

## VARIAÇÃO TEMPORAL DE ÍNDICES DE ARIDEZ NA ÁREA DE RESERVATÓRIO DO TRÓPICO SEMIÁRIDO

Stephanie de Oliveira Souza\*, Ana Carolina de Oliveira Nobre, Gustavo Ross Ribeiro Lima, Francisco Klayton Marques de Alencar, Fernando José Araújo da Silva

\* Universidade Federal do Ceará. stephanie\_souza@hotmail.com

### RESUMO

Alterações de longo prazo no sistema clima, quanto à temperatura, precipitação, evapotranspiração, frequência e intensidade de eventos extremos afetam o ciclo hidrológico e os usos da água. No Trópico Semiárido, o comportamento irregular das chuvas, em sua distribuição e intensidade, e a intensa evaporação, grande responsável pelo balanço hídrico negativo, ocasionam secas recorrentes. Nesse contexto, avaliou-se a influência do ciclo climático anual e a variação temporal dos índices de aridez de Lang, De Martonne e o baseado na Conama nº 238/1997 na área do reservatório cearense Pereira de Miranda. Realizou-se a abordagem estatística dos dados referentes ao período de 2004 a 2014. Os índices de aridez mostraram a tendência decrescente de precipitação e a vulnerabilidade da área à desertificação. As estações chuvosas e secas apresentaram influências estatisticamente significativas sobre os índices avaliados.

**PALAVRAS-CHAVE:** Índices de aridez, variação temporal, trópico semiárido.

### INTRODUÇÃO

As mudanças climáticas globais podem acarretar variações importantes nas condições hidroclimáticas ao redor do mundo (ZARCH *et al.*, 2017). Aridez, desertificação e secas são grandes problemas ambientais, que afetam as condições de vida de milhares de pessoas em muitos países (TABARI *et al.*, 2014). As secas se caracterizam como uma perturbação no regime climático e hidrológico natural, que pode afetar os parâmetros determinantes da qualidade da água de múltiplas formas. Portanto, torna-se necessário conhecer melhor as decorrências dessa perturbação sobre a qualidade da água para prevenir e administrar os seus impactos adversos (MOSLEY, 2015).

No contexto acima, as secas têm destaque em regiões semiáridas. O semiárido brasileiro se caracteriza pelo alto potencial para evaporação da água, em função da enorme disponibilidade de energia solar e altas temperaturas do ar. A região é mais exposta aos riscos da variabilidade climática e a uma possível “aridização”, com subsequente desertificação. Essa elevada evaporação e a grande variabilidade interanual dos deflúvios proporcionam uma significativa oscilação na disponibilidade hídrica em superfície. Nos últimos anos, o semiárido nordestino vem apresentando estações chuvosas mais curtas. Caso isto se firme, no futuro, a região se tornará árida e com clima mais quente (PBMC, 2013; RIBEIRO NETO; PAZ; SILVA, 2016).

Os Índices de Aridez classificam o tipo de clima em relação à disponibilidade de água. São usados para previsão e monitoramento de secas, através do processamento de dados meteorológicos, tais como precipitação, evapotranspiração e temperatura do ar (NASTOS; POLITI; KAPSOMENAKIS, 2013). Identificar regiões áridas e semiáridas a partir de bases climáticas auxilia no enfrentamento dos perigos decorrentes da desertificação e da degradação de terras e recursos hídricos (ŞARLAK; AGHA, 2018). A salinidade das águas está muitas vezes relacionada com o grau de aridez local, o qual pode ser quantificado na forma de índices.

Ao longo dos anos, vários índices de aridez foram elaborados para identificar a aridez climática, como os índices de Lang, De Martonne, Erinç e do Programa das Nações Unidas para o Meio Ambiente (UNEP). Esses índices foram empregados em muitos estudos para identificar o estado de secura do clima de determinada região e classificá-la quanto à escassez de água (ŞARLAK; AGHA, 2018).

Alterações no índice de aridez podem apontar impactos no ciclo hidrológico, no ecossistema e na gestão dos recursos hídricos de uma região. A elevação da aridez representa maior frequência de anos secos e de variabilidade na disponibilidade de recursos hídricos (DENIZ; TOROS; INCECIK, 2011; TABARI *et al.*, 2014). Assim, modelar alterações na aridez ante condições climáticas futuras é importante para o adequado manejo dos recursos hídricos (ZARCH *et al.*, 2017).

### OBJETIVOS

O presente estudo teve como objetivo avaliar a escassez de água na área de um reservatório do semiárido brasileiro quanto a diferentes índices de aridez e verificar a influência do ciclo climático anual sobre estes no período analisado.

## METODOLOGIA

A área estudada é a do reservatório Pereira de Miranda, também conhecido como açude Pentecoste, localizado no Estado do Ceará. Encontra-se entre as coordenadas geográficas 470.964 E e 9.579.848 N e faz parte da bacia hidrográfica do rio Curu. Foi construído, represando o rio Canindé, entre os anos de 1950 e 1957 pelo Departamento Nacional de Obras Contra as Secas (DNOCS). Possui uma capacidade de armazenamento de 395.638.000 m<sup>3</sup>, bacia hidrográfica de 2.840 Km<sup>2</sup> e bacia hidráulica de cerca de 5.700 ha (CEARÁ, 2018). O clima do local é do tipo BSwh, segundo a classificação climática de Köppen, caracterizando a área como semiárida quente com chuvas durante o verão e o outono. A pluviosidade é irregular no tempo e no espaço com escassez de chuvas e secas periódicas com intensidades variadas. A precipitação pluviométrica média local é de 817,7 mm com estação chuvosa entre os meses de janeiro e abril. A temperatura média fica entre 26 e 28 °C.

O açude tem como propósitos: o abastecimento de água, a irrigação, a geração de energia elétrica, a piscicultura e o controle das cheias do rio Curu. O açude Pentecoste nos últimos anos (2004 a 2018) apresentou redução considerável no volume disponível devido à estiagem prolongada na região. O mapa de localização da área em estudo é ilustrado na Figura 1.

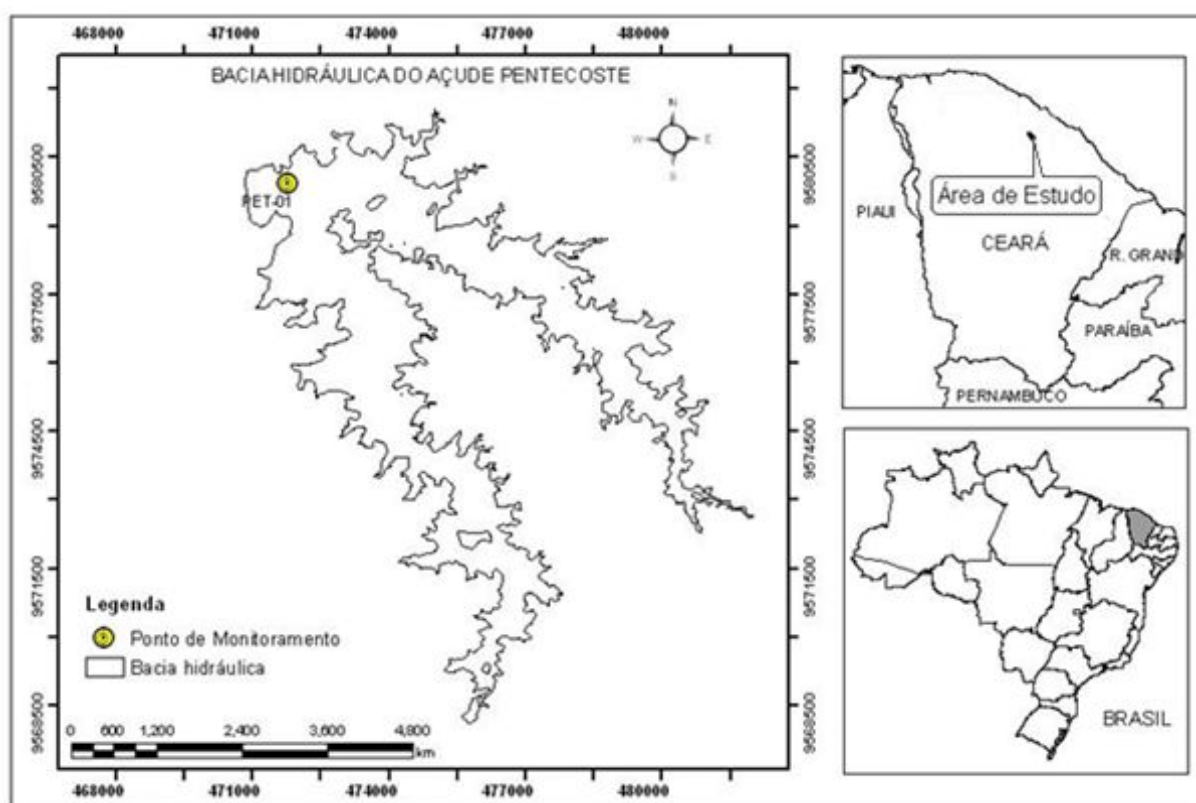


Figura 1: Localização do Açude Pentecoste.

O estudo foi desenvolvido utilizando dados de temperatura do ar do município de Pentecoste (T) e de precipitação pluviométrica (P). A pluviometria foi obtida no Portal Hidrológico do Ceará, enquanto os dados relativos à temperatura do ar foram disponibilizados pela Fundação Cearense de Meteorologia e Recursos Hídricos (FUNCEME).

Para avaliar a disponibilidade de água na área do reservatório estudado foi considerado o período de 2004 a 2014. Para cada ano do estudo foram considerados dois períodos para avaliação (1º e 2º semestres), a fim de determinar a influência do ciclo climático anual. Os índices de aridez, suas equações e critérios de classificação seguem na Tabela 1.

Tabela 1. Índices de aridez.

Índice	Equação	Valor do Índice	Condição da Água
Índice de	$IA_L = \frac{P}{T}$	$IA_L < 20$	Árido

Aridez de Lang		$20 < IA_L < 40$	Semiárido
		$40 < IA_L < 160$	Úmido
		$IA_L > 160$	Muito úmido
Índice de Aridez de De Martonne	$IA_{dM} = \frac{P}{(T+10)}$	$IA_{dM} < 5$	Árido
		$5 < IA_{dM} < 15$	Semiárido
		$15 < IA_{dM} < 20$	Subúmido seco
		$20 < IA_{dM} < 30$	Subúmido úmido
		$30 < IA_{dM} < 60$	Úmido
		$IA_{dM} > 60$	Muito úmido
Índice de Aridez (Conama nº 238/1997)	$IA_C = \frac{P}{ETP}$ $ETP = K \cdot ETP_i$ $I = \sum_{i=1}^{12} \left(\frac{T_i}{5}\right)^{1,514}$ $a = (6,75 \cdot 10^{-7}) \cdot I^3 - (7,71 \cdot 10^{-5}) \cdot I^2 + (1,7921 \cdot 10^{-2}) \cdot I + 0,4923$ $ETP_i = 16 \cdot \left(\frac{10 \cdot T_i}{I}\right)^a$ , para $0 < T_i < 26,5^\circ C$ $ETP_i = -415,85 + 32,25 \cdot T_i - 0,43 \cdot T_i^2$ , para $T_i \geq 26,5^\circ C$	$IA_C < 0,05$	Hiperárido
		$0,05 < IA_C < 0,20$	Árido
		$0,21 < IA_C < 0,50$	Semiárido
		$0,51 < IA_C < 0,65$	Subúmido seco
		$IA_C > 0,65$	Subúmido e úmido

### Índice de Lang

Lang (1920) propôs o Índice de Aridez de Lang ( $IA_L$ ), que consiste na razão entre precipitação (P) e temperatura (T). A precipitação pluviométrica anual em milímetros (mm) e a temperatura média anual do ar em °C.

### Índice de aridez De Martonne

De Martonne (1927) modificou o Índice de Aridez de Lang adicionando uma constante ao denominador para evitar valores negativos na razão. No entanto, esse índice ficou indefinido para temperaturas médias anuais de  $-10^\circ C$ . O Índice de Aridez de De Martonne ( $IA_{dM}$ ) é calculado em função da precipitação pluviométrica anual (P) em milímetros (mm) e a temperatura média anual do ar (T) em °C.

### Índice de aridez – Conama nº 238/1997

A Resolução Conama nº 238/1997 formalizou o Índice de Aridez ( $IA_C$ ) estabelecido na Política Nacional de Controle da Desertificação (PNCD). Esse índice estabelece que o grau de aridez de uma região depende da quantidade de água advinda da chuva (P) e da perda máxima possível de água pela evaporação e transpiração (ETP). O  $IA_C$  é calculado de acordo com a metodologia Thornthwaite (1948).

## RESULTADOS

De acordo com os resultados mostrados nas Tabela 2 e 3, o  $IA_L$  médio obtido com os primeiros semestres de cada ano foi de 23,6, enquadrando-se predominantemente como semiárido. Já com os segundos semestres, o  $IA_L$  médio foi de 1,4, enquadrando-se como árido. Constatou-se a alternância entre as classes de aridez semiárido, árido e úmido nos primeiros semestres, e a ocorrência exclusiva da classe de aridez árido nos segundos semestres.

O Índice de De Martonne médio obtido com os primeiros semestres foram de 34,4, enquadrando-se predominantemente como úmido. Nos segundos semestres, o  $IA_{dM}$  médio foi de 2,1, enquadrando-se predominantemente como árido. Ao longo dos anos analisados, notou-se uma oscilação entre as classes úmido, subúmido úmido e subúmido seco nos primeiros semestres, enquanto a classe de aridez árido predominou nos segundos semestres.

Os resultados para o Índice de Aridez baseado na Conama nº 238/1997 mostraram que o valor médio obtido com os primeiros semestres foi de 0,76, enquadrando-se como predominantemente subúmido e úmido. Já com os segundos semestres, o  $IA_C$  médio foi de 0,04, enquadrando-se como predominantemente hiperárido. Ademais, observaram-se nos primeiros semestres, variações entre as classes subúmido e úmido, subúmido seco e semiárido. Nos segundos semestres, houve um predomínio da classe hiperárido, complementada com a classe de aridez árido.

Os resultados alcançados com os segundos semestres evidenciam que o local de estudo está mais propenso à desertificação. A Política Nacional de Controle da Desertificação (PNCD) define a desertificação como: “A degradação de terras nas zonas áridas, semiáridas e subúmidas secas resultantes de fatores diversos tais como as variações climáticas e as atividades humanas”, implicando a deterioração da Terra, dos solos, dos recursos hídricos, da vegetação, da biodiversidade e da qualidade de vida da população afetada (BRASIL, 1997). Dessa forma, as mudanças observadas na aridez podem alterar a extensão e a gravidade da desertificação, impactar o ciclo hidrológico, a gestão de recursos hídricos e o ecossistema na região (TABARI *et al.*, 2014).

Os resultados dos índices de aridez apontam uma condição de clima mais favorável nos primeiros semestres de cada ano. Essa tendência geral advém do regime pluviométrico local, que apresenta um ciclo climático anual dividido em duas estações: seca e chuvosa. Desse modo, concentra-se no primeiro semestre a quadra chuvosa (fevereiro, março, abril e maio), representando cerca de 70% da precipitação anual, e no segundo semestre a estação seca, em que praticamente inexistem fenômenos atmosféricos ocasionadores de chuva (CORTEZ; LIMA; SAKAMOTO, 2017; GUTIÉRREZ *et al.*, 2014). Além disso, os referidos índices refletiram a tendência decrescente de precipitação observada na localidade aplicada, que está frequentemente relacionada com o fenômeno *El Niño*-Oscilação Sul (ENOS).

Mediante o exposto, uma maior frequência de anos secos na área estudada resultará, em tendência mais notável, na elevação da aridez (DENIZ; TOROS; INCECIK, 2011). Assim, nos períodos de seca, como observado na maioria dos lagos e reservatórios, o aumento da salinidade pode limitar a adequação das águas armazenadas à irrigação, ao consumo humano e aos usos industriais (MOSLEY, 2015).

**Tabela 2. Índices de aridez na área do Açude Pereira de Miranda no período chuvoso.**

\* Classificação A: Árido; MU: Muito úmido; S: Semiárido; SS: Subúmido seco; SU: Subúmido e úmido; U: Úmido; CV: Coeficiente de variação.

Ano/Semestre	$IA_L$	*	$IA_{dM}$	*	$IA_C$	*
2004.1	33,6	S	49,0	U	1,06	SU
2005.1	21,0	S	30,7	U	0,68	SU
2006.1	26,5	S	38,4	U	0,91	SU
2007.1	19,0	A	27,6	SU	0,62	SS
2008.1	27,9	S	40,6	U	0,88	SU
2009.1	44,3	U	64,7	MU	1,41	SU
2010.1	11,6	A	17,2	SS	0,36	S
2011.1	33,6	S	48,5	U	1,16	SU
2012.1	11,2	A	16,3	SS	0,35	S
2013.1	14,7	A	21,7	SU	0,45	S
2014.1	16,4	A	24,2	SU	0,51	SS
Média	23,6	S	34,5	U	0,76	SU
CV	0,45	-	0,44	-	0,46	-

**Tabela 3. Índices de aridez na área do Açude Pereira de Miranda no período seco.**  
\* Classificação A: Árido; H: Hiperárido; S: Semiárido; CV: Coeficiente de variação.

Ano/Semestre	IA <sub>L</sub>	*	IA <sub>dM</sub>	*	IA <sub>C</sub>	*
2004.2	1,4	A	2,0	A	0,04	H
2005.2	0,3	A	0,4	A	0,01	H
2006.2	0,8	A	1,2	A	0,03	H
2007.2	1,2	A	1,8	A	0,04	H
2008.2	1,4	A	2,1	A	0,04	H
2009.2	2,5	A	3,7	A	0,08	A
2010.2	1,8	A	2,6	A	0,05	A
2011.2	3,5	A	5,1	S	0,11	A
2012.2	0,2	A	0,4	A	0,01	H
2013.2	1,7	A	2,5	A	0,05	A
2014.2	0,9	A	1,3	A	0,03	H
Média	1,4	A	2,1	A	0,04	H
CV	0,67	-	0,66	-	0,67	-

### Análises estatísticas

Realizou-se testes de análise de variância paramétrico (ANOVA) e não paramétrico (*Kruskal-Wallis*) para a detecção de tendências entre o ciclo climático anual. De acordo com esses testes, a hipótese nula ( $H_0$ ) é igual à inexistência de tendência na série temporal, ou seja, a variação de um ou mais conjuntos de dados não difere significativamente dos demais, enquanto a hipótese alternativa ( $H_1$ ) é igual à existência de tendência. As tendências semestrais de cada índice de aridez para o período de 2004 a 2014 foram avaliadas ao nível de significância de 5% ( $\alpha = 0,05$ ). As distribuições dos conjuntos de dados, que tiveram como base o Critério de Informação de *Akaike* (AIC), e os resultados da análise de variância podem ser vistos na Tabela 4.

De acordo com a tabela abaixo, as distribuições comparadas (1º e 2º semestres) dos resultados dos índices de aridez de Lang, De Martonne e Conama 238/197, respectivamente, foram significativamente diferentes para o período de 2004 a 2014 no açude Pereira de Miranda. Isto é evidenciado pelos testes ANOVA ( $p$ -valor  $< 0,05$  e  $F_{\text{calculado}} > F_{\text{crítico}}$ ) e *Kruskal-Wallis* ( $p$ -valor  $< 0,05$  e  $H_{\text{teste}} > H_{\text{crítico}}$ ).

Dessa forma, as condições climáticas avaliadas pelos índices de aridez (temperatura, precipitação e evapotranspiração) nos 1º e 2º semestres são estatisticamente distintas. Não seguem um padrão homogêneo, destacando a influência do ciclo climático anual sobre as classes de aridez obtidas.

**Tabela 4. Distribuições teóricas e testes de variância dos índices de aridez na área do Açude Pereira de Miranda.**

Açude Pereira de Miranda	FDP	ANOVA			<i>Kruskal-Wallis</i>		
		F <sub>calculado</sub>	F <sub>crítico</sub>	$p$ -valor	H <sub>teste</sub>	H <sub>crítico</sub>	$p$ -valor
IA <sub>L</sub>	1º semestre	48,28	4,35	9,57x10 <sup>-7</sup>	15,78	3,84	7,11x10 <sup>-5</sup>
	2º semestre						
IA <sub>dM</sub>	1º semestre	48,82	4,35	8,83x10 <sup>-7</sup>	15,78	3,84	7,11x10 <sup>-5</sup>
	2º semestre						
IA <sub>C</sub>	1º semestre	46,15	4,35	1,32x10 <sup>-6</sup>	15,78	3,84	7,11x10 <sup>-5</sup>
	2º semestre						

## CONCLUSÕES

Este trabalho avaliou indicadores quantitativos da deficiência de água presente na área de um reservatório pertencente ao Trópico Semiárido. O estudo apresentou repetidamente a classificação de “árido”, principalmente nos segundos semestres. Os resultados evidenciam a vulnerabilidade da área à desertificação como definida pela PNCD. Assim, a aridez observada pode aumentar a deficiência de água, alterar a gravidade e a extensão da desertificação e, por fim, impactar atividades fins, como a agricultura.

Como um todo, houve diferença estatisticamente significativa ao longo de cada ano para os índices computados. Assim, depreende-se que a variabilidade climática, com resposta na precipitação, pode controlar a qualidade das águas do açude de estudo, afetando diretamente o conteúdo iônico das águas, a salinidade e a aridez.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. Brasil. Ministério do Meio Ambiente. Conselho Nacional de Meio Ambiente. Resolução 238. Dispõem sobre a aprovação da Política Nacional de controle da desertificação. Brasília, DF: **Diário Oficial da União** n° 248, seção 1, p. 30930. 1997.
2. Ceará. Secretaria dos Recursos Hídricos do Estado do Ceará. **Atlas eletrônico dos recursos hídricos do Ceará**. Disponível em: <[http://atlas.srh.ce.gov.br/infra-estrutura/acudes/detalhaCaracteristicasTecnicas.php?cd\\_acude=175&status=0](http://atlas.srh.ce.gov.br/infra-estrutura/acudes/detalhaCaracteristicasTecnicas.php?cd_acude=175&status=0)>. Acesso em: 20 jul. 2018.
3. Cortez, H. S.; Lima, G. P.; Sakamoto, M. S. A seca 2010-2016 e as medidas do Estado do Ceará para mitigar seus efeitos. **Parcerias Estratégicas**, v. 22, n. 44, p. 83-118, 2017.
4. De Martonne, E. Regions of interior-basin drainage. **Geographical Review**, v. 17, n. 3, p. 397- 414, 1927.
5. Deniz, A.; Toros, H.; Incecik, S. Spatial variations of climate indices in Turkey. **International Journal of Climatology**, v. 31, n. 3, p. 394-403, 2011.
6. Gutiérrez, A. P. A.; Engle, N. L.; De Nys, E.; Molejón, C.; Martins, E. S. Drought preparedness in Brazil. **Weather and Climate Extremes**, v. 3, p. 95-106, 2014.
7. Lang, R. **Verwitterung und Bodenbildung als Einführung in die-Bodenkunde**. Schweizerbart Science Publishers, Stuttgart, 1920.
8. Mosley, L. M. Drought impacts on the water quality of freshwater systems; review and integration. **Earth-Science Reviews**, v. 140, p. 203-214, 2015.
9. Nastos, P. T.; Politi, N.; Kapsomenakis, J. Spatial and temporal variability of the Aridity Index in Greece. **Atmospheric Research**, v. 119, p. 140-152, 2013.
10. Painel Brasileiro de Mudanças Climáticas (PBMC). **Impactos, vulnerabilidades e adaptação às mudanças climáticas**. Contribuição do Grupo de Trabalho 2 ao Primeiro Relatório de Avaliação Nacional do Painel Brasileiro de Mudanças Climáticas. Sumário Executivo do GT2. Rio de Janeiro: PBMC, 2013. 28 p.
11. Ribeiro Neto, A.; Paz, A. R.; Silva, E. R. **Impactos e vulnerabilidade do setor de recursos hídricos no Brasil às mudanças climáticas**. In: Modelagem climática e vulnerabilidades setoriais à mudança do clima no Brasil. Brasília: Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovação, 2016. 590 p.
12. Şarlak, N.; Agha, O. M. M. Spatial and temporal variations of aridity indices in Iraq. **Theoretical and Applied Climatology**, v. 133, n. 1-2, p. 89-99, 2018.
13. Tabari, H.; Talaei, P. H.; Nadoushani, S. M.; Willems, P.; Marchetto, A. A survey of temperature and precipitation based aridity indices in Iran. **Quaternary International**, v. 345, p. 158-166, 2014.
14. Thornthwaite, C.W. An approach towards rational classification of climate. **Geographical Review**, v. 38, n. 1, p. 55-94, 1948.
15. Zarch, M. A. A.; Sivakumar, B.; Malekinezhad, H.; Sharma, A. Future aridity under conditions of global climate change. **Journal of Hydrology**, v. 554, p. 451-469, 2017.