



UNILAB

**UNIVERSIDADE DA INTEGRAÇÃO INTERNACIONAL DA LUSOFONIA AFRO-
BRASILEIRA**

**INSTITUTO DE ENGENHARIAS E DESENVOLVIMENTO SUSTENTÁVEL
CURSO DE PÓS-GRADUAÇÃO LATO SENSU EM GESTÃO DE RECURSOS
HÍDRICO, AMBIENTAIS E ENERGÉTICOS**

SIDNEY SILLAS SILVA ARAÚJO

**ÍNDICES DE SECA HIDROLÓGICA PARA O SEMIÁRIDO
BRASILEIRO**

REDENÇÃO

2018

SIDNEY SILLAS SILVA ARAÚJO

ÍNDICES DE SECA HIDROLÓGICA PARA O SEMIÁRIDO
BRASILEIRO

Monografia apresentada ao Curso de Especialização Lato Sensu em Gestão de Recursos Hídrico, Ambientais e Energéticos da Universidade da Integração Internacional da Lusofonia Afro-Brasileira como requisito parcial para obtenção do título de Especialista em Gestão de Recursos Hídrico, Ambientais e Energéticos.

Orientador: Prof. Alexandre Cunha Costa

REDENÇÃO
2018

Universidade da Integração Internacional da Lusofonia Afro-Brasileira
Sistema de Bibliotecas da UNILAB
Catalogação de Publicação na Fonte.

Araujo, Sidney Sillas Silva.

A687i

Índices de Seca Hidrológica para o Semiárido Brasileiro / Sidney Sillas Silva Araujo. - Redenção, 2018.
36f: il.

Monografia - Curso de Especialização em Gestão de Recursos Hídricos, Ambientais e Energéticos, Coordenação De Pós-graduação, Universidade da Integração Internacional da Lusofonia Afro-Brasileira, Redenção, 2018.

Orientador: Prof. Dr. Alexandre Cunha Costa.

1. Indicadores de seca. 2. Quantificação da seca. 3. Recursos hídricos. 4. Seca no Nordeste. I. Costa, Alexandre Cunha. II. Título.

CE/UF/BSCL

CDD 333.7360

UNIVERSIDADE DA INTEGRAÇÃO INTERNACIONAL DA LUSOFONIA
AFRO-BRASILEIRA

SIDNEY SILLAS SILVA ARAÚJO

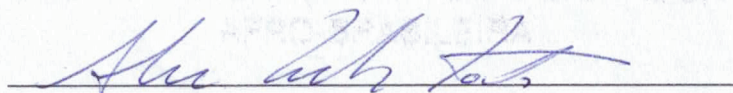
ÍNDICES DE SECA HIDROLÓGICA PARA O SEMIÁRIDO
BRASILEIRO

Monografia julgada e aprovada para obtenção do título de Especialista em da
Universidade da Integração Internacional da Lusofonia Afro-Brasileira.

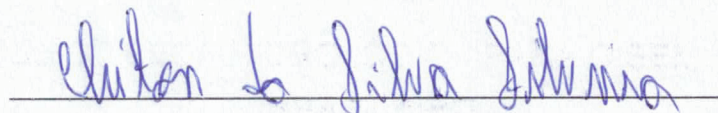
Data: 17 / 05 / 2018

Nota: 9,2

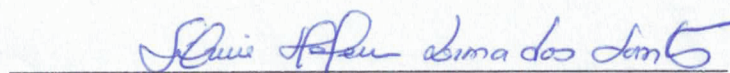
Banca Examinadora:



Prof. Alexandre Cunha Costa (Orientador)



Prof. Cleiton da Silva Silveira



Prof. Silvia Helena Lima dos Santos

LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

ANA	Agência Nacional de Águas
BMDI	Bhalme & Mooley Drought Index
CMI	Crop Moisture Index
CSA	Cumulative Streamflow Anomaly
CWSI	Crop Water Stress Index
D	Decicles
EDI	Effective Drought Index
ENOS	El Niño-Oscilação Sul
EUA	Estados Unidos da América
FUNCEME	Fundação Cearense de Meteorologia e Recursos Hídricos
HSI	Herbst Severity Index
IBMDI	Modified Bhalme & Mooley Drought Index
LRDI	Lamb Rainfall Departure Index
NEB	Nordeste Brasileiro
PDSI	Palmer Drought Severity Index
PHDI	Palmer Hydrological Drought Index
PN	Percent of Normal
RAI	Rainfall Anomaly Index
RDI	Reclamation Drought Index
SPEI	Standardized Precipitation Evapotranspiration Index
SPI	Standardized Precipitation Index
SRI	Standardized Runoff Index
SSFI	Standardized Streamflow Index
SWSI	Surface Water Supply Index
TSM	Temperatura da Superfície do Mar
TWD	Total Water Deficit
VCAN	Vórtice Ciclônico de Altos Níveis
ZCIT	Zona de Convergência Intertropical

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	8
2 REVISÃO DE LITERATURA	10
2.1 DEFINIÇÕES DE SECA	10
2.2 ÍNDICES DE SECA.....	12
2.3 ÍNDICES DE SECA HIDROLÓGICA.....	14
3 METODOLOGIA	18
3.1 ÁREA DE ESTUDO	18
3.1.1 SEMIÁRIDO BRASILEIRO: ASPECTOS GERAIS	18
3.1.2 SEMIÁRIDO BRASILEIRO: ASPECTOS DE CLIMA E HIDROLOGIA	18
3.1.3 SEMIÁRIDO BRASILEIRO: RESERVATÓRIOS.....	21
3.2 PROCEDIMENTOS	22
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO	23
4.1. ÍNDICE DE SEVERIDADE DE SECA DE PALMER – PDSI	23
4.2. ÍNDICE NORMALIZADO DE PRECIPITAÇÃO – SPI	24
4.3. ÍNDICE PADRONIZADO DE PRECIPITAÇÃO-EVAPOTRANSPIRAÇÃO – SPEI.....	25
4.4. ÍNDICE DE SECA HIDROLÓGICA DE PALMER – PHDI	27
4.5. ÍNDICE DE ABASTECIMENTO DE ÁGUA EM SUPERFÍCIE – SWSI	28
4.6. STANDARDIZED STREAMFLOW INDEX – SSFI	29
4.7. INDICADOR PADRONIZADO DE ESCOAMENTO – SRI	30
5 CONSIDERAÇÕES FINAIS	31
REFERÊNCIAS	33

ÍNDICES DE SECA HIDROLÓGICA PARA O SEMIÁRIDO BRASILEIRO

Sidney Sillas Silva Araújo¹

Alexandre Cunha Costa²

RESUMO

A seca é um fenômeno natural recorrente que afeta a civilização humana ao longo da história, geralmente associado à deficiência de precipitação, elevada evapotranspiração e/ou demasiada exploração dos recursos hídricos. A seca hidrológica, caracteriza-se por um período de tempo onde o volume de água disponível é insuficiente para atender a demanda de uma determinada região, situação muitas vezes ocasionada por um mau gerenciamento dos recursos hídricos. O semiárido brasileiro é uma região extremamente vulnerável à ocorrência de secas, fazendo-se necessário uma melhor caracterização do fenômeno. Os índices de seca apresentam-se como o método mais eficaz de investigar e compreender a seca e seus impactos, porém são muitos e distintos os encontrados na literatura. Diante disso, o objetivo deste trabalho é identificar quais os índices de seca mais adequados para a quantificação da seca hidrológica no semiárido brasileiro. Para isso buscará descrever detalhadamente cada um deles; analisar detalhadamente suas aplicações; identificar as variáveis que compõem cada um; e estabelecer um comparativo entre estas e a realidade do semiárido brasileiro. Para o desenvolvimento desse trabalho procedeu-se a realização de uma pesquisa bibliográfica sobre os principais índices de seca encontrados na literatura, selecionando-se aqueles já amplamente revisados, objeto de estudo de vários pesquisadores e dotados de histórico de aplicação prática por parte de órgãos ligados ao clima. O estudo detalhado de cada índice mostrou que todos possuem suas vantagens e desvantagens quanto à aplicação no semiárido brasileiro, bem como que muitos já são aplicados na região, entretanto há uma dificuldade de adaptação às características locais, visto que a maioria dos índices são desenvolvidos em outros países e, além disso, muitas vezes, requerem dados que não são disponíveis naquela região. Por fim, concluiu-se que apenas a combinação de mais de um índice poderia oferecer um diagnóstico preciso para a seca no semiárido brasileiro e que a enorme dependência de reservatórios como fonte de abastecimento de água, aliada à dificuldade em obter dados de volume armazenado dos mesmos, é um dos principais fatores limitantes à quantificação da seca hidrológica na região.

Palavras-chave: indicadores de seca; quantificação da seca; recursos hídricos; seca no nordeste.

¹ Estudante do Curso de Especialização em Gestão de Recursos Hídricos, Ambientais e Energéticos pela Universidade da Integração Internacional da Lusofonia Afro-Brasileira e Universidade Aberta do Brasil, polo Limoeiro do Norte.

² Professor do Curso de Especialização em Gestão de Recursos Hídricos, Ambientais e Energéticos pela Universidade da Integração Internacional da Lusofonia Afro-Brasileira e Universidade Aberta do Brasil, polo Limoeiro do Norte.

ABSTRACT

Drought is a natural hazard that affects human civilization through the history, usually associated with precipitation deficiency, high levels of evapotranspiration and too much exploitation of water resources. The hydrological drought is characterized by a period of time where the amount of water available is not enough to supply the demand of a region, usually caused by a bad water resources management. The Brazilian semi-arid is a region extremely vulnerable to the occurrence of droughts, demanded a better characterization of the phenomenon. Drought indexes are the most effective method of investigating and understanding drought's impacts, but there are several and different indexes in the literature. Therefore, the aim of this study is identify the most adequate drought indexes for the quantification of the hydrological drought in the Brazilian semi-arid. In order to this, It is describe, in detail, each of them; it is analyze, in detail, their applications; identify the variables that make up each one; and establish the comparison between these and the characteristics of the Brazilian semi-arid. For the development of this work, the bibliographic research was carried out on the main drought indexes found in the literature, selecting those already widely reviewed, object of study of several researchers and already applied by organs connected with the climate. The detailed study of each index showed that all have their advantages and disadvantages when applied to the Brazilian semi-arid. As well as that many are already applied in the region, however there is a difficulty to adapt to the local characteristics, since most indexes are developed in other countries and, in addition, often require data that is not available in that region. Finally, it was concluded that only the combination of more than one index could provide a diagnosis for drought in the Brazilian semi-arid region. In addition, that the large dependence of reservoirs as a source of water supply, associate with the difficulty in obtaining storage data is one of the main limiting factors for the quantification of hydrological drought in the region.

Keywords: drought index; drought in the northeast; drought quantification; water resources.

1 INTRODUÇÃO

A seca é um fenômeno natural recorrente que afeta a civilização humana ao longo da história, tendo interferência sobre os habitats naturais, os ecossistemas e diversos setores econômicos e sociais. A enorme variedade de setores afetados pela seca, sua distribuição geográfica e temporal diversa e a demanda de abastecimento de água para consumo humano tornam difícil desenvolver uma única definição de seca (HEIM JUNIOR, 2002).

Diante dessa dificuldade, acaba-se por adotar diferentes conceituações para o fenômeno, dependendo principalmente da abordagem que se deseja adotar, podendo ser esta: meteorológica, hidrológica, agrícola ou socioeconômica.

Trata-se de um fenômeno natural geralmente associado à deficiência de precipitação, elevada evapotranspiração e/ou demasiada exploração dos recursos hídricos. Sua ocorrência pode ser verificada em regiões com características climáticas variadas e com diferentes níveis de utilização de água (MEDEIROS, 2016).

De acordo com Cirilo (2008), a região nordeste do Brasil (NEB), por ser acometida por períodos de estiagem intensa, torna-se extremamente vulnerável à ocorrência de secas. O semiárido do NEB caracteriza-se por um regime de chuvas fortemente concentrado em poucos meses do ano (INSA, 2011). Além de ser uma região pobre em volume de escoamento de água dos rios devido à variabilidade temporal das precipitações e das características geológicas dominantes. O resultado é uma densa rede de rios intermitentes e poucos rios perenes (CIRILO, 2008).

Para solucionar esse problema, tornou-se recorrente na região a construção de reservatórios de acumulação de água. Mas, apesar dos esforços no sentido de aumentar a oferta hídrica, o investimento não obtém os resultados esperados e como consequência a região segue sendo castigada pela seca (PAIXÃO et al. 2002).

Diante disso, faz-se necessário um aprofundamento nos conhecimentos relativos a seca e uma melhor caracterização do fenômeno, principalmente no semiárido brasileiro, onde a quantificação da seca é insipiente. A convivência com as secas exige uma compreensão e reconhecimento de suas características, pois, desta forma, torna-se possível pôr em prática em tempo hábil ações preventivas, reativas ou emergenciais. Para tanto, é necessário acompanhar a evolução das

variáveis meteorológicas e hidrológicas que são influenciadas pelas secas (PEREIRA; PAULO, 2004).

Com o intuito de detectar, monitorar e avaliar eventos de seca, é comum o uso de índices que são desenvolvidos por vários pesquisadores ao redor do mundo (BARUA et al. 2010). Para Fernandes et al. (2009), o método mais eficaz de investigar e compreender a seca e seus impactos, incluindo seu começo e o seu fim, consiste na aplicação de índices criados por vários pesquisadores para medir sua severidade, esses índices assimilam vários anos de variáveis hidrometeorológicas como: precipitação, temperatura do ar, evapotranspiração, escoamento superficial (runoff), umidade do solo, entre outras variáveis, e assim as combinam a fim de obter uma melhor caracterização do período de seca.

Uma caracterização técnico-científica, através de indicadores hidrológicos, permite, ao longo do tempo, um monitoramento permanente e consistente de desastres naturais como a seca (SOMBRA, 2008). A seca hidrológica, caracteriza-se por um período de tempo onde a demanda hídrica não é atendida, o que é ocasionado por um déficit de precipitação pluviométrica e associado à redução dos níveis médios de água em reservatórios superficiais e subterrâneos no período, essa situação é agravada por um mau gerenciamento dos recursos hídricos acumulados nos reservatórios (CAMPOS; STUDART, 2001).

De acordo com Medeiros (2016) existem diversos índices destinados a quantificar a seca hidrológica, merecendo especial destaque, por terem utilização mais disseminada, o Índice de Seca Hidrológica de Palmer (Palmer Hydrological Drought Index - PHDI), o Índice de Abastecimento de Água em Superfície (Surface Water Supply Index - SWSI).

Apesar de conhecidos, uma dificuldade evidente na aplicação desses, e de outros índices, diz respeito à aplicação dos mesmos em diferentes lugares, pois a seca notabiliza-se por ser um fenômeno com características distintas em cada região, tornando-se difícil estabelecer parâmetros entre lugares diferentes.

No caso do semiárido brasileiro, área de estudo desta pesquisa, essa problemática agrava-se ainda mais, pois trata-se de uma região que apresenta características de clima, relevo e vegetação bem específicos, fazendo-se necessário um conhecimento detalhado das variáveis que compõem cada índice e sua adaptação ao semiárido brasileiro, para que se torne possível identificar quais

podem ser considerados mais adequados para quantificação da seca hidrológica na região.

Diante do exposto, o objetivo geral desta pesquisa é identificar quais os índices de seca mais adequados para a quantificação da seca hidrológica no semiárido brasileiro e os objetivos específicos são: descrever detalhadamente cada um dos índices de seca; analisar detalhadamente suas aplicações; identificar as variáveis que compõem cada um deles; e estabelecer um comparativo entre estas e a realidade do semiárido brasileiro.

A metodologia empregada neste trabalho possui abordagem qualitativa; é de natureza aplicada; tendo como procedimento de estudo a realização de pesquisa bibliográfica, caracterizando um estudo de caráter explicativo.

2 REVISÃO DE LITERATURA

2.1 DEFINIÇÕES DE SECA

A seca é um fenômeno natural que afeta de diferentes maneiras regiões com características climáticas variadas e com níveis de utilização de água diversos. Tal particularidade inviabiliza a atribuição de uma definição única, passível de ser aceita universalmente e de um modelo uniforme a ser adotado nos estudos relacionados ao tema. Entretanto, em todos os estudos há uma correlação das secas a situações de escassez de água, ocasionado por precipitação insuficiente, evapotranspiração elevada e exploração dos recursos hídricos desacerbada ou de uma combinação destes fatores (FERNANDES et al. 2009).

Wilhite (2000), afirma que a seca é um ameaça natural que pode acometer praticamente todas as regiões e que não deve ser vista apenas como um fenômeno físico isolado, mas como resultado de uma interação entre um evento natural e a demanda por abastecimento de água de sistemas de uso humano. Afirma, ainda, que a impossibilidade de adoção de uma conceituação universal insurge a necessidade de um agrupamento de acordo com abordagem que se deseja trabalhar, existindo assim a seca: meteorológica, hidrológica, agrícola e socioeconômica.

A Seca Meteorológica ou Climatológica, de acordo com Fernandes et al. (2009), é avaliada apenas com base no grau de secura e na duração do período seco em relação aos níveis “normais” de precipitação, ou seja, é caracterizada pela

redução dos índices de precipitação em relação ao valor normal. Notabiliza-se pela escassez de água ocasionada por um desequilíbrio entre a precipitação e a evaporação, a qual depende de outras variáveis como a temperatura, a velocidade do vento, insolação e umidade do ar.

A Seca agrícola, também chamada de Seca Edáfica, por sua vez, pode ser identificada como uma deficiência na umidade do solo, afetando a absorção de água pelas raízes das plantas e tendo como resultado considerável perda de produção agrícola. Apresenta como causas básicas a insuficiência ou distribuição irregular das chuvas. Associada à agricultura de sequeiro, é o tipo de seca causadora dos maiores impactos no semiárido nordestino. Alguns efeitos conhecidos: drásticas perdas econômicas e enormes transtornos sociais como fome, migração e desagregação familiar (CAMPUS; STUDART, 2001).

Seca socioeconômica é aquela que se relaciona aos impactos da seca sobre as atividades humanas, podendo haver relação direta e/ou indireta com a produção agrícola e outras atividades econômicas. É observada quando o déficit de água induz a falta de bens e serviços (alimentos, energia elétrica, entre outros) devido a um volume de água insuficiente, resultante de uma distribuição irregular de chuvas, de um aumento na demanda, ou ainda de um gerenciamento inadequado dos recursos hídricos (FERNANDES et al. 2009).

A Seca hidrológica, objeto de estudo desta pesquisa, é entendida por Campus; Studart (2001) como a presença de volume de água nos rios ou reservatórios, insuficiente para suprir as demandas de águas já estabelecidas em uma dada região. Ainda, para o mesmo, a causa desse tipo de seca remonta a uma sequência de anos com deficiência no escoamento superficial ou a um mal gerenciamento dos recursos hídricos acumulados nos reservatórios. Como consequências da seca hidrológica vemos, num estágio inicial, o racionamento e, em estágios mais avançados, o colapso de sistemas de abastecimento d'água das cidades ou das áreas de irrigação

Para Eslamian et al. (2017), na visão hidrológica, a seca ocorre quando o nível da água de superfície e do lençol freático é menor do que a média a longo prazo. Nesta visão, os indicadores de seca incluem nível de córregos, lagos e águas subterrâneas. As flutuações climáticas servem como o principal fator para determinar a gravidade dessa seca que eles próprios têm base física e natural. Além disso, as atividades humanas, como a mudança do uso da terra, a degradação da terra e as

construções de barragens têm impactos nas características da bacia, bem como na ocorrência e severidade da seca hidrológica. Devido à extensa urbanização, industrialização e escassez de água, esse tipo de seca se torna um problema complexo.

2.2 ÍNDICES DE SECA

Os índices de seca são medidas quantitativas que caracterizam os níveis de seca ao assimilar dados de uma ou várias variáveis, como precipitação e evapotranspiração, em um único valor numérico. A natureza dos índices de seca reflete diferentes eventos e condições; eles podem refletir as anomalias de secura climática (principalmente com base na precipitação) ou correspondem a impactos agrícolas e hidrológicos atrasados, como perda de umidade do solo ou baixos níveis de reservatório. Além disso, a categorização dos índices de seca também pode ser baseada nos dados e tecnologia utilizados (ZARGAR et al. 2011).

Heim Junior (2002) explica que é necessário algum padrão numérico para comparar medidas de seca de região a região, bem como para comparar eventos de seca passados. No entanto, o desacordo considerável que existe sobre a definição de seca torna impossível inventar um índice de seca universal. Além disso, as características da seca e a ampla gama de setores econômicos que impacta tornam seus efeitos difíceis de quantificar. Devido à complexidade da seca, nenhum índice único conseguiu captar adequadamente sua intensidade e gravidade e seus impactos potenciais em um grupo tão diversificado de usuários.

Contudo, várias metodologias têm sido desenvolvidas e utilizadas na análise de secas. Os índices de seca, baseados numa ou mais variáveis climáticas, são vulgarmente utilizados na identificação e monitorização das secas em várias escalas temporais. Dentre estes destacam-se pela sua utilização mais generalizada o Índice de Severidade de Seca de Palmer (Palmer Drought Severity Index - PDSI) e, mais recentemente, o Índice Normalizado de Precipitação (Standardized Precipitation Index – SPI) (PEREIRA; PAULO, 2004).

O PDSI (Palmer Drought Severity Index) foi desenvolvido por Palmer (1965). O conceito de seca nesse índice está baseado na temperatura, na precipitação e na umidade do solo. O PDSI usa uma escala de tempo mensal e para calculá-lo são

necessários quatro fatores principais: precipitação, temperatura, umidade do solo e evapotranspiração (ESLAMIAN et al. 2017).

O índice retorna medidas normalizadas das condições de umidade e assim permite estabelecer comparações entre diferentes regiões e meses do ano. O PDSI responde às condições meteorológicas que possuem um estado de anormalidade de seca ou de umidade. Para calculá-lo todos os termos da equação do balanço hídrico, incluindo escoamento superficial, evapotranspiração, perda de umidade na camada de superfície e recarga do solo são utilizados como dados de entrada (FERNANDES et al. 2009).

Ao desenvolver o PDSI, Palmer pretendia incluir a duração de uma seca ou um período de umidade no seu indicador. Sua motivação foi: eliminar um impacto significativo no índice caso ocorra um mês anormalmente úmido no meio de um período de seca e; vários meses seguidos registrando precipitação próxima ao normal acompanhado de uma seca drástica não significa que a seca acabou. Adicionalmente, Palmer desenvolveu critérios para determinar o início e o fim de um período de seca ou de umidade (FERNANDES et al. 2009).

O SPI (Standardized Precipitation Index) foi desenvolvido por McKee et al. (1993). É obtido pela diferença de precipitação da média, para uma determinada escala de tempo, dividida pelo desvio padrão. Baseia-se apenas nos dados de precipitação e é calculado para períodos de 3, 6, 12, 24 e 48 meses. Trata-se de uma ferramenta analítica para dados de precipitação. Pretende atribuir valores numéricos à precipitação para que a comparação de várias regiões com climas totalmente diferentes se torne possível (ESLAMIAN et al. 2017).

Possui como base unicamente dados de precipitação e foi proposto como uma ferramenta de avaliação de seca meteorológica. O índice é fundamentado na precipitação normalizada tendo como base dados históricos, fornece uma ideia de quão raro o total precipitado num dado período é em relação ao histórico daquela região (CONAMARY et al. 2015).

O Índice compara a precipitação acumulada de uma determinada estação ou região em um intervalo específico (por exemplo, nos últimos 3 meses ou nos últimos 6 meses) até a média de precipitação no mesmo intervalo durante todo o período estatístico. Conceitualmente, o SPI indica o desvio padrão acima ou abaixo do registro médio (ESLAMIAN et al. 2017).

O SPI quantifica o déficit de precipitação para múltiplas escalas de tempo capazes de refletir o impacto da seca na disponibilidade de fontes hídricas. As condições de umidade de solo respondem às anomalias de precipitação em uma escala de tempo relativamente curta. As anomalias de precipitação a longo prazo são refletidas pelos fluxos de rios e reservatório oriundos de armazenamento de água subterrânea. (FERNANDES et al. 2009).

Vicente-Serrano et al. (2010) pensando em combinar a sensibilidade do PDSI às mudanças na evaporação, causadas por flutuações e tendências de temperatura, com a simplicidade de cálculo e a natureza multitemporal do SPI formularam um novo índice de seca, o Índice Padronizado de Precipitação-Evapotranspiração (Standardized Precipitation Evapotranspiration Index – SPEI).

O cálculo desse índice baseia-se em uma simples metodologia de balanço de água para obter as diferenças mensais entre a precipitação e a evapotranspiração potencial (MARTINS et al. 2015). Ocorre a partir da verificação do balanço hídrico climatológico expresso pela diferença entre a precipitação e a evapotranspiração potencial. A evapotranspiração, como ocorre no PDSI, também é obtida pela equação de Thornthwaite. Como o cálculo do SPEI baseia-se na mesma metodologia aplicada no SPI, os resultados do balanço hídrico também são agregados em diferentes escalas de tempo (CONAMARY, 2015).

Fernandes et al. (2009), cita alguns outros índices utilizados para caracterizar a seca, são eles: Índice de Porcentagem Normal (Percent of Normal – PN); Decis (Deciles – D); Índice de Anomalia de Chuva (Rainfall Anomaly Index – RAI); Índice de Seca de Bhalme & Mooley (Bhalme & Mooley Drought Index – BMDI); Índice de Seca de Bhalme & Mooley Modificado (Modified Bhalme & Mooley Drought Index – IBMDI); Índice de Severidade de Herbst (Herbst Severity Index – HSI); Índice de Reparação de Seca (Reclamation Drought Index – RDI); Índice de Umidade da Cultura (Crop Moisture Index – CMI); Índice de Estresse Hídrico da Cultura (Crop Water Stress Index – CWSI); Índice de Desvio de Chuva de Lamb (Lamb Rainfall Departure Index – LRDI); Índice de Seca Efetiva (Effective Drought Index – EDI).

2.3 ÍNDICES DE SECA HIDROLÓGICA

O Índice de Seca Hidrológica de Palmer (Palmer Hydrological Drought Index – PHDI) foi elaborado por Karl (1986) como uma adaptação do PDSI utilizado para

monitorar o abastecimento de água (MEDEIROS, 2016). Nos EUA, os gestores dos recursos hídricos perceberam ser interessante suplementar os valores de PDSI com valores de PHDI como forma de analisar as informações hidrológicas essenciais para a tomada de decisões relacionadas ao gerenciamento da água (FERNANDES, et al. 2009).

O PHDI é muito semelhante ao PDSI, a diferença é que utiliza um critério mais rigoroso para determinar o fim da seca ou de um período úmido, resultando em um índice de recuperação do estado de seca para o estado normal mais lento do que o PDSI. Este atraso é apropriado para a avaliação da seca hidrológica, que é um fenômeno de desenvolvimento mais lento do que a seca meteorológica (KEYANTASH; DRACUP, 2002).

O PHDI quantifica os impactos de longo prazo ocasionados pela seca em sistemas hidrológicos, permanecendo indicando um valor negativo mesmo por vários meses após o PDSI ter voltado a assumir valores positivos que indicam o fim da seca. Por ser um indicador amplamente utilizado, muitos estudos vêm sendo feitos para avaliar a eficácia e aplicabilidade dos seus resultados, o que permitiu a detecção de algumas falhas, como, por exemplo, as simplificações feitas pelo modelo hidrológico adotado no cálculo da umidade do solo (CONAMARY, 2015).

O Índice de Abastecimento de Água em Superfície (Surface Water Supply Index – SWSI) foi desenvolvido por Shafer; Dezman (1982). Objetivava indicar a deficiência de água em regiões dos EUA onde o degelo é a principal fonte hídrica. O Índice surgiu a partir da percepção de que o PDSI, apesar de ser um indicador largamente adotado em estudos nos EUA, mostra-se ineficiente quando aplicado em regiões com uma elevada acumulação de neve (CONAMARY, 2015).

O cálculo do SWSI requer quatro valores de entrada de dados: precipitação, bloco de neve, armazenamento de reservatório e fluxo em superfície. No inverno, o SWSI é calculado somente com dados armazenamento, precipitação e neve, devido ao fato desse índice ser dependente da estação do ano. Já nos meses de verão, o bloco de neve é substituído pelo fluxo de superfície como um componente dentro da equação do SWSI (FERNANDES et al. 2009). É calculado com base na probabilidade mensal de não-excedência de registros históricos disponíveis (MISHRA; SINGH, 2010).

Fernandes et al. (2009), mostra que a proposta do SWSI é incorporar características hidrológicas e climatológicas em um único valor de índice, de forma

semelhante ao índice de Palmer. É possível normatizar os valores do índice para permitir comparações entre bacias. Para determinar o SWSI para uma bacia em particular, são coletados e somados para todas as estações de precipitação, reservatórios e fluxo em superfície/bloco de neve em estações de medição sobre a bacia. As observações dos dados relativos a essas variáveis são somadas e depois normalizados recorrendo à análise de frequência das séries (ROSA, 2011).

Anomalia de Vazão Acumulada (Cumulative Streamflow Anomaly - CSA) é um índice que representa o quanto a vazão acumulada distancia-se das condições médias, revelando as tendências da disponibilidade de água em longo prazo. Assim sendo, os desvios acentuados do valor médio indicarão os períodos de seca. Mesmo tendo apresentado um desempenho nos critérios avaliativos propostos por Keyantash; Dracup (2002) melhor que os índices de seca hidrológica PHDI e SWSI, a anomalia de vazão acumulada ainda é um método pouco explorado na quantificação da seca hidrológica (MEDEIROS, 2016).

O Déficit total de água (Total Water Deficit - TWD) nada mais é que uma avaliação tradicional da seca hidrológica, capaz de apresentar a severidade da seca a partir de sua duração e magnitude (MEDEIROS, 2016). A duração de uma seca hidrológica é definida como o tempo durante no qual uma variável hidrológica (ou uma combinação de variáveis) permanece consistentemente abaixo do nível de limite. A magnitude, por sua vez, é o volume do déficit que está abaixo desse limite. Uma vez determinado o limite de seca, pode-se usar o déficit total de armazenamento de água abaixo desse limite como medida da severidade da seca (LEBLANC et al. 2009).

Vicente-Serrano et al. (2012) aponta que recentemente vêm sendo desenvolvidos índices de seca hidrológica que seguem uma abordagem comumente usada para índices de seca meteorológica.

O Standardized Streamflow Index (SSFI) foi concebido pela primeira vez por Modarres (2007), com o objetivo de desenvolver um modelo capaz de prever a seca no rio Zayandehrud, que abastece a barragem de Zayandehrudsendo, localizada no Irã. O índice foi definido como a diferença de fluxo da média dividida pelo desvio padrão, estatisticamente semelhante ao SPI, com a diferença de substituir os valores de precipitação por valores de vazão do rio.

McKee et al. (1993) desenvolveram um procedimento de padronização para avaliar as saídas de precipitação. Uma abordagem semelhante foi utilizada para

desenvolver o SSFI, porém, ao invés de ser computado em um período de tempo mensal, ele é calculado em um período de tempo diário usando fluxos cumulativos contínuos para uma variedade de escalas de tempo (QUIRING et al. 2007).

Vicente-Serrano et al. (2012), percebendo as limitações de se usar uma única distribuição de probabilidade em séries de dados de diferentes regiões para calcular o SSFI desenvolveram um estudo utilizando distribuições de probabilidade particulares para cada área estudada. Concluíram que essa abordagem permite o desenvolvimento de um índice mais confiável, com as médias esperadas, desvios padrão e frequências de valores positivos e negativos a serem obtidos. Capaz de realizar uma comparação espacial e temporal entre os dados do fluxo, independentemente dos regimes dos rios e das magnitudes do fluxo.

Shukla; Wood, (2008) aplicou o conceito empregado por McKee et al. (1993) para o SPI na definição de um índice de escoamento padronizado (Standardized Runoff Index - SRI). O SRI baseia-se na substituição dos valores de precipitação pelo desvio padrão normal dos valores de escoamento superficial registrados ao longo de um determinado espaço de tempo.

O procedimento de cálculo do SPI envolve os seguintes passos: uma série retrospectiva de tempo de escoamento é obtida por simulação e uma distribuição de probabilidade é adequada à amostra representada pelos valores da série temporal; a distribuição é utilizada para estimar a probabilidade cumulativa do valor de interação (ou acumulação atual ou outra de uma data retrospectiva); a probabilidade cumulativa é convertida em um desvio padrão normal (com média zero e variância unitária), que pode ser calculado a partir de uma aproximação numérica para a função de distribuição cumulativa normal ou extraído de uma tabela de valores para o normal da função que está prontamente disponível em livros didáticos estatísticos ou na rede mundial de computadores (SHUKLA; WOOD, 2008).

A Fundação Cearense de Meteorologia e Recursos Hídricos (FUNCEME) em parceria com a Agência Nacional de Águas (ANA), atendendo à necessidade de incluir um indicador hidrológico no Monitor de Secas no Nordeste (ferramenta desenvolvida para monitorar as secas na região), fizeram uma adaptação do SRI para as características da região (MARTINS et al. 2015).

Criaram então um indicador que faz uso das características de distribuição temporal da precipitação diária relacionadas ao escoamento superficial. No cálculo, utiliza-se a duração do período úmido e um fator em função do tempo de duração

deste mesmo período. Seu comprimento é definido como três ou mais dias consecutivos com precipitação maior do que 10 mm. Um peso maior é atribuído a períodos úmidos que duram pelo menos 10 dias. Os pesos são calibrados conforme os dados da região (MARTINS et al. 2015).

3 METODOLOGIA

3.1 ÁREA DE ESTUDO

3.1.1 SEMIÁRIDO BRASILEIRO: ASPECTOS GERAIS

O Semiárido brasileiro se estende por uma área que abrange a maior parte dos Estados da região Nordeste (86,48%), a região setentrional do Estado de Minas Gerais (11,01%) e mesmo sofrendo questionamentos técnicos e científicos se amplia ao norte do Espírito Santo (2,51%). Possui 1.133 municípios distribuídos em uma área de 974.752 Km². É o maior e mais populoso do mundo com mais de 22,6 milhões de habitantes, representando 11,8% da população brasileira, sendo 44% desta residente na área rural, a maior porcentagem do país (SILVA, 2003).

A Região Nordeste do Brasil, com 1,56 milhão de km² (18,2% do território nacional), comporta a maior parte do Semiárido brasileiro, que se localiza na porção central dessa região, abrangendo os estados do Piauí, Ceará, Rio Grande do Norte, Paraíba, Pernambuco, Alagoas, Sergipe, Bahia, além de parte do norte do Estado de Minas Gerais na região sudeste (DA SILVA et al. 2010).

3.1.2 SEMIÁRIDO BRASILEIRO: ASPECTOS DE CLIMA E HIDROLOGIA

Com uma precipitação anual média de 800 mm, insolação média de 2.800 h.ano⁻¹, temperaturas médias anuais de 23 °C a 27 °C, evaporação média de 2.000 mm.ano⁻¹ e umidade relativa do ar média em torno de 50%, o semiárido brasileiro, caracteriza-se por apresentar: forte insolação, temperaturas relativamente altas e regime de chuvas marcado pela escassez, irregularidade e concentração das precipitações em um curto período, em média, de três a quatro meses, apresentando volumes de água insuficientes em seus mananciais para atendimento das necessidades da população (DA SILVA et al. 2010).

O regime de chuvas da região é altamente concentrado em uma única estação: cerca de 90% dos totais anuais ocorrem em seis meses. Na parte norte da

região, predominam as chuvas do sistema da Zona de Convergência Intertropical (ZCIT); na parte sul, atuam os sistemas frontais, que alcançam até a Bahia. No litoral, a pluviosidade anual supera 1.000 mm, (e mesmo 2.000 mm em alguns casos), enquanto nos sertões, está em torno de 700 milímetros. A parte menos chuvosa situa-se no chamado cotovelo do São Francisco. O posto de Remanso, localizado nessa área, tem pluviosidade de 496,7 mm/ano (CAMPOS, 1997).

Uvo et al (1989), realizou um trabalho visando analisar a relação existente entre a posição da ZCIT no atlântico equatorial e a precipitação no nordeste brasileiro. O estudo indicou que é a permanência mais longa ou mais curta da ZCIT em torno do Equador o fator mais importante na determinação da qualidade da estação chuvosa do norte do Nordeste. De acordo com a análise, quando a ZCIT inicia sua migração para o norte em fins de fevereiro ou início de março, a ocorrência de chuvas será menor. Entretanto, quando a ZCIT somente inicia sua migração para o norte em fins de abril ou início de maio, a ocorrência de chuvas será maior.

Ferreira; Mello (2005) apontam que as frentes frias são um importante mecanismo causador de chuvas no NEB e a precipitação associada a esse fenômeno está ligada a sua penetração até às latitudes tropicais entre os meses de novembro e janeiro, chegando a atingir a porção sul do nordeste. Os Vórtices Ciclônicos de Altos Níveis (VCAN), por sua vez, formam-se no oceano Atlântico, principalmente entre os meses de novembro e março, e sua trajetória normalmente é de leste para oeste, penetram na parte sul do Nordeste, com maior frequência entre os meses de janeiro e fevereiro.

As Ondas de Leste são um importante mecanismo causador de chuvas principalmente na Zona da Mata, que se estende desde o Recôncavo Baiano até o litoral do Rio Grande do Norte, abrangendo toda a parte leste do NEB, entre os meses de maio e agosto, porém, quando as condições oceânicas e atmosféricas estão favoráveis, também provocam chuvas no estado do Ceará nos meses de junho, julho e agosto, principalmente na parte centro-norte do estado (FERREIRA; MELLO, 2005).

O deslocamento sazonal da ZCIT está relacionado aos padrões da Temperatura da Superfície do Mar (TSM) sobre essa bacia do oceano Atlântico Tropical. A ZCIT é mais significativa sobre os oceanos, e por isso, a TSM é um dos fatores determinantes na sua posição e intensidade (FERREIRA; MELLO, 2005).

A estação chuvosa do Nordeste está concentrada no período de fevereiro a maio, quando a ZCIT atinge sua posição mais ao sul, deslocando-se para a zona de maior TSM. Quando o gradiente da TSM é enfraquecido ao norte a ZCIT se deslocada para norte, produzindo seca no Nordeste. Os alísios no Atlântico Norte são enfraquecidos, enquanto no Atlântico Sul são acelerados, aumentando o fluxo que cruza o equador para o norte. Portanto, a variabilidade da precipitação no Nordeste está sujeita à forte influência das anomalias de TSM no Oceano Atlântico e à posição da zona de convergência intertropical (GRIMM et al. 1998).

O fenômeno El Niño-Oscilação Sul (ENOS) é um fenômeno atmosférico-oceânico caracterizado pelo aquecimento anormal das águas superficiais no Oceano Pacífico Tropical, enquanto o La Niña representa um fenômeno oceânico-atmosférico exatamente oposto, caracterizando um esfriamento anormal nas águas superficiais do Oceano Pacífico Tropical (INPE, 2017).

Ferreira; Mello (2005) explicam que em anos de El Niño, quando as águas superficiais da Bacia do Pacífico, em torno do Equador, e sobre o lado centro-leste, estão mais aquecidas, o ar quente sobre aquela região é empurrado, originando uma célula descendente sobre o Oceano Atlântico, próximo à região nordeste do Brasil até a Amazônia oriental. Dependendo da intensidade dessa célula de circulação e de sua fase de ocorrência, pode haver inibição da formação de nuvens e da descida da ZCIT, favorecendo a deficiência das chuvas na região.

A Evapotranspiração potencial é bastante elevada, variando entre 1.400 a 2.000 mm, como valores médios nas 24 grandes bacias nordestinas. Em inúmeros locais, ultrapassa 2.000 mm. O déficit de evapotranspiração real em relação à evapotranspiração potencial (bom indicador de aridez) varia entre 50 mm até valores superiores a 1.000 mm em bacias como Acaraú-Coreaú, Curú, Jaguaribe, Apodi, Mossoró, Piranhas-Açú (ÁRIDAS, 1994).

A maioria dos rios apresenta regime intermitente devido às irregularidades do regime pluvial e às demais condições fisiográficas (CARVALHO, 2012). O coeficiente de escoamento superficial na região também é muito baixo, variando entre 0,06 a 0,26, com média aproximada de 0,12 (VIEIRA, 2003). As vazões naturais dos rios possuem elevado coeficiente de variação, com valor médio para o Semiárido no entorno de 1,4 (CAMPOS, 1997).

3.1.3 SEMIÁRIDO BRASILEIRO: RESERVATÓRIOS

As secas de 1825, 1827 e 1830 marcaram o início da açudagem no Nordeste semiárido como fonte de água para abastecimento humano e animal durante tais períodos. A açudagem pública apresenta um balanço de aproximadamente 1.200 a 1.500 reservatórios de capacidade superior a 100 mil m³, com cerca de 450 barragens de mais de um milhão m³ e número menor de açudes entre 2 e 4 bilhões de m³ (REBOLÇAS, 1997).

Paralelamente ao desenvolvimento da açudagem pública, e apesar das prioridades oficiais voltadas para os grandes reservatórios, observou-se um surto espontâneo da pequena açudagem privada, de tal forma que se estima em 70 mil o número total de reservatórios com espelho d'água de mais de mil m². Os açudes com capacidade entre 10 e 200 mil m³ representam aproximadamente 80% dos reservatórios do Nordeste semiárido (MOLLE; CADIER, 1992).

A política de acumulação de água em açudes, típica da região nordeste, tem sido feita sob duas formas. A primeira, através de reservatórios com capacidade de regularização plurianual, em bacias hidrográficas de maior porte. Esse tipo de reservatório, com capacidade da ordem do bilhão de metros cúbicos, encontra-se presente em diversos Estados da região, porém em pequeno número (CIRILO, 2008).

E possível citar diversos exemplos desses reservatórios de grande acumulação na região, como os açudes: Castanhão, Orós e Banabuiú no estado do Ceará; o açude Boa Esperança no Piauí; o açude Armando Ribeiro no Rio Grande do Norte; o açude Pedras na Bahia; e os açudes Mãe d'água e Boqueirão na Paraíba.

A segunda política de acumulação de água decorre do emprego de pequenos reservatórios com capacidade da ordem de poucos milhares de metros cúbicos, os chamados barreiros, espalhados por toda a região. Os altos índices de evaporação potencial, da ordem de 2.500 mm ao ano, trazem sério problema à política de acumulação de água, especialmente à pequena açudagem, que não resiste aos efeitos da seca prolongada (CIRILO, 2008).

3.2 PROCEDIMENTOS

O presente estudo consiste numa pesquisa do tipo bibliográfica. A metodologia empregada possui abordagem qualitativa, ou seja, a avaliação dos índices de seca, bem como suas aplicações, procede-se sob uma perspectiva conceitual e subjetiva. É de natureza aplicada, buscando, portanto, formular conhecimentos que possam ser replicados em situações práticas e reais. A coleta de dados dar-se através de pesquisa bibliográfica e pesquisa eletrônica, dando-se preferência a obras conceituadas e publicações em periódicos de grande relevância acadêmica.

A área de estudo desta pesquisa é o semiárido brasileiro, que foi escolhido por se tratar de uma região frequentemente acometida por secas e que, ao mesmo tempo, carece de uma caracterização mais adequada do fenômeno. Nesse sentido, a identificação dos índices de seca mais adequados para a região pode contribuir para que essa deficiência seja sanada.

Devido à grande variedade de índices de seca encontrados na bibliografia, para o desenvolvimento desta pesquisa, foram selecionados aqueles que já tenham sido amplamente revisados pela literatura; que sejam objeto de estudo de vários pesquisadores; e que sejam dotados de histórico de aplicação prática por parte de órgãos ligados ao clima, tanto em escala global, quanto no semiárido brasileiro, em especial. Por fim, chegando-se aos seguintes índices a serem estudados: Índice de Severidade de Seca de Palmer, Índice Normalizado de Precipitação, Índice Padronizado de Precipitação, Índice de Seca Hidrológica de Palmer, Índice de Abastecimento de Água em Superfície, Standardized Streamflow Index, Indicador Padronizado de Escoamento.

A análise dos dados é realizada através da análise do conteúdo obtido por meio da descrição dos índices em si, bem como da análise detalhada de suas aplicações, buscando identificar aqueles cujas variáveis melhor se adequam às características específicas do semiárido brasileiro, para isso sendo necessária uma descrição detalhada desta área de estudo.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1. ÍNDICE DE SEVERIDADE DE SECA DE PALMER – PDSI

A análise detalhada do PDSI, demonstrou, primeiramente, tratar-se de um dos mais consolidados indicadores de seca existentes, usado, principalmente, nos EUA, mas também em outros países acometidos pelo fenômeno, inclusive o Brasil e sua região semiárida. Diante de tal relevância faz-se imprescindível conhecer as características que compõem esse índice.

Apesar de ser um índice de seca meteorológica, o cálculo do PDSI leva em consideração variáveis determinantes para a caracterização da seca hidrológica, como temperatura, evaporação e escoamento superficial. O emprego de tais variáveis torna o PDSI uma ferramenta de utilização recorrente na quantificação, também, da seca hidrológica.

Entretanto, ao desenvolver o PDSI, Palmer tinha como objetivo estabelecer um comparativo entre as condições de umidade do solo de diferentes regiões e em diferentes períodos de tempo (FERNANDES et al. 2009), não se preocupando em considerar variáveis como vazão dos corpos hídricos, nível dos reservatórios, demandas diversas de água, entre outras típicas do balanço hidrológico. Isso faz de seu índice um indicador inadequado de secas prolongadas, pois qualquer alteração na umidade do solo provoca uma interrupção na condição de seca, fato que, no entanto, não se verifica sob a perspectiva hidrológica.

Além disso, diversos autores criticaram a metodologia seguida por Palmer, foram feitas considerações a respeito do cálculo da evaporação, do escoamento superficial e da umidade do solo, por exemplo (PEREIRA; PAULO, 2004). Porém, merecem especial atenção, por dizer respeito a características do semiárido brasileiro, aquelas que se referem à dificuldade em adaptar o cálculo do índice a diferentes regiões e à necessidade de existência de uma longa série histórica de dados de precipitação e temperatura.

Conamary (2015) ressalta que, para calcular os índices propostos por Palmer, é preciso dispor de uma base de dados sólida, pois, os resultados serão mais consistentes à medida que os períodos de calibração forem maiores. Contudo, por se tratar de uma região com características extremamente heterogêneas e nem todos os estados e municípios dispõem de estrutura adequada de monitoramento

do clima e dos recursos hídricos, esta pode ser uma limitação à aplicação da ferramenta para quantificação das secas na região nordeste.

Ainda com relação a essa adaptação do índice a outras regiões, Conamary (2015) mostra que a composição da equação dos pesos do PDSI teve como base relações empíricas estabelecidas entre dados coletados apenas em regiões dos Estados Unidos, o que gera incertezas relativas à aplicação do índice em regiões com características diferentes.

4.2. ÍNDICE NORMALIZADO DE PRECIPITAÇÃO – SPI

As análises a respeito do SPI e suas aplicações mostraram que apesar de ter sido desenvolvido há relativamente pouco tempo, trata-se de um índice de seca com grande utilização atualmente, encontrando-se na literatura exemplos de sua aplicação no semiárido brasileiro.

Tamanho utilização evidencia-se numa premissa básica de cálculo do índice: a simplicidade, pois faz uso apenas dos dados históricos de precipitação. É, portanto, um indicador de seca meteorológica. Pode ser aplicado em qualquer região que possua uma série histórica de dados mensais de precipitação de, pelo menos, 30 anos (PENAFORTE, 2016), o que, entretanto, pode ser uma limitação, pois nem todos os estados e municípios que compõem o semiárido possuem esses dados.

O SPI utiliza os dados mensais de precipitação normalizados (PENAFORTE, 2016). Esse método possui a vantagem de padronizar a análise, permitindo comparar regiões totalmente distintas, como por exemplo regiões com climas mais úmidos e chuvosos com regiões mais áridas e secas (FERNANDES et al. 2009). Tal característica é essencial para a aplicação de um índice em uma região diferente daquela para a qual ele foi concebido.

A metodologia de cálculo do SPI também permite identificar períodos de seca e avaliar a sua severidade considerando múltiplas escalas de tempo (PEREIRA; PAULO, 2004). Ou seja, desde que hajam dados, é possível estabelecer um parâmetro comparativo de valores de precipitação correspondentes a vários anos e não apenas entre valores recentes, o que propicia uma avaliação bem mais confiável, considerando tratar-se do estudo de uma variável climática.

A justificativa da adoção dessa metodologia é que o SPI se baseia na ideia de que a variabilidade da precipitação é superior à das demais variáveis (CONAMARY,

2015), dessa forma, podendo ser considerado a variável principal na análise da seca e, assim sendo, passível de utilização também na quantificação da seca hidrológica.

Por outro lado, Conamary (2015) aponta tal característica como uma grande desvantagem do SPI, pois despreza outras variáveis que podem influenciar na severidade da seca. Trazendo para a realidade do semiárido brasileiro, onde as características de precipitação, temperatura, solo e gerenciamento dos recursos hídricos, entre outros fatores, são extremamente particulares, torna-se difícil desconsiderar tais variáveis.

O solo da região, por exemplo, apresenta características que dificultam a infiltração da água, favorecendo o escoamento superficial e propiciando o armazenamento em reservatórios. A acumulação de água em açudes é um traço característico do semiárido brasileiro, representando uma das principais medidas de enfrentamento da escassez recorrente de água na região. As altas temperaturas ocasionam índices de evaporação elevados, representando fator de perda considerável e tendo interferência direta no volume de água superficial existente.

Aspectos da gestão dos recursos hídricos também são fundamentais na análise do déficit hídrico, pois, por se tratar de uma região onde predomina a existência de rios intermitentes, a forma com que essa água “passageira” será gerida é essencial, encontrando-se regiões onde existem reservatórios de grande volume de acumulação, regiões onde há o predomínio de pequenos e médios açudes e outras onde inexiste política de represamento da água. Além disso, questões relativas à demanda hídrica, que varia de local para local, e às formas de utilização da água pelos usuários também possuem grande relevância.

4.3. ÍNDICE PADRONIZADO DE PRECIPITAÇÃO-EVAPOTRANSPIRAÇÃO – SPEI

A primeira observação com relação ao SPEI que merece ser destacada diz respeito à motivação que levou seus criadores a desenvolvê-lo: conceber um índice capaz de reunir a simplicidade do SPI com a sensibilidade a variações de temperatura do PDSI, pois, trata-se de duas ponderações que, indubitavelmente, precisam ser feitas para adaptação de um índice de seca ao semiárido brasileiro.

A simplicidade para calcular o índice facilita sua aplicação, pois elimina a necessidade de utilização de ferramentas sofisticadas, a contratação de profissionais muito concorridos pelo mercado e a existência de dados relativos a

muitas variáveis que compõem o indicador, o que poderia dificultar a introdução do mesmo em estados onde o monitoramento hidroclimatológico ainda é precário.

Além disso, essa simplicidade também se refere à aplicabilidade e à capacidade de adaptação do índice à diversidade local, características imprescindíveis a um indicador a ser introduzido no semiárido brasileiro. Um exemplo dessa introdução que merece destaque pode ser visto no trabalho de Martins et al. (2015) a respeito do desenvolvimento de um monitor de secas para a região nordeste.

A contabilização da variável temperatura, e sua evaporação associada, na equação de um indicador de seca no semiárido, assim como ocorre no PDSI, mostra-se absolutamente necessária. Um dado alarmante mostra que estudos realizados por Suassuna (2002), estimam em 40% o percentual de perda de água acumulada em reservatórios no semiárido por evaporação.

Seguindo essa mesma linha, Martins et al. (2005), apresenta algumas vantagens e desvantagens do uso da ferramenta para monitoramento da seca no NEB. Entre as vantagens cita: a contabilização da evapotranspiração e existência de componente de balanço de água no solo.

Apesar de conciliar as potencialidades do PDSI e do SPI, percebe-se, também no SPEI, a junção de algumas desvantagens dos dois indicadores. Nesse sentido, Martins et al. (2005) aponta: a modificação dos valores com a atualização da série de dados; uma dificuldade grande de conseguir longas séries de dados de temperatura e precipitação para uma mesma localidade; e sensibilidade ao método de cálculo de Evapotranspiração.

Outra observação a respeito da formulação do SPEI que merece ser destacada é que, ao desenvolverem o índice, Vicente-Serrano et al. (2010) tinham como motivação estudar as consequências do aquecimento global sobre o fenômeno da seca. Por isso o esforço em incluir a temperatura entre os componentes de seu índice. Para os autores, o SPEI, apresenta-se como um indicador ideal para detectar, monitorar e explorar as consequências do aquecimento global em situações de seca.

4.4. ÍNDICE DE SECA HIDROLÓGICA DE PALMER – PHDI

Com relação ao PHDI, o primeiro ponto que deve ser ressaltado é o fato de tratar-se de um índice voltado especificamente à quantificação da seca hidrológica, tendo sido adaptado do PDSI com o intuito de ser um indicador eficiente desse tipo de seca. Tende, portanto, a apresentar resultados mais fidedignos que os índices anteriores, que possuem a seca meteorológica como objeto de estudo principal.

É sabido que a configuração de um cenário de seca hidrológica ocorre algum tempo depois de configurado o cenário de seca meteorológica. De acordo com Pires (2003), essa defasagem normalmente ocorre, sendo necessário um período de tempo maior para que as deficiências de precipitação se traduzam em deficiências de água nos reservatórios. É razoável, portanto, depreender que essa diferenciação requeira a aplicação de ferramentas de estudo específicas.

O fato de ter uma metodologia semelhante à do PDSI é outra vantagem do PHDI, pois faz uso de um procedimento de cálculo já consolidado, e cujas potencialidades e fragilidades já são conhecidas, para aplicação em um outro indicador capaz de diagnosticar um tipo de seca de conhecimento é ainda deficiente.

Todavia, é possível criticar a metodologia adotada para transformar o PDSI em um índice de seca hidrológica, pois o processo leva em consideração apenas alterações no tocante à umidade do solo, deixando, assim como percebido no PDSI, de ponderar outros elementos inerentes à seca hidrológica, como vazão dos rios, nível dos reservatórios, demandas diversas de água, entre outros que fazem parte da realidade do semiárido brasileiro e interferem nas condições de seca.

Entretanto, ressalta-se que no processo de conversão mantém-se, no cálculo do PHDI, variáveis cuja contemplação é considerada aspecto positivo do PDSI, tais como: temperatura, evaporação e escoamento superficial. Ademais, uma outra vantagem referente à aplicação do PHDI no semiárido brasileiro, e algo visto como deficiência do PDSI, é sua capacidade de quantificar secas prolongadas, situação recorrente na região.

Por fim, como desvantagens replica-se aquelas já citadas na análise do PDSI e que dizem respeito à metodologia de cálculo da evaporação, do escoamento superficial e da umidade do solo; à dificuldade em aplicar o índice a regiões diferentes daquela para qual foi concebido; e à necessidade de existência de uma série histórica de dados de precipitação, temperatura e escoamento superficial.

4.5. ÍNDICE DE ABASTECIMENTO DE ÁGUA EM SUPERFÍCIE – SWSI

Assim como o PHDI, o SWSI também é um índice de seca hidrológica e um dos mais utilizados atualmente, especialmente nos EUA, além de ser um índice com extensa bibliografia desenvolvida. Tais fatores, por si só, atestam a necessidade de realizar um aprofundamento em torno de sua aplicação.

Foi desenvolvido com o intuito de aperfeiçoar a metodologia de cálculo do PDSI, incluindo variáveis fundamentais à análise da seca hidrológica, tais como escoamento superficial e nível dos reservatórios. A inclusão desta última, pensando em uma adaptação ao semiárido brasileiro, mostra-se o grande diferencial do SWSI, tendo em vista que outros índices não o fazem e considerando o papel que a redução nos níveis de água acumulada nos reservatórios exerce sobre o agravamento das condições de seca na região.

O SWSI também pode ser considerado um índice relativamente fácil de calcular requerendo apenas os dados relativos aos quatro componentes estudados e a determinação dos pesos correspondentes à probabilidade de não-excedência de cada um deles de acordo com as características da bacia estudada.

A grande desvantagem com relação à aplicação do SWSI em outras regiões, como o semiárido brasileiro, por exemplo, é que esse índice foi concebido para atender especificamente a necessidade de corrigir uma deficiência do PDSI quando aplicado em regiões montanhosas dos EUA, onde o degelo é a principal fonte hídrica. Portanto, sua aplicação é mais indicada para as regiões onde a neve contribui significativamente para a vazão anual e para as reservas superficiais de água (KEYANTASH; DRACUP, 2002).

Apesar de ter como objetivo complementar o PDSI através da inclusão de outras variáveis do balanço hídrico o SWSI deixa de considerar importantes componentes do ciclo hidrológico capazes de afetar as secas, como a umidade do solo e a evapotranspiração potencial (BARUA et al. 2010), esta última, com contribuição significativa sob a diminuição do volume de água superficial existente no Nordeste, notadamente nos períodos de seca.

Outro fator de crítica ao índice é com relação à determinação dos pesos da fórmula, eles precisam variar durante o ano para estimar elementos irregulares como a ocorrência de neve e são sensíveis a valores artificialmente manipulados como os de reservatórios de armazenamento; podem diferir substancialmente de uma região

para outra; se houver interrupção nas medições em qualquer estação de coleta de dados ou nas observações de um ou mais componentes é necessário calcular uma nova distribuição de frequência; similarmente, desvios na bacia ou surgimento de novas represas requererão modificações dos pesos para cada componente do balanço hídrico. Pode haver problema, ainda, se eventos extremos não tiverem sido registrados previamente, requerendo uma revisão na distribuição de frequência (FERNANDES et al. 2009).

Além disso, como combinar os efeitos de grandes reservatórios com pequena variabilidade relativa e pequenos reservatórios com grande variabilidade na mesma bacia de drenagem é também um problema. Bem como é também improvável que possa ser usado com sucesso para grandes regiões com significativa variabilidade hidrológica espacial.

Todos esses fatores entram em choque com a realidade vista no semiárido brasileiro, pois trata-se de região com enorme variabilidade espacial, repleta de pequenos, médios e grandes reservatórios, que seguem sendo construídos até os dias de hoje e cujo registro histórico de eventos extremos é incipiente, além de ainda existirem falhas da obtenção dos dados mais atuais.

Por último, tem-se ainda o fato de que o SWSI foi desenvolvido para regiões onde as estações do ano são bem definidas (FERREIRA, 2016), característica que, de modo algum, condiz com a realidade do semiárido brasileiro. Além de requerer dados de natureza bem escassa como fluxo de superfície ou mesmo o nível dos reservatórios.

4.6. STANDARDIZED STREAMFLOW INDEX – SSFI

O SSFI apresenta como diferencial a utilização de valores de vazão dos corpos d'água para a quantificação da seca hidrológica. Ward (2013) afirma que em muitos aspectos a vazão parece ser uma variável mais apropriada para quantificar a oferta hídrica do que a precipitação. A existência de menos índices de seca baseados nessa métrica, possivelmente, deve-se ao fato do registro de dados de vazão ser mais limitado que os de precipitação.

Mudelsee (2007), afirma que a vazão geralmente apresenta uma maior variabilidade espacial do que as variáveis meteorológicas que são usadas para derivar indicadores de seca. Isso deve-se à influência de uma série de fatores,

incluindo topografia, litologia, vegetação e manejo humano; também é uma consequência da agregação espacial dos fluxos, que altera as propriedades estatísticas da série à jusante.

Mais um ponto favorável ao SSFI, diz respeito a sua metodologia, pois ao aplicar o mesmo procedimento adotado pelo SPI, fazendo apenas a substituição dos dados de precipitação por dados de vazão, mostra-se um indicador relativamente fácil de ser calculado, além de permitir a aplicação em diferentes regiões.

A utilização de valores de vazão, apesar de indicar uma melhor quantificação da seca hidrológica, pode ser vista como um fator limitante à aplicação de índices que seguem essa métrica no semiárido brasileiro, isso devido à insuficiência de registro histórico de dados que auxiliem na determinação da vazão dos corpos hídricos, fazendo com que seja necessário recorrer a métodos de determinação indiretos e afetando a confiabilidade do índice.

Ademais, assim como visto em outros índices, o SSFI carece de uma maior abrangência de componentes avaliados, pois limita-se aos dados de vazão. E no semiárido, onde a maioria dos rios é intermitente, nem sempre as informações de vazão serão um indicador confiável no diagnóstico da seca.

4.7. INDICADOR PADRONIZADO DE ESCOAMENTO – SRI

O SRI, assim como o SSFI, utiliza a mesma metodologia de cálculo do SPI, logo, apresentando os mesmos benefícios decorrentes dessa métrica, já anteriormente descritos. Seu grande diferencial está na utilização de dados de escoamento superficial, pois estes podem ser obtidos através de simulações, bem como, segundo Martins et al. (2015), pelo uso de características da distribuição temporal da precipitação diária relacionadas ao escoamento superficial.

Essa flexibilidade facilita a adaptação do índice ao semiárido brasileiro, pois evita o uso de dados diretos de vazão dos rios e nível dos reservatórios, o que incorreria em problemas como inconsistência nas séries e ausência ou dificuldade em obter informações de liberações dos reservatórios na maioria dos estados; permite, ainda, que o índice possa ser calculado para cada estação pluviométrica (MARTINS et al. 2015), na medida que toma como base os dados particulares de cada uma delas.

Por outro lado, esse método torna o índice demasiadamente especulativo e embasado na análise de dados indiretos, além de, assim como o SSFI, recorrer a apenas um único indicador, que pode mascarar determinadas realidades, para diagnosticar condições de seca.

Mas vale ressaltar que o SRI já é aplicado no NEB como índice integrante do Monitor de Secas no Nordeste. Alguns testes de sensibilidade foram feitos para o Ceará no período 1971 - 2000 e exemplos em que é possível verificar a destreza do SRI em representar anos chuvosos e secos foram apresentados. Foram relacionadas anomalias padronizadas do SRI para a bacia de contribuição do posto de Iguatu com as vazões medidas nesse posto e constatou-se que o indicador está positivamente correlacionado com os dados observados e consegue capturar o estado de escoamento extremo (MARTINS et al. 2015).

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O semiárido brasileiro notabiliza-se pela recorrente ocorrência de secas. Em regiões castigadas por esse fenômeno é comum a utilização de indicadores como forma de mensurar a magnitude dos eventos de seca. Muitos são os índices desenvolvidos e adotados em diferentes lugares, porém poucos são os adaptados ao semiárido brasileiro. Diante desse cenário, a presente pesquisa propôs-se a realizar uma revisão dos principais índices encontrados na literatura e identificar aqueles mais adequados à quantificação da seca hidrológica no semiárido brasileiro.

Após realização de uma seleção prévia entre os principais índices de seca encontrados, chegou-se aos sete índices aqui estudados, então, foi possível descrever detalhadamente cada um deles, analisar detalhadamente suas aplicações e identificar as variáveis que os compõem, estabelecendo um comparativo entre estas e a realidade do semiárido brasileiro, buscando identificar potencialidades e fragilidades visando uma aplicação do índice na região.

A partir da análise de cada índice em particular percebe-se que todos possuem suas vantagens e desvantagens com relação à adaptação ao semiárido e que é demasiado complicado escolher apenas um, esperando que este retorne um diagnóstico preciso das condições de seca de uma região onde tantos fatores interferem na gravidade do fenômeno e onde há tanta dificuldade no acesso a dados

hidroclimáticos. Conclui-se, portanto, que apenas a combinação de mais de um índice poderia oferecer um diagnóstico preciso para a seca no semiárido brasileiro.

Entretanto, dentre os índices avaliados foi possível destacar o SPEI, por combinar as vantagens do SPI e do PDSI e mostrar-se um indicador capaz de adaptar-se bem ao semiárido brasileiro; o SSFI, por ser embasado em uma das variáveis mais importantes do ciclo hidrológico e de grande relevância na dinâmica hídrica da região: a vazão dos corpos d'água; e o SRI, por tangenciar muito bem as limitações inerentes a realidade do semiárido brasileiro e assim apresentar-se como um indicador a ser considerado.

Todos eles deixaram a desejar por desconsiderar algumas variáveis fundamentais na avaliação da seca hidrológica, principalmente o volume armazenado nos reservatórios. Dentre os índices estudados, o SWSI é o único a considerar essa variável, mas por ter sido desenvolvido para regiões onde há ocorrência de neve, sua adaptação ao semiárido é delicada. Conclui-se, portanto, que a enorme dependência de reservatórios como fonte de abastecimento de água, aliada à dificuldade em obter dados de volume armazenado dos mesmos, é um dos principais fatores limitantes à quantificação da seca hidrológica na região.

Diante desses problemas e tomando como exemplo o modelo adotado pelo Monitor de Secas do Nordeste, sugere-se a utilização de não apenas de um, mas de vários indicadores trabalhando de forma complementar e simultânea, com vistas a corrigir as deficiências um do outro e assim oferecer um diagnóstico mais confiável e preciso dos eventos ocorridos de seca.

REFERÊNCIAS

ÁRIDAS, Projeto. Recursos hídricos e o desenvolvimento sustentável do semiárido nordestino. Relatório Consolidado, Secretaria de Planejamento da Presidência da República, Brasília, Brasil, 1994.

BARUA, S.; NG, A. W. M.; PERERA, B. J. C. Comparative evaluation of drought indexes: case study on the Yarra River catchment in Australia. *Journal of Water Resources Planning and Management*, v. 137, p. 215-226, 2010.

CAMPOS, José Nilson Bezerra. Vulnerabilidades Hidrológicas do Semiárido às Secas. Planejamento e políticas públicas, 1997.

CAMPOS, José Nilson Bezerra; STUDART, Ticiania Marinho de Carvalho. Secas no Nordeste do Brasil: origens, causas e soluções. IV Dialógo Interamericano de Gerenciamento de Águas. ABRH: Foz do Iguaçu, 2001.

CARVALHO, Luzineide Dourado. Natureza, território e convivência: Novas territorialidades no Semiárido Brasileiro. Jundiaí: Paco Editorial, 2012.

CIRILO, José Almir. Políticas públicas de recursos hídricos para o semiárido. *Estudos avançados*, v. 22, p. 61-82, 2008.

CONAMARY, E. A. Avaliação de índices para fins de monitoramento e previsão de secas no Nordeste setentrional. Dissertação (Mestrado em Tecnologia Ambiental e Recursos Hídricos) – UnB, Brasília, DF, 2015.

DA SILVA, Pedro Carlos Gama et al. Caracterização do Semiárido brasileiro: fatores naturais e humanos. Embrapa Semiárido - Capítulo em livro científico (ALICE), 2010.

EL NIÑO E LA NIÑA. INPE. Disponível em: <<http://enos.cptec.inpe.br/>>. Acesso em 18 de abr.2018.

ESLAMIAN, Saeid. et al. A Review of Drought Indices. *International Journal of Constructive Research in Civil Engineering (IJCRCE)*. v. 3, p. 48-66, 2017.

FERNANDES, D.S. et al. Índices para a quantificação da seca. Santo Antônio de Goiás: Embrapa Arroz e Feijão, 2009.

FERREIRA, A. G.; MELLO, N. G. da S. Principais sistemas atmosféricos atuantes sobre a região Nordeste do Brasil e a influência dos oceanos Pacífico e Atlântico no clima da região. *Revista Brasileira de Climatologia*, v. 1, 2005.

FERREIRA, L. K. R. Análise comparativa do desempenho de índices de seca aplicados à região do Alto Jaguaribe – Ceará. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – UFC, Fortaleza, CE, 2016.

GRIMM, A. M.; FERRAZ, S. E.; CARDOSO, A. de O. Influência de El Niño sobre a chuva no Nordeste brasileiro. In: *Anais do X Congresso Brasileiro de Meteorologia*. Sociedade Brasileira de Meteorologia, 1998.

HEIM JUNIOR, Richard R. A review of twentieth-century drought indices used in the United States. *Bulletin of the American Meteorological Society*, v. 83, p. 1149-1165, 2002.

INSTITUTO NACIONAL DO SEMIÁRIDO. Recursos hídricos em regiões áridas e semiáridas. Campina Grande – PB: INSA, 2011.

KARL, Thomas R. The sensitivity of the Palmer drought severity index and Palmer's Z-index to their calibration coefficients including potential evapotranspiration. *Journal of Climate and Applied Meteorology*, v. 25, p. 77-86, 1986.

KEYANTASH, John; DRACUP, John A. The quantification of drought: an evaluation of drought indices. *Bulletin of the American Meteorological Society*, v. 83, p. 1167-1180, 2002.

LEBLANC, Marc J. et al. Basin-scale, integrated observations of the early 21st century multiyear drought in southeast Australia. *Water resources research*, v. 45, 2009.

MARTINS, E. S. P. R. et al. Monitor de Secas do Nordeste, em busca de um novo paradigma para a gestão de secas. *Série Água*, v. 10, 2015.

MCKEE, Thomas B. et al. The relationship of drought frequency and duration to time scales. In: *Proceedings of the 8th Conference on Applied Climatology*. Boston, MA: American Meteorological Society, p. 179-183, 1993.

MEDEIROS, G. C. S. DE. Metodologia de avaliação da seca hidrológica sob a perspectiva da demanda hídrica. Dissertação (Mestrado em Engenharia Sanitária) – UFRN, Natal, RN, 2016.

MISHRA, Ashok K.; SINGH, Vijay P. A review of drought concepts. *Journal of hydrology*, v. 391, p. 202-216, 2010.

MODARRES, Reza. Streamflow drought time series forecasting. *Stochastic Environmental Research and Risk Assessment*, v. 21, p. 223-233, 2007.

MOLLE, François; CADIER, Eric. Manual do pequeno açude. SUDENE-ORSTOM, Recife, PE, 1992.

Mudelsee, M. Long memory of rivers from spatial aggregation. *Water resources research*, v. 43, 2007.

PAIXÃO, M. P.; DE CARVALHO STUDART, T. M.; BESERRA, J. N. Aplicação de indicadores de performance na avaliação de sistemas hídricos: um estudo de caso. Fortaleza, CE, 2002.

PALMER, W. C. Meteorological Drought. Research Paper n. 45, Weather Bureau, Washington, 1965.

PENAFORTE, R. V. Análise das secas na bacia do rio do peixe através do índice padronizado de precipitação (SPI). Monografia (Bacharel em Engenharia Civil) – UFP, João Pessoa, PB, 2016.

PEREIRA, L. S.; PAULO, A. A. Indicadores De Escassez De Água: Índices de secas: comparação entre o Índice de Palmer e o SPI. Lisboa, 2004.

PIRES, V. Frequência e intensidade de fenômenos meteorológicos extremos associados a precipitação. Dissertação (Mestrado em Ciências e Engenharia da Terra) – Universidade de Lisboa, Lisboa, 2003.

QUIRING, Steven et al. Drought monitoring index for Texas. Texas Water Development Board, Austin, TX, 2007.

REBOUÇAS, Aldo da C. Água na região Nordeste: desperdício e escassez. Estudos avançados, v. 11, p. 127-154, 1997.

ROSA, R. G. T. D. Índices de seca: aplicação ao continente português. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrônômica) – ISA/UTL, Lisboa, 2011.

SHUKLA, Shraddhanand; WOOD, Andrew W. Use of a standardized runoff index for characterizing hydrologic drought. Geophysical research letters, v. 35, 2008.

SHAFER, B. A.; DEZMAN, L. E. Development of a Surface Water Supply Index (SWSI) to assess the severity of drought conditions in snowpack runoff areas. In: Proceedings Western Snow Conference, Colorado State University, Fort Collins, CO, p. 164-175, 1982.

SILVA, Roberto Marinho Alves da. Entre dois paradigmas: combate à seca e convivência com o semiárido. Sociedade e estado, v. 18, p. 361-385, 2003.

SOMBRA, I.P. Caracterização através de indicadores dos impactos da seca na bacia do alto Jaguaribe. Dissertação (Mestrado em Recursos Hídricos) – UFC, Fortaleza, CE, 2008.

SUASSUNA, João. A pequena e média açudagem no semiárido nordestino: uso da água na produção de alimentos. Fundação Joaquim Nabuco. Disponível em: <http://www.fundaj.gov.br/index.php?option=com_content&id=756&Itemid=376> Acesso em 13 mar. 2018.

UVO, Cintia Regina Bertacchi; NOBRE, Carlos Afonso; CITEAU, Jean. Análise da posição da Zona de Convergência Intertropical (ZCIT) no Atlântico Equatorial e sua relação com a precipitação no Nordeste do Brasil. In: Congresso Brasileiro de Meteorologia. p. 7-11, 1988.

VICENTE-SERRANO, Sergio M. et al. Performance of drought indices for ecological, agricultural, and hydrological applications. Earth Interactions, v. 16, p. 1-27, 2012.

VICENTE-SERRANO, Sergio M.; BEGUERÍA, Santiago; LÓPEZ-MORENO, Juan I. A multiscalar drought index sensitive to global warming: the standardized precipitation evapotranspiration index. Journal of Climate, v. 23, p. 1696-1718, 2010.

VIEIRA, Vicente. P. P. B. Desafios da gestão integrada de recursos hídricos no semiárido. Revista Brasileira de Recursos Hídricos, v. 8, p. 7-17, 2003.

WARD, George H. Hydrological Indices and Triggers, and Their Application to Hydrometeorological Monitoring and Water Management in Texas. Center for Research in Water Resources, University of Texas, Austin, 2013.

WILHITE, Donald A. Drought as a natural hazard: concepts and definitions. London: Routledge, 2000.

ZARGAR, Amin; et al. A review of drought indices. *Environmental Reviews*, v. 19, p. 333-349, 2011.