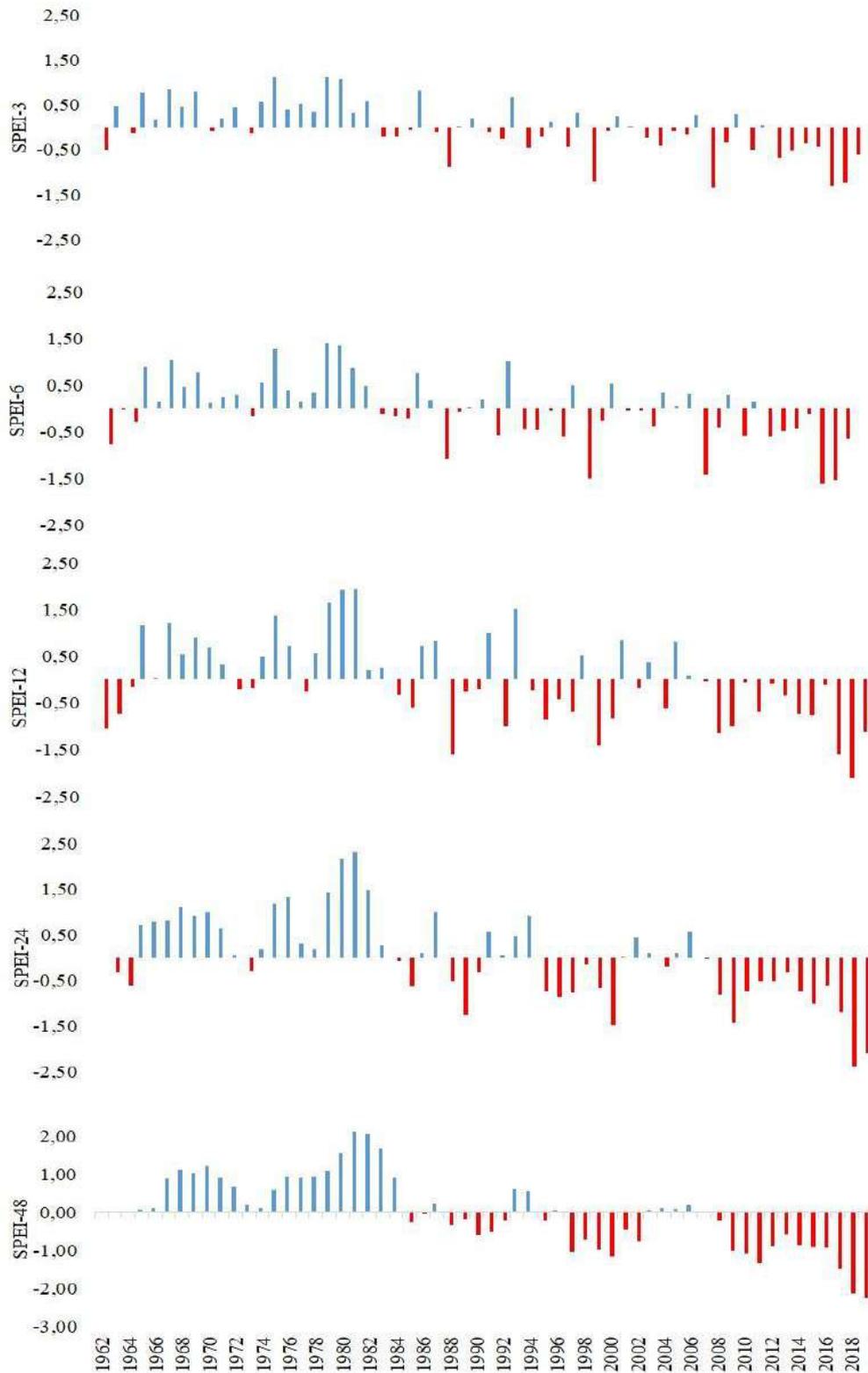
em que: $Z_{1-\alpha/2}$ é obtido por meio de uma tabela de distribuição normal padrão. Então, em seguida $M1 = (n - C_\alpha) / 2$ e $M2 = (n + C_\alpha) / 2$ são calculados. Os limites inferior e superior do intervalo de confiança, Q_{min} e Q_{max} , é o $M1^o$ maior e $(M2 + 1)$ o maior das estimativas de inclinação ordenada n , respectivamente (GILBERT, 1987). A inclinação Q_{med} é significativa diferente de zero se os dois limites (Q_{min} e Q_{max}) tiverem sinais semelhantes.

Resultados e Discussão

Conforme a Figura 3 é possível observar a variabilidade da seca mediante o SPEI em diferentes escalas de tempo (SPEI-3, SPEI-6, SPEI-12, SPEI-24 e SPEI-48) na microrregião de Barreiras durante o período de 1961 a 2018. De maneira geral, é possível verificar a presença do fenômeno conforme o índice (valores $\leq -0,5$) durante o período analisado, com grande similaridade entre o padrão das secas obtidos independentemente da escala temporal.

Figura 3

Distribuição dos menores valores anuais do SPEI em diferentes escalas temporárias (3, 6, 12, 24 e 48 meses) para a microrregião de Barreiras no período de 1961 a 2018.



Fonte: própria autoria.

É possível relatar que o SPEI-3 e SPEI-6 indicam variações sazonais a médio prazo de eventos de seca (pode estar associado a fluxos anômalos e níveis de reservatórios), e que o SPEI-12, SPEI-24 e SPEI-48 pode ser utilizado como um indicador para diminuição da recarga de reservatórios assim como da água subterrânea, onde, todos denotam uma maior magnitude e frequência do evento na região.

Verifica-se ainda de acordo com a Figura 3 que durante o período avaliado os maiores valores do SPEI (períodos úmidos) se deram no período que antecede a década de 80, e as maiores intensidades dos eventos secos se deram a partir dessa década em todas as escalas temporais, com maior severidade do fenômeno (menores valores do SPEI). De forma geral, os anos decorrentes dessa década destacaram-se quanto aos menores valores do SPEI em todas as escalas de tempo avaliadas cujos valores observados se deram em torno de -1,5.

Ao avaliar cada escala de tempo, para a microrregião de Barreiras, o ano de 2007 denotou o menor valor do SPEI-3 (-1,33). Para o índice na escala de tempo de seis meses (SPEI-6), o ano que deteve os menores valores do índice se deu em 2016 (-1,62). Ao que diz respeito ao SPEI-12, destaca-se o ano de 2017 como o mais seco em relação ao índice (-2,11). Nas escalas temporais maiores (SPEI-24 e SPEI-48) os anos de destaque para os menores valores dos índices foram 2017 e 2018, com valores de -2,38 e -2,10 para o SPEI-24 e -2,12 e -2,27 para o SPEI-48. O semiárido Baiano é uma das regiões que foram altamente impactada pela influência da seca, nos recentes episódios destes eventos climáticos (São José et al., 2020a, São José et al., 2020b; São José et al., 2021a, & São José et al., 2021b).

É válido ressaltar que nas secas de curto prazo (SPEI-3 e SPEI-6), percebe-se que os valores SPEI tendem a variar com mais frequência entre valores positivos e negativos no decorrer do tempo havendo quebras na continuidade dos eventos secos e úmidos (Figura 3), característica também relatada por Santos et al. (2017). Nesse sentido, destaca-se que os índices de menor escala temporal apresentam maior sensibilidade à ocorrência de eventos extremos. Verifica-se que nessas duas escalas temporais houve alguns eventos úmidos em meio a uma sequência consecutiva de períodos secos, a exemplo do ano de 2011.

Marengo et al. (2016) em estudo sobre secas passadas e presentes no Nordeste Brasileiro-NEB, observaram que 2010 já foi um ano seco, e que no período 2010-15, apenas 2011 deteve chuvas significativas, porém foi seguido pelos déficits de precipitação mais graves em 2012, o que pode vir a explicar o ocorrido na região. Vários estudos têm indicado que a maior parte do NEB tende a receber mais precipitação durante episódios La Niña, mas o ano de 2012 não seguiu o padrão. Durante o evento La Niña de 2012, o NEB declarou estado de emergência devido a uma seca considerada a mais grave nas recentes décadas. O estado da

Bahia foi o estado nordestino mais impactado pela seca de 2012, onde a maioria dos municípios decretaram estado de emergência (Brasil, 2018 & São José et al., 2021b).

São José et al. (2022) ao analisar a distribuição espacial do risco de seca à atividade agrícola nas mesorregiões do Vale São-Franciscano e do Centro-norte, região do semiárido da Bahia, constataram que até o ano de 2011, a média anual da precipitação na região era de 681,83mm e, a partir de 2011, a média passou a ser de 473,94mm, indicando uma redução de precipitação pluviométrica para esta região, ocasionando estiagens e diversos danos.

Por meio da aplicação do Índice Padronizado de Precipitação-SPI os autores Cunha et al. (2018) confrontaram o padrão espacial de episódios de seca severa do período de 1982 a 2013 (30 anos) na região Nordeste, e seus resultados permitiram verificar que uma característica bastante particular pertencente a seca é a sua capacidade de tornar-se mais evidente perante ocorrências de eventos de El Niño.

Observa-se que os eventos de seca (Figura 3) nas escalas maiores (SPEI-12, SPEI-24 e SPEI-48) SPEI-12 (1987, 1998, 2007, 2016, 2017 e 2018); SPEI-24 (1999, 2008, 2016, 2017 e 2018) e SPEI-48 (1999, 2010, 2016, 2017 e 2018), estão de acordo com secas históricas na região do Nordeste (Marengo et al., 2017). Nobre et al. (2016), afirmam que os períodos de seca na escala de 6-12 meses foram mais frequentes durante os intervalos de 1961 a 2015 no Brasil. A CGEE (2016) retrata que ao longo da história, foram registrados vários eventos, a exemplo, 1969-83, 1987, 1990, 1992-93, 1997-99, 2002-03, 2007, 2011-2018, corroborando assim com o que foi encontrado no estudo. Sendo possível notar uma maior incidência nos eventos de seca durante as últimas décadas.

Ainda a respeito da Figura 3, percebe-se que o fenômeno é mais intensificado durante o intervalo de 2015 a 2018 (menores valores de SPEI) em todas as escalas temporais, com destaque o intervalo de 2016 e 2018, cujos valores do índice registraram eventos de até -2.38 (SPEI-24), sendo, portanto, os anos com ocorrências de secas variando da categoria de severa a extremas da série temporal avaliada. Uma característica importante da seca verificada é sua propensão a se tornar mais acentuada durante fortes eventos de El Niño, exemplo do período de 2015–2018 (Lee et al., 2020).

Ao que diz respeito aos impactos ocasionados pela seca, destaca-se elevações significativas na ocorrência dessa adversidade principalmente meses chuvosos, fato que merece atenção devido à importância desses períodos na recarga de reservatórios hídricos. Sendo assim, a crise hídrica que assolou durante o período de 2012 a 2018, que foi uma das mais severas desde a década de 60, afetando a população e a economia em diversas regiões (Nobre et al. 2016). Os resultados observados nesse estudo e em Armani et al. (2022), aliados à crescente

demanda por água, evidenciam a importância do planejamento e gestão dos recursos hídricos de áreas com elevada vulnerabilidade às crises hídricas (Nobre et al. 2016).

Entretanto, resultados publicados recentemente, baseados em dados de medição, confirmam o aumento dos padrões de temperatura e a diminuição dos padrões de ET e precipitação em regiões tropicais sujeitas a supressão da cobertura da vegetação nativa, revelando ainda que as épocas de seca podem se tornar mais frequentes mediante conversão do bioma (Perugini et al., 2017; Casagrande et al., 2018, & Teixeira et al, 2021).

Os eventos de seca na América do Sul podem de fato sofrer elevações em sua frequência e intensidade devido ao potencial dessa região em responder drasticamente às condições secas excessivas e à elevação da temperatura atmosférica (Erfrain et al., 2017 & Marengo et al., 2017). Em adição, autores como Pereira et al. (2018) observaram elevações na frequência de eventos de seca desencadeadas por déficits de chuva podem ser prejudiciais às atividades agrícolas em diversas regiões.

Partindo desse pressuposto, optou-se por avaliar as tendências do evento extremo de seca para a microrregião de Barreiras-BA. Com base nos resultados do teste não paramétrico de Mann-Kendall, complementado pelo estimador de declive Sen's slope aplicado a diferentes escalas temporais do Índice Padronizado de Precipitação e Evapotranspiração-SPEI de acordo com a Tabela 2, foi possível identificar as tendências de aumento ou redução das secas para o período analisado, assim como as significâncias estatísticas.

Tabela 2

Resultado do teste não-paramétrico de Mann-Kendall aplicado a microrregião de Barreiras para diferentes escalas de tempo do SPEI no período de 1961-2018.

SPEI	Tau de Kendall	Sen's slope	p-valor
3	-0,290	-0,016	0,001
6	-0,322	-0,018	0,000
12	-0,310	-0,024	0,001
24	-0,454	-0,036	< 0,0001
48	-0,551	-0,040	< 0,0001

Fonte: própria autoria.

Dos resultados da aplicação do teste Mann-Kendall verificou-se conforme tabela acima que todas escalas temporais do SPEI avaliadas denotaram tendência decrescente

estatisticamente significativa, ou seja, evidenciando um aumento dos eventos de seca ao longo do período estudado.

Na Tabela 2 observa-se também, os valores dos coeficientes de declividade de Sen's slope, com destaque para a magnitude de tendência nas diferentes escalas temporais do SPEI, onde todas possuem tendência temporal negativa estatisticamente significativa ao mesmo nível de significância adotado no teste Mann-Kendall (p-valor <0,05) complementando-o.

Essas tendências evidenciadas representam de acordo com o estimador, uma redução no índice de SPEI entre -0,016 e -0,04 ao longo dos 57 anos de estudo. A maior redução retratada conforme Sen's slope diz respeito ao SPEI-48 (-0,04), sendo este a maior escala de tempo avaliada.

Yao et al. (2018) em estudo semelhante aplicaram o teste não paramétrico de Mann-Kendall aos índices SPI e SPEI para investigar a significância da tendência de seca na província de Xinjiang, localizada no noroeste da China. Os resultados obtidos mostraram tendências negativas, onde o SPI demonstrou aumento nas condições de seca em 47,1% das estações, e o SPEI em 70,5%.

Além disso, nota-se que os valores da estatística diminuem à medida que a escala de tempo aumenta, o indicando uma maior frequência de ocorrência de períodos secos nos últimos anos (Koudahe et al., 2017). De acordo com Azua (2015), a ligeira tendência de aumento e diminuição concorda com o fato de que longas escalas de tempo do índice respondem lentamente e estavelmente à variação na precipitação diária.

A região do NEB é sensível à variabilidade climática, e o cenário das mudanças climáticas indica que essa área poderá ser afetada pelo déficit de chuvas e o aumento da aridez já em um futuro bem próximo (Marengo, Bernasconi, 2015, & Vieira et al., 2010). Se essas mudanças forem significativas em âmbito regional, poderão causar sérios impactos socioeconômicos e ambientais.

Conclusões

Mediante resultados obtidos, identificou-se uma variabilidade nos episódios de seca na microrregião de Barreiras de acordo com as diferentes escalas de tempo utilizadas do SPEI, com aumento na sua intensificação e ocorrências nas escalas temporais maiores, diferindo na magnitude e frequência do evento, observando-se que existe uma associação entre as intensas secas de anos antecedentes com as recentes.

Em relação a análises de tendências, os resultados a partir da aplicação dos testes não paramétricos, possibilitou verificar que todas as escalas temporais analisadas para a micro de

Barreiras denotaram tendências decrescentes significativas, ou seja, aumento do fenômeno extremo das secas durante todo o período avaliado.

Portanto, pode ser conjecturado mediante estudo que a microrregião avaliada vem passando por aumentos significativos do fenômeno da seca, sendo então necessário o aprimoramento em estudos voltados ao conhecimento e proteção dessa região cujo intuito, seria tentar amenizar os avanços causados por esse evento extremo.

Referências

- Álvares, C. A., Stape, J. L., Sentelhas, P. C., Gonçalves, J. L. M., & Sparovek, G. (2013). Köppen's climate classification map for Brazil. *Meteorologische Zeitschrift*. *Meteorologische Zeitschrift, Brasília*, 22(6), 711-728. <http://doi.org/10.1127/0941-2948/2013/0507>
- Armani, G., Lima, N. G. B., Garcia, M. F. P., & Carvalho, J. L. (2022). Regional climate projections for the State of São Paulo, Brazil, in the 2020 - 2050 period. *Derbyana*, 43(773). <https://doi.org/10.14295/derb.v43.773>.
- Azua, S. (2015). Analysis of Rainfall Variability and the Trends of Wet and Dry Periods in Makurdi and Environs Using Standardised Precipitation Index. In: 6th *International Conference and Annual General Meeting Meeting of Nigeria Association of Hydrological Sciences (NAHS)* "ABU, pp. 1-11.
- Bastos, L. A., & Ferreira, I. M. (2010). Composições fitofisionômicas do bioma Cerrado: estudo sobre o subsistema de Vereda. *Espaço em Revista, Catalão*, 12(1).
- Blain, G. C., Sobierajski, G. R., Weight, E., Martins, L. L., & Xavier, A. C. F. (2022). Improving the interpretation of standardizes precipitation index estimates to capture drought characteristics in changing climate conditions. *International Journal of Climatology*, 42(11), 5586-5608. <https://doi.org/10.1002/joc.7550>.
- Brasil. Superintendência do desenvolvimento do Nordeste (SUDENE). (2018). *Delimitação do semiárido*. <http://sudene.gov.br/planejamento-regional/delimitacao-do-semiarido>.
- Casagrande, E., Recanati, F., & Paco Melià, P. (2018). Assessing the Influence of Vegetation on the Water Budget of Tropical Areas. - *IFAC Papers On Line*, 51, 1-6. <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2018.06.190>.
- Centro de Gestão e Estudos Estratégicos. (2016). *Secas no Brasil: política e gestão proativas*. Brasília: Centro de Gestão e Estudos Estratégicos.

- Cunha, A. P. M. A., Tomasella, J., Ribeiro-Neto, G. G., Brown, M., Garcia, S. R., Brito, S. B., & Carvalho, M. A. (2019). Changes in the spatial – temporal patterns of droughts in the Brazilian Northeast. *Atmospheric Science Letters*, 19(10).
<https://doi.org/10.1002/asl.855>.
- Dashtpajardi, M. M., Kousari, M. R., Vagharfard, H., Ghonchepour, D., Hosseini, M. E., & Ahani, H. (2018). An investigation of drought magnitude trend during 1975–2005 in arid and semi-arid regions of Iran. *Environmental Earth Sciences*, 73(3), 1231–1244.
doi: 10.1007/s12665-014- 3477-1.
- Erfrain, A., Wang, G., & Fomenko, L. (2017). Unprecedented drought over tropical South America in 2016: significantly underpredicted by tropical SST. *Nature: Scientific Reports*, 7(5811). <https://doi.org/10.1038/s41598-017- 05373-2>.
- Gilbert, R. O. (1987). *Statistical methods for environmental pollution monitoring*. New York: Van Nostrand Reinhold Company.
- Kamruzzaman, M., Hwang, S., Cho, J., Min-Won Jang, M., & Jeong, H. (2019). Evaluating the Spatiotemporal Characteristics of Agricultural Drought in Bangladesh Using Effective Drought Index. *Water*, 11. <https://doi.org/10.3390/w11122437>.
- Kazemzadeh, M., & Malekian, A. (2018). Changeability evaluation of hydro-climate variables in Western Caspian Sea region, Iran. *Environmental Earth Sciences*, 77.
<https://doi.org/10.1007/s12665-018-7305-x>.
- Kendall, M. G. (1945). *Rank correlation measures*. London: Charles Griffin.
- Kendall, M. G. (1948). *Rank Correlation methods*. United States of America: Charles Griffin.
- Khan, M. I., Liu, D., Fu, Q., Fai, & M. A. (2018). Detecting the persistence of drying trends under changing climate conditions using four meteorological drought indices. *Meteorological Applications*, 25, 184–194. Doi:10.1002/met.1680.
- Koudahe, K., Kayode, A. J., Samson, A. O., Adebola, A. A., & Djavan, K. (2017). Trend analysis in standardized precipitation index and standardized anomaly index in the context of climate change in Southern Togo. *Atmospheric and Climate Sciences*, 7.
<https://doi.org/10.33448/rsd-v10i8.17458>

- Lee, C.W., Yu-Heng, T., Chung-Hsiung, S., Zheng, F., & Erh-Tung, W. (2020). Characteristics of the prolonged El Niño events during 1960–2020. *Geophysical Research Letters*, 47(12). <https://doi.org/10.1029/2020GL088345>
- Liu, W., Wang, L., Zhou, Y., Wang, S., Zhu, J., & Wang, F. (2016). A comparison of forest fire burned area indices based on H. J. satellite data. *Nat. Hazards*, 81, 971-980. <http://doi.org/10.1007/s11069-015-2115-x>
- Ma, N., Szilagyi, J., & Zhang, Y. Q. (2021). Calibration-free complementary relationship estimates terrestrial evapotranspiration globally. *Water Resources Research*, 57, <https://doi.org/10.1029/2021WR029691>.
- Malheiros, R. (2016). A influência da sazonalidade na dinâmica da vida no Bioma Cerrado. *Revista Brasileira de Climatologia*, 19, 113-128. <http://dx.doi.org/10.5380/abclima.v19i0.48876>
- Mann, H. B. (1945). Econometrica. *The econometric society*, 13, 245-259, <http://dx.doi.org/10.2307/1907187>.
- Marengo, J. A., Alves, L. M., Alvala, R., Cunha, A. P., Brito, S., & Moraes, O. L. (2017). Características climáticas da seca de 2010-2016 na região semiárida do Nordeste do Brasil. *Anais da Academia Brasileira de Ciências*, 90, 1973-1985.
- Marengo, J., Cunha, A. P., & Alves, L. (2016). A seca de 2012-15 no semiárido do Nordeste do Brasil no contexto histórico. *Climanálise*, 4.
- Marengo, J. A., & Bernasconi, M. (2015). Regional differences in aridity/drought conditions over Northeast Brazil: present state and future projections. *Climatic Change*, 129, 103-115. <https://doi.org/10.1007/s10584-014-1310-1>.
- Marengo, J. A., Torres, R. R., & Alves, L. M. (2017). Drought in Northeast Brazil—past, present, and future. *Theoretical and Applied Climatology*, 129, 1189-1200. <https://doi.org/10.1007/s00704-016-1840-8>.
- Mcgree, S., Schreider, S., & Kuleshov, Y. (2016). Trends and Variability in Droughts in the Pacific Islands and Northeast Australia. *Journal of Climate*, 23.

- Meza, I., Siebert, S., Döll, P., Kusche, J., Herbert, C., Eyshi Rezaei, E., Nouri, H., Gerdener, H., Popat, E., Frischen, J., Naumann, G., Vogt, J.V., Walz, Y., Sebesvari, Z. E., & Hagenlocher, M. (2020). Global drought risk assessment for agricultural agricultural systems. *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.*, 20, 695–712. <https://doi.org/10.5194/nhess-20-695>.
- Mostafazadeh, R., & Zabihi, M. (2016). Comparison of SPI and SPEI indices to meteorological drought assessment using R programming (Case study: Kurdistan Province). *Journal of the Earth and Space Physics*, 3.
- Nobre, C. A., Marengo, J. A., Seluchi, M. E., Cuartas, L. A., & Alves, L. M. (2016). Some characteristics and impacts of the drought and water crisis in Southeastern Brazil during 2014 and 2015. *Journal of Water Resource and Protection*, 8(2), 252-262. <https://doi.org/10.4236/jwarp.2016.82022>.
- Pereira, V. R., Blain, G. C., Avila, A. M. H., Pires, R. C., & Pinto, H. S. (2018). Impacts of climate change on drought: changes to drier conditions at the beginning of the crop growing season in southern Brazil. *Bragantia*, 77, 201-211. <https://doi.org/10.1590/1678-4499.2017007>.
- Perugini, L., Caporaso, L., Marconi, S., Cescatti, A., Quesada, B., Noblet-Ducoudré, N. de, House, J. I., & Arneth, A. (2017). Biophysical effects on temperature and precipitation due to land cover change. *Environmental Research Letters*, 12. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/aa6b3f>.
- Piyooosh, A. K., & Ghosh, S. K. (2017). Effect of autocorrelation on temporal trends in rainfall in a valley region at the foothills of Indian Himalayas. *Stochastic Environmental Research and Risk Assessment*, 31, 2075–2096. <https://doi.org/10.1007/s00477-016-1347-y>.
- Rubens Júnior, F., Barbosa, S. R., Cedro, T., Valério, R., Dias, E., & Santos, J. Y. (2020). Queimadas em áreas do Cerrado brasileiro. *Revista Ibero-Americana de Ciências Ambientais*, 11, 587-601. Doi: 10.6008/CBPC2179-6858.2020.007.0046.
- Santos, C. D., & Chaves, M. L. J. (2014). Difusão do agronegócio e urbanização no Nordeste: as regiões produtivas do agronegócio da soja no oeste da Bahia e da fruticultura no

baixo curso do rio Açú/Jaguaribe (CE/RN). *Geografia Ensino & Pesquisa*, 18.
<https://doi.org/10.5902/2236499413277>

- Santos, C. A. G., Brasil Neto, R. M., Passos, J. S. A., & Silva, R. M. (2017). Drought assessment using a TRMM-derived standardized precipitation index for the upper São Francisco River basin, Brazil. *Environmental Monitoring and Assessment*, 189, 250–270. Doi: 10.1007/s10661-017-5948-9.
- São José, R. V., Coltri, P. P., Greco, R., Souza, I. S., Torres, G. A. L., Charles, R., & Santos, K. A. (2020a). Avaliação de vulnerabilidade agrícola à seca: um estudo de caso no semiárido do estado da Bahia. *Caminhos de Geografia*, 21, 96-110.
<https://doi.org/10.14393/RCG217752133>.
- São José, R. V., Coltri, P. P., Greco, R., & Souza, I. S. (2020b). Seca no Semiárido Baiano e o Hidrometeoro (Chuva) no Contexto da Mídia Impressa do Estado da Bahia. *Revista Brasileira de Geografia Física*, 13, 249-255. <https://doi.org/10.26848/rbgf.v13.1.p249-255>.
- São José, R. V., Coltri, P. P., Greco, R., Souza, I., & Souza, A. P. S. (2022). Hazard (seca) no semiárido da Bahia: Vulnerabilidades e Riscos climáticos. *Revista Brasileira de Geografia Física*, 15(4), 1978-1993. Doi: 10.26848/rbgf.v15.4.p1978-1993.
- São José, R. V., Coltri, P. P., Greco, R., Santos, K. A., Souza, I. S., Torres, G. A. L., & Charles, R. (2021a). Cobertura jornalística do perigo climático (seca) 2012-2015 na Bahia: entre o combate e a convivência com a seca. *Caminhos De Geografia*, 22(84), 136–153. <https://doi.org/10.14393/RCG228456771>.
- São José, R. V., Coltri, P. P., Greco, R., Melo, H. L. S., Santos, K. A., & Souza, I. S. (2021b). Seca extrema de 2012 no semiárido baiano e seus impactos: informações climáticas difundidas pela mídia. *Revista Brasileira de Climatologia*. 29.
- Schumacher, D. L., Keune, J., Dirmeyer, P., & Miralles, D. G. (2022). Drought self-propagation in drylands due to land-atmosphere feedbacks. *Nature Geoscience*, 15. Doi:10.1038/s41561-022-00912-7.

- Sen, P. K. (1968). Estimates of the regression coefficient based on Kendall's tau. *Journal of the American Statistical Association*, 63, 1379-1389.
<https://www.jstor.org/stable/2285891>.
- Silva, W. L., Dereczynski, C., Chang, M., Freitas, M., Machado, B. J., Tristão, L., & Ruggeri, J. (2015). Tendências observadas em indicadores de extremos climáticos de temperatura e precipitação no estado do Paraná. *Revista Brasileira de Meteorologia*, 30, 2015.<https://doi.org/10.1590/0102-778620130622>.
- Sobhani, B., & Zengir, V. S. (2020). Modeling, monitoring and forecasting of drought in south and southwestern Iran. *Model. Earth Syst. Environ.*, 6(1), 63-71.
Doi:10.1007/s40808-019-00655-2.
- Teixeira, R. L. P., Pessoa, Z. S., Dias, E. M. S., & Alves, E. P. Q. (2021). Mudanças climáticas, capacidade adaptativa e sustentabilidade: reflexões a partir das cidades da região semiárida brasileira. *Revista Geotemas*, 11.
- Vieira, J. P. G., Souza, M. J. H., Teixeira, J. M., & Carvalho, F. P. (2010). Estudo da precipitação mensal durante a estação chuvosa em Diamantina, Minas Gerais. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, 14(7), 762-767.
<https://doi.org/10.1590/S1415-43662010000700012>.
- Yang, H., Wang, H., Fu, G., Yan, H., Zhao, P., & Ma., M. (2017). A modified soil water deficit index (MSWDI) for agricultural drought monitoring: Case study of Songnen Plain China. *Agr. Water Manage*, 194, 125-138. Doi: 10.1016/j.agwat.2017.07.022.
- Yao, J., Zhao, Y., & Yu, X. (2018). Spatial-temporal variation and impacts of drought in Xinjiang 159 (Northwest China) during 1961-2015. *Peer J*, 6(4926).
- Zhang, B., Fatima K., Salem, A., Hayes, M. J., Smith, K. H., Tadesse, T., & Wardlow, B. D. (2023). Explainable machine learning for the prediction and assessment of complex drought impacts. *Science of The Total Environment*, 898.
<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.165509>.

Zhang, X., Yu, J., Li, L. Z. X., & Li, W. (2022). Role of anthropogenic climate change in autumn drought trend over China from 1961 to 2014. *J. Meteorological Res.* 36, 251–260. Doi:10.1007/s13351-022-1178-3.

Zhao, M., Geruo, A., Liu, Y. L., & Konings, A. G. (2022). Evapotranspiration frequently increases during droughts. *Nature Climate Change*, 12, 1024–1030, Doi:10.1038/s41558-022-01505-3.

Zylstra, P., Bradstock, R. A., Bedward, M., Penman, T. D., Doherty, M. D., Weber, R. O., Gill, A. M., & Cary, G. J. (2016). Biophysical mechanistic modelling quantifies the effects of plant traits on fire severity: species, not surface fuel loads, determine flame dimensions in Eucalypt forests. *Plos One*, 11(8).
<http://doi.org/10.1371/journal.pone.0160715>.

Agradecimentos

A Universidade Federal de Campina Grande, pela contribuição no ensino e estrutura. Ao apoio do Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), pelo suporte financeiro.