

Artigo

Homogeneidade, Eventos Extremos e suas Causas Climáticas: Bacia Hidrográfica do Rio São Francisco

Lucas Henrique dos Santos Rocha¹ , Djane Fonseca da Silva¹, Mary Toshie Kayano², Osmar Evandro Toledo Bonfim³

¹*Instituto de Ciências Atmosféricas, Universidade Federal de Alagoas, Maceió, Alagoas, AL, Brasil.*

²*Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, São Paulo, SP, Brasil.*

³*Universidade Federal de Pelotas, Pelotas, Rio Grande do Sul, RS, Brasil.*

Recebido em: 15 de Agosto de 2020 - Aceito em: 15 de Outubro de 2020

Resumo

Objetiva-se nessa pesquisa identificar áreas climatologicamente homogêneas, identificar e quantificar os eventos extremos ocorridos nesta Bacia utilizando o Índice de Precipitação Normalizado (SPI, sigla em inglês), bem como conhecer suas causas climáticas. Foram utilizados dados de precipitação da ANA com período de 1912 a 2019, e usadas vários métodos estatísticos. Áreas pluviometricamente homogêneas identificadas foram o Baixo São Francisco/Submédio São Francisco; Médio São Francisco e Alto São Francisco, com períodos chuvosos e sistemas atuantes distintos. O MSF apresentou os extremos mais intensos e o BSF apresentou os eventos menos intensos da Bacia. Ocorreram mais episódios de chuva moderada, severa ou extrema em toda a região do rio São Francisco do que de secas moderada, severa e extrema, conforme o SPI. Através da Análise de Ondaletas verificou-se que estes índices oscilam em várias escalas temporais: sazonal, semestral, interanual, a do ENOS, ENOS estendido, a do Dipolo do Atlântico, a dos ciclos solares e da Oscilação Interdecadal do Pacífico.

Palavras-chave: SPI, análise de agrupamentos, análises de ondaletas.

Homogeneity, Extreme Events and Climatic Causes: São Francisco River Basin

Abstract

The objective of this research is to identify climatologically homogeneous areas, to identify and quantify the extreme events that occurred in this Basin using the Standardized Precipitation Index (SPI), as well as to know its climatic causes. ANA precipitation data from 1912 to 2019 was used, and various statistical methods were used. Rainfall homogeneous areas are the Lower São Francisco/Middle São Francisco, Middle São Francisco and Upper São Francisco, with different rainy periods and active systems. MSF presented the most intense extremes and BSF presented the least intense events in the Basin. There were more episodes of moderate, severe or extreme rain in the entire São Francisco River region than of moderate, severe and extreme droughts, according to the SPI. Through Wave Analysis it was found that these indices fluctuate in various time scales: seasonal, half-yearly, inter-annual, that of ENSO, extended ENSO, that of the Atlantic Dipole, that of solar cycles and the Interdecadal Oscillation of the Pacific.

Keywords: SPI, cluster analysis, wavelet analysis.

1. Introdução

Sendo uma das Bacias hidrográficas mais importantes para o Brasil, seu potencial hídrico é de grande relevância para a geração de energia elétrica, com 10.000 MW de potência instalados à jusante de Barra (BA). Além

disso, essa importância está também no volume de água transportado pelo rio, por dentro da região semiárida, na sua contribuição histórica e econômica para fixação das populações ribeirinhas e criação das cidades hoje plantadas ao longo do vale (CBHSF, 2013). Vale ressaltar que

uma parte da Bacia Hidrográfica do rio São Francisco está contida em uma área significativa do Polígono das Secas, a qual é uma área propícia para que haja chuvas abaixo da média e longos períodos de estiagem. Entretanto, muitos afluentes que compõem o rio São Francisco são considerados perenes, e mesmo em tempos de pouca quantidade de precipitação o rio não seca (Silva e Clarke, 2004).

Por meio de ciclos, a variabilidade climática, produz deficiência e/ou excesso de chuvas em todo o globo, que em consequência, gera secas ou inundações. Os eventos climáticos de extremas intensidades demonstram um papel significativo no dia a dia das sociedades, seja por sua intensidade e frequência de ocorrência, seja pela vulnerabilidade socioambiental (Dos Santos *et al.*, 2017).

Com o aumento de eventos extremos no Brasil (Marengo, 2016), vem a necessidade de utilizar e desenvolver métodos capazes de possibilitar o estudo de tais casos. Para melhorar a capacidade de detecção e monitoramento de eventos pluviométricos em diferentes escalas de tempo os autores Mckee *et al.* (1993) desenvolveram um índice de precipitação padronizado, conhecido como Standardized Precipitation Index (SPI), o qual se destaca por permitir a caracterização do déficit ou do excesso de precipitação em uma determinada localidade, com sua flexibilidade temporal e simplicidade, e utilização de apenas dados mensais de precipitação (Pellegrino *et al.*, 2007). Tadesse *et al.* (2005), Macedo *et al.* (2010), Zhai *et al.* (2010), Blain e Kayano (2011), Uliana *et al.* (2015), Dos Santos *et al.* (2014), Bonfim e Da Silva (2017) e Da Silva *et al.* (2020) foram alguns dos trabalhos que utilizaram SPI para identificação, quantificação ou análise de eventos pluviométricos extremos.

Desta forma, o objetivo dessa pesquisa é após identificar áreas climatologicamente homogêneas, identificar e quantificar os eventos extremos ocorridos na Bacia Hidrográfica do rio São Francisco, bem como conhecer suas causas climáticas.

2. Materiais e Métodos

Segundo a Agência Nacional de Águas (CBHSF, 2013), com aproximadamente 2.800 km de extensão e ocupando áreas das regiões Nordeste e Sudeste brasileiros, o rio São Francisco abrange 7 Estados do país (Alagoas, Sergipe, Pernambuco, Bahia, Minas Gerais, Distrito Federal e Goiás) e, possui uma área total de cerca de 640.000 km², ocupando cerca de 7,51% da área total do Brasil. O potencial hídrico do rio São Francisco é essencial para a geração de energia elétrica, além do seu possível aproveitamento em projetos de irrigação dos excelentes solos situados às suas margens. Além disso, devido sua grande extensão, a Bacia está dividida em quatro regiões fisiográficas: Alto (ASF), Médio (MSF), Submédio (SMSF) e Baixo São Francisco (BSF) (Fig. 1).



Figura 1 - Bacia hidrográfica do rio São Francisco em relação ao Brasil. Fonte: Da Silva (2005).

Foram utilizados dados diários de precipitação de 26 estações pluviométricas disponibilizadas pela Agência Nacional de Águas (ANA), conforme a Tabela 1. Os períodos de dados das sub-bacias são distintos, ASF de 1949-2019, MSF de 1936-2017, SMSF de 1911-2018 e BSF de 1912-2000. Desse modo, optou-se em utilizar períodos distintos para não ficar restrito como período em comum de análise somente de 1949 a 2000.

A Análise de Componentes Principais (ACP) foi desenvolvida por Pearson em 1901, e é uma técnica estatística de análise multivariada que, através de transformações lineares, descreve a interrelação das variáveis, explicando estrutura de interdependência dessas e cria um novo conjunto com o número de variáveis inferior ao conjunto original. Para a ACP de um conjunto de dados, inicialmente deve-se obter os autovalores e os autovetores a partir da matriz de correlação ou da matriz de variância-covariância entre as variáveis desse conjunto (Preisendorfer, 1988; Farias *et al.*, 2005).

O número escolhido de Componentes Principais ocorrerá de acordo com o critério de truncamento de Kaiser, que considera como mais significativos os autovalores cujos valores sejam superiores à unidade (Garayalde *et al.*, 1986). Sendo os fatores comuns obtidos através da relação entre a matriz de autovetores (A) e a raiz quadrada do autovalor (λ), ou seja, o primeiro fator comum é obtido pela relação entre o primeiro autovetor e o primeiro autovalor (λ_1) e assim por diante (Wilks, 1995). Os fatores podem ser distribuídos espacialmente representando a contribuição (peso) destes em relação à variância total do conjunto de dados.

Com os dados utilizados na ACP ainda pode-se determinar semelhanças para classificação em grupos de

Tabela 1 - Estações pluviométricas utilizadas no estudo e suas respectivas sub-bacias.

Estação pluviométrica	Latitude (°)	Longitude (°)
Barra do Rio de Janeiro	-17,9581	-45,1022
Vargem Bonita	-20,33	-46,3661
Lassance	-17,89	-44,5767
Remanso	-9,625	-42,085
Formosa do Rio Preto	-11,05	-45,1833
Oliveira dos Brejinhos	-12,3161	-42,8956
Cabeceiras	-15,8008	-46,9247
Barreiro - DF (Brasília)	-15,8386	-47,6272
Rio Preto (Brasília)	-15,7922	-47,4328
Lagoa dos Patos	-16,9833	-44,6
São José do Egito	-7,4667	-37,2833
São José do Belmonte	-7,8667	-38,7833
Serra Talhada	-7,9833	-38,3
Triunfo	-7,8333	-38,1167
Exú (Novo Exú)	-7,5167	-39,7167
Serrita (Serrinha)	-7,9333	-39,3137
Lagoa Grande	-8,9989	-40,2731
Baixa Grande	-9,1469	-40,9644
Riacho Grande	-9,4667	-37,4667
Cacimbinhas	-9,4	-37
Mata Grande	-9,1333	-37,7333
Olho d'água das Flores	-9,5333	-37,2833
Pão de Açúcar	-9,7333	-37,4333
Porto da Folha	-9,9167	-37,2667
Canindé de São Francisco	-9,65	-37,8
Curralinho	-9,7	-37,6667

mesmas características hidroclimáticas. Desta forma, [Kumar e Duffy \(2009\)](#) puderam detectar regiões homogêneas dentro da Bacia do rio Colorado, e essa técnica foi utilizada nesta pesquisa para apontar regiões pluviometricamente homogêneas dentro das 4 sub-bacias do rio São Francisco, seguindo a metodologia usada por [Braga et al. \(2003\)](#), [Kumar e Duffy \(2009\)](#) e [Coutinho et al. \(2010\)](#).

Os métodos de agrupamentos têm por finalidade agrupar indivíduos em classes, de forma que os indivíduos pertencentes a essas classes mantenham características semelhantes em algum aspecto ([Guimarães et al., 2013](#)). Assim, nesta etapa foram submetidos à análise de agrupamentos (AA) os dados de precipitação das quatro sub-bacias do rio São Francisco, utilizando o software SPSS versão 20.

Essa estatística de análise multivariada tem como objetivo principal classificar os indivíduos de uma população que são conhecidos por suas características, ou seja, mostrar indivíduos semelhantes ([UNAL et al., 2003](#)). Como resultado da AA foi gerado o dendograma, que tem como objetivo, unifica-los em classes ou grupos sucessi-

vamente maiores através da utilização de alguma medida de similaridade ou de distância ([Guedes et al., 2010; 2012](#)).

Por fim, segundo [Macedo et al. \(2010\)](#), análise de agrupamentos é utilizada em processos de classificação e consiste em determinar o nível de similaridade ou dissimilaridade entre indivíduos, aplicando uma função de agrupamento a uma determinada variável. Para validar/reforçar os resultados da análise de agrupamentos, foram calculados os coeficientes de similaridade entre as precipitações das sub-bacias através do software SPSS versão 20, conforme método desenvolvido por [Jaccard \(1901\)](#) e também utilizado por [Souza et al. \(1997\)](#). O coeficiente de similaridade de Jaccard apresenta valor 1 se as amostras são idênticas e valor 0 se são completamente distintas, e de posse dos dados desse coeficiente foi construída a tabela com coeficientes de similaridade.

Utilizou-se o método estatístico SPI (Standardized Precipitation Index - Índice de Precipitação Normalizada), desenvolvido por [McKee et al. \(1993\)](#), o qual se mostrou como uma ferramenta extremamente útil para identificar e quantificar os eventos climáticos extremos tanto chuvosos quanto secos. O cálculo do SPI resulta em um valor adimensional para um período de tempo específico que corresponde a uma classe ([Tabela 2](#)).

Valores positivos equivalem a uma superioridade em relação à média, enquanto valores negativos são reflexos de uma inferioridade também em relação à média. Além disso, valores iguais a zero indicam valor do SPI igual à média de precipitação, como indica a [Tabela 2](#) em coerência com [McKee et al. \(1993\)](#).

A distribuição gama possui bom ajuste para variáveis contínuas que tenham limite inferior ou igual a zero e não possuem limite superior, por isso, é largamente utilizada para o estudo de séries históricas de precipitação ([Wilks, 2006 Apud Dos Santos et al., 2017](#)). A função gama é dada por:

$$g(x) = \frac{X^{\alpha - 1} * e^{-\frac{x}{\beta}}}{\beta^{\alpha} \Gamma(\alpha)} \text{ para } X > 0 \tag{1}$$

em que: $\alpha > 0$ parâmetro de forma; $\beta > 0$ parâmetro de escala; $x > 0$, a quantidade de precipitação (mm) e $\Gamma(\alpha)$ a função gama completa. Para estimativa dos parâmetros α e β da distribuição gama utilizou-se o método de:

Tabela 2 - Classificação do SPI. Adaptado de [McKee et al. \(1993\)](#).

Valores de SPI	Classes	Valores de SPI	Classes
≤ -2,00	Seca Extrema	-	-
-1,99 a -1,50	Seca Severa	0,50 a 0,99	Chuva Leve
-1,49 a -1,00	Seca Moderada	1,00 a 1,49	Chuva Moderada
-0,99 a -0,49	Seca Leve	1,50 a 1,99	Chuva Severa
-0,48 a 0,49	Quase Normal	≥ 2,00	Chuva Extrema

Fonte: [McKee et al. \(1993\)](#).

$$\alpha = \frac{1}{4A} \left(1 + \sqrt{1 + \frac{4A}{3}} \right) \quad (2)$$

$$\hat{\beta} = \frac{\bar{x}}{\alpha} \quad (3)$$

sendo \bar{x} , a precipitação média e

$$\alpha = \ln(\bar{x}) - \frac{\sum \ln(x)}{n} \quad (4)$$

em que o n é número de observações.

Deste modo, a distribuição acumulativa é então transformada em distribuição probabilidade normal com média igual a zero e desvio padrão igual a um. Em seguida, a probabilidade acumulada de ocorrência de cada valor mensal é estimada. Aplica-se a essa probabilidade a função normal inversa para encontrar o valor do SPI.

De acordo com [Dos Santos et al \(2017\)](#) o SPI nada mais é que a diferença da precipitação observada em relação à média do intervalo de tempo específico:

$$SPI = Zi = \frac{(Pi - \bar{Pi})}{\sigma_i} \quad (5)$$

em que Pi é a precipitação observada; \bar{Pi} e σ_i , são, respectivamente, a média e o desvio padrão da série ajustada.

Com os valores obtidos de SPI para cada estação de cada sub-bacia foram feitos gráficos de caixa tipo box plot comparativo entre os SPIs das sub-bacias, ambos através do Excel. Boxplot é um gráfico utilizado para avaliar a distribuição empírica dos dados e realiza uma análise comparativa dos dados amostrais de cada grupo. O boxplot é formado pelo primeiro e terceiro quartil e pela mediana. As hastes inferiores e superiores se estendem, respectivamente, do quartil inferior até o menor valor não inferior ao limite inferior e do quartil superior até o maior valor não superior ao limite superior. Essa estatística também funciona muito bem para a identificação e eliminação de valores discrepantes ([Santos et al., 2011](#)).

Os dados de precipitação foram tratados para gerar o índice de Prp e assim submetidos à Análise de Ondaleta (AO) para identificação das causas climáticas dos eventos extremos em cada sub-bacia do rio São Francisco. Essa identificação ocorre através da determinação das escalas temporais dominantes associadas a fenômenos climáticos. A AO é uma técnica eficiente para identificar as escalas de variabilidade dominantes em uma série temporal, juntamente com suas localizações no tempo ([Torrence e Compo, 1998](#)).

O índice de Prp se refere à anomalia mensal de precipitação, normalizada pelo respectivo desvio-padrão mensal, calculado através de:

$$A \text{ Varij} = \frac{(Varij - \overline{Vari})}{\sigma_i} \quad (6)$$

em que $A \text{ Varij}$ é a anomalia normalizada da precipitação no ano $j = 1, 2, 3, \dots, N$ e mês $i = 1, 2, 3, \dots, 12$; $Varij$ é a precipitação no ano $j = 1, 2, 3, \dots, N$ e mês $i = 1, 2, 3, \dots, 12$; \overline{Vari} e σ_i são a média climatológica e o desvio padrão do mês i .

O uso desse índice é justificado e utilizado por diversos autores como [Kousky e Chu \(1978\)](#), [Aceituno \(1988\)](#), [Andreoli et al. \(2004\)](#), [Kayano e Blain \(2007\)](#), [Da Silva \(2009\)](#); [Da Silva \(2017\)](#).

A ondaleta Morlet é complexa e possui características semelhantes aos de sinais meteorológicos, tais como simetria ou assimetria e variação temporal brusca ou suave. Estes critérios são adotados para a utilização da ondaleta para identificações de variações em escalas sinóticas, oscilações intra-sazonais e outras variações meteorológicas de diferentes escalas temporais ([Weng e Lau, 1994](#)) e é definida pela seguinte expressão:

$$\Psi(t) = e^{iW0t} e^{-t^2/2} \quad (7)$$

a qual representa uma onda modulada por um envelope Gaussiano, e i = parâmetro de dilatação e compressão da onda; $W0$ = parâmetro de frequência e t = tempo. Todos introduzidos no 'script' de programação de [Torrence e Compo \(1998\)](#) no software Matlab.

3. Resultados e Discussão

Os diferentes fatores encontrados pela ACP representam os diferentes padrões ou regimes pluviométricos e ao mesmo tempo, áreas pluviometricamente homogêneas. O fator 1 evidencia o regime pluviométrico do BSF e parte do SMSF, que é ao mesmo tempo, distinto do ASF ([Fig. 2](#)). Segundo [Alves et al. \(2001; 2006\)](#) e [Fedorova et al. \(2006\)](#) o regime pluviométrico dessa região é decorrente da atuação dos Complexos Convectivos de Mesoescala (CCM), dos Vórtices Ciclônicos de Altos Níveis (VCAN) ([Fedorova et al., 2006](#)), das Ondas de leste ([Coutinho e Fritsch, 2007](#)) e das Perturbações Ondulatórias no Campo dos Ventos Alísios (POAs) ([Molion e Bernardo, 2002](#)), ocorrendo majoritariamente de maio a agosto, e podendo nos meses de verão ocorrer no NEB os VCANs e Vórtices Ciclônicos de Médios Níveis (VCMN) em médios níveis da atmosfera ([Fedorova et al., 2006](#)). O fator 2 ([Fig. 3](#)) evidencia a ZCAS, que ocorre de novembro a março no ASF, e os VCANs e VCMNs que podem ocorrer, de janeiro a março no NEB e podem proporcionar períodos simultâneos de precipitação em ambas sub-bacias, no entanto com sistemas causadores de chuva distintos. No entanto, o regime do MSF, mostra-se diferente do restante da Bacia hidrográfica ([Fig. 3](#)).

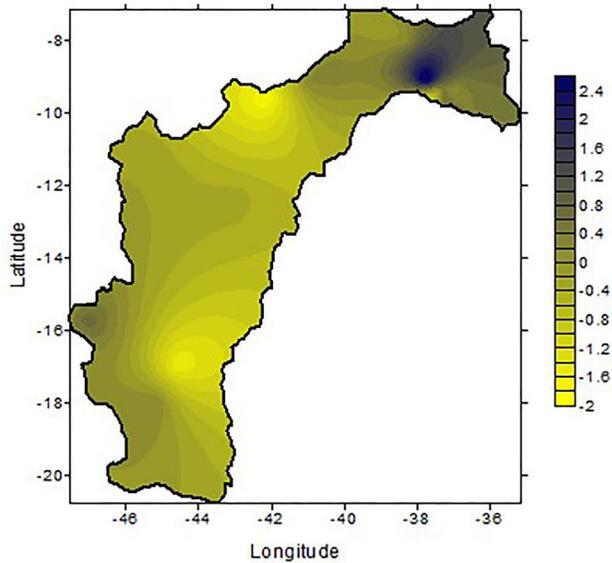


Figura 2 - Fator 1.

De acordo com [Da Silva \(2005\)](#) ao longo da latitude 20° S é observada uma faixa de precipitação mais elevada nos meses de novembro a março, a qual seria a posição média da ZCAS sobre esta Bacia hidrográfica. Esse sistema foi apontado como o principal mecanismo produtor de precipitação na Bacia. O fator 2 pode também estar relacionado à interação da ZCAS com a ZCIT ao longo do verão, como apontado por [Ferreira *et al.* \(2004\)](#).

No fator 2 ([Fig. 3](#)) ainda se percebe que o MSF não está em seu período chuvoso. De acordo com [Da Silva \(2005\)](#), no MSF, em torno da latitude de 15° S, há uma diminuição de umidade, aproximadamente na divisa entre Minas Gerais e Bahia, porque nessa região ocorre escoamento

que é em média de nordeste, e a Chapada Diamantina serve de barreira ao escoamento de umidade. Desse modo, seria mais um fator para o MSF não apresentar o mesmo período chuvoso do ASF.

Por fim, o fator 3 reforça que quando as precipitações aumentam no MSF não ocorre o mesmo no resto da Bacia e vice-versa ([Fig. 4](#)). Desta forma, são áreas pluviometricamente homogêneas o BSF e o SMSF, separadamente do MSF e por fim, do ASF, corroborando com o estudo de [Da Silva e Molion \(2004\)](#) que identificou o Dipolo da Bacia hidrográfica do São Francisco. Essa configuração de áreas homogêneas também se dá pelo fator distância e microclima, visto que os sistemas meteorológicos que proporcionam chuvas diferem em origem e tempo de ocorrência ou atuação ([Da Silva, 2005](#)).

Os fatores acima apresentados são reforçados pela Análise de agrupamentos ([Fig. 5](#)). Observa-se que as precipitações do SMSF e BSF apresentam ligação direta, com maiores semelhanças, formando um grupo entre ambos. Posteriormente, este grupo tem relação menos direta com MSF, mostrando menor semelhança entre BSF/SMSF e MSF. Por fim, as três sub-bacias são relacionadas ao ASF em ligação indireta, demonstrando a menor semelhança possível com o ASF. Esse método também foi utilizado por [Melo \(2016\)](#) para identificar áreas homogêneas e suas semelhanças, dentro do domínio da região semiárida nordestina e por [Farias \(2016\)](#) para sub-bacia hidrográfica do rio Taperoá (PB).

Os resultados da Análise de Componentes Principais e Análise de Agrupamentos, são reforçados pelos coeficientes de similaridade das sub-bacias, dispostos na [Tabela 3](#). Nela, vê-se que o MSF tem pouca similaridade com BSF/SMSF e pouca relação e inversa com ASF, como também encontrado na análise de agrupamentos. O

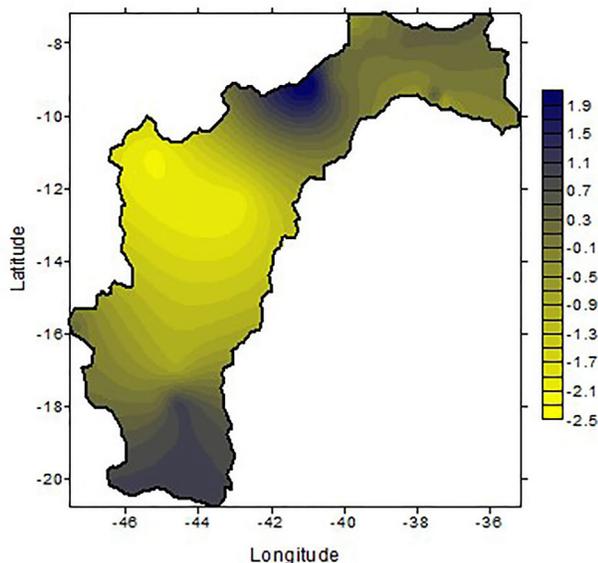


Figura 3 - Fator 2.

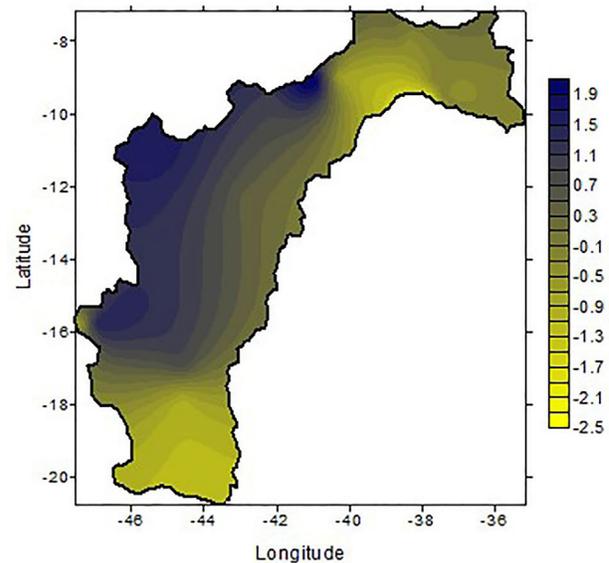


Figura 4 - Fator 3.

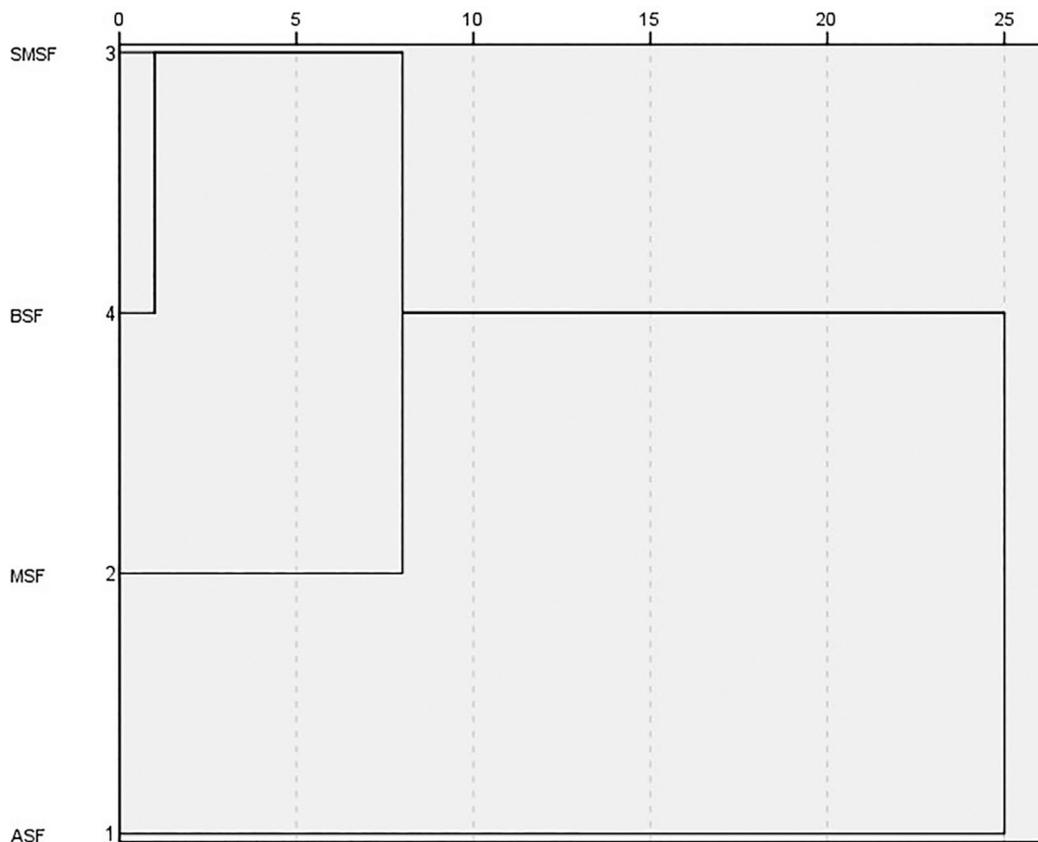


Figura 5 - Análise de agrupamentos entre as sub-bacias hidrográficas do rio São Francisco. O eixo X representa a distância euclidiana; quanto maior, menor a semelhança; e o eixo Y são as localidades em estudo.

ASF mostrou-se dissimilar às outras sub-bacias, acompanhando a análise de agrupamentos. O SMSF, como no fator 1, é inverso ao comportamento do ASF e mais similar ao BSF. O BSF, por sua vez, é dissimilar ao ASF, tem baixa similaridade com MSF e melhor com SMSF (Tabela 3).

No geral, as quantidades de secas leves e secas moderadas foram maiores que os de chuvas leves e chuvas moderadas; a persistência de secas com intensidade leve requer atenção por parte de gestores, visto que, os eventos menos intensos de secas podem se desenvolver para mais intensos, consoante à atuação concomitante de outros fenômenos externos (Nascimento *et al.*, 2017), contribuindo para possíveis agravamentos nos setores hídrico, agrícola e econômico.

Tabela 3 - Coeficientes de similaridade entre as sub-bacias do rio São Francisco.

	ASF	MSF	SMSF	BSF
ASF	–	–0,022	–0,052	–0,029
MSF	–0,022	–	0,075	0,024
SMSF	–0,052	0,075	–	0,118
BSF	–0,029	0,024	0,118	–

Através da Fig. 6 verifica-se que no Alto São Francisco (ASF), ocorreu só um único caso de seca extrema, lembrando que no ASF encontra-se a cabeceira do rio São Francisco, o que pode levar a uma considerável diminuição de sua chuva, e conseqüentemente, da vazão. Na região do ASF a maior parte dos eventos foram classificados como “quase normal”, com 46,83% das ocorrências. Somando todas as classes que são denominadas como seca, totalizou-se 28,99% dos eventos, enquanto 24,17% é o somatório de todas as classes de chuva. No entanto, chuvas extremas e severas no ASF são superiores às ocorrências de secas extremas e severas.

No Médio São Francisco (MSF), observa-se que ocorreu a maior quantidade de eventos climáticos na categoria “quase normal”, aproximadamente 60% dos casos (Fig. 7). O MSF obteve o somatório de todas as secas igual a 23,11%, e o somatório de todas as chuvas apresentou uma porcentagem de 17,75%. Embora, de acordo com o que é exibido na Fig. 8, não apresente nenhum evento de “seca extrema”, foi a região que mais apresentou eventos de “seca severa” em relação à toda Bacia do rio São Francisco.

A sub-bacia do Submédio São Francisco (SMSF) não apresentou valores que se adequem na categoria “seca

extrema” e nem “seca severa” (Fig. 8); e ao mesmo tempo, também registrou o menor índice de “chuva extrema”.

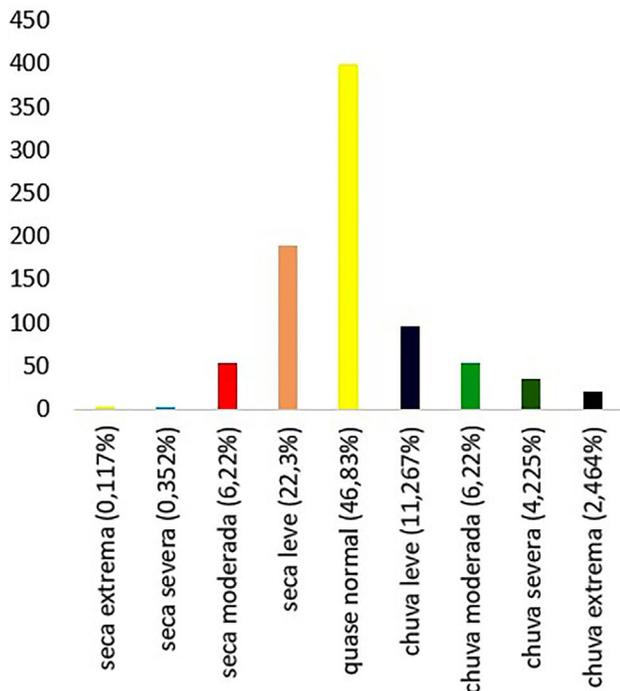


Figura 6 - Classificação e quantificação dos eventos extremos do Alto São Francisco. Eixo Y representa o número de casos.

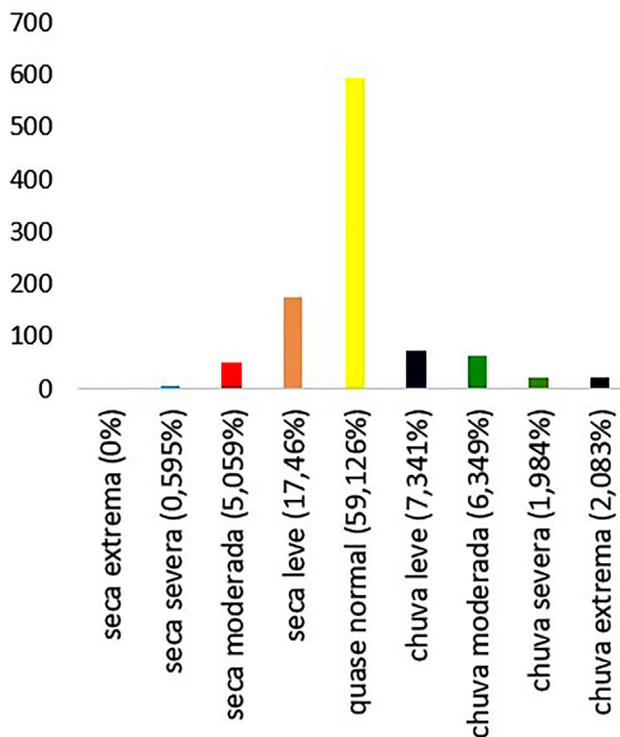


Figura 7 - Classificação e quantificação dos eventos extremos do Médio São Francisco. Eixo Y representa o número de casos.

Contudo, destacou-se por ter maior índice em relação as outras sub-bacias na categoria de “seca leve”. Quando somadas as porcentagens dos índices classificados como “seca”, a quantidade das secas no SMSF equivale a 24,84% dos casos, e o somatório das classes de chuva é igual a 17,66%.

A região do Baixo São Francisco (BSF) apresentou o maior índice de “chuva extrema”, chegando a 3,24%, como visto na Fig. 9. As categorias de chuva ocuparam 18,42% do total de eventos e quanto ao índice de precipitação normal, pode-se notar que 55,37% dos eventos, ficaram próximos ou igual à média climatológica da região (Fig. 9).

O MSF apresentou os extremos mais intensos, diante da sua barra de erro (Fig. 10), tanto SPI de secas quanto de chuvas foram os maiores, tanto negativo, quanto positivo. O BSF apresentou o menor erro, induzindo que suas secas e chuvas são as menos intensas na Bacia. Aproximadamente 75% dos dados (terceiro quartil) do ASF, MSF e SMSF são de SPI positivos e maiores que zero.

A Análise de Ondaleta apresenta a habilidade de detectar diferentes escalas temporais em uma série de dados. Foram identificadas ocorrências da escala sazonal a semestral de 0,25-0,5 anos, cujos picos espectrais são estatisticamente significantes. A presença de escala temporal de 1 a 2 anos foi observada em todas sub-bacias, estando associada ao ciclo anual dos sistemas acoplados oceano-atmosfera atuantes com causas e período de ocorrência distintos e ENOS. Também foi observada variabilidade na escala de até 7 anos, relacionadas com eventos de ENOS

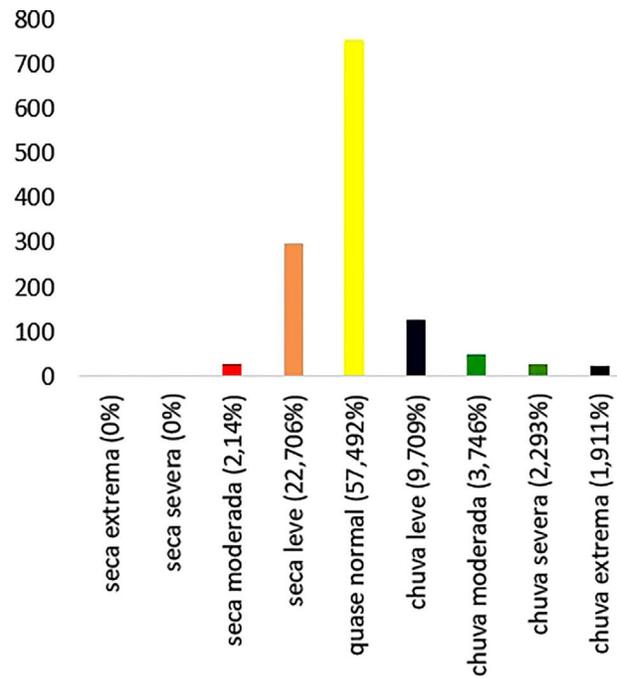


Figura 8 - Classificação e quantificação dos eventos extremos do Sub-médio São Francisco. Eixo Y representa número de casos.

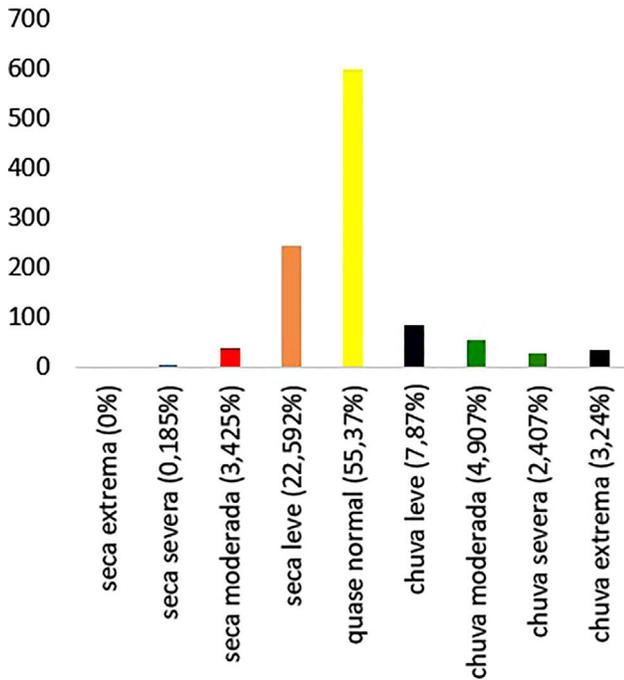


Figura 9 - Classificação e quantificação dos eventos extremos do Baixo São Francisco. Eixo Y representa o número de casos.

estendido e Dipolo do Atlântico (Clauzet e Wainer, 1999) e na escala de 11 anos, a qual está associada ao Ciclo de manchas solares (Kerr, 1996; Echer *et al.*, 2003; Molion, 2005) e também ao Dipolo do Atlântico (Souza *et al.*, 1998; Servain *et al.*, 1999).

A escala temporal de 22 anos também pode ser visualizada em alguns momentos em algumas séries. Beer *et al.* (2000) revelam que além do ciclo solar de Schwabe

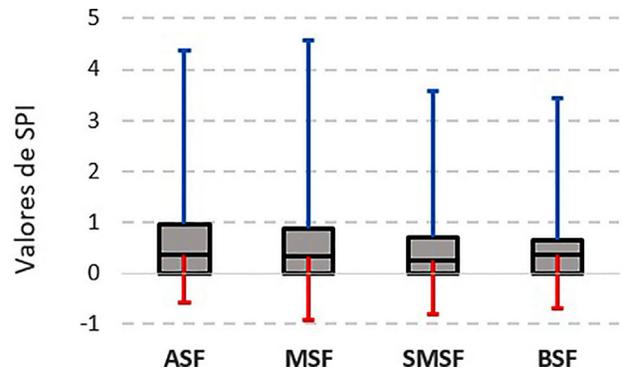


Figura 10 - Box plot de valores de SPI para as sub-bacias do rio São Francisco.

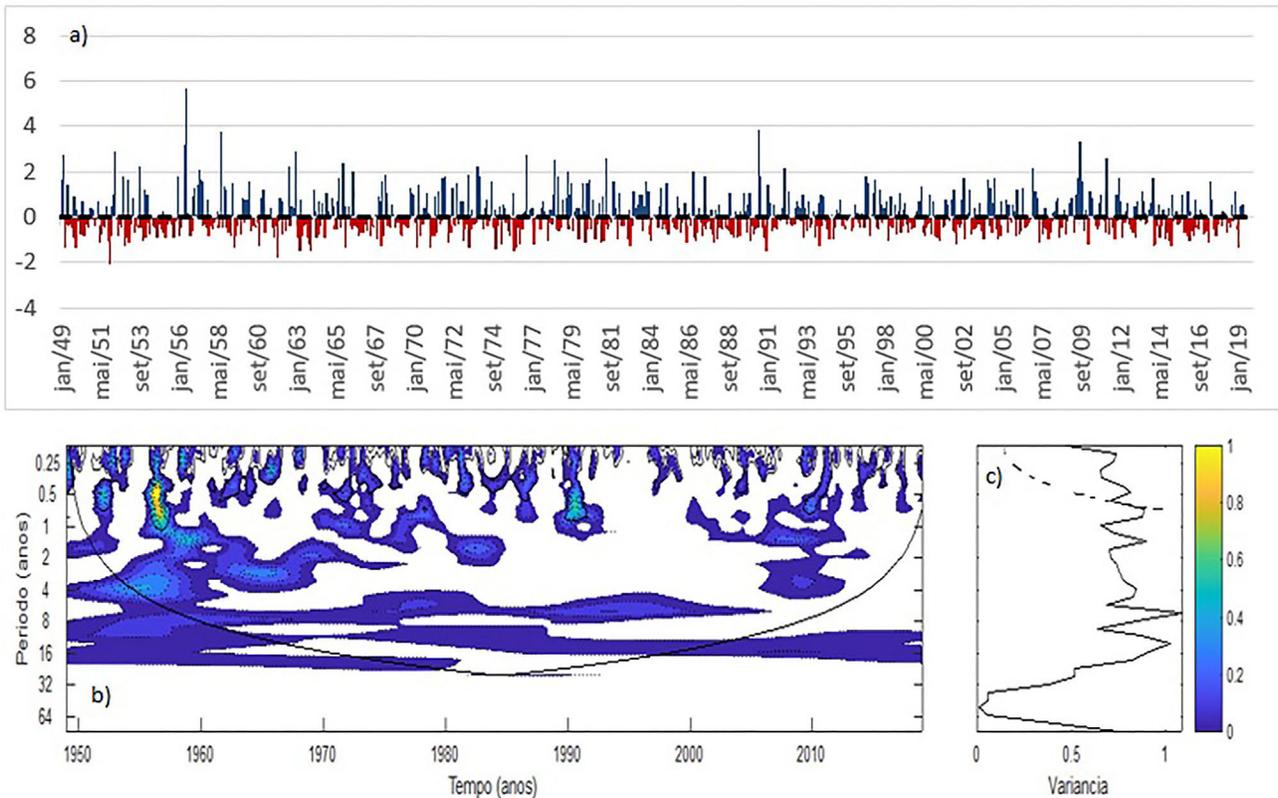


Figura 11 - (a) Índice de Prp para ASF; (b) Espectro de Potência da Ondaleta para precipitação para o ASF. Contornos tracejados correspondem a valores de variância normalizados. Contornos sombreados correspondem a variâncias significativas ao nível de confiança de 95%. A curva em forma de U representa o cone de influência, sob o qual o efeito de borda é importante; (c) Espectro de Potência global, o contorno tracejado indica que o EPG é significativo ao nível de confiança de 95%.

(11 anos), o astro apresenta um ciclo solar que é um ciclo magnético no qual a polarização magnética das manchas solares se inverte a cada 22 anos, o chamado ciclo de Hale, o qual pode ser relacionado à escala temporal observada de 22 anos. No mesmo sentido, Zuffo (2015) afirmou que esse ciclo apresenta influência significativa dos efeitos do Sol no clima da Terra, uma vez que representa uma forçante radiativa considerável nas mudanças climáticas. Já Scafetta (2010; 2012) e Oliveira *et al.* (2017) relacionaram a escala de 22 anos à Oscilação Interdecadal do Pacífico (OIP), que apresenta um ciclo variando entre 15 e 30 anos e afeta tanto o norte quanto o sul do Pacífico.

De acordo com Oliveira *et al.* (2017), o ciclo de 35 anos está relacionado ao período de periastro lunar, o qual foi objeto de investigação nos Países Baixos ainda no início do século 17. O ciclo de 35 anos ganhou notoriedade com os estudos de mudanças nos níveis do mar Cáspio conduzidos pelo Professor alemão Eduard Brückner, motivo pelo qual a periodicidade é ora conhecida como Ciclos de Brückner. Já ciclos de 64 a 80 anos alteraram a duração do dia em 4 milissegundos no início do século 20. Essas flutuações longas são devidas ao fluxo de ferro lí-

quido no núcleo externo da Terra, onde o campo magnético terrestre se origina. Ao interagir com o manto da Terra, esse fluido afeta a rotação da Terra (Dickey *et al.*, 2011). As variações na duração do dia podem estar associadas a variações da temperatura média do ar na Terra, podendo provocar flutuações de até 0,2 °C na temperatura superficial global. Por fim, os ciclos de 50 a 70 anos são relacionados à Oscilação Decadal do Pacífico (ODP) (Mantua *et al.*, 1997; Newman *et al.*, 2003) e os de 50 a 90 anos, à Oscilação Multidecadal do Atlântico (OMA) (Giorgio, 2013).

Altos valores de SPI caracterizando eventos extremos foram identificados em todas as sub-bacias. Esses eventos acontecem em muitos casos devido à ocorrência simultânea de várias escalas temporais que podem favorecer a ocorrência de chuvas, ou em decorrência da ausência de todas ou de algumas, promovendo assim anomalias pluviométricas negativas, corroborando com Hastenrath e Heller (1977), Gershunov e Barnett (1998) e Da Silva (2017).

No ASF (Fig. 11) houveram maiores atividades entre as escalas temporais de 0,25 a 1 ano. Os mais intensos

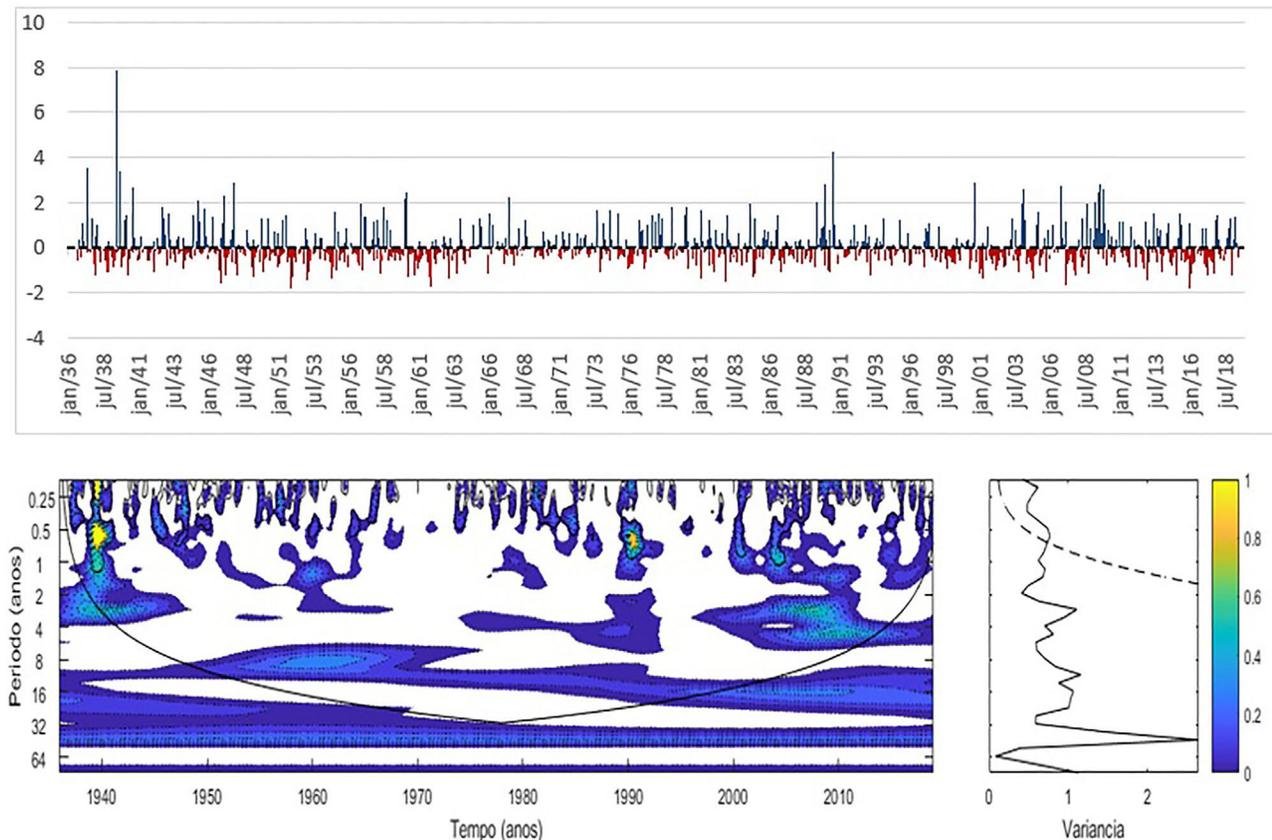


Figura 12 - (a) Índice de Prp para MSF; (b) Espectro de Potência da Ondaleta para precipitação para o MSF. Contornos tracejados correspondem a valores de variância normalizados. Contornos sombreados correspondem a variâncias significativas ao nível de confiança de 95%. A curva em forma de U representa o cone de influência, sob o qual o efeito de borda é importante; (c) Espectro de Potência global, o contorno tracejado indica que o EPG é significativo ao nível de confiança de 95%.

eventos em decorrência do ENOS foram em 1950 a 1954, 1958 a 1963, 1970 a 1972, 1976 a 1980, 1980 a 1983, 1991, 2001 a 2010. O ENOS estendido teve atuação mais fortes em 1950, e de 2008 a 2011. Já a escala temporal de 11 anos foi atuante no ASF de 1951 a 1962. Ocorreu chuva extrema na região do ASF, explicando o valor do SPI maior que 5 no ano de 1956 (Fig. 11a). Esse evento foi devido associação de vários sistemas/fenômenos que ocorreram simultaneamente (Fig. 11b) nas escalas sazonal + semestral + interanual + ENOS + ENOS estendido + escala de 11 anos + escala de 22 anos.

Além disso, no final do ano de 1951 (Fig. 11), ocorreu um período de seca extrema, devido à presença do fenômeno ENOS com intensidade moderada e nenhum evento nas escalas sazonal, semestral e anual. Houve também a existência de atividade na escala de 4 a 8 anos devido ao ENOS estendido e na escala de 11 a 22 anos, relacionada ao ciclo de mancha solares e OIP. Consolidou-se nesta sub-bacia como dominante, a escala de temporal entre 4 e 8 anos, relacionado ao ENOS estendido, no entanto, as escalas sazonal e semestral tiveram picos espectrais estatisticamente significantes.

Para o MSF (Fig. 12) observou-se a presença da escala sazonal, da escala semestral, da escala associada ao ENOS, de escalas relacionadas à variabilidade oceânica

entre 30 e 55 anos. Conforme já citado, escalas entre 15 e 30 anos relacionam à OIP, entre 50 e 70 anos ODP e entre 50 e 90 anos, à OMA; essas últimas não tiveram seus ciclos completos visualizadas no MSF devido ao tamanho da série temporal. Além disso, também foi notável a presença do fenômeno de manchas solares com ciclo de 11 anos, porém em fraca intensidade.

No MSF houve ausência de sinais na escala semestral, interanual curta e de ENOS. No entanto, foram presentes as escalas sazonal, de 11 anos, e a escala entre 20 e 35 anos, tendo como exemplo o ano de 1951. Contudo, ocasionaram uma seca severa, de acordo com o SPI. Os ciclos de 35 e de 64 anos também foram observados na série do MSF. O período de 50 anos se tornou a escala dominante, enquanto a maior significância estatística se manteve na escala sazonal e semestral.

Diferentemente da análise de ondaleta do ASF e MSF, no SMSF (Fig. 13) as escalas sazonal e semestral não ocorreram em alguns momentos da série, contudo foi a sub bacia na que mais houve eventos meteorológicos mais intensos e duradouros na escala de 11 anos e na escala temporal maior que 60 anos. A região não apresentou índices de secas severas e nem secas extremas, ficando somente com ocorrência de secas moderadas. De acordo com a ondaleta, a escala dominante ficou

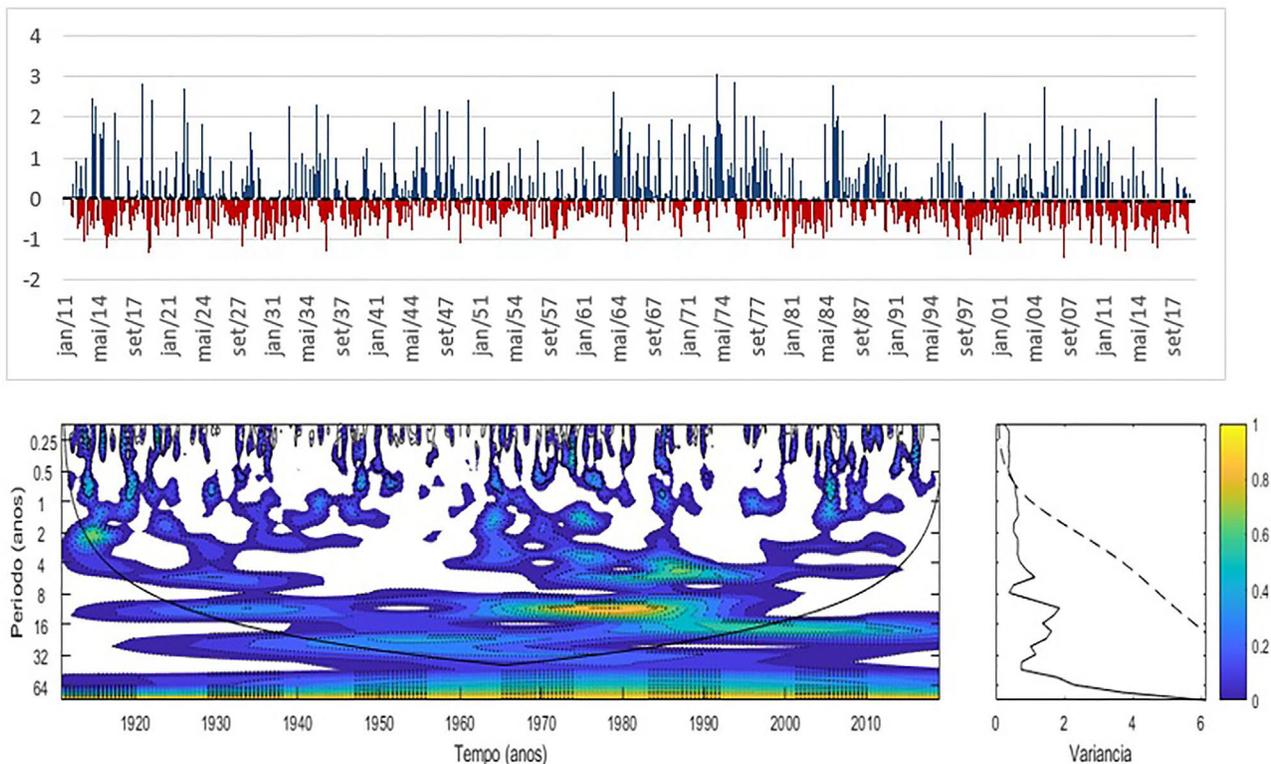


Figura 13 - (a) Índice de Prp para SMSF; (b) Espectro de Potência da Ondaleta para precipitação para o SMSF. Contornos tracejados correspondem a valores de variância normalizados. Contornos sombreados correspondem a variâncias significativas ao nível de confiança de 95%. A curva em forma de U representa o cone de influência, sob o qual o efeito de borda é importante; (c) Espectro de Potência global, o contorno tracejado indica que o EPG é significativo ao nível de confiança de 95%.

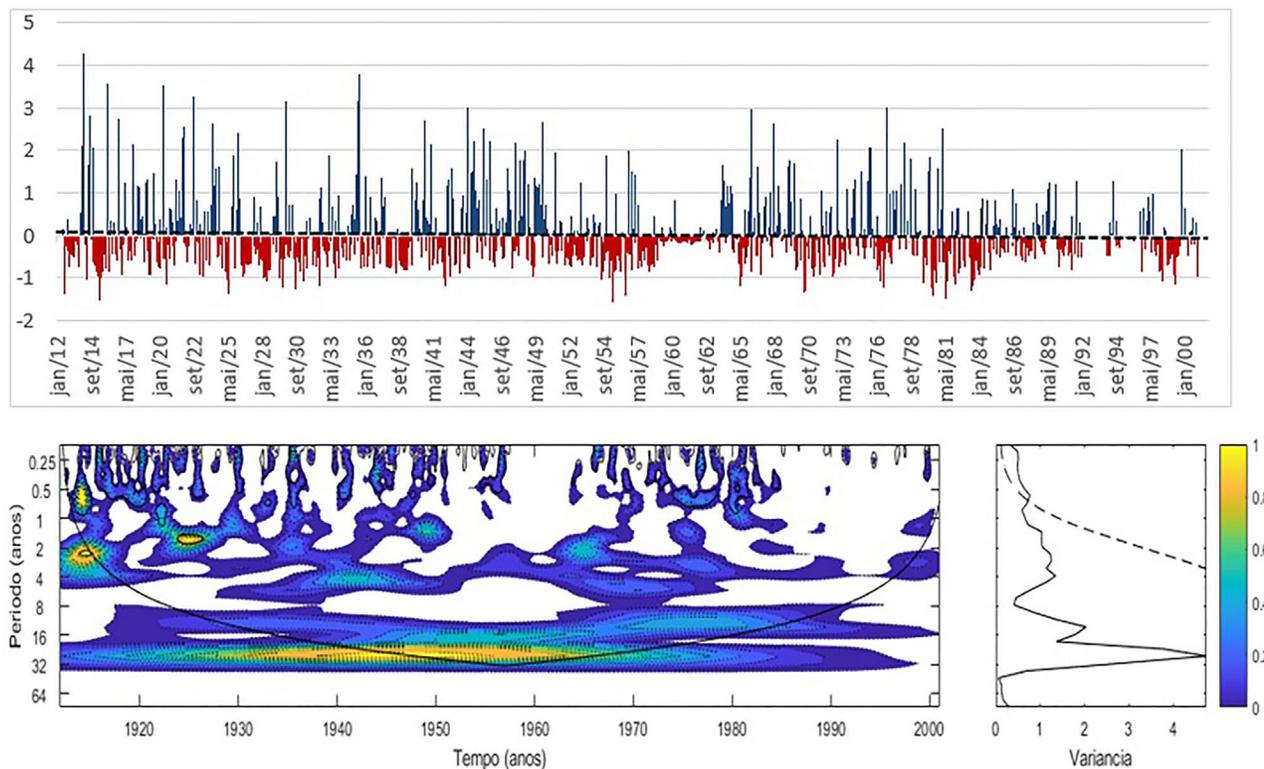


Figura 14 - (a) Índice de Prp para BSF; (b) Espectro de Potência da Ondaleta para precipitação para o BSF. Contornos tracejados correspondem a valores de variância normalizados. Contornos sombreados correspondem a variâncias significativas ao nível de confiança de 95%. A curva em forma de U representa o cone de influência, sob o qual o efeito de borda é importante; (c) Espectro de Potência global, o contorno tracejado indica que o EPG é significativo ao nível de confiança de 95%.

no período de 35 anos relacionado à interação entre Terra-Lua-Sol.

Tendo como exemplo o ano de 1973 (Fig. 13), a chuva extrema ocorrida foi ocasionada por sistemas e fenômenos meteorológicos simultâneos ocorridos na escala temporal sazonal, semestral de ENOS estendido, escalas de ciclos solares de 11 anos e 22 anos, além das atividades do Dipolo do Atlântico, escala temporal de 35 e a superior a 60 anos. Desse modo, o SMSF também corrobora com a hipótese de Gershunov e Barnett (1998).

Destacou-se como escala dominante no BSF (Fig. 14), o período de aproximadamente 22 anos e a significância estatística pode ser vista na escala sazonal e semestral. Escalas sazonal e semestral ocorreram em grande parte da série com ausência em 1957 a 1963, e após 1988, o que causou precipitações abaixo da média. No BSF (Fig. 14) foi ocasionada uma chuva extrema no início do ano de 1914 explicada por fortes atividades entre a escala semestral a de 1 ano, escalas de 2 a 4 anos devido ao fenômeno ENOS, e a escala de 22 anos.

Já em 1955, pode-se notar que houve precipitação abaixo da média, sendo considerada como seca severa através da classificação do SPI, acarretada por pouquíssimas atividades na escala semestral até atuação da escala de ENOS estendido, no entanto, houve forte sinal na esca-

la de 20 a 35 anos, os quais já foram explicados a que se relacionam. Essa interação entre sistemas e fenômenos de escalas temporais distintas também foi observada por Da Silva (2017), para parte do Nordeste brasileiro, o qual também é área do SMSF e BSF.

4. Considerações Finais

Áreas pluviometricamente homogêneas são o BSF/SMSF, MSF e ASF, com períodos chuvosos e sistemas atuantes distintos. Concluiu-se também que o BSF é dissimilar ao ASF, que o período chuvoso do MSF distingue do resto da Bacia, e em um período o BSF/SMSF e ASF estão simultaneamente com precipitações, enquanto o MSF não.

Ocorreram mais episódios de chuva moderada, severa ou extrema em toda a região do rio São Francisco do que em relação a classes de secas moderada, severa e extrema, conforme o SPI. Todas as sub-bacias apresentaram algum índice de chuva extrema, entretanto, apenas a região do ASF obteve a presença de seca extrema, mesmo que com porcentagem muito baixa (0,117%), afirmando, desta forma, que é mais comum que se tenha cenários de chuva extrema do que cenários com grandes

secas. Já no MSF, pelo erro indicado no boxplot, os eventos são mais extremos do que nas demais sub-bacias.

Através da Análise de Ondas verificou-se que se mostraram presentes as escalas temporais sazonal, semestral, interanual, a do ENOS, ENOS estendido, a do Dipolo do Atlântico, a dos ciclos solares e da OIP. A combinação ou ausência desses fenômenos/sistemas citados acima corroborou para o aumento ou diminuição de eventos climáticos extremos na região, tanto secos quanto chuvosos.

Referências

- ACEITUNO, P. On the functioning of the southern oscillation in the South American Sector. Part 1: surface climate. **Mon. Wea. Rev.**, v. 116, p. 505-524, 1988. [doi](#)
- ALVES, J.M.B.; TEIXEIRA, R.F.B.; FERREIRA, A.G. Um intenso sistema convectivo de mesoescala no Setor Leste do Nordeste: o caso de 20 a 21 de maio de 1999. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 16, n. 1, p. 19-31, 2001.
- ALVES, J.M.B.; FERREIRA, F.F.; CAMPOS, J.N.B.; SOUZA, E.B.; DURAN, B.J.; SERVAIN, J.; STUART, A. Mecanismos atmosféricos associados à ocorrência de precipitação intensa sobre o Nordeste do Brasil durante janeiro/2004. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 21, n. 1, p. 1-21, 2006.
- ANDREOLI, R.V.; KAYANO, M.T.; GUEDES, R.L.; OYAMA, M.D.; ALVES, M.A.S. A influência da temperatura da superfície do mar dos oceanos pacífico e atlântico na variabilidade de precipitação em Fortaleza. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 19, n. 2, p. 113-122, 2004.
- BEER J.; MENDER W.; STELLMACHER R. The role of the sun in climate forcing. **Quaternary Science Reviews**, v. 19, n. 1-5, p. 403-415, 2000. [doi](#)
- BLAIN, G.C.; KAYANO, M.T. 118 anos e dados mensais do índice padronizado de precipitação: série meteorológica de Campinas, Estado de São Paulo. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 26, n. 1, p. 137-148, 2011. [doi](#)
- BRAGA, C.C.; BRITO, J.I.B.; SANSIGOLO, C.A.; RAO, T.V.R. Tempo de resposta da vegetação às variabilidades sazonais da precipitação no Nordeste do Brasil. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, v. 11, n. 1, p. 149-157, 2003.
- BONFIM, O.E.T.; DA SILVA, D.F. Identificação de áreas de precipitação homogêneas nas Bacias hidrográficas Agua-peí-Peixe (SP). In: **7º Simpósio Internacional De Climatologia**, Petrópolis, 2017.
- COMITÊ DA BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO SÃO FRANCISCO. **A Região do Baixo São Francisco**. Disponível em https://cbhsaofrancisco.org.br/noticias/cbhsf_blog/a-regiao-do-baixo-sao-francisco/, acesso em 10 de mai. 2022.
- CLAUZET, G.; WAINER, I. Identificação da variabilidade de baixa frequência em algumas regiões da costa sudeste-nordeste do Brasil. **Revista Brasileira de Oceanografia**, v. 47, n. 1, p. 69-78, 1999. [doi](#)
- COUTINHO, E.C.; FISCH, G. Distúrbios ondulatórios de leste (Dols) na região do Centro de Lançamento de Alcântara, MA. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 22, n. 2, p. 193-203, 2007. [doi](#)
- COUTINHO, M.D.L.; BRITO, I.B. Análise de componentes principais com dados pluviométricos no estado do Ceará. In: **Proceedings of the Congresso Amazônia e o Clima Global**, Belém, 2010.
- DA SILVA, D.F.; MOLION, L.C.B. Influência da variabilidade climática interanual na hidrologia da Bacia do Rio São Francisco. In: **XIII Congresso Brasileiro de Meteorologia**, Fortaleza, 2004.
- DA SILVA, D.F. **Variabilidade Espacial e Temporal de Componentes dos Balanços de Água e de Energia sobre a Bacia do Rio São Francisco com Ênfase para a Região da ZCAS**. Dissertação de Mestrado em Meteorologia, UFCG, 2005.
- DA SILVA, D.F. **Análise de Aspectos Climatológicos, Agrônômicos, Ambientais e de seus Efeitos sobre a Bacia Hidrográfica do Rio Mundaú (AL e PE)**. Tese de Doutorado em Recursos Naturais, UFCG, Campina Grande, 2009.
- DA SILVA, D.F. Aplicação de análises de ondas para detecção de ciclos e extremos pluviométricos no leste do Nordeste do Brasil. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 32, n. 2, p. 187-198, 2017. [doi](#)
- DA SILVA, D.F.; LIMA, M.J.S.; SOUZA NETO, P.F.; GOMES, H.B.; SILVA, F.D.S.; ALMEIDA, H.R.R.C.; PEREIRA, M.P.S.; COSTA, R.L. Caracterização de eventos extremos e de suas causas climáticas com base no índice padronizado de precipitação para o leste do Nordeste. **Revista Brasileira de Geografia Física**, v. 13, n. 2, p. 449-464, 2020.
- DIAS, M.A.F.S. Eventos climáticos extremos, **Revista USP**, n. 103, p. 33-40, 2014. [doi](#)
- DICKEY, J.O.; MARCUS, S.I.; DE VIRON, O. Air temperature and anthropogenic forcing: insights from the solid earth. **Journal of Climate**, v. 24, n. 2, p. 569-574, 2011. [doi](#)
- DOS SANTOS, S.R.Q.; BRAGA, C.C.; SANTOS, A.P.P.; BRITO, J.I.B.; CAMPOS, T.L.O.B. Classificação de eventos extremos de precipitação em múltiplas escalas de tempo em Belém-PA: utilizando o índice de precipitação normalizada. **Revista Brasileira de Geografia Física**, v. 7, n. 4, p. 628-635, 2014.
- DOS SANTOS, S.R.Q.; BRAGA, C.C.; SANSIGOLO, C.A.; SANTOS, A.P.P. Determinação de regiões homogêneas do índice de precipitação normalizada (SPI) na Amazônia Oriental. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 32, n. 1, p. 111-122, 2017. [doi](#)
- ECHER, E.; RIGOSO, N.R.; NORDEMANN, D.J.R.; VIEIRA, L.E.A.; PRESTES, A.; FARIA, H.H. O número de manchas solares, índice da atividade do sol. **Revista Brasileira de Ensino de Física**, v. 25, n. 2, p. 157-163, 2003.
- FARIAS, W.R.G.; DA SILVA, D.F.; ARAÚJO, L.E.; NASCIMENTO, M.G. Variação climática da precipitação no Estado de Pernambuco através de análise de componentes principais. In: **Simpósio Internacional de Climatologia**, Fortaleza, 2005.
- FARIAS, A.A. **Caracterização e Análise das Secas na Sub-Bacia Hidrográfica do Rio Taperoá e Avaliação dos Impactos e Ações de Convivência com a Seca de 2012-2014 no Município de Taperoá - PB**. Tese de Doutorado em Recursos Naturais, Campina Grande, 2016.
- FEDOROVA, N.; GEMIAKI, L.; CARVALHO, L.C.; LEVIT, V.; RODRIGUES, L.R. L.; COSTA, S.B. Frontal zone on

- the North-East of Brazil. In: **International Conference on Southern Hemisphere Meteorology and Oceanography (Icshmo)**, São Paulo, p. 1765-1768, 2006.
- FERREIRA, N.J.; SANCHES, M.; SILVA DIAS, M.A.F. Composição da ZCAS em períodos de El Niño e La Niña. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 19, n. 1, p. 89-98, 2004.
- GARAYALDE, E.J.G.; SILVA, M.G.A.; TAVARES, A. de SÁ. Classificação meso-climática da região sul do Brasil pela análise de Componentes Principais. In: **Congresso Interamericano de Meteorologia, Congresso Brasileiro de Meteorologia**, Brasília, 1986.
- GERSHUNOV, A.; BARNETT, T.P. Interdecadal modulation of ENSO teleconnections. **Bulletin of the American Meteorological Society**, v. 79, n. 12, p. 2715-2726, 1998.
- GIORGIO, A. **Atlantic Multidecadal Oscillation**. Disponível em: http://climexp.knmi.nl/data/iamo_ersst.dat. 2013.
- GUEDES, R.V.S.; LIMA, F.J.L.; AMANAJÁS, J.C.; BRAGA, C.C. Análise em componentes principais da precipitação pluvial no Estado do Piauí e agrupamento pelo método de Ward. **Revista de Geografia**, v. 27, n. 1, p. 218-233, 2010.
- GUEDES, R.V.S.; MACEDO, M.J.H.; SOUSA, F.A.S. Análise espacial de eventos de secas com base no índice padronizado de precipitação e análise de agrupamento. **Revista Brasileira de Ciências Ambientais**, n. 23, p. 55-65, 2012.
- GUIMARÃES, R.M.; ASMUS, C.I.R.F.; BURDOF, A. Characterization of population exposure to organochlorines: a cluster analysis application. **Revista Brasileira de Epidemiologia**, v.16, n. 2, p. 231-239, 2013. doi
- HASTENRATH, S.; HELLER, L. Dynamics of climatic hazards in northeast Brazil. **Journal of the Royal Meteorological Society**, v. 435, n. 103, p. 77-92, 1977. doi
- JACCARD, P. Étude comparative de la distribution florale dans une portion des Alpes et des Jura. **Bulletin de la Société Voudoise des Sciencies Natureller**, v. 37, p. 547-579, 1901.
- KOUSKY, V.E.; CHU, P.S. Fluctuations in annual rainfall for northeast Brazil. **J. Meteor. Soc. Japan**, v. 56, p. 457-466, 1978. doi
- KERR, R.A.A. Now dawn for sun-climate links? **Science**, v. 271, n. 5254, p. 1360-1361, 1996.
- KAYANO, M.T.; BLAIN, G.C. Análisis de ondeletas de series mensuales de precipitación, temperaturas máximas y mínimas mensuales en Campinas. In: **4º Congreso Venezolano de Agrometeorologia**, Caracas, 2007.
- KUMAR, C.; DUFFY, C.; Detecting hydroclimatic change using spatio-temporal analysis of time series in Colorado River Basin. **Journal of Hydrology**, v. 374, n. 1-2, p. 1-15, 2009. doi
- MACEDO, M.J.H.; GUEDES, R.V.S.; SOUZA, F.A.S.; DANTAS, F.R.C. Análise do índice padronizado de precipitação para o estado da Paraíba, Brasil. **Revista Ambi-Agua**, v. 5, n. 1, p. 204-214, 2010. doi
- MANTUA, N.J.; HARE, S.R.; ZHANG, Y.; WALLACE, J.M.; FRANCIS, R.C. A Pacific interdecadal climate oscillation with impacts on salmon production. **Bulletin of the American Meteorological Society**, v. 78, n. 6, p. 1069-1080, 1997. doi
- MARENCO, J.A. Mudanças climáticas, condições meteorológicas extremas e eventos climáticos no Brasil. **Mudanças Climáticas Eventos Extremos no Brasil**. São Paulo: FBDS, p. 5-19, 2009.
- MCKEE, T.B.; DOESKEN, N.J.; KLEIST, J. The relationship of drought frequency and duration of time scales. In: **Proceedings of the 8th Conference on Applied Climatology**, Anaheim, p. 179-186, 1993.
- MELO, V.S. **Análise de Frequência de Secas Utilizando Análise de Agrupamento e Distribuições de Probabilidades**. Dissertação de Mestrado em Meteorologia, Programa de Pós-Graduação em Meteorologia, Centro de Tecnologia e Recursos Naturais, Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, 101 p., 2016.
- MOLION, L.C.B.; BERNARDO, S.O. Uma revisão da dinâmica das chuvas no Nordeste Brasileiro. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 17, n. 1, p. 1-10, 2002.
- MOLION, L.C.B. Aquecimento global, El Niños, manchas solares, vulcões e Oscilação Decadal do Pacífico. **Revista Climanalise**, v. 3, n. 1, p. 1-5, 2005.
- NASCIMENTO, F.C.A.; BRAGA, C.C.; ARAÚJO, F.R.C.D. Análise estatística dos eventos secos e chuvosos de precipitação do estado do Maranhão. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 32, n. 3, 375-386. 2017. doi
- NEWMAN, M.; COMPO, G.P.; ALEXANDER, M.A. ENSO-forced variability of the Pacific decadal oscillation. **Journal of Climate**, v. 16, n. 23, p. 3853-3857, 2003. doi
- OLIVEIRA, M.J.; CARNEIRO, C.D.R.; VECCHIA, F.A.S.; BAPTISTA, G.M.M. Ciclos climáticos e causas naturais das mudanças do clima. **Terra e Didática**, v. 13, n. 3, p. 149-184, 2017. doi
- PELLEGRINO, G.Q.; OTAVIAN, A.F.; EVANGELISTA, S.R.M.; ASSAD, E.D.; PINTO, H.S. Mapeamento automático do índice da precipitação normalizada (SPI) no Agritempo. In: **Congresso Brasileiro de Agrometeorologia**, Aracajú, 2007.
- PREISENDORFER, R. Principal componente analysis in meteorology and oceanography. In: **Development in Atmospheric Sciences**, v. 17. Amsterdam: Elsevier, p. 425, 1988.
- SERVAIN, J. Simple climatic indices for the tropical Atlantic Ocean and some applications. **Journal of Geophysical Research**, v. 96, n. C8, p. 15137-15146, 1991. doi
- SOUZA, E.B.; BRABO ALVES, J.M.; NOBRE, P. Anomalias de precipitação nos setores Norte e Leste do Nordeste brasileiro em associação aos eventos do padrão de Dipolo observados na Bacia do Atlântico Tropical. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 13, n. 2, p. 45-55, 1998.
- SILVA, B.C; CLARKE, R.T. Análise estatística de chuvas intensas na bacia do Rio São Francisco. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 19, n. 3, p. 265-272, 2004.
- SOUZA, A.L.; FERREIRA, R.L.C.; XAVIER, A. **Análise de Agrupamento Aplicada à Ciência Florestal**. Viçosa: Universidade Federal de Viçosa, 1997.
- SANTOS, E.H.M.; GRIEBELER, N.P; OLIVEIRA, L.F.C. Variabilidade espacial e temporal da precipitação pluvial na Bacia hidrográfica do Ribeirão João Leite-GO. **Engenharia Agrícola**, v. 31, n. 1, p. 78-89, 2011.
- SCAFETTA, N. Empirical evidence for a celestial origin of the climate oscillations and its implications. **Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics**, v. 72, n. 13, p. 951-970, 2010. doi

- SCAFETTA, N. Multi-scale harmonic model for solar and climate cyclical variation throughout the Holocene based on Jupiter-Saturn tidal frequencies plus the 11-year solar dynamo cycle. **Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics**, v. 80, p. 296-311, 2012. [doi](#)
- TADESSE, T.; WILHITE, D.A.; MICHAEL, J.; HAYES, M.J. Discovering associations between climatic and oceanic parameters to monitor drought in Nebraska using data mining techniques. **Journal of Climate**, v. 18, p. 1541-1550, 2005. [doi](#)
- TORRENCE, C; COMPO, G.P.A. A practical guide to wavelet analysis, **Bulletin of American Meteorological Society**, v. 79, p. 61-78, 1998. [doi](#)
- ULIANA, E.M.; DOS REIS, E.F.; DE SOUZA, A.P.; SILVA, J.G.F.; XAVIER, A.C. Utilização do índice de precipitação padronizado para a região norte do estado do Espírito Santo. **Revista Irriga**, v. 20, n. 3, p. 414-428, 2015. [doi](#)
- UNAL, Y.; KINDAP, T.; KARACA, M. Redefining the climate zones of Turkey using cluster analysis. **International Journal of Climatology**, v. 23, p. 1045-1055, 2003. [doi](#)
- WENG, H.; LAU, K.M. Wavelets, period doubling, and time-frequency localization with application to organization of convection over the Tropical Western Pacific. **Journal of the Atmospheric Sciences**, v. 51, n. 17, p. 2523-2541, 1994. [doi](#)
- WILKS, D.S. **Statistical Methods in the Atmospheric Sciences**. San Diego: Academic Press, 1995.
- ZHAI, J.; SU, B.; KRYSANOVA, V.; TOBIAS, A.; VETTER, T.; GAO, C.; JIANG, T. Spatial variation and trends in PDSI and SPI indices and their relation to streamflow in ten large regions of China. **Journal of Climate**, v. 23, n. 3, p. 649-663, 2010. [doi](#)
- ZUFFO, A.C. O sol, o motor das variabilidades climáticas. **Revista DAE**, v. 63, n. 198, p. 6-24, 2015. [doi](#)

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.