

REVISTA AIDIS

de Ingeniería y Ciencias Ambientales:
Investigación, desarrollo y práctica.

AVALIAÇÃO DE INDICES DE SECA METEOROLÓGICA E HIDROLÓGICA EM RELAÇÃO AO IMPACTO DE ACUMULAÇÃO DE ÁGUA EM RESERVATÓRIO: UM ESTUDO DE CASO PARA O RESERVATÓRIO DE JUCAZINHO-PE

* Luiz Martins Araújo Junior ¹
Francisco de Assis de Souza Filho ²
Daniel Antônio Camelo Cid ²
Samiria Maria Oliveira da Silva ²
Cleiton da Silva Silveira ²

EVALUATION OF METEOROLOGICAL AND HYDROLOGICAL DRY INDICES IN RELATION TO THE IMPACT OF WATER ACCUMULATION IN RESERVOIR: A CASE STUDY FOR THE RESERVOIR OF JUCAZINHO-PE

Recibido el 1 de octubre de 2018; Aceptado el 28 de octubre 2019

Abstract

This work aims to analyze the dry state in a water accumulation reservoir and assess the severity classification difference in different time horizons over the years in order to determine what the best drought indices that can be used as triggers for shooting drought mitigation actions. For this, we used the SPI index (Standardized Precipitation Index), SPEI (Standardized Precipitation-Evapotranspiration Index), SRI (Standardized Runoff Index), IE (State Index), IS (Synthetic Index) and NM (Target levels), where such indices were compared by a qualitative and quantitative analysis. The results showed that the drought afflicting Jucazinho reservoir or dry severity level of the same, it is not always occur due to natural conditions which the reservoir is exposed. Another important finding is that content such as SPI, SPEI and SRI cannot keep the fluctuation of the water stock in the same speed as do occur.

Keywords: drought state, drought indexes, reservoir.

¹ Instituto de Engenharia e Desenvolvimento Sustentável, Universidade da Integração Internacional da Lusofonia Afro-Brasileira (UNILAB), Brasil.

² Departamento de Engenharia Hidráulica e Ambiental, Universidade Federal do Ceará, Brasil.

*Autor correspondente: Instituto de Engenharia e Desenvolvimento Sustentável, Universidade da Integração Internacional da Lusofonia Afro-Brasileira - UNILAB, Campus da Liberdade, Avenida da Abolição, 3 – Centro, CEP.: 62.790-000, Redenção – CE – Brasil Email: luiz_m_jr@unilab.edu.br

Resumo

Este trabalho tem como objetivo analisar os estados de seca em um reservatório de acumulação de água e avaliar a diferença de classificação de severidade em diferentes horizontes temporais ao longo dos anos a fim de determinar quais os melhores índices de seca que podem ser utilizados como gatilhos para disparar ações de mitigação da seca. Para isso, utilizaram-se os índices SPI (Índice de Precipitação Normalizada), SPEI (Índice de Precipitação-Evapotranspiração Normalizada), SRI (Índice de Escoamento Normalizado), IE (Índice de Estado), IS (Índice Sintético) e o NM (Níveis Meta), em que tais índices foram comparados através de uma análise qualitativa e quantitativa. Os resultados mostraram que a seca que aflige o reservatório Jucazinho ou o nível de severidade de seca do mesmo, nem sempre ocorre devido às condições naturais a qual o reservatório é exposto. Outra conclusão importante, é que índices tais como SPI, SPEI e SRI não conseguem acompanhar a flutuação do estoque de água na mesma velocidade com que realmente ocorrem.

Palavras chave: estado de seca, índices de seca, reservatório.

Introdução

A seca é um fenômeno recorrente que afeta ecossistemas, setores econômicos e sociais. No Nordeste Brasileiro (NEB), as secas ocasionam perdas na pecuária, na agricultura de sequeiro, comprometendo o abastecimento de água para as pessoas e animais que habitam a região. O monitoramento da seca pode minimizar os impactos de tal evento extremo e melhorar a resiliência das localidades afetadas.

O monitoramento tem o papel de identificar os condicionantes, a evolução histórica e o grau de severidade atual, além de apontar os possíveis impactos e vulnerabilidades do hidrossistema submetido a escassez hídrica. Tendo por finalidade definir estratégias de preparação, mitigação e resposta às secas, e ainda determinar gatilhos e ações compatíveis com os estados de seca. Esse tipo de mecanismo possibilita a definição de medidas de gestão afim de evitar o colapso dos hidrossistemas, tais como restrição da disponibilidade de água e atuação do governo (National Drought Policy Commission, 2000).

A grande variedade de setores afetados pela seca, a sua diversificada distribuição geográfica e temporal, e uso múltiplo da água (abastecimento humano, irrigação, geração de energia, entre outros) tornam difícil o desenvolvimento de uma única definição de seca (Heim Junior., 2002; Araújo Júnior *et al.*, 2014).

As inúmeras peculiaridades da seca e a ampla gama de setores da economia afetados faz com que seu efeito seja difícil de avaliar e/ou quantificar. Em geral, para se identificar e avaliar as condições de seca, comumente utilizasse índices de seca baseados em variáveis como precipitação, temperatura, evaporação, evapotranspiração, umidade do solo, vazão e volume armazenado de água (Souza Filho *et al.*, 2016a).

Na literatura há diversos índices de seca que normalmente são utilizados no monitoramento e identificação desse tipo de evento em várias escalas temporais. Dentre estes os mais difundidos pela sua utilização estão o índice de severidade de seca de Palmer, PDSI (Palmer Drought Severity Index) (Alley, 1984; Keyantash e Dracup, 2002), o índice de abastecimento

de água superficial, SWSI (Surface-Water Supply Index) (Shafer e Dezman, 1982; Garen, 1993) e o índice normalizado de precipitação, SPI (Standardized Precipitation Index) (McKee *et al.*, 1993), associados a esse último têm-se o SRI (Standardized Runoff Index) (Shukla e Wood, 2008) e SPEI (Standardized Precipitation-Evapotranspiration Index) (Vicente-Serrano *et al.*, 2010).

O objetivo desse estudo é identificar o índice de seca que apresenta melhor desempenho na identificação dos estados de seca associados a acumulação de água em reservatórios (seca hidrológica) em diversas escalas temporais para o reservatório de Jucazinho, Pernambuco, Brasil.

Contexto

O índice normalizado de precipitação, SPI, desenvolvido por McKee *et al.* (1993, 1995), teve grande divulgação e baseia-se na distribuição de probabilidade da precipitação e pode ser calculado em diferentes escalas de tempo. Por ser um índice normalizado, permite a comparação entre diferentes locais e climas. O SRI e o SPI são conceitualmente semelhantes quando se baseiam em longos períodos de acumulação, contudo para períodos curtos de acumulação o SRI incorpora processos hidrológicos que determinam defasagens sazonais entre estes índices, isso é associado a capacidade de armazenamento do solo e sua influência no escoamento superficial, fenômenos que não são avaliados pelo SPI. Como resultado, em escalas de tempo mensal para sazonal, o SRI é um complemento útil do SPI para retratar os aspectos hidrológicos de seca (Shukla e Wood, 2008; Araújo Júnior *et al.*, 2014).

O SPEI e o PDSI consideram os efeitos da evapotranspiração de referência sobre a severidade da seca, porém a natureza multi-escalar do SPEI permite identificar os tipos diferentes de secas e de impactos da seca sobre diversos sistemas. Com isso, o SPEI tem a sensibilidade do PDSI em relação a evapotranspiração demandada e é multi-escalar como o SPI (Vicente-Serrano *et al.*, 2010; Vicente-Serrano *et al.*, 2012). Adicionalmente, o SPEI tem sido usado em sistemas de monitoramento de seca e muitos estudos relataram que o SPEI tem uma melhor correlação com variáveis ecológicas e hidrológicas que outros índices de seca (Lorenzo-Lacruz *et al.*, 2010).

Hayes *et al.* (1999) fizeram uma análise da seca de 1996 em planícies do sul e sudoeste dos Estados Unidos e no Texas, utilizando o SPI, nível de reservatórios e o PDSI. Os resultados mostraram que o SPI foi capaz de monitorar o início e a progressão da seca de 1996, sendo que o SPI detectou a seca pelo menos um mês antes do que o PDSI.

Domingos (2006) realizou um estudo no intuito de implementar e avaliar o SPI para o Portugal Continental, investigando sua capacidade de informação complementar ao PDSI no acompanhamento de situações de seca. Verificou-se que houve uma maior ocorrência de seca na segunda metade da série em estudo e que correlação entre o SPI e PDSI é mais forte nas escalas de 3 a 6 meses para a maior parte das estações em estudo.

Keyantash e Dracup (2002) avaliou os índices de seca mais proeminente para vários tipos de seca (meteorológica, hidrológica e agrícola), aplicando um conjunto ponderado de seis critérios

(robustez, tratabilidade, transparência, sofisticação, extensibilidade e dimensionalidade) de avaliação. Para seca meteorológica, os índices analisados foram a anomalia de precipitação acumulada e discreta, decis de chuva, o PDSI, o índice de área seca, o índice de anomalia de chuva e o SPI. Para seca hidrológica, os índices avaliados foram o déficit total de água, a anomalia de vazões acumuladas, o índice de severidade de seca hidrológica Palmer (PHDI) e o índice de abastecimento de água superficial (SWSI). Para seca agrícola, os índices em estudo foram o índice de umidade da colheita (CMI), o índice de anomalia umidade Palmer, a umidade do solo computadorizada e o índice de anomalia da umidade do solo. Os resultados mostraram que os índices que obtiveram as melhores pontuações segundo os critérios de avaliação escolhidos foram os decis de chuva e o SPI na ocorrência de seca meteorológica, o déficit total de água na ocorrência de seca hidrológica e a umidade de solo computada na seca agrícola.

Além dos índices citados, outro bastante utilizado na identificação dos estados de seca, principalmente na Espanha, é o índice de estado (IE) que, em síntese, indica os valores abaixo ou acima da média de uma série histórica. CHJ (2007) e Chebro (2007) fizeram uso do IE no plano de atuação em situação de alerta ou eventual seca para as bacias hidrográficas de Júcar e de Ebro, na Espanha, a fim de descrever o estado de seca das bacias estudadas e permitir uma comparação quantitativa entre outros indicadores de seca.

Cid *et al.* (2014) realizaram simulações para a proposição de uma regra de operação de reservatório, definindo níveis metas para o reservatório Jucazinho, localizado na bacia do rio Capibaribe, em Pernambuco. Os resultados demonstraram que uma retirada de 1.42 m³/s de vazão para volumes metas do reservatório de 127.98hm³, 111.07 hm³, 89.78 hm³ e 10.54 hm³ no mês de junho, conferem garantias de atendimento das demandas, respectivamente de 85%, 90%, 95% e 100%. Este valor de vazão retirada é inferior ao utilizado pela Companhia Pernambucana de Saneamento (Compesa) (2.177 m³/s), demonstrando que o valor de vazão utilizado pela companhia tem uma menor garantia de atendimento hídrico da população.

Materiais e métodos

Para o desenvolvimento do estudo foram utilizados os índices associados a seca meteorológica: SPI e SPEI; e a seca hidrológica: SRI, IE, índice sintético (IS) e Níveis Meta. As formulações desses índices encontram-se nos tópicos a seguir. Após a seção de formulação dos índices, tem-se a descrição do método utilizado para a análise comparativa.

Local de aplicação

O reservatório selecionado para o estudo foi a barragem de Jucazinho, inserido na Bacia Hidrográfica do Rio Capibaribe. Esta bacia está localizada na porção norte-oriental de Pernambuco, fazendo parte das Mesorregiões Metropolitana do Recife, Mata Pernambucana e Agreste Pernambucano.

A região apresenta uma distribuição pluviométrica mensal e interanual irregular, assim como os deflúvios. Segundo o Plano Estadual de Recursos Hídricos de Pernambuco (PERH/PE, 1998a; PERH/PE, 1998b) o reservatório possui um volume máximo de 327 hm³, em que 100 hm³ são

destinados para atenuação de enchentes, ficando o reservatório com um volume útil 227 hm^3 , a vazão média afluente é de $6.34 \text{ m}^3/\text{s}$, a evaporação média de $0.59 \text{ m}^3/\text{s}$ e o volume anual médio regularizado (90%) de 122.7 hm^3 .

Dados utilizados

No desenvolvimento desse estudo foram utilizados dados diários de precipitação da estação meteorológica de Surubim do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET), entre o período de 1961 e 2012, localizada na latitude 7.83°S e longitude 35.71°W . Os dados diários adquiridos foram transformados em series mensais e utilizados para estimar os índices de seca. A evapotranspiração potencial foi estimada por meio do método de Thornthwaite (Thornthwaite e Wilm, 1944), usando a temperatura e a longitude da região. Os dados de temperatura foram obtidos mensalmente para a estação meteorológica de Surubim no mesmo período supracitado.

Utilizou-se a série de afluições históricas, do período de janeiro de 1933 a dezembro de 2008, extraídas do “Plano Hidro-Ambiental da Bacia do Rio Capibaribe - TOMO I VOLUME 01/03” (SRH, 2010). Além disso, foram usadas series históricas de volume, que foram obtidas de duas maneiras:

- a primeira cedida pela Agencia Pernambucana de Água e Clima (APAC) para o período de 2000 a 2014;
- a segunda calculada por um modelo de operação de reservatório utilizando os dados de vazão afluente supracitados com uma retirada mensal de aproximadamente $2.18 \text{ m}^3/\text{s}$ simulados para o mesmo período das vazões de entrada.

Índices de seca analisados

Para o desenvolvimento do estudo, índices de seca foram gerados no intuito de verificar a persistência e a severidade da seca no reservatório de acumulação de água ao longo dos anos.

Deste modo, com dados de precipitação foi obtido o SPI, com os dados de estimativa de evapotranspiração foi feito um balanço hídrico climatológico (Precipitação menos evapotranspiração) afim de se obter o SPEI.

Com os dados de vazão afluente calculou-se o SRI, para as escalas temporais de 12, 24 e 36 meses, estas foram baseadas no tempo de residência da água no reservatório, que conceitualmente se refere a quantidade média de tempo que a capacidade máxima de acumulação do reservatório levaria para se extinguir a uma taxa de fluxo máxima da água ou vazão regularizada máxima.

Em seguida, computou-se uma classificação de severidade da seca, para os índices citados. O SRI e o SPEI podem ser computados da mesma maneira que o SPI, esses índices são adimensionais, sendo que valores negativos indicam seca e valores positivos indicam períodos úmidos. Com esses índices, a intensidade da seca, a magnitude e a duração podem ser determinadas, bem como a probabilidade de surgir uma seca específica a partir de uma série histórica (Araújo Júnior *et al.*, 2014).

Para o cálculo do SPI, SRI e do SPEI, em uma escala de tempo pré-selecionada, ajusta-se uma distribuição de probabilidade para os valores de entrada, precipitação, vazão e temperatura, respectivamente, depois estima-se os valores da distribuição de probabilidade correspondente e converte-se os valores de probabilidade acumulada obtidos que correspondem à variável normal reduzida.

A distribuição de probabilidade utilizada no ajuste dos dados foi a gama dois parâmetros, definida por

$$f(x) = \frac{1}{\beta^\alpha \Gamma(\alpha)} x^{\alpha-1} e^{-\frac{x}{\beta}}, x > 0 \quad \text{Equação (1)}$$

em que $\alpha > 0$ é os parâmetros de forma, $\beta > 0$ o parâmetro de escala, x é a variável aleatória em estudo e

$$\Gamma(x) = \int_0^\infty y^{\alpha-1} e^{-y} dy \quad \text{Equação (2)}$$

a função gama. A distribuição gama, conforme exposto na equação (1), só está definida para $x > 0$, logo quando um dado mês apresenta valores nulos, faz-se necessário o uso de uma transformação da distribuição de probabilidade acumulada, dada por

$$F(x) = q + (1 - q)G(x) \quad \text{Equação (3)}$$

sendo $G(x)$ conhecida como função gama incompleta, que é a função de distribuição estimada a partir dos valores não nulos da série de dados utilizada e q a probabilidade de zeros na amostra. Com isso, o SRI e o SPEI são definidos assim como o SPI,

$$SPI = \varphi^{-1}[F(x)] \quad \text{Equação (4)}$$

em que φ a função de distribuição normal reduzida. Os valores de SPI, SRI e SPEI são classificados conforme a Tabela 1.

Tabela 1. Limiares dos índices com as devidas classificações, categorias e estados.

SPI, SPEI e SRI	Classificação	Categoria	Estado
≥ -0.79	D0	Próximo a Normalidade	Normal
-0.80 a -1.29	D1	Seca Moderada	Pré-Alerta
-1.30 a -1.59	D2	Seca Severa	Alerta
-1.60 a -1.99	D3	Seca Extrema	Emergência I
≤ -2.00	D4	Seca Excepcional	Emergência II

Fonte: Adaptada de Cunha (2008).

Em adição aos índices já citados, calculou-se o índice que relaciona o estado da seca com o estoque de água armazenada no reservatório, este índice é denominado de indicador de estado (IE) (Estrela *et al.*, 2006). O IE, assim como os demais índices em estudo, é padronizado, e consequentemente é um índice adimensional, a fórmula que tem sido adotada é definida com valores num intervalo de 0, correspondente ao valor mínimo histórico, até 1, correspondente ao valor máximo histórico, e é calculada de acordo com as seguintes expressões:

Se

$$V_i \geq V_{med} \Rightarrow I_e = \frac{1}{2} \left[1 + \frac{V_i - V_{med}}{V_{max} - V_{med}} \right] \text{ e se } V_i < V_{med} \Rightarrow I_e = \frac{V_i - V_{min}}{2(V_{med} - V_{min})} \quad \text{Equação (5)}$$

em que V_i é o volume medido do período analisado, V_{med} o volume médio para o período histórico, V_{max} o volume máximo do período histórico e V_{min} o volume mínimo do período histórico.

Para o cálculo do IE foram utilizados apenas os valores referentes a dezembro de cada ano da série de volume em análise. Na utilização dos dados de volume simulados pelo modelo de operação de reservatório o IE foi renomeado para índice sintético (IS). Suplementarmente, calculou-se tanto o IE como o IS alterando o volume médio pelo volume mediano objetivando reduzir o efeito do dimensionamento do reservatório. Os valores de IE e IS são classificados conforme Tabela 2.

Tabela 2. Categorização dos índices IE e IS.

IE e IS	Estado
> 0.5	Normal
0.50 a 0.31	Pré-Alerta
0.30 a 0.16	Alerta
0.15 a 0.076	Emergência I
≤ 0.075	Emergência II

Fonte: Adaptado de Estrela *et al.* (2006).

Outro índice calculado foi o Nível Meta, que corresponde os níveis de água desejados para um reservatório para um dado intervalo de tempo, o operador tenta mantê-los enquanto satisfaz as demandas.

Os níveis de água acumulados em um reservatório são modelados ao longo dos meses por um modelo de operação de reservatório. Aqui não será exposta formulação matemática desse modelo visto que o foco desse estudo não é a operação de reservatórios, assim para consulta de desenvolvimento do Nível Meta veja Cid *et al.* (2014). Esse índice foi extraído apenas para os meses de dezembro de cada ano, para efeito de classificação, assim como os IE e IS. Os valores de Níveis Metas associados a cada estado de seca são apresentados na Tabela 3.

Tabela 3. Categorização dos Níveis Meta.

Níveis Meta	Estado
0	Normal
1	Pré-Alerta
2	Alerta
3	Emergência I
4	Emergência II

Fonte: *Elaboração própria.*

Análise comparativa dos índices de seca

No intuito de avaliar a seca no hidrossistema, Jucazinho, foi feita uma avaliação simplória dos acertos e erros ocorridos em cada estado de seca, em que ora o IS de volume mediano e ora os Níveis Meta foram convencionados como índice de referência ou observação e os índices SPI, SPIE e SRI nas escalas temporais de 12, 24 e 36 meses convencionados como uma “previsão”.

Para fazer essa avaliação, utilizou-se o método de análise de contingência como ferramenta matemática de comparação, e a partir disso inferiu-se a probabilidade de detecção de eventos (POD), que é a razão do número de eventos que foram corretamente previstos pelo número total de eventos, e a razão de falso alarme (FAR), que é proporção das previsões de ocorrência de eventos que na verdade não se materializaram, mostrados nas equações 6 e 7, respectivamente (Schaefer, 1990).

$$POD = \frac{a}{a+c} \quad \text{Equação (6)}$$

$$FAR = \frac{b}{a+b} \quad \text{Equação (7)}$$

Sendo, (a) quando o modelo previu o evento e este ocorreu, (b) quando o modelo previu o evento e este não ocorreu, (c) quando o modelo não previu o evento e este ocorreu e (d) quando o modelo não previu o evento e este não ocorreu. A Tabela 4 mostra uma síntese do método de análise de contingência (Souza Filho *et al.*, 2016b).

Tabela 4. Síntese do método de análise de contingência, com indicativo dos cálculos de POD e FAR.

		Observação		FAR
		Sim	Não	
Previsão	Sim	A	B	b / (a + b)
	Não	C	D	
POD		a / (a + c)		

Fonte: *Adaptado de Amanajas (2008).*

Resultados e discussões

Os resultados são divididos em duas partes. A primeira parte trata-se de uma abordagem qualitativa dos índices SPI, SRI, SPEI, IE, IS e Níveis Meta, que permitiu verificar os padrões do grau de severidade de seca de cada um desses índices e relacioná-los. A segunda parte implica em uma abordagem quantitativa dos índices de seca, que se utiliza de técnicas de análise estatística para verificar o desempenho dos mesmos.

Análise Qualitativa dos Índices de Seca

As Tabelas 5 e 6 mostram a variação anual dos índices SPI, SRI e SPEI para as escalas temporais de 12, 24 e 36 meses no reservatório de Jucazinho, além dos IE, IS e Níveis Meta, identificando as variáveis de entrada para cada índice de seca e agrupando os mesmos pelo tipo de seca (meteorológica ou hidrológica) que melhor caracterizam e classificando a severidade da seca, de acordo como os limiares já apresentados nas Tabelas 1, 2 e 3.

Pelas Tabelas 5 e 6 observam-se, independente do índice, que o sistema de recursos hídricos na maior parte do tempo encontra-se no estado próximo a normalidade ou normal, porém anos como o de 1963, 1971, 1983, 1998, 1999, 2003 e 2007 todos os índices em análise identificaram a ocorrência de seca, porém houve uma divergência quanto ao grau de severidade ou do estado de seca, em que os IE, os IS e os Níveis Meta apresentaram na maioria dos casos uma maior severidade de seca que os demais índices (SPI, SRI e SPIE).

Analisando a corroboração dos índices de seca com os registros histórico da região em estudo, verifica-se que entre os anos de 1979 e 1984, em que ocorreu a mais prolongada e abrangente seca histórica do Nordeste Brasileiro (NBS), os índices que caracterizam a seca meteorológica (SPI e SPIE) identificam satisfatoriamente a ocorrência de seca, apresentando uma maior intensificação da seca nos anos de 1981 e 1982. Já os índices SRI e os IS não reconheceram claramente esse registro histórico de seca, sendo que o SRI-12 classificou os anos de 1979 e 1983 como estado de Emergência I, os IS e os Níveis Meta classificaram o intervalo de 1979 a 1982 como Normal e os anos de 1983 e 1984 entre os estados de Pré-Alerta e Alerta.

Outra seca famosa na região é a de 1993, nesse evento os índices que caracterizam a seca hidrológica (SRI, IS e Níveis Meta) classificam o estado de seca entre Emergência I e Emergência II, concordando com a gravidade dos impactos da seca encontrados nos registros históricos. Adversamente, os índices SPI e SPEI identificam esse ano como Normal ou Próximo a Normalidade, não corroborando com os registros históricos.

A seca de 1998 é um outro episódio conhecido pela sua severidade, segundo registros históricos. Nesse ano, todos os índices conseguiram identificar a ocorrência de seca, mas apenas os SPI, SPIE, IS e os Níveis Meta classificaram como estado de Emergência (tipo I e II) e o SRI identificou apenas como estado de Alerta.

Tabela 5. Valores dos índices SPI, SPIE, SRI, IE, IS e Níveis Meta de 1962 a 1984 para as escalas de tempo de 12, 24 e 36 meses, relacionados aos primeiros três índices, e classificação de estado de seca, em que amarelo, laranja, vermelho e vermelho escuro, representam os estados de Pré-Alerta, Alerta, Emergência I e Emergência II, respectivamente.

Ano	Seca Meteorológica						Seca Hidrológica								
	Precipitação (P)			Balanço (P-ETP)			Vazão Afluente (Q)			Volume (V)				Níveis Meta	
	SPI-12	SPI-24	SPI-36	SPEI-12	SPEI-24	SPEI-36	SRI-12	SRI-24	SRI-36	IE _{mediana}	IE _{media}	IS _{mediana}	IS _{media}		
1962	-0.68	-	-	-0.96	-	-	1.09	-	-	-	-	0.57	0.58	0	
1963	-0.89	-1.20	-	-1.07	-1.33	-	-0.94	0.35	-	-	-	0.23	0.24	1	
1964	2.49	1.39	0.82	2.14	1.06	0.19	0.65	-0.15	0.51	-	-	0.36	0.37	1	
1965	-0.15	1.76	1.08	-0.28	1.65	0.62	0.09	0.33	-0.40	-	-	0.22	0.22	1	
1966	1.42	0.88	2.31	1.40	0.79	2.33	1.37	1.03	1.15	-	-	0.66	0.67	0	
1967	0.09	1.02	0.74	0.41	1.30	0.83	0.11	1.04	0.82	-	-	0.57	0.58	0	
1968	-0.30	-0.24	0.66	0.07	0.18	1.05	-0.99	-0.78	0.44	-	-	0.22	0.23	1	
1969	1.49	0.84	0.71	1.29	0.94	0.95	0.92	0.15	-0.10	-	-	0.50	0.51	1	
1970	0.42	1.28	0.90	0.32	1.13	0.89	0.20	0.65	-0.03	-	-	0.40	0.41	2	
1971	-0.84	-0.33	0.64	-0.85	-0.51	0.31	-0.11	-0.21	0.29	-	-	0.19	0.19	2	
1972	0.05	-0.63	-0.35	0.42	-0.44	-0.28	-0.22	-0.55	-0.67	-	-	0.00	0.00	3	
1973	0.22	0.09	-0.49	0.02	0.16	-0.44	-0.46	-0.83	-1.19	-	-	0.00	0.00	4	
1974	1.39	1.08	0.90	1.31	0.93	0.96	1.17	0.58	0.17	-	-	0.55	0.55	1	
1975	0.28	1.11	1.03	0.01	0.92	0.69	1.18	1.54	1.17	-	-	0.77	0.77	1	
1976	-1.12	-0.62	0.35	-1.06	-0.83	0.00	-1.61	0.36	0.97	-	-	0.50	0.51	0	
1977	2.01	0.86	0.83	1.85	0.69	0.48	1.74	1.02	1.55	-	-	0.96	0.96	0	
1978	1.32	2.26	1.48	1.25	2.44	1.36	0.71	1.72	1.19	-	-	1.00	1.00	0	
1979	-0.85	0.39	1.59	-0.60	0.41	1.67	-1.63	-0.22	1.19	-	-	0.72	0.73	0	
1980	-0.99	-1.40	-0.28	-0.80	-1.00	-0.23	-0.56	-1.84	-0.89	-	-	0.53	0.54	0	
1981	-1.63	-1.93	-2.28	-1.18	-1.30	-1.37	1.34	0.74	-0.03	-	-	0.80	0.81	0	
1982	-0.47	-1.52	-2.02	-0.45	-1.13	-1.31	-0.24	0.85	0.33	-	-	0.65	0.65	0	
1983	-0.90	-1.05	-1.96	-0.91	-0.98	-1.35	-1.71	-1.44	0.10	-	-	0.29	0.30	2	
1984	0.97	0.07	-0.30	0.99	-0.06	-0.38	0.63	-0.33	-0.81	-	-	0.40	0.41	2	

Fonte: Elaboração Própria.

Análise Quantitativa dos Índices de Seca

Para a análise quantitativa dos índices de seca, agrupou-se as contingências comparando os estados de seca do IS e dos Níveis Meta com as classificações de severidade do SPI, SPEI e do SRI para as escalas de tempo de 12, 24 e 36 meses.

Dessa maneira, para uma melhor avaliação dos índices de seca, agrupou-se os estados de Pré-Alerta e Alerta e os Emergência I e II no IS e nos Níveis Meta, chamando os agrupamentos apenas de Alerta e Emergência, respectivamente, e também foi feito um agrupamento dos graus de severidade da seca dos índices SPI, SPEI e SRI, ficando em conjunto Úmido e D0, D1, D2, D3 e D4. A Tabela 7 mostra a associação entre os agrupamentos dos estados e dos graus de severidade de seca.

Tabela 7. Relação entre os agrupamentos de estado e grau de severidade da seca.

Estado de seca	Grau de severidade da seca		
	Úmido e D0	D1 e D2	D3 e D4
Normal			
Alerta			
Emergência			

Fonte: *Elaboração própria*

Com isso, as Tabelas 8 e 9 apresentam os valores calculados da FAR e do POD, considerando-se uma inter-comparação do IS e dos Níveis Meta com os índices SPI, SPEI e SRI, respectivamente, nas três escalas de tempo em estudo.

Pela Tabela 8, verifica-se que para o SPI12 no estado de Alerta o FAR é de 0.57 e o POD é de 0.21, para o SPI24 tem-se um FAR de 0.71 e um POD de 0.14, para o SPI36 têm-se um FAR baixo, cerca de 0.33, implicando que em 33% das vezes foi estimada a ocorrência do estado de Alerta e ele não ocorreu.

Em relação ao SPEI12, nota-se um baixo POD para os estados de Alerta e Emergência, indicando que a quantidade de acertos dos eventos que efetivamente ocorreram foi de 29% e 22%, respectivamente, ou seja, das vezes que o IS mediana informou o estado de alerta em apenas 29% o SPEI concordou, o mesmo é válido para o estado de Emergência, porém para um percentual de 22%. Ainda em relação ao nível de Alerta, tem-se que o FAR atingiu um valor de 56 %.

Para o SPEI24 e SPEI36, destaca-se os valores de FAR em ocorrência de estado de Emergência que foram de 0%, indicando que em nenhuma das vezes que o IS mediana afirmou ser Emergência esses índices de seca meteorológica afirmaram que não era.

Ainda com relação a Tabela 8, o índice de seca baseado na vazão, SRI, mostra valores de POD superiores a 90% para o estado de normalidade em todos os horizontes de tempo em estudo, apontando uma boa capacidade de detecção para esse estado de seca, porém o interesse desse estudo não é esse. Assim, no estado de Alerta, no SRI, os valores de POD são de cerca de 14% para as escalas temporais em análise, o FAR é de 67% para todos os horizontes temporais em estudo. Para o estado de Emergência, tem-se que o índice de seca com a menor capacidade de detecção desse estado é o SRI12.

Tabela 8. Valores de FAR e POD para agrupamento das contingências comparando os estados de seca do IS com as classificações de severidade do SPI, SPEI e SRI nas escalas de tempo de 12, 24 e 36 meses.

	SPI12		SPI24		SPI36	
	FAR	POD	FAR	POD	FAR	POD
	Normal	0.47	0.83	0.50	0.82	0.44
Alerta	0.57	0.21	0.71	0.14	0.33	0.15
Emergência	0.33	0.22	0.50	0.11	0.60	0.22
Índice Sintético (mediana)	SPEI12		SPEI24		SPEI36	
	FAR	POD	FAR	POD	FAR	POD
	Normal	0.43	0.87	0.48	0.77	0.43
Alerta	0.56	0.29	0.70	0.21	0.57	0.23
Emergência	0.00	0.22	0.00	0.22	0.00	0.22
	SRI12		SRI24		SRI36	
	FAR	POD	FAR	POD	FAR	POD
	Normal	0.42	0.91	0.40	0.95	0.40
Alerta	0.67	0.14	0.67	0.14	0.67	0.15
Emergência	0.75	0.11	0.25	0.33	0.00	0.33

Fonte: Elaboração própria.

Através da Tabela 9, obtém-se que das vezes que o NM do reservatório Jucazinho apontou estado de Alerta, o SPI entrou nesse estado em apenas 18%, para o SPI12 e SPI24, e de apenas 6% para o SPI 36, conforme a métrica de verificação POD. Para o estado de Emergência, o POD foi ligeiramente menor, cerca de 17%. Em relação ao estado Normal, tem-se que o POD e o FAR são relativamente altos, para todos os horizontes temporais, indicando que os Níveis Meta e o SPI não estão bem correlacionados.

Para o SPEI, em geral, pode-se destacar que no estado de Emergência o FAR foi de 0% e no estado Normal foi superior ou igual a 60%, mostrando que em estados de seca mais amenos há uma maior tendência de superestimação dos níveis de alerta de seca, porém, conforme os valores de POD, a capacidade de afirmar que um certo estado de seca ocorreu e o mesmo tenha de fato ocorrido, diminui medida que o grau de severidade da seca aumenta. Isto, provavelmente está relacionado a frequência de ocorrência dos estados de seca.

Tabela 9. Valores de FAR e POD para agrupamento das contingências comparando os estados de seca dos Níveis Meta com as classificações de severidade do SPI, SPEI e SRI nas escalas de tempo de 12, 24 e 36 meses.

	SPI12		SPI24		SPI36	
	FAR	POD	FAR	POD	FAR	POD
Normal	0.64	0.76	0.64	0.81	0.61	0.88
Alerta	0.57	0.18	0.57	0.18	0.67	0.06
Emergência	0.33	0.17	0.50	0.08	0.60	0.17
Níveis Meta	SPEI12		SPEI24		SPEI36	
	FAR	POD	FAR	POD	FAR	POD
Normal	0.60	0.82	0.64	0.75	0.60	0.88
Alerta	0.56	0.24	0.60	0.24	0.71	0.13
Emergência	0.00	0.17	0.00	0.17	0.00	0.17
	SRI12		SRI24		SRI36	
	FAR	POD	FAR	POD	FAR	POD
Normal	0.58	0.88	0.57	0.94	0.57	0.94
Alerta	0.67	0.12	0.67	0.12	0.83	0.06
Emergência	0.75	0.08	0.25	0.25	0.00	0.25

Fonte: *Elaboração própria.*

Para o SRI, ainda com relação a Tabela 9, percebe-se no SRI12 um baixíssimo POD do nível de Emergência, somente 0.08 ou 8%, e um alto valor de FAR, indicando uma correlação de apenas 25% dos índices de seca em análise. Em relação ao nível de Alerta, também foi possível notar um baixo POD, indicando uma capacidade de detecção de eventos de somente 12%. Para as escalas de tempo de 24 e 36 meses, o SRI, apresenta os mesmos valores de FAR e POD para o estado de normalidade, para o estado de Alerta o FAR é maior na escala de tempo de maior magnitude, enquanto o POD é menor.

Conclusões

A seca que aflige o reservatório Jucazinho ou o nível de severidade de seca do mesmo, nem sempre ocorre devido as condições naturais a qual o reservatório é exposto, as vezes a seca ou a severidade dela podem ser agravadas devido a ação antrópica sobre o reservatório, como utilização de regras de operações não eficientes, uso de valores de vazão regularizada de longo prazo que podem distorcer as reais garantias de atendimento às demandas totais existentes ou até mesmo pelo fato de secas extremas superarem a memória de armazenamento hídrico do reservatório.

Com isso, tem-se que os índices de seca SPI, SPIE e o SRI não são bons indicadores do estado de seca quando se referem ao volume atual acumulado de água em reservatórios, visto que os mesmos não conseguem acompanhar a oscilação do estoque de água na mesma velocidade com que realmente ocorrem em função da defasagem temporal entre as variáveis de entrada dos índices citados e o volume estocado de água. Dessa maneira, o uso desses índices como gatilhos de ações a serem tomadas para mitigação da seca podem levar a tomada de decisões erradas ou tardias.

Além disso, pode-se concluir, pela análise dos IS e Níveis Meta, que ao longo dos anos a frequência de ocorrência de estados de Alerta e Emergência tem aumentado significativamente e a seca tem se tornado cada vez mais severa.

Isso mostra a necessidade de mais estudos voltados para liberação e outorga de água, além da criação de um plano de contingência ou um plano de gestão de seca contínuo, isto é, um planejamento eficaz que possa ser desenvolvido ao longo de todos os anos e não apenas em época de secas extremas naturais.

Desta maneira, a longo prazo seria possível melhorar a eficiência de uso da água e a curto prazo poderia se desenvolver estratégias de mitigação para a escassez de água, evitando ou diminuindo os impactos durante a ocorrência de eventos mais extremos de seca.

Agradecimentos

Os autores desse estudo agradecem ao Banco Mundial pelo incitamento e apoio financeiro a pesquisa, assim como a FUNCAP mediante fomento de bolsa de doutorado e a APAC pela cessão da série histórica de volume estocado.

Referências

- Alley, W. M. (1984). The Palmer drought severity index: limitations and assumptions, *Journal of Applied Meteorology*, **23**, 1100-1109.
- Amanajás, J. C. (2008). Uso do método de contingência para análise da eficácia de previsão da precipitação pluviométrica do modelo ETA para o município de Macapá-AP em 2007. Monografia (Licenciatura Plena em Matemática) – Universidade Federal do Amapá, Amapá.
- Araújo Júnior, L. M., Souza Filho, F. A., Silveira, C. S., Studart, R. C., Cabral, S. L. (2014). Avaliação da severidade da seca no reservatório de caxitoré com base no índice de escoamento normalizado, no índice de reservatório e no volume estocado. XII Simpósio de Recursos Hídricos do Nordeste, "Água e Desenvolvimento", 4 a 7 de novembro de **2014**, Natal - RN. ABRH.
- Cid, D. A. C., Souza Filho, F. A., Araújo Júnior, L. M., Silva, S. M. O. (2014). Uso de simulação para definição de níveis metas de operação para o reservatório Jucazinho/PE. In: Anais do XII Simpósio de Recursos Hídricos do Nordeste, 2014.
- CHEBRO, Confederacion Hidrografica del Ebro (2007). *Plan especial de actuación en situaciones de sequía*, Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente.
- CHJ, Confederacion Hidrografica del Jucar (2007) *Plan especial de alerta y eventual sequía*, Ministerio de Medio Ambiente.
- Cunha, R. L. A. (2008). *Definição de cenários de referência para avaliação dos impactos das secas*, Dissertação (Mestrado Integrado em Engenharia Civil) – Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, 147f.
- Domingos, S. I. S. (2006). *Análise do índice de seca Standardized Precipitation Index (SPI) em Portugal Continental e sua comparação com o Palmer Drought Severity Index (PDSI)*, Tese (Licenciatura em Meteorologia, Oceanografia e Geofísica Interna) - Faculdade de Ciências, Lisboa, 53f.
- Estrela, T., Fidalgo, A., Pérez, M. A. (2006). Droughts and the European water framework directive: Implications on Spanish river basin districts, In: *Drought Management and Planning for Water Resources*, ISBN 1-56670-672-6, CRC Press (Taylor & Francis), Boca Raton, Chapter six, 169-191.
- Garen, D. C. (1993). Revised Surface-Water Supply Index for western United States, *Journal of Water Resources Planning and Management*, **119**(4), 437-454, DOI: 10.1061/(ASCE)0733-9496(1993)119:4(437).
- Hayes, M. J., Svoboda, M. J., Wilhite, D. A., Vanyarkho, O. V. (1999). Drought monitoring the 1996 drought using the Standardized-Precipitation Index. *Bulletin of the American Meteorological Society*, **80**(3), 429-438.
- Heim Junior, R. R. A. (2002). Review of twentieth-century drought indices used in the United States, *Bulletin of the American Meteorological Society*, **83**(8), 1149- 1165.
- Keyantash, J., Dracup, J. A. (2002). The quantification of drought: An evaluation of drought indices, *Bulletin of the American Meteorological Society*, **83**(8), 1167-1180, DOI: 10.1175/1520-0477.
- Lorenzo-Lacruz, J., Vicente-Serrano, S. M., López-Moreno, J. I., Beguería, S., García-Ruiz, J. M., Cuadrat, J. M. (2010). The impact of droughts and water management on various hydrological systems in the headwaters of the Tagus River (central Spain), *Journal of Hydrology*, **386**, 13-26.
- Mckee, T. B., Doesken, N. J., Kleist, J. (1993). The relationship of drought frequency and duration to time scales, In: *8th Conference on Applied Climatology*, California, 179-184.
- Mckee, T. B., Doesken, N. J., Kleist, J. (1995) Drought monitoring with multiple time scales, In: *9th Conference on Applied Climatology*, Texas, 233-236.
- National drought policy commission. (2000). *Final report: Preparing for drought in the 21 st century*, United States Department of Agriculture, Washington, D. C, 50 pp.
- PERH/PE, Plano Estadual de Recursos Hídricos (1998a) *Plano Estadual de Recursos Hídricos*, Secretaria de Ciência, Tecnologia e Meio Ambiente, Vol. II, 217 pp.
- PERH/PE, Plano Estadual de Recursos Hídricos (1998b) *Plano Estadual de Recursos Hídricos*, Secretaria de Ciência, Tecnologia e Meio Ambiente, e Vol. VI, 113 pp.
- Schaefer, J. T. (1990). The critical success index as an indicator of warning skill, *Weather and Forecasting*, **5**, 570-575.

- Shafer, B. A., Dezman, L. E. (1982). Development of a Surface Water Supply Index (SWSI) to assess the severity of drought conditions in snowpack runoff areas, *Proceedings of the Western Snow Conference*, Colorado State University, Fort Collins, 164-175.
- Shukla, S., Wood, A. W. (2008). Use of a standardized runoff index for characterizing hydrologic drought, *Geophysical Research Letters*, **35**, L02405. doi:10.1029/2007GL032487.
- Souza Filho, F. A., Oliveira, P. P. F., Abicalil, M. T., Braga, C. F. C., Silva, S. M. O., Aquino, S. H. S., Cid, D. A. C., Araujo Junior, L. M., Braga, C. F. M. (2016a) *Drought Preparedness Plans: Tools and Case Studies*. In: Engle, N. L.; De Nys, E.; Magalhaes, A. R.. (Org.). *Drought in Brazil Proactive Management and Policy*. 1ed.: CRC Press, v. 1, 163-207.
- Souza Filho, F. A., Oliveira, P. P. F., Abicalil, M. T., Braga, C. F. C., Silva, S. M. O., Aquino, S. H. S., Cid, D. A. C., Araujo Junior, L. M., Braga, C. F. M. (2016b) *Planos de Preparação para a Seca: ferramentas e estudos de casos*. In: De Nys, E., Engle, N. L., Magalhães, A. R. (Org.). *Secas no Brasil: política e gestão proativas*. 1ed. Brasília: Centro de Gestão e Estudos Estratégicos: Banco Mundial, v. 1, 217-282.
- SRH - Secretaria DE Recursos Hídricos (2010). *Plano hidroambiental da bacia hidrográfica do rio Capibaribe: Tomo I - Diagnóstico hidroambiental*, **1**(3), Projetos Técnicos, Recife.
- Thorntwaite, C. W., Wilm, H. G. (1944). Report of the Commite on evapotranspiration and transpiration, 1943-1944, Washington, D. C. : *Transactions of the American Geophysical Union*, 686-693.
- Vicente-Serrano, S. M., Beguería S., López-Moreno, J. I. (2010). A multiscalar drought index sensitive to global warming: the standardized precipitation evapotranspiration index – SPEI, *Journal of Climate*, **23**, 1696–1718.
- Vicente-Serrano, S. M., Beguería, S., Lorenzo-Lacruz, J., Camarero, J. J., López-Moreno, J. I., Azorin-Molina, C., Revuelto, J., Morán-Tejeda, E., Sánchez-Lorenzo, A. (2012). Performance of drought indices for ecological, agricultural and hydrological applications, *Earth Interactions*, **16**, 1–27.