

Artigo

Análise da Relação entre Diferentes Índices de Seca: Caso de Estudo na Bacia do Alto Jaguaribe

Thaís Antero de Oliveira¹ , Francisco de Assis de Souza Filho¹,
Francisco das Chagas Vasconcelos Junior²

¹*Departamento de Engenharia Hidráulica e Ambiental, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, CE, Brasil.*

²*Fundação Cearense de Meteorologia e Recursos Hídricos, Fortaleza, CE, Brasil.*

Recebido em: 27 de Fevereiro de 2023 - Aceito em: 27 de Setembro de 2023

Resumo

Os impactos das secas variam dependendo da sua intensidade, duração e recorrência, além do estado de desenvolvimento e da capacidade de enfrentamento das regiões e dos países. A seca pode ser dividida em três categorias principais: meteorológica, hidrológica e agrícola. A mitigação eficaz dos impactos da seca é possível por meio de um sistema de monitoramento eficiente. Como a seca é um evento multi-fatorial, a análise de múltiplos índices de diferentes classes auxilia no seu monitoramento. Este estudo visa preencher uma lacuna na pesquisa ao avaliar os três tipos de seca por meio de índices em regiões semiáridas, visando melhorar o monitoramento e a gestão dessas condições. Esse trabalho analisa o comportamento de sete índices de seca, SPI, SPEI, EDDI, RDIST, SRI, VHI e NDVI. Estes foram calculados para a bacia do alto jaguaribe por meio de uma janela móvel de tempo e por meio de uma discretização temporal, tanto para a escala de 3 como de 12 meses. Foram utilizadas como métricas de análise o valor de informação mútua e correlação de Pearson entre os índices. Os resultados dos índices meteorológicos SPI, SPEI e RDIST apresentaram elevada correlação tanto na análise linear como não-linear. EDDI apresentou um comportamento diferente dos outros índices meteorológicos. Contudo, O EDDI-12 mostrou maior informação mútua do que o NDVI, sugerindo um alarme precoce para a seca da vegetação em escalas mais amplas. Este estudo analisa a propagação de seca através da correlação entre índices de escala 3 meses e o SPI-3 para fevereiro-março-abril. Os resultados mostram a propagação de seca, com maiores correlações dos índices de vegetação (VHI e NDVI) e hidrológico (SRI) em março-abril-maio, e os índices meteorológicos (RDIST e SPEI) com as maiores correlações em fevereiro-março-abril.

Palavras-chave: seca, índices de seca, Bacia do Alto Jaguaribe.

Analysis of the Relationship Between Different Drought Indices: Case Study in the Upper Jaguaribe Basin

Abstract

The impacts of droughts vary depending on their intensity, duration, and recurrence, as well as the developmental state and coping capacity of regions and countries. Drought can be categorized into three main types: meteorological, hydrological, and agricultural. Effective mitigation of drought impacts is achievable through an efficient monitoring system. Given that drought is a multifactorial event, the analysis of multiple indices from different classes aids in its monitoring. This study aims to address a research gap by assessing the three types of droughts using indices in semi-arid regions, with the goal of enhancing monitoring and management of these conditions. This work examines the behavior of seven drought indices - SPI, SPEI, EDDI, RDIST, SRI, VHI, and NDVI - calculated for the Upper Jaguaribe Basin using both a moving time window and temporal discretization, for both 3 and 12-month scales. Mutual information value and Pearson correlation were employed as analytical metrics between the indices. Results for meteorological indices SPI, SPEI, and RDIST exhibited significant correlation in both linear and non-linear analyses. EDDI displayed distinct behavior from the other meteorological indices. Notably, EDDI-12 showed higher mutual information than NDVI, suggesting early warning potential for vegetation drought on broader scales. This study analyzes drought propagation through correlation between 3-month scale indices and SPI-3 for February-March-April. Findings demonstrate drought propagation, with vegetation-based indices (VHI and NDVI) and hydrological index (SRI) showing higher correlations in March-April-May, while meteorological indices (RDIST and SPEI) exhibited stronger correlations in February-March-April.

Keywords: drought, drought indexes, Upper Jaguaribe basin.

1. Introdução

A escassez hídrica é considerada por muitos como um desastre natural complexo, porém, o menos compreendido e o que mais afeta pessoas no mundo (Wilhite, 2000). Os impactos das secas variam dependendo da sua intensidade, duração e recorrência, além do estado de desenvolvimento e da capacidade de enfrentamento das regiões e dos países. Esses eventos afetam os meios de subsistência da economia dos países em desenvolvimento, o comércio e a situação das empresas públicas e privadas dos países desenvolvidos (Agwata, 2014).

A seca possui conceitos diferentes para as pessoas dependendo do interesse específico delas. Para o agricultor, a seca significa uma falta de umidade na raiz de suas plantas. Para o hidrólogo, indica níveis de água abaixo da média em rios, lagos, reservatórios e similares (Palmer, 1965). A escassez hídrica pode ser dividida em três categorias principais: meteorológica, hidrológica e agrícola (Barua e Perera, 2011). A seca meteorológica ocorre quando há um déficit de precipitação e é caracterizada por mudança no padrão do clima. A seca hidrológica, contudo, acontece quando o nível hídrico na superfície, bem como no subsolo está menor que o nível médio da série histórica. Quando a umidade do solo está menor do que a demanda de água da planta, ocorre seca agrícola (Eslamian *et al.*, 2017).

A mitigação eficaz de impactos adversos da seca é possível por meio do fornecimento de um sistema de monitoramento, capaz de alertar prontamente sobre o início do evento e acompanhar sua evolução no espaço e no tempo (Sheffield *et al.*, 2014; Abatzoglou *et al.*, 2017). Para essa finalidade, uma seleção precisa de índices para identificação de seca, fornecendo uma descrição objetiva das condições é bastante relevante para a implementação de um sistema eficiente de observação desse evento (Canelli *et al.*, 2007). De forma sucinta, o monitoramento do nível de seca, por meio dos índices, produz um suporte para o processo de tomada de decisão, a fim de reduzir os impactos provenientes desse desastre natural.

Entre 2012 e 2016, ocorreu uma seca severa no Ceará, que está entre as piores dos últimos 100 anos registradas no estado (Rabelo e Lima Neto, 2018). Segundo Filho *et al.* (2020), as principais razões para este evento estão relacionadas a combinações de anomalias de baixa e alta frequência na diferença de temperatura da superfície do mar entre as porções norte e sul do Atlântico Tropical. Ao final de 2016, 39 dos 153 reservatórios monitorados colapsaram, 42 atingiram o volume inativo e 96 dos 184 municípios cearenses apresentaram interrupção no abastecimento de água (Martins *et al.*, 2017).

Existem vários estudos de seca em regiões semiáridas, no entanto, muitos desses estudos usaram apenas um índice de seca ou índices que representam um único tipo de seca. Por exemplo, Mohammad Amin *et al.* (2011)

usaram o Índice de Reconhecimento de Seca (*Reconnaissance Drought Index* - RDI) para detectar tendências de seca nas regiões semiáridas do Irã; Tabari *et al.* (2012) estudaram características espaço-temporais utilizando o Índice Padronizado de Precipitação (*Standardized Precipitation Index* - SPI) no Irã; e Shahabfar e Eitzinger (2013) utilizaram índices meteorológicos para fazer uma análise de seca no espaço temporal no Irã e o Sobral *et al.* (2018) estudou a variabilidade espacial do SPI e do RDIst para episódios de seca no Brasil. Contudo, como a seca é um evento multi-fatorial, a análise de múltiplos índices de diferentes classes de seca pode auxiliar no seu monitoramento, facilitando assim, a implementação de medidas para mitigar os efeitos negativos da seca.

Nesta pesquisa, é abordada uma lacuna na literatura científica relacionada às regiões semiáridas, onde a avaliação simultânea dos três diferentes tipos de seca por meio de índices é escassa. Como contribuição científica, o presente estudo visa fornecer uma análise holística desses tipos de seca, visando aprimorar as estratégias de monitoramento e gestão em ambientes semiáridos.

Devido a essa conjuntura, este estudo foi realizado analisando o comportamento de sete índices, quatro dos quais foram classificados como meteorológicos, SPI (McKee *et al.*, 1993), Índice Padronizado de Precipitação e Evapotranspiração (Standardized Precipitation-Evapotranspiration Index - SPEI) (Vicente-Serrano *et al.*, 2010), Índice de Seca de Demanda de Evaporação (Evaporative Demand Drought Index - EDDI) (Hobbins *et al.*, 2016) e o RDI (Tsakiris *et al.*, 2007); um hidrológico, Índice Padronizado de Escoamento (Standardized Runoff Index - SRI) (Shukla e Wood, 2008), e dois como índices de seca da vegetação, Índice de Saúde da Vegetação (Vegetation Health Index - VHI) (Kogan, 2001) e Índice de Diferença de Vegetação Normalizado (Normalized Difference Vegetation Index - NDVI).

No presente artigo, foi realizado um estudo de caso na bacia do Alto Jaguaribe no estado do Ceará, Brasil, com o objetivo de investigar a dependência entre índices de seca pertencentes a uma mesma classe, bem como os de categorias diferentes, quantificar a informação mútua entre eles, além de avaliar a propagação dos tipos de seca entre os índices.

2. Materiais e Métodos

2.1. Área de estudo

A bacia do rio Jaguaribe está localizada no estado do Ceará, Brasil, localizada na região semiárida do nordeste do país. As principais demandas hídricas na bacia são urbanas (20%) e de irrigação (80%), que se concentram principalmente durante a estação seca (agosto-novembro) (Souza Filho e Lall, 2004). O balanço hídrico é negativo na maioria dos meses (janeiro, fevereiro e junho a dezem-

bro), quando a irrigação das culturas é mais necessária. Uma seca severa ocorre quase todos os anos nesta região (Dai *et al.*, 2004), principalmente devido à heterogeneidade espacial da precipitação.

A área de foco do estudo é a bacia do Alto Jaguaribe, que é a maior das cinco (Alto, Médio e Baixo Jaguaribe, Banabuiú e Salgado) incluídas na bacia do Jaguaribe (Fig. 1). O clima da bacia é do tipo BSh' (clima semiárido quente), segundo a classificação climática de Köppen (Medeiros *et al.*, 2014). As precipitações são escassas e irregulares, com concentração em seis meses, de dezembro a maio, sendo os dois primeiros meses da pré-estação e os quatro últimos meses associados à estação chuvosa (Rocha *et al.*, 2019). A região hidrográfica do Alto Jaguaribe é composta por 24 municípios com aproximadamente meio milhão de habitantes. A economia baseia-se principalmente na criação de gado e na agricultura, tanto irrigada como de sequeiro. Sua área de captação se estende por 24.000 km², correspondendo a 16,56% do território cearense, e contém entre 4.000 e 5.000 reservatórios, variando de 2.500 m³ a 2 bilhões de m³ de capacidade.

A saída da bacia é controlada por seu maior reservatório, Orós, construído em 1961 e com capacidade de armazenamento de 1,94 bilhão de m³ (70% do total armazenado da bacia), sendo a segunda maior capacidade de armazenamento de água do estado do Ceará.

2.2. Dados e índices de secas

Os índices de seca utilizados nesse trabalho são relacionados a sua classe de seca, as quais definem o impacto mensurado. Os índices são: Standardized Precipitation Index (SPI), Standardized Precipitation Evapotranspiration Index (SPEI), Evaporative Drought Demand Index (EDDI), Standardized Reconnaissance Drought Index (RDIst), Normalized Difference Vegetation Index (NDVI), Vegetation Health Index (VHI), Standardized Runoff Index (SRI). Estes são sumarizados na Tabela 1.

Esses índices de seca são muito utilizados para o gerenciamento de eventos de seca, sendo amplamente empregados tanto no cenário brasileiro quanto global. Entre os índices utilizados, o SPI detém uma notável difusão internacional, sendo reconhecido como um dos índices mais utilizados em escala global. Os índices SPEI, RDIst, NDVI e VHI tem significativa difusão, tanto no Brasil como no mundo. O EDDI, contudo, tem menor difusão por ser um índice com desenvolvimento mais no (2016), mas apresentou interessantes resultados quando comparado aos resultados no monitor de secas no Estado Unidos (Hobbins *et al.*, 2016).

Esses índices de seca têm desempenhado um papel vital no gerenciamento de eventos de estiagem em âmbito global, incluindo o Brasil. Dentre esses indicadores, o

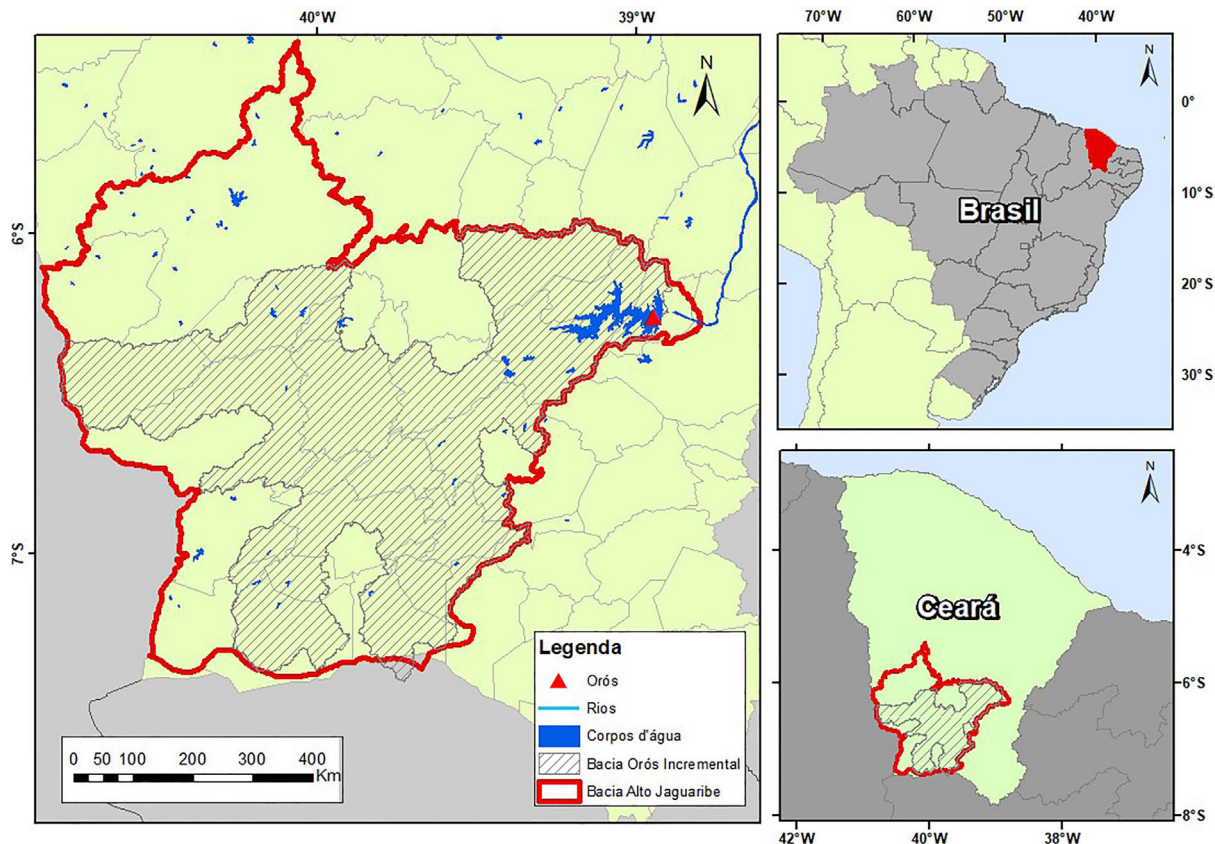


Figura 1 - Localização da Bacia do Alto Jaguaribe

Tabela 1 - Informações sobre os índices de seca.

Índice	Dados de entrada	Classe de seca	Referência	Metodologia resumida
SPI	Precipitação	Meteorológica	McKee et al. (1993)	É calculado padronizando as anomalias de precipitação em relação ao período de referência, através da divisão das anomalias pelo desvio padrão do período
SRI	Vazão	Hidrológica	Shukla e Wood (2008)	Consiste em calcular o índice a partir da diferença entre os valores de escoamento de água e a média para um determinado período, dividida pelo desvio padrão da série de dados
SPEI	Precipitação, ETP	Meteorológica	Vicente-Serrano et al. (2009; 2010)	É calculado de forma semelhante ao SPI, porém utiliza a diferença entre a precipitação e a evapotranspiração de referência (P - ET0). O balanço hídrico climático é calculado em várias escalas temporais e os valores resultantes são transformados em unidades padronizadas usando uma distribuição de probabilidade log-logística.
EDDI	ETP	Meteorológica	Hobbins et al. (2016)	Sua metodologia envolve calcular a evapotranspiração de referência (ET0) usando dados meteorológicos e calcular a anomalia de evapotranspiração em relação à média de longo prazo.
RDIST	Precipitação, ETP	Meteorológica	Tsakiris e Vangelis (2005; 2007)	O Índice de Seca Reconnaissance (RDI) é obtido pela divisão entre precipitação e ETP. O RDI Padronizado (RDIST) é calculado pela padronização das anomalias do déficit em relação ao período de referência, através da divisão das anomalias pelo desvio padrão do período.
NDVI	R_{NIR} e R_{RED}	De Vegetação	Kriegler et al. (1969)	É um indicador amplamente utilizado para monitorar a saúde e a cobertura vegetal de uma área. Ele é calculado a partir de dados de reflectância da superfície da Terra, obtidos por sensores remotos em satélites.
VHI	NDVI e BT	De Vegetação	Kogan et al. (2012)	É um índice composto que combina o Índice de Vegetação por Diferença Normalizada (NDVI) e o Índice de Temperatura da Superfície (STI - Surface Temperature Index). Essa combinação permite avaliar a saúde e o vigor da vegetação de uma área de interesse.

Em que: ETP (Evapotranspiração potencial); R_{RED} (Radiação medida no visível); R_{NIR} (Radiação no infravermelho próximo); BT (Temperatura de Brilho).

Índice de Precipitação Padronizada (SPI) se destaca como um dos mais amplamente reconhecidos e utilizado internacionalmente. Além disso, o SPE, RDIST, NDVI e VHI também desempenham papéis relevantes em níveis nacional e global. O EDDI, apesar de menos difundido devido à sua novidade, desenvolvido em 2016, apresentou resultados interessantes na sua aplicação em comparação com dados do monitor de secas dos Estados Unidos ([Hobbins et al., 2016](#)).

Os índices foram gerados para o intervalo de tempo entre janeiro de 1961 a julho de 2019, menos o NDVI (janeiro de 2001 a julho de 2019) e o VHI (janeiro de 1982 a julho de 2019), em decorrência da disponibilidade de dados.

A série de dados de precipitação é obtida através da metodologia de Thiessen, aplicada à bacia do Alto Jaguaribe, com base nos registros pluviométricos das estações da rede operada pela FUNCEME (Fundação Cearense de Meteorologia e Recursos Hídricos). A precipitação média mensal é empregada como variável de entrada nos cálculos dos índices que dependem desses dados pluviométricos.

A série de vazões do intervalo de 1961 a 2019 é proveniente ao estudo realizado pelo ANA sobre os reservatórios do semiárido brasileiro, incluindo o Açude Orós ([ANA, 2017](#)). Este estudo obteve as vazões a partir do modelo hidrológico MODHAC (Modelo Hidrológico Auto-Calibrável) para a bacia do Alto Jaguaribe.

Os valores de evapotranspiração potencial (Etp) foram obtidos por meio da aplicação do método proposto por Hargreaves (1974). Este método é de fácil utilização, pois fornece a Etp em função da temperatura média compensada, da umidade relativa do ar e de um coeficiente de correção que depende da latitude do local considerado. A Etp foi calculada por meio das temperaturas mensuradas pelas estações meteorológicas operadas pelas INMET (Instituto Nacional de Meteorologia) inclusas na bacia do Alto Jaguaribe.

Os índices VHI e NDVI são obtidos por meio da plataforma oferecida pela Administração Oceânica e Atmosférica Nacional (NOAA), apresentando-se na forma de pontos de grade. Para a análise da bacia do Alto Jaguaribe, procedeu-se à determinação da média dos valores correspondentes a região da bacia.

Foi realizado uma análise dos índices por meio de uma janela móvel de tempo e por meio de uma discretização temporal. Na análise discretizada foram considerados os três meses mais chuvosos da bacia (Fev-Mar-Abr) e a série de um ano completa (Jan-Dez) para a escala de 12 meses, resultando em um valor de índice para cada ano.

Já, na abordagem da janela móvel, foi gerado um valor de índice para cada mês tanto para a escala de 3 meses como de 12 meses. Em resumo, este estudo utilizou escalas de 3 e 12 meses para investigar a variabilidade da seca nas escalas de tempo inter-sazonal e inter-anual, respectivamente.

Importante salientar que os valores negativos para todos os índices indicam eventos secos e valores positivos eventos úmidos.

2.3. Métricas de análise

2.3.1. Informação Mútua - Mutual Information (MI)

A Informação Mútua (MI) estima a quantidade de informação sobre uma variável contida em outra (Sheueirell, 2017). Pode ser definida como uma medida não-paramétrica da covariância entre as duas variáveis. O MI é uma função da entropia, que é a quantidade de informação contida em uma variável. A entropia de Shannon para uma variável X aleatória é definida por Lathi (1968):

$$H(X) = E[-\log(p(X))] = - \sum_{i=1}^L p(x_i) \log_b p(x_i) \quad (1)$$

em que L é o comprimento da série temporal e b é a base do logaritmo. No caso de $p(x_i) = 0$, então $H(X) = 0$. A entropia conjunta de X e Y é:

$$H(X, Y) = - \sum_{i=1}^L p(x_i, y_i) \log_b p(x_i, y_i) \quad (2)$$

em que $p(x_i, y_i)$, é a probabilidade onde $X = x_i$ e onde $Y = y_j$. A informação mútua entre X e Y é:

$$MI(X, Y) = H(X) + H(Y) - H(X, Y) \quad (3)$$

MI estima a dependência entre duas variáveis (Shannon, 1948). Valores elevados de indicam que as duas variáveis têm uma forte dependência, MI perto de 0 indica independência entre elas.

O valor de Informação Mútua (MI) pode ser usado para quantificar a dependência linear e não linear (Bowden *et al.*, 2005). Isso torna o MI uma alternativa interessante ao uso do coeficiente de correlação, que só pode descrever padrões de dependência linear. O Índice de Informação Mútua (MI) possui um potencial relevante para abordar problemas hidrológicos, considerando que a relação entre as variáveis hidrológicas e os índices associados frequentemente apresenta uma natureza não linear. (Santos *et al.*, 2013).

Para o cálculo da informação mútua foi realizada a discretização da série temporal utilizando o método de frequências semelhantes, que é um algoritmo de discretização não supervisionada, que busca colocar o mesmo número de valores em cada intervalo.

2.3.2. Correlação

Foi escolhido o uso da correlação de Pearson como métrica de análise pois esta mensura a dependência linear entre duas variáveis. Historicamente, foi a primeira estimativa de correlação formal e, hoje, é o tipo de correlação mais utilizado. A formulação para obter o coeficiente da correlação de Pearson está descrita como segue:

$$r_{xy} = \frac{\sum (x_i - \bar{x}) \sum (y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum (x_i - \bar{x})^2} \sqrt{\sum (y_i - \bar{y})^2}} \quad (4)$$

em que $\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^N x_i$ corresponde à média de x . O coeficiente

r_{xy} varia de -1 a 1 e é uma medida estatística que avalia a relação linear entre duas variáveis em um conjunto de dados. Quando o coeficiente de correlação é próximo de 1, indica uma correlação positiva forte, ou seja, as variáveis aumentam ou diminuem juntas. Quando próximo de -1, indica uma correlação negativa forte, onde uma variável aumenta enquanto a outra diminui. Já uma correlação próxima de 0 indica uma relação fraca ou inexistente entre as variáveis.

3. Resultados e Discussão

A Fig. 2 mostra os gráficos de dispersão dos índices de seca para a escala 3 meses, para todos os meses do ano, dois a dois. Ao analisá-la é visto que os gráficos referentes aos índices (RDIST, SPI e SPEI), indicam uma alta correlação positiva, principalmente entre os índices RDIST e SPI. Interessante analisar que o há uma maior semelhança entre os índices RDIST e SPI do que entre SPEI e SPI, sendo que os índices RDIST e SPEI utilizam os mesmos dados de entrada (ETP e Precipitação). Esse comportamento pode ser esclarecido pela presença de uma variabilidade pequena nos valores da Evapotranspiração de Referência (ETP) ao longo dos meses, o que resulta em uma notável correlação entre os índices RDIST e SPEI com o Índice de Precipitação Padronizado (SPI). Notavelmente, a correlação é mais acentuada no caso do RDIST em comparação com o SPEI, uma vez que o cálculo do primeiro envolve a divisão da precipitação pela ETP, tornando a correlação deste com o SPI mais sensível à variabilidade da ETP. Tsakiris *et al.* (2005) apresenta um estudo de caso com correção do RDIST com SPI de 0,98, no qual explica essa relação pela pequena variabilidade de ETP no local.

Um ponto interessante é que os gráficos referentes a RDIST/SPEI, bem como SPEI/SPI, apresentam comportamento bastante semelhante: os valores mais positivos apresentam maior concordância e os mais negativos, menor concordância. O EDDI apresenta gráficos com uma semelhança a uma reta positiva, contudo, com maior dispersão ao comparar aos gráficos entre os 3 índices meteorológicos.

Os dois índices de vegetação (VHI e NDVI) apresentaram uma significativa correlação linear positiva com elevada dispersão dos dados. O SRI apresentou resultados concentrados entre -2 e 1, o que mostra que apresenta maior sensibilidade para eventos de seca.

Ao analisar a Fig. 3, onde foram elaborados gráficos referentes somente ao trimestre de fevereiro, março e abril, dois a dois, o comportamento geral dos gráficos é semelhante, todos apresentam uma correlação positiva, é notório uma correlação mais elevada no bloco dos três

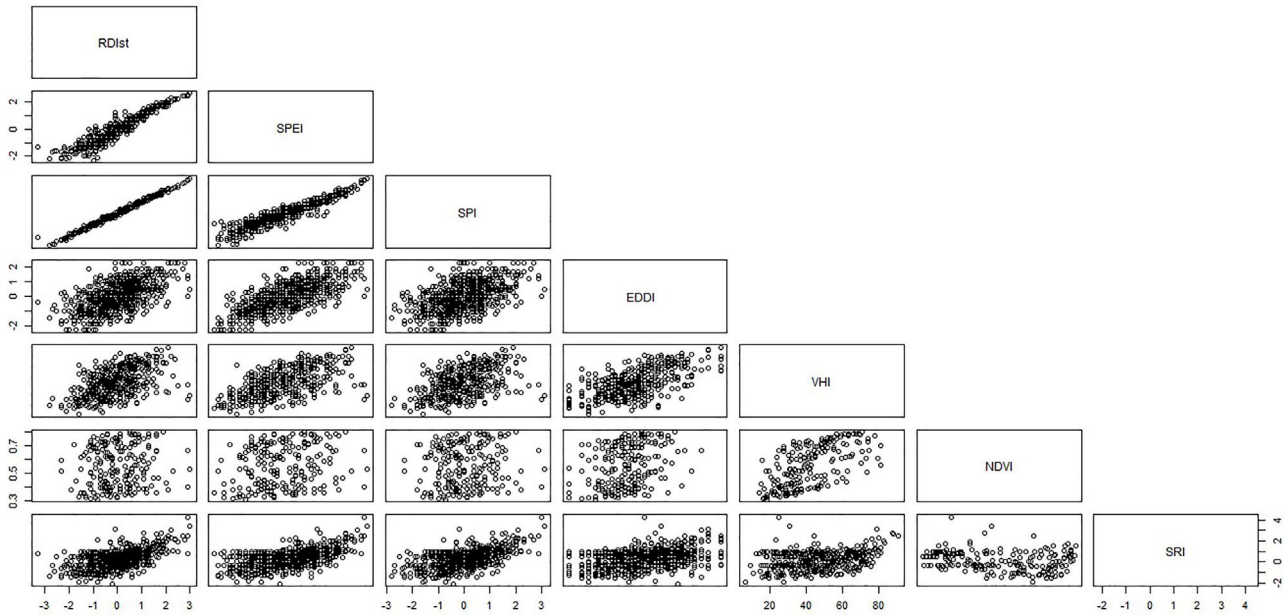


Figura 2 - Índices de seca para a escala de 3 meses (janela móvel) plotados 2 a 2.

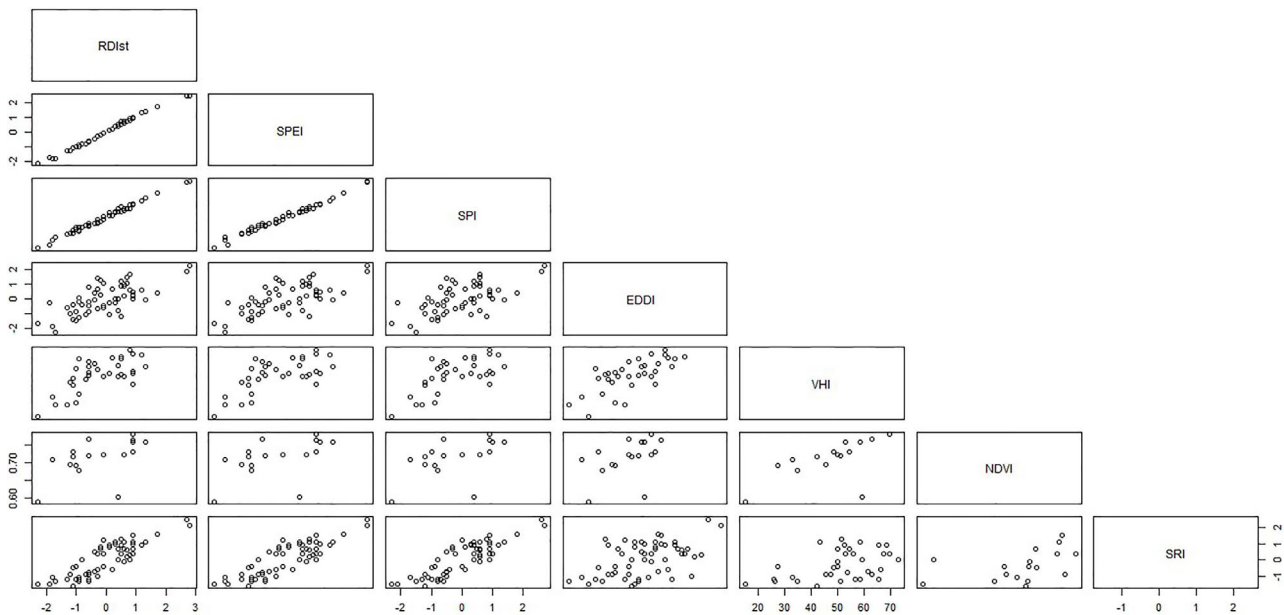


Figura 3 - Índices de seca para a escala de 3 meses (Fev-Mar-Abr) plotados 2 a 2.

índices meteorológicos (RDist, SPI e SPEI). Um ponto relevante observado é que os gráficos do SRI com os três primeiros índices meteorológicos apresentaram uma disposição dos valores de forma mais semelhante à uma reta, o que indica uma correlação mais elevada quando se analisa somente o trimestre chuvoso. Esse resultado pode ser explicado pelo fato que na região semiárida do Ceará a maioria dos rios são intermitentes, assim, no segundo semestre apresentam vazão próxima de zero, pois é a fase sem chuvas da região. Com isso, os valores nesses meses são constantes em toda a série próximo de 1.

Os resultados dos gráficos dos índices de escala 12 foram plotados dois a dois na Fig. 4, apresentam padrão semelhante com a Fig. 2, exibindo uma diferença acentuada em relação aos índices de vegetação NDVI e VHI, os quais apresentaram a disposição dos pontos bem mais semelhante a uma reta, e ao índice SRI, que, de forma geral, apresentou um comportamento mais linear nos gráficos plotados.

Outro ponto de diferença é que o comportamento dos valores negativos entre os índices SPI e SPEI, e SPI e RSist apresenta menor dispersão, com isso, demonstrando

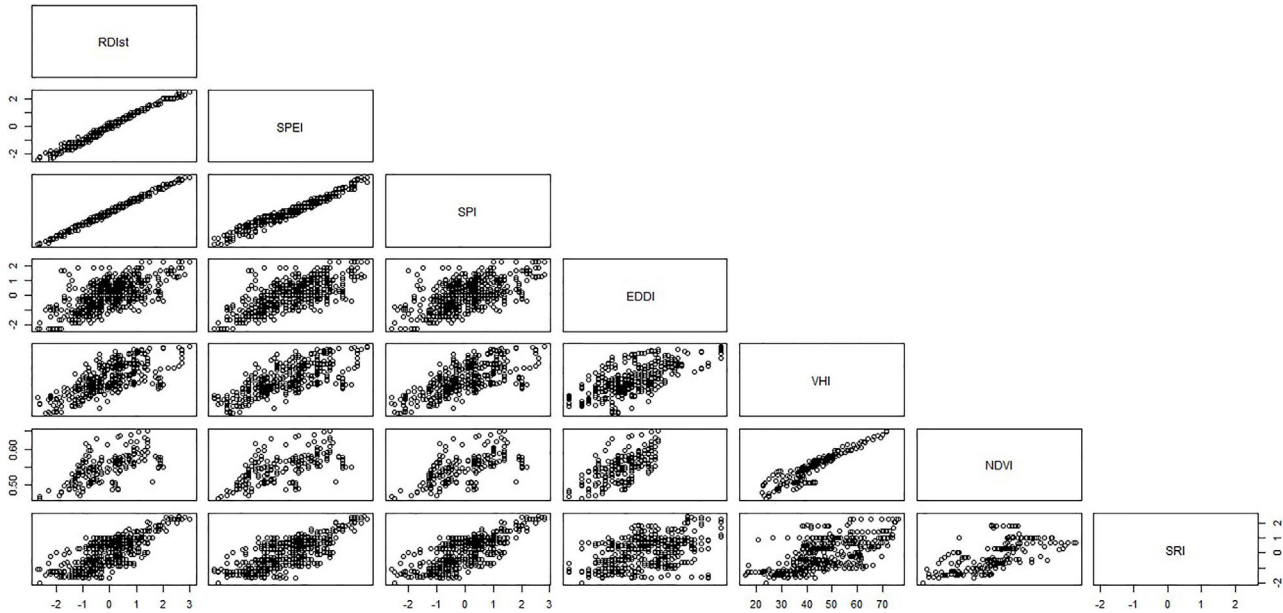


Figura 4 - Índices de seca para a escala de 12 meses (janela móvel) plotados 2 a 2.

maior concordância de identificação de eventos secos na escala de 12 meses. Isso pode ser explicado pelo fato de haver menor variabilidade da ETP em escala de 12 meses do que de 3 meses.

Os gráficos relativos aos índices de seca de escala 12 discretizados plotados dois a dois (Fig. 5) apresentaram comportamentos bastante similares ao da Fig. 3 apresentando uma diferença mais relevante nos gráficos do índice de vegetação NDVI, o qual mostrou comportamentos bem mais semelhantes a uma reta.

3.1. Correlação

A Fig. 6 (a) apresenta a matriz de correlação entre os índices com escala de 3 meses em janela móvel. Há um bloco de forte correlação positiva entre os três índices meteorológicos (SPI, SPEI, RD1st). O NDVI apresenta baixa correlação com os índices meteorológicos, correlação negativa com o índice hidrológico (SRI) e correlação significativa positiva com o outro índice de vegetação VHI.

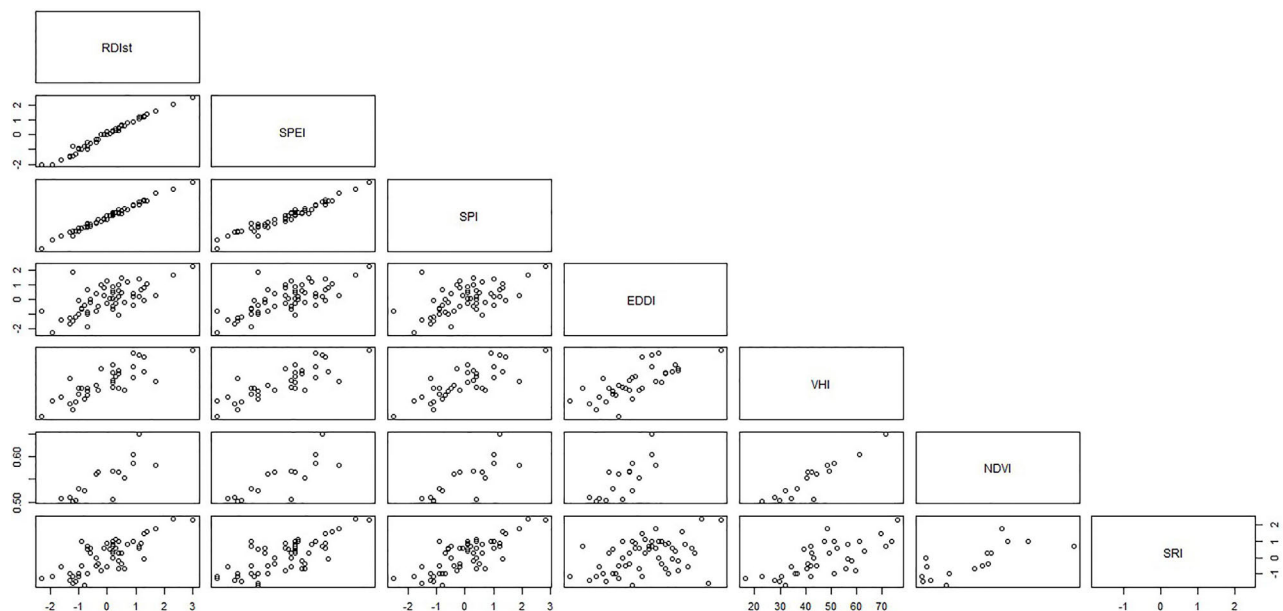


Figura 5 - Índices de seca para a escala de 12 meses (Jan-Dez) plotados 2 a 2.

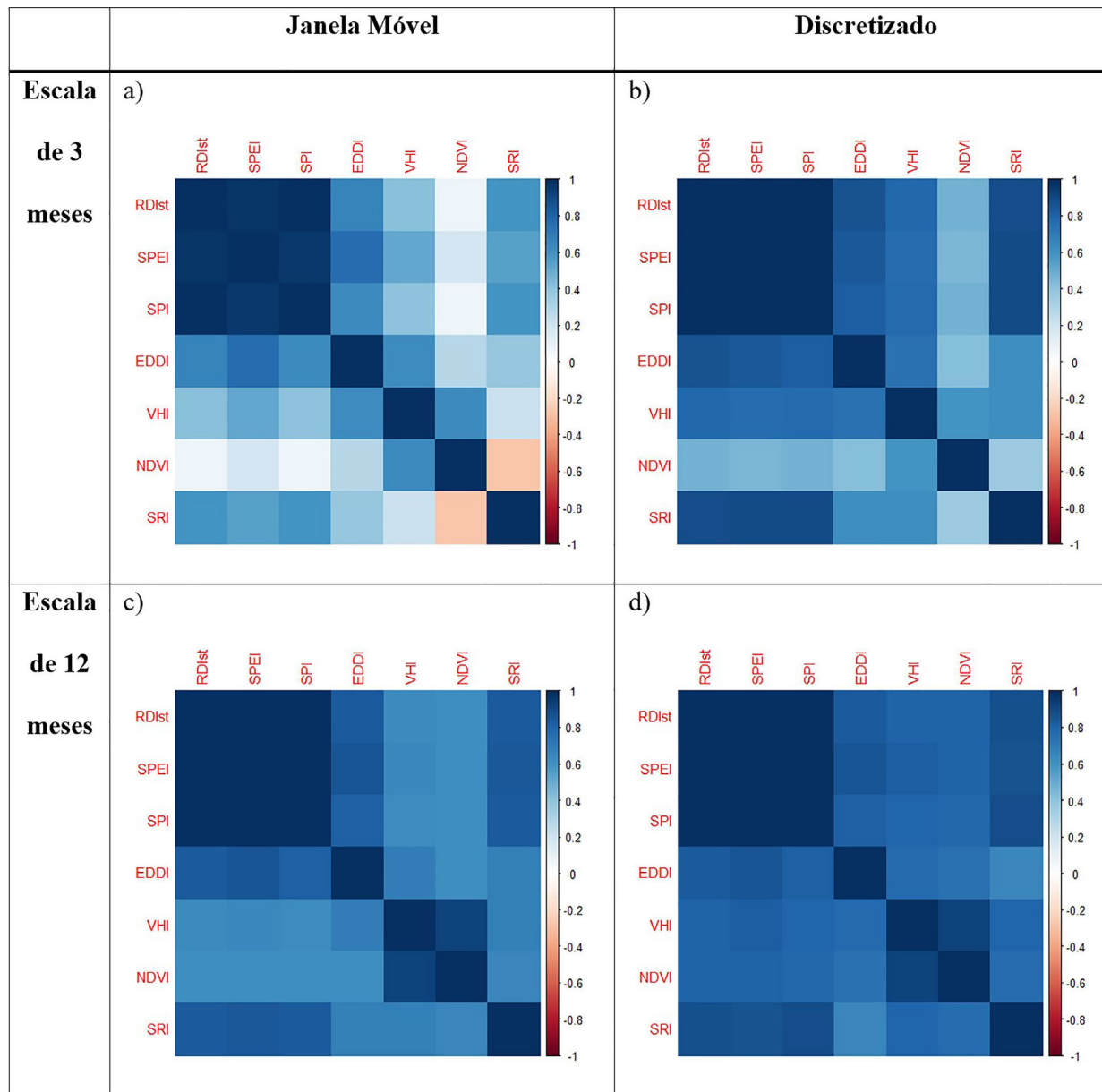


Figura 6 - Matriz de Correlação entre os índices. (a) Matriz de correlação entre índices com escala de 3 meses em janela móvel. (b) Matriz de correlação entre índices com escala de 3 meses discretizados. (c) Matriz de correlação entre índices com escala de 12 meses em janela móvel. (d) Matriz de correlação entre índices com escala de 12 meses discretizados.

A [Fig. 6 \(b\)](#) ilustra a matriz de correlação entre os índices com escala de 3 meses discretizados. É possível observar que existem três blocos de índices, os quais apresentam valor de correlação mais elevado. Sendo, um bloco representado pelos índices meteorológicos (RDlst, SPEI, SPI, EDDI), contudo, o EDDI apresentou valor de correlação um pouco reduzido em relação aos outros, o que mostra que este apresenta informações diferentes sobre a situação de seca. Outro bloco é o relativo à condição da vegetação, composto pelo VHI e NDVI. Por fim, tem o índice SRI, o qual está relacionado à seca hidrológica e que apresentou maior correlação com os índices meteorológicos,

sem o EDDI, do que os de condição da vegetação. Ao comparar com a [Fig. 6 \(a\)](#) é visto que há uma tendência de aumento da correlação em todos os pares de índices.

A [Fig. 6 \(c\)](#) apresenta a matriz de correlação entre índices com escala de 12 meses em janela móvel. Os índices apresentam uma correlação positiva elevada de forma geral, com dois blocos de fácil identificação: um dos três índices meteorológicos (SPI, SPEI e RDlst) e um dos dois índices de vegetação (NDVI e VHI). Ao comparar com a [Fig. 6 \(a\)](#), que apresenta as correlações em escala de 3 meses, há um aumento no valor da correlação de forma significativa entre os índices, princi-

palmente, em relação aos índices EDDI, VHI, NDVI e SRI.

Ao analisar a Fig. 6 (d), a qual representa a matriz referente aos índices de escala 12 discretizados, é observado grande semelhança com a anterior, porém com uma redução de correlação entre o SRI e os três primeiros índices meteorológicos, em decorrência, provavelmente, da computação de dados de vazão do segundo semestre do ano, no qual, no semiárido brasileiro apresenta muito valores nulos.

Nas quatro figuras o índice hidrológico está mais fortemente correlacionado aos índices meteorológicos do

que aos índices de vegetação, uma vez que a precipitação desempenha um papel crucial na geração de condições de seca hidrológica, superando a influência da Evapotranspiração de Referência (PET). Isso é evidenciado pela baixa correlação entre o índice hidrológico e o Índice de Seca Meteorológica Padronizado (EDDI), que depende exclusivamente da PET.

3.2. Informação mútua

Em relação aos resultados de Informação Mútua gerados entre os índices (ver Fig. 7), é observado um padrão similar a correlação (análise linear). É de fácil visualiza-

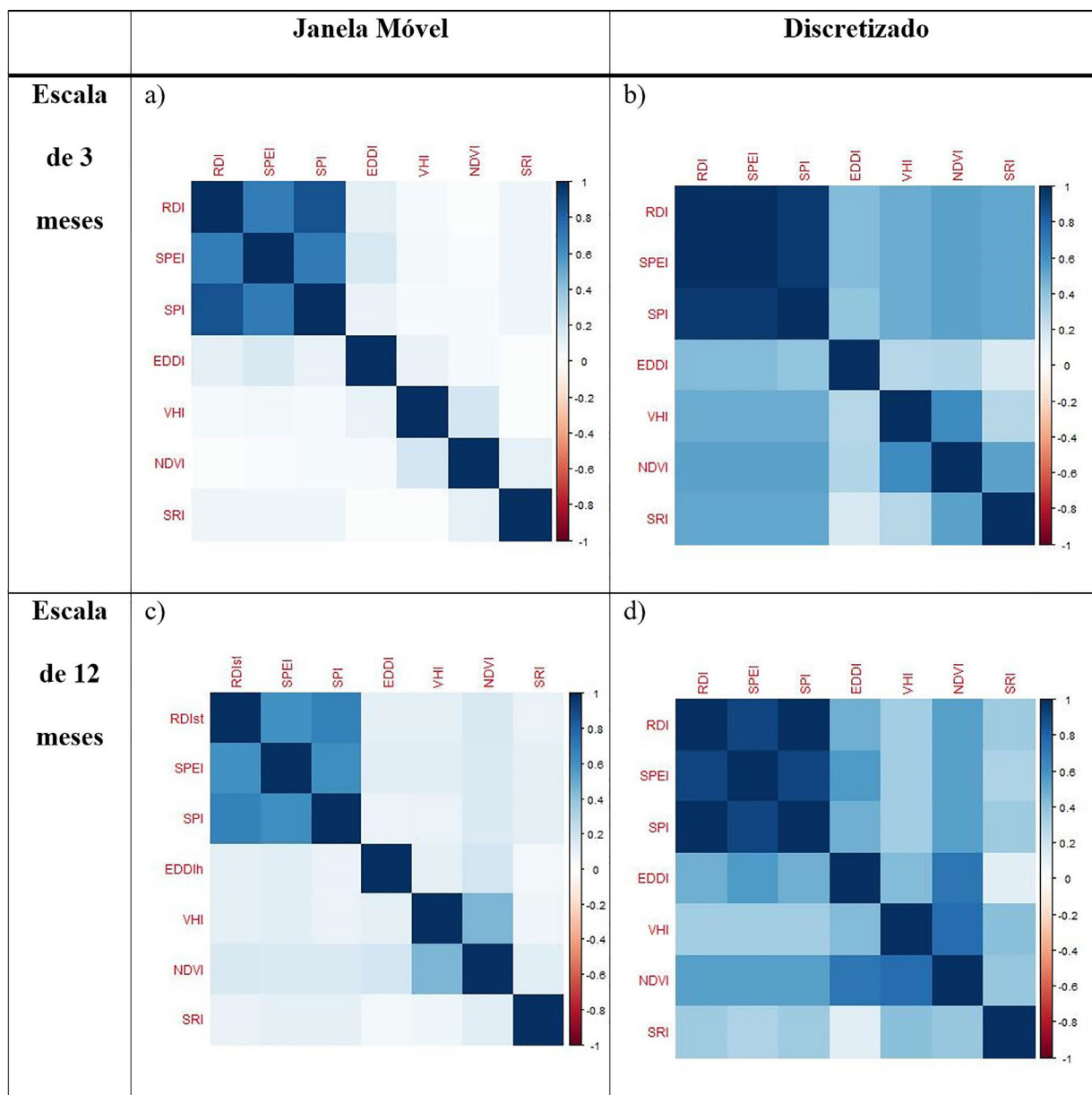


Figura 7 - Matrizes de Informação Mútua entre índices. a) Matriz de informação mútua entre índices com escala de 3 meses em janela móvel. b) Matriz de informação mútua entre índices com escala de 3 meses discretizados. c) Matriz de informação mútua entre índices com escala de 12 meses em janela móvel. d) Matriz de informação mútua entre índices com escala de 12 meses discretizados.

ção a formação de dois blocos de índices com valores de informação mútua elevados, um dos índices meteorológicos e dos de vegetação. Em relação ao EDDI, como na análise linear, ele também apresenta um valor de informação mútua menor com os outros índices meteorológicos, do que o que eles têm entre si, mostrando que ele apresenta informações sobre a seca diferentes dos outros índices meteorológicos. Na escala de 12 meses discretizado, o Índice de Severidade de Seca (EDDI) demonstra uma maior informação mútua com o Índice de Vegetação NDVI em comparação com os outros índices meteorológicos, em concordância com [Hobbins et al. \(2016\)](#). Isso indica um alarme precoce de seca pelo EDDI, visto que ele já sinaliza o efeito subsequente, considerando o impacto na vegetação.

3.3. Propagação temporal da seca

Analisando a correlação móvel entre os índices de escala 3 e o SPI-3 (Fev-Mar-Abr) na [Fig. 8](#), é possível observar que a conjuntura apresentada corrobora com o que foi definido, por [Van Loon \(2015\)](#), como funciona a propagação da seca, evoluindo de uma seca meteorológica para uma hidrológica, passando pela seca da vegetação. Esse comportamento é confirmado vendo que os índices de vegetação (NDVI e VHI) apresentam uma maior correlação com o SPI-3 (FMA) no trimestre seguinte (MAM), mostrando a influência da seca meteorológica no estado da vegetação. O SRI-3 apresenta uma maior correlação nos trimestres seguintes (MAM e AMJ), confirmando a evolução da seca meteorológica para a seca hidrológica. Inte-

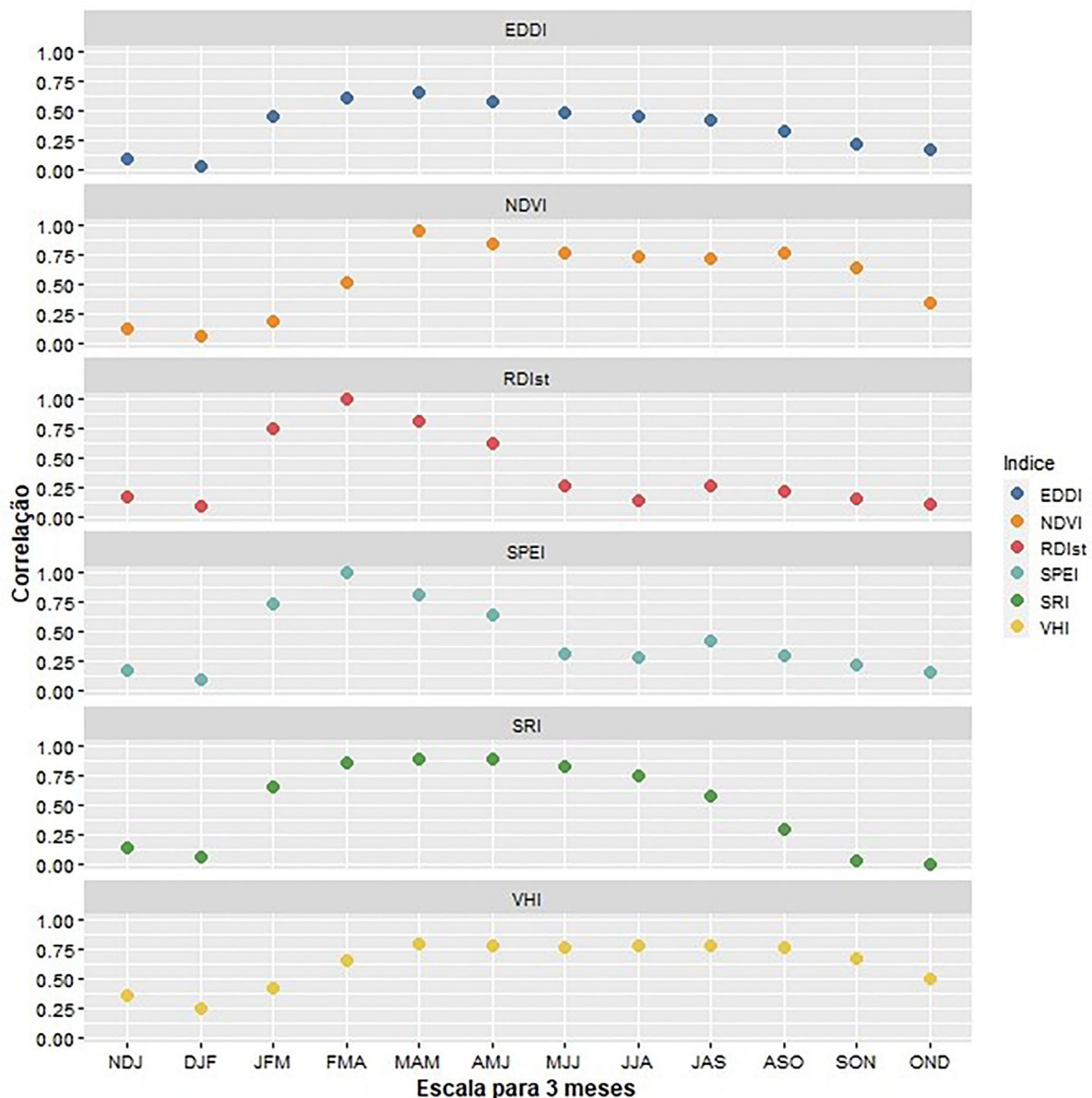


Figura 8 - Correlação entre o SPI-3 (Fev-Mar-Abr) e os outros índices de seca calculada de forma móvel.

ressante observar que o EDDI-3 apresentou uma maior correlação no trimestre seguinte, mostrando que este índice pode indicar um alerta prévio de stress na vegetação, como descrito por [Hobbins *et al.* \(2016\)](#).

4. Conclusões

Neste estudo, avaliou-se conjuntamente o comportamento de sete índices de seca, sendo estes: RDIst, SPEI, SPI, EDDI, VHI, NDVI e SRI. Foi avaliada a relação entre índices relacionados a diferentes tipos de seca aplicados a uma região semiárida, utilizando como estudo de caso a bacia do Alto Jaguaribe, no Ceará.

Os resultados desse estudo mostraram o comportamento de diferentes índices que representam os três tipos de seca, permitindo uma avaliação ampla da seca para uma região semiárida. Esta avaliação ampla permite verificar como os índices agregam diferentes informações para detecção de seca e como discutir quais índices mais adequados para detecção de cada tipo de seca.

Os resultados dos índices meteorológicos SPI e SPEI apresentaram semelhança elevadas, principalmente, quanto maior a escala de tempo agregado, em concordância com [Liu *et al.* \(2018\)](#), o qual obteve valores de correlação elevados entre eles (r variando entre 0,969, e 0,996) para a escala de 12 meses. O RDIst apresentou correlações em relação ao SPI mais elevadas do que do SPEI com SPI (r variando entre 0,997 e 0,998) o que indica que para detecção da seca o RDIst e SPI agregam o mesmo tipo de informação. O EDDI, contudo, apresentou um comportamento bem distinto, com correlações mais baixas em relação aos outros índices meteorológicos (r variando entre 0,639 e 0,860), indicando que para detecção este traz informações sobre a seca não detectadas pelos outros. Os pares de índices SPI-SPEI e RDIst-SPEI apresentam maior concordância para detectar eventos não secos e maior dispersão para detectar eventos de seca, tanto na escala de 3 meses, como de 12 meses.

Os três índices meteorológicos (SPI, SPEI e RDIst) apresentaram, tanta uma alta correlação, como um alto valor de informação mútua, indicando alta dependência linear e não-linear. O mesmo comportamento ocorreu entre os dois índices de vegetação (VHI e NDVI). Interessante ver que o EDDI-12 apresentou um valor de informação mútua mais alto em relação ao NDVI o que indica um alarme precoce deste, pois estaria indicando a seca da vegetação quando analisado em escalas mais elevadas. Isto concorda com [Hobbins *et al.* \(2016\)](#) que estabelece o EDDI como um índice para alerta precoce de seca.

Neste estudo é analisado a propagação de seca ao calcular a correlação entre os índices com escala 3 e o SPI-3 para o agregado de meses fevereiro-março-abril. Este mostra, claramente, o fenômeno de propagação de seca, pois as maiores correlações dos índices de vegetação (VHI e NDVI) e hidrológico (SRI) ocorrem no agregado de

meses posterior (março-abril-maio) e os valores mais altos de correlação dos dois índices meteorológicos (RDIst e SPEI) ocorrem no mesmo agregado de meses (fevereiro-março-abril) do SPI-3. O EDDI, todavia, apresenta maior correlação no agregado posterior, o que corrobora para a ideia que apresenta um comportamento diferente que os outros índices meteorológicos e que, assim, necessita de estudos futuros para analisar melhor como funciona sua detecção da seca.

Recomenda-se que investigações futuras contemplem a análise comparativa de índices hidrológicos adicionais, para além do SRI, juntamente com a realização de uma análise mais rigorosa e aprofundada do índice EDDI. Adicionalmente, sugere-se a exploração da aplicabilidade desses índices em outras escalas temporais frequentemente empregadas, tais como períodos de agregação de 6 e 48 meses.

Referências

- ABATZOGLOU, JOHN T.; MCEVOY, D.J.; REDMOND, K.T. The west wide drought tracker: drought monitoring at fine spatial scales. **Bulletin of the American Meteorological Society**, v. 98, n. 9, p. 1815-1820, 2017. doi
- AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS (ANA). **Reservatórios do Semiárido Brasileiro: Hidrologia, Balanço Hídrico e Operação**. Brasília: ANA, 2017.
- AGWATA, J. A review of some indices used for drought studies. **Civil and Environmental Research**. v. 6, n. 2, 2014.
- ASADI ZARCH, M.A.; MALEKINEZHAD, H.; MOBIN, M.H.; DASTORANI, M.T.; KOUSARI, M.R. Drought monitoring by reconnaissance drought index (RDI) in Iran. **Water Resources Management**, v. 25, p. 3485-3504, 2011.
- 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, n. 2, p. 215-226, 2011. doi(ASCE)
- BOWDEN, G.J.; DANDY, G.C.; MAIER, H.R. Input determination for neural network models in water resources applications. Part 1. Background and methodology. **Journal of Hydrology**, v. 301, n. 1, p. 75-92, 2005. doi
- CANCELLIERE, A. *et al.* Drought forecasting using the standardized precipitation index. **Water Resources Management**, v. 21, p. 801-819, 2007.
- DAI, A.; TRENBERTH, K.E.; QIAN, T. A global dataset of Palmer Drought Severity Index for 1870-2002: Relationship with soil moisture and effects of surface warming. **Journal of Hydrometeorology**, v. 5, n. 6, p. 1117-1130, 2004. doi
- ESLAMIAN, S.; OSTAD-ALI-ASKARI, K.; SINGH, V.P.; DALEZIOS, N.R.; GHANE, M.; *et al.* A review of drought indices. **Int. J. Constr. Res. Civ. Eng**, v. 3, p. 48-66, 2017.
- HOBBINS, M.T.; WOOD, A.; MCEVOY, D.J.; HUNTINGTON, J.L.; MORTON, C.; *et al.* The evaporative demand drought index. Part I: Linking drought evolution to variations in evaporative demand. **Journal of Hydrometeorology**, v. 17, n. 6, p. 1745-1761, 2016. doi

- KOGAN, F.N. Operational space technology for global vegetation assessment. **Bulletin of the American Meteorological Society**, v. 82, n. 9, p. 1949-1964, 2001. doi
- KOGAN, F.; SALAZAR, L.; ROYTMAN, L. Forecasting crop production using satellite-based vegetation health indices in Kansas, USA. **International Journal of Remote Sensing**, v. 33, n. 9, p. 2798-2814, 2012. doi
- KOUSARI, M.R.; DASTORANI, M.T.; NIAZI, Y.; SOHEILI, E.; HAYATZADEH, M.; *et al.* Trend detection of drought in arid and semi-arid regions of Iran based on implementation of reconnaissance drought index (RDI) and application of non-parametrical statistical method. **Water Resources Management**, v. 28, p. 1857-1872, 2014.
- KRIEGLER, F.J. Preprocessing transformations and their effects on multispectral recognition. In: **Proceedings of the Sixth International Symposium on Remote Sensing of Environment**, p. 97-131, 1969.
- LATHI, B.P. **An Introduction to Random Signals and Information Theory**. Scanton: International Textbook Company, 488 p., 1968.
- LI, J.; ZHOU, S.; HU, R. Hydrological drought class transition using SPI and SRI time series by loglinear regression. **Water Resources Management**, v. 30, p. 669-684, 2016.
- LIU, L.; HONG, Y.; BEDNARCZYK, C.N.; YONG, B.; SHAFER, M.A.; *et al.* Hydro-climatological drought analyses and projections using meteorological and hydrological drought indices: a case study in Blue River Basin, Oklahoma. **Water Resources Management**, v. 26, p. 2761-2779, 2012.
- LIU, X.; ZHU, X.; PAN, Y.; BAI, J.; LI, S. Performance of different drought indices for agriculture drought in the North China Plain. **Journal of Arid Land**, v. 10, p. 507-516, 2018. doi
- MARTINS, E.S.P.R.; COELHO, C.; HAARSMAN, R.; OTTO, F.; KING, A.; *et al.* A multimethod attribution analysis of the prolonged northeast Brazil hydrometeorological drought (2012-16). Explaining extreme events of 2016 from a climate perspective. **Special Supplement to the Bulletin of the American Meteorological Society**, v. 99, n. 1, p. 65-71, 2017. doi
- MCKEE, T.B.; DOESKEN, N.J.; KLEIST, J. The relationship of drought frequency and duration to time scales. In: **Proceedings of the 8th Conference on Applied Climatology**, v.1, p. 179-183, 1993.
- MEDEIROS, P.H.A.; DE ARAÚJO, J.C.; MAMEDE, G.L.; CREUTZFELDT, B.; GÜNTNER, A.; *et al.* Connectivity of sediment transport in a semiarid environment: A synthesis for the Upper Jaguaribe Basin, Brazil. **Journal of Soils and Sediments**, v. 14, p. 1938-1948, 2014. doi
- PALMER, W.C. **Meteorological Drought**. Washington: Weather Bureau, 1965.
- PONTES FILHO, J.D.; SOUZA FILHO, F.D.A.; MARTINS, E.S.P.R.; STUDART, T.D.C. Copula-based multivariate frequency analysis of the 2012-2018 drought in Northeast Brazil. **Water**, v. 12, n. 3, p. 834, 2020. doi
- RABELO, U.P.; LIMA NETO, I.E. Efeito de secas prolongadas nos recursos hídricos de uma região semiárida: Uma análise comparativa para o Ceará. **Revista DAE**, v. 66, n. 212, p. 61-79, 2018.
- ROCHA, R.V.; SOUZA FILHO, F.A.; SILVA, S.M.O. Análise da relação entre a precipitação média do reservatório Orós, Brasil-Ceará, e os índices PDO e AMO Através da análise de changepoints e transformada de ondeletas. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 34, n. 2, p. 139-149, 2019. doi
- SANTOS, J.F.; PORTELA, M.M.; PULIDO CALVO, I. Dimensionality reduction in drought modelling. **Hydrological Processes**, v. 27, n. 10, p. 1399-1410, 2013. doi
- SHAHABFAR, A.; EITZINGER, J. Spatio-temporal analysis of droughts in semi-arid regions by using meteorological drought indices. **Atmosphere**, v. 4, n. 2, p. 94-112, 2013. doi
- SHANNON, C.E. A mathematical theory of communication. **The Bell system Technical Journal**, v. 27, n. 3, p. 379-423, 1948.
- SHEFFIELD, J.; WOOD, E.F.; CHANEY, N.; GUAN, K.; SARDRI, S.; *et al.* A drought monitoring and forecasting system for sub-Sahara African water resources and food security. **Bulletin of the American Meteorological Society**, v. 95, n. 6, p. 861-882, 2014. doi
- SCHEUERRELL, M.D. **Muti: An R Package for Computing Mutual Information**. Version v1.0.0. Zenodo. Available at <http://doi.org/10.5281/zenodo.439391>.
- SHIN, J.Y.; CHEN, S.; LEE, J.H.; KIM, T.W.; *et al.* Investigation of drought propagation in South Korea using drought index and conditional probability. **Terrestrial, Atmospheric & Oceanic Sciences**, v. 29, n. 2, p. 1-11, 2018. doi
- SHUKLA, S.; WOOD, A.W. Use of a standardized runoff index for characterizing hydrologic drought. **Geophysical Research Letters**, v. 35, n. 2, p. 1-7, 2008. doi
- SOBRAL, B.S.; OLIVEIRA JÚNIOR, J.F.; DE GOIS, G.; PEREIRA JÚNIOR, E.R.; *et al.* Spatial variability of SPI and RDIst drought indices applied to intense episodes of drought occurred in Rio de Janeiro State, Brazil. **International Journal of Climatology**, v. 38, n. 10, p. 3896-3916, 2018. doi
- SOUZA FILHO, F.A.; LALL, U. Modelo de previsão de vazões sazonais e interanuais. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 9, n. 2, p. 61-74, 2004.
- TABARI, H.; ABGHARI, H.; HOSSEINZADEH TALAEE, P. Temporal trends and spatial characteristics of drought and rainfall in arid and semiarid regions of Iran. **Hydrological Processes**, v. 26, n. 22, p. 3351-3361, 2012. doi
- TIGKAS, D.; VANGELIS, H.; TSAKIRIS, G. Drought and climatic change impact on streamflow in small watersheds. **Science of the Total Environment**, v. 440, p. 33-41, 2012. doi
- TSAKIRIS, G.; VANGELIS, H.J.E.W. Establishing a drought index incorporating evapotranspiration. **European Water**, v. 9, n. 10, p. 3-11, 2005.
- TSAKIRIS, G.; PANGALOU, D.; VANGELIS, H. Regional drought assessment based on the Reconnaissance Drought Index (RDI). **Water Resources Management**, v. 21, p. 821-833, 2007. doi
- TUCKER, C.J. Red and photographic infrared linear combinations for monitoring vegetation. **Remote Sensing of Environment**, v. 8, n. 2, p. 127-150, 1979. doi
- VICENTE-SERRANO, S.M.; BEGUERÍA, S.; LÓPEZ-MORENO, J.I. A multiscalar drought index sensitive to global

warming: the standardized precipitation evapotranspiration index. **Journal of Climate**, v. 23, n. 7, p. 1696-1718, 2010. [doi](#)

VAN LOON, A.F. Hydrological drought explained. **Wiley Interdisciplinary Reviews: Water**, v. 2, n. 4, p. 359-392, 2015. [doi](#)

WANG, D.; HEJAZI, M.; CAI, X.; VALOCCHI, A.J.; *et al.* Climate change impact on meteorological, agricultural, and hydrological drought in central Illinois. **Water Resources Research**, v. 47, n. 9, p. 1-13, 2011. [doi](#)

WANG, H.; LIN, H.; LIU, D. Remotely sensed drought index and its responses to meteorological drought in Southwest China. **Remote Sensing Letters**, v. 5, n. 5, p. 413-422, 2014. [doi](#)

WILHITE, D.A. Drought as a natural hazard: Concepts and definitions. **Drought: A Global Assessment**, v. 1, n. 1, p. 3-18, 2000.



License information: This is an open-access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License (type CC-BY), which permits unrestricted use, distribution and reproduction in any medium, provided the original article is properly cited.