XXIII SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HIDRÍCOS

COMPARAÇÃO DE MÉTODOS DE ESTIMATIVAS DE SECAS METEROLÓGICAS E HIDROLÓGICAS NO BRASIL

Alena Gonzalez Bevacqua [1]*; Vinícius Bogo Portal Chagas*[2] *& Pedro Luiz Borges Chaffe*[3]

RESUMO – No Brasil, eventos de seca causam diversos impactos como na geração de energia e no abastecimento público. O objetivo deste trabalho foi verificar como esses diferentes índices podem afetar a determinação dos eventos de seca no Brasil. Foram comparados índices com influência da sazonalidade, a utilização do método paramétrico e não paramétrico e também o uso de cópulas. Analisou-se 496 bacias hidrográficas para os índices SPI, SPEI e SSI além disso foram selecionadas 72 bacias para a análise do MSDI. Os resultados indicam que não há influência da sazonalidade na obtenção dos índices para bacias presentes na região Sul. Já para as demais regiões essa influência é significativa para períodos de acumulação inferior a 12 meses. A utilização do método não paramétrico não influencia no início, fim e duração dos eventos de seca, mas pode influenciar na intensidade e severidade da seca. Para o MSDI, as secas começam sempre que o SPEI ou SSI reconheçam o evento de seca e duram até que evento acabe para ambos os índices. Como consequência, alerta-se que os estudos de secas podem depender completamente dos métodos utilizados para a sua determinação.

ABSTRACT– Drought events in Brazil may have several socioeconomic impacts, such as in hydroelectric generation and the public water supply. Our objective was to analyze how different types of droughts indices may affect drought identification in Brazil. We verified the influence of seasonality, the use of a non-parametric method and the use of copulas. We analyzed 496 hydrographic basins for SPI, SPEI e SSI. Besides that, 72 basins were selected for the MSDI analysis. The results show that there is no influence of seasonality in Southern Brazil. For other regions, this influence is significant for accumulation periods of less than 12 months. The use of a non-parametric method does not influence the beginning, end and duration of drought events but may influence the characteristics such as intensity and severity. For MSDI, droughts start whenever the SPEI or SSI recognize the drought event and last until the event has ended for both indices. Consequently, the studies of droughts can depend completely on the methods used.

Palavras-Chave – Seca meteorológica; Seca hidrológica; Índices de Secas

1) Graduação em Engenharia Sanitária e Ambiental, UFSC, e-mail: alenabevacqua@hotmail.com.
2) Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental, UFSC, e-mail: vbchagas@gmail.com.
3) Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental, UFSC, e-mail: pedro.chaffe@ufsc.br.

1 – INTRODUÇÃO

As secas são desastres naturais associados a grandes perdas econômicas e a danos ao ecossistema (Wilhite, 2000). No Brasil, as secas afetam a disponibilidade hídrica e prejudicam a geração de energia elétrica, que corresponde a 70% da matriz energética brasileira. Além disso, comprometem o abastecimento público, como a seca de 2014 em São Paulo, que afetou 11 milhões de pessoas (Melo *et al*., 2016).

Os eventos de seca podem ser definidos como o período em que a disponibilidade hídrica se encontra abaixo do esperado (Van Loon *et al*., 2014). São classificados em quatro categorias: secas meteorológicas, hidrológicas, agrícola e socioeconômica (Wilhite e Glantz, 1985). São empregados diversos índices de seca para comparar as características destes eventos, como sua duração e severidade (Stagge *et al*., 2016). A escolha destes índices está relacionada ao tipo de seca que se deseja analisar, visto que cada índice está associado a uma parte específica do ciclo hidrológico (Van Loon, 2015). Como as secas estão relacionadas a mais de uma variável, sua análise a partir de um único indicador pode ser incompleta (Hao e Aghakouchak, 2013). Por isso, melhorar a compreensão e as diferenças dos indicadores de secas pode ampliar o entendimento sobre como estes eventos se comportam.

O objetivo deste trabalho foi verificar como o uso de diferentes índices pode afetar a determinação dos eventos de seca no Brasil. Como etapas deste trabalho pode-se destacar: (i) comparar o uso de quatro índices para identificar secas, sendo eles o Índice de Precipitação Padronizado (SPI), Índice de Precipitação e Evapotranspiração Padronizado (SPEI), Índice de Vazão Padronizado (SSI), e Índice Multivariado de Seca Padronizado (MSDI); (ii) verificar a influência da sazonalidade nos índices de seca; (iii) analisar as diferenças entre métodos paramétricos e não-paramétricos na computação dos índices.

2 – MATERIAIS E MÉTODOS

2.1 – Área de estudo e bases de dados

Analisou-se 496 bacias hidrográficas distribuídas em território brasileiro e na América do Sul, correspondendo a uma área maior que 10 milhões de km² (Figura 1).

O cálculo dos índices de seca exige dados de três variáveis hidrometeorológicas: precipitação, evapotranspiração potencial, e vazão. Foram utilizadas duas bases de dados de precipitação: Xavier *et al.* (2016) para o território brasileiro, e CPC (2018) para o restante da América do Sul. Para a evapotranspiração potencial foram utilizados dados do *Global Land Evaporation Amsterdam Model* (GLEAM; Martens *et al*., 2017; Miralles *et al*., 2011). As três bases de dados são de dados diários

com uma grade de resolução espacial de 0,25º. Os dados foram transformados em dados mensais e o período de análise foi de janeiro de 1980 a dezembro de 2015.

Os dados de vazão foram obtidos das medições diárias de estações fluviométricas disponibilizadas no HIDROWEB (ANA, 2018) e foram transformados em médias mensais. Meses com ausência de dados superior a 30% foram descartados. Somente bacias hidrográficas com mais de 70% de dados disponíveis para o período análise foram utilizadas. Além disso, foi realizado um controle de qualidade dos dados de vazão, a fim de eliminar estações com dados espúrios.

As bacias hidrográficas foram delimitadas a partir de dados altimétricos do SRTM (USGS, 2016), com resolução horizontal de 90 metros. Em virtude da resolução espacial dos dados de precipitação e evapotranspiração potencial, foram analisadas somente bacias hidrográficas com áreas maiores que 1500 km². Os índices SPI, SPEI e SSI foram analisadas para todas as 496 bacias hidrográficas. Porém, o índice MSDI foi analisado apenas para 72 bacias, devido a necessidade de usar séries de vazões sem falhas (Figura 1).

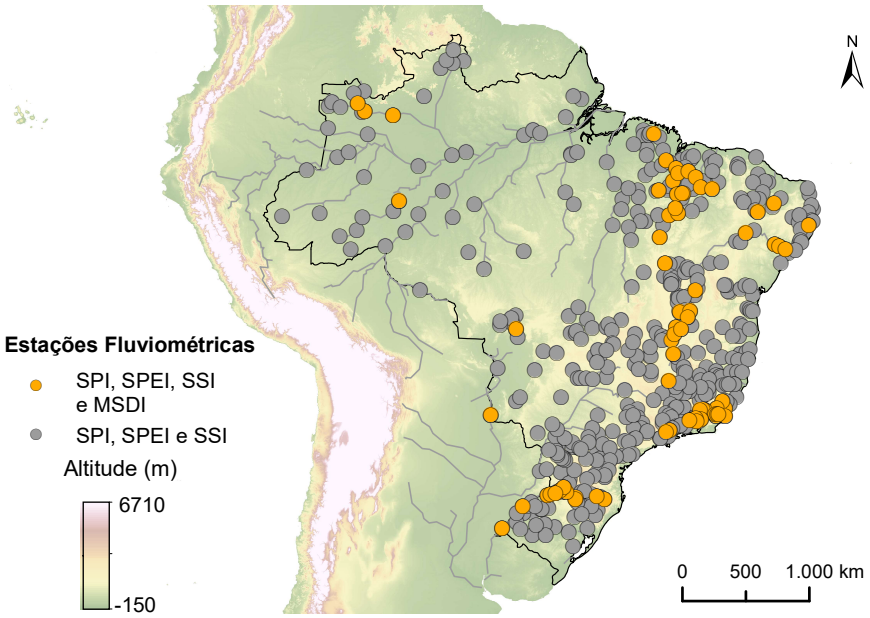

Figura 1- Localização das estações fluviométricas e exutória das bacias. As estações em cinza foram analisadas com o SPI, SPEI e SSI. As estações em Laranja foram analisadas com o SPI, SPEI, SSI e MSDI.

2.2 – Índices de Seca

Foram comparados quatro índices de secas (Tabela 1): o Índice Padronizado de Precipitação (SPI; Mckee *et al*., 1993), o Índice de Precipitação e Evapotranspiração Padronizado (SPEI; Vicente-Serrano et al.,2010), o Índice de Vazão Padronizado (SSI; Barker *et al*., 2016) e o Índice Multivariado de Secas (MSDI; Hao e Aghakouchak, 2013). Todos os índices foram computados com dois métodos: (i) o método paramétrico, segundo a distribuição indicada na Tabela 1; (ii) o método não paramétrico, sugerido por Farahmand e Aghakouchak, (2015), pois pode levar a resultados mais consistentes para bacias de grandes escalas. O método não-paramétrico, consiste em obter a probabilidade marginal através da probabilidade empírica G*ringorten plotting position*.

Tabela 1- Índices, variáveis e métodos utilizados.

Índice	Variável	Método	
		Paramétrico	Não-paramétrico
SPI	Precipitação	Gama (Mckee *et al*., 1993)	*Gringorten plotting position* (Farahmand e Aghakouchak, 2015)
SPEI	Precipitação e evapotranspiração potencial.	GEV (Stagge *et al.*, 2015)	
SSI	Vazão	GEV (Vicente-Serrano *et al*., 2012)	
MSDI	Precipitação, evapotranspiração potencial e vazão.	Frank copula (Hao e Aghakouchak, 2013)	

A aplicação do método paramétrico seguiu os mesmos princípios para todos os índices. Inicialmente, foi realizado a soma móvel para períodos de acumulação de 1 a 12 meses. Em seguida, foi realizado o ajuste das somas móveis à distribuição escolhida. Por fim, o índice foi obtido multiplicando-se a função acumulada pelo inverso da distribuição normal.

Para o SPI foram utilizados apenas dados de precipitação mensal. O ajuste das somas móveis foi realizado através da distribuição Gama. Como a função Gama não é definida para x=0, foi utilizado a Equação 1 para probabilidade cumulativa, onde q é a probabilidade de um valor igual a zero; G(x) é a função de distribuição acumulada; α e β são os parâmetros de forma e escala respectivamente; x são os dados de entrada; e Γ(α) é a função Gama.

$$H(x) = q + (1-q)G(x) = q + (1-q)\int_0^x \frac{x^{\propto-1}e^{-x/\beta}}{\beta^{\alpha}\Gamma(\propto)} \quad (1)$$

O SPI foi obtido multiplicando H(x) pelo inverso da distribuição normal Ψ^{-1}:

$$SPI = \Psi^{-1}[H(x)] \quad (2)$$

O SSI utiliza apenas dados de vazão mensal. O SPEI foi realizado com um balanço de precipitação menos a evapotranspiração potencial mensal. O ajuste do SSI e do SPEI foi feito utilizando a distribuição generalizadas de valores extremos (GEV) representada pela Equação 3. Os parâmetros de local, escala, e forma são representados por ξ, α e k respectivamente.

$$f(x) = \begin{cases} \exp[-\left\{1 - \frac{k(x-\xi)}{\propto}\right\}^{1/k}], & k \neq 0 \\ \exp\left[-\exp\left\{-\frac{(x-\xi)}{\propto}\right\}\right], & k = 0 \end{cases} \quad (3)$$

O SPEI e o SSI foram obtidos multiplicando-se a função cumulativa pelo inverso da distribuição normal:

$$SSI\ e\ SPEI = \Psi^{-1}[\int f(x)] \quad (4)$$

Para o MSDI, foram utilizados dados de vazão e o mesmo balanço de precipitação e evapotranspiração realizado para o SPEI. A Equação 5 representa a função cópula Frank, utilizada para obter a distribuição conjunta para as variáveis utilizadas, onde u e v representam a probabilidades cumulativa de cada variável, e θ é o parâmetro da função.

$$C(u,v) = -\frac{1}{\theta} ln\left[1 + \frac{(e^{-\theta u}-1)(e^{-\theta}-1)}{e^{-\theta}-1}\right] \quad (5)$$

O MSDI foi obtido multiplicando-se pelo inverso da distribuição:

$$MSDI = \Psi^{-1}[C(u,v)] \quad (6)$$

O método não-paramétrico segue os mesmos princípios do método paramétrico. No entanto, a realização do ajuste das somas móveis foi feita com a G*ringorten plotting position* para obtenção da probabilidade. Para os índices que utilizam apenas uma variável de entrada, a Equação 7 foi utilizada, onde $P(x_i)$ é probabilidade empírica, n é o tamanho da amostra, e i representa a classificação de dados diferentes de zero do menor para o maior. O índice padronizado (SI) é então obtido multiplicando-se a Equação 7 pelo inverso da distribuição normal.

$$P(x_i) = \frac{i-0,44}{n+0,12} \quad (7)$$

$$SI = \Psi^{-1}[P(x_i)] \quad (8)$$

Para o caso de índices que utilizam mais de uma variável de entrada, como o MSDI, a Equação 8 foi utilizada, onde $P(x_k,y_k)$ é a probabilidade conjunta, m_k é o número de ocorrências do par (x_k,y_k) para $x_i \leq x_k$ e $y_i \leq y_k$, tal que $1 \leq i \leq n$. O índice multivariado padronizado (MSI) é obtido multiplicando-se a probabilidade conjunta pelo inverso da distribuição normal.

$$P(x_k,y_k) = \frac{m_k-0,44}{n+0,12} \quad (9)$$

$$MSI = \Psi^{-1}[P(x_k,y_k)] \quad (10)$$

Usualmente ao calcular os índices de secas, realiza-se o ajuste das somas móveis para série inteira. No entanto tal abordagem não permite levar em consideração os possíveis efeitos da sazonalidade. Sendo assim, seguiu-se o princípio da *Standardized Drought Analysis Toolbox* (SDTA; Hao *et al*., 2014; Farahmand e Aghakouchak, 2015), que realiza o ajuste mês a mês. Primeiro todos os meses de janeiro, depois todos os meses de fevereiro e assim sucessivamente. A comparação das secas com e sem o ajuste da sazonalidade foi feita apenas para os índices SPI, SPEI e SSI.

3 – RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 – Espacialização dos índices de seca no Brasil.

A figura 2 apresenta a precipitação e vazão acumulada em milímetros para um período acumulação de 12 meses, considerando um limiar de seca de -1. Os índices utilizados foram o SPI e SSI calculados para o método paramétrico considerando os efeitos da sazonalidade. Com isso foi possível obter uma estimativa da precipitação e vazão mínima para uma acumulação de 12 meses que se deve ter para que não ocorra um evento de seca. Os resultados indicam que existe um padrão claro de acordo com as regiões do país. Sendo assim a região Nordeste foi a que apresentou os menores

valores de precipitação e vazão acumulada para 12 meses. Enquanto a região Norte foi a que apresentou os maiores valores de acumulação, em algumas bacias esse valor foi superior a 2200 mm para precipitação e 1200 mm para vazão.

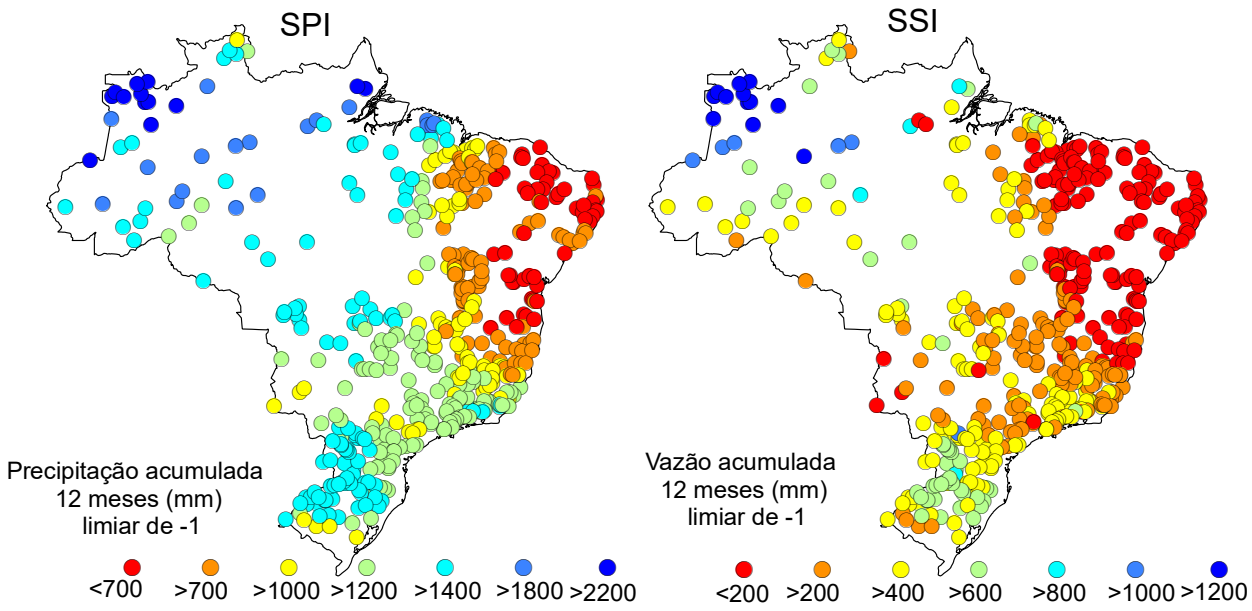

Figura 2- Precipitação e Vazão acumulada de 12 meses(mm) para um limiar de -1.

3.2 – Influência da sazonalidade e de métodos não-paramétricos

Devido ao grande número de bacias analisadas para cada índice e os diferentes períodos de acumulação considerados, não é possível apresentar os resultados para cada bacia hidrográfica. Sendo assim a Figura 3 apresenta o resultado de uma estação no sudeste e outra no sul do Brasil como exemplo dos resultados obtidos. Esses dois exemplos seriam um *proxy* para o que foi observado em média em cada uma dessas regiões.

Houve pouca ou nenhuma influência em considerar a sazonalidade na obtenção dos índices para todas as bacias hidrográficas localizadas na região sul independentemente do período de acumulação, como visto na Figura 3 representado pela bacia localizada na região Sul. O mesmo resultado foi obtido para os demais índices e períodos de acumulação analisados.

Já para as bacias de outras regiões do país, houve uma influência significativa em considerar a sazonalidade nos cálculos dos índices para os períodos de acumulação inferior a 12 meses, uma vez que os efeitos da sazonalidade zeram a atingir um período de 1 ano de acumulação, representado na Figura 3 pela bacia localizada na região Sudeste. O mesmo resultado foi encontrado para os outros índices e períodos de acumulação inferiores a 12 meses.

Comparando os métodos não-paramétrico e paramétrico, não houve diferença significativa com relação a identificação ao período de ocorrência dos eventos e sua duração. Ambos os métodos foram

capazes de identificar os mesmos períodos úmidos e secos, apresentando início e fim semelhantes e, consequentemente, duração semelhante. A maior diferença dos dois métodos foi com relação à intensidade e severidade das secas, como pode ser visto na Figura 3 comparando o SPI-Par com o SPI-NonPar entre os meses 20 e 40 para estação sudeste. Além disso, as vezes os valores obtidos para o método não-paramétrico podem formar uma espécie de platô. Isso se deve ao tamanho da série de dados e ao máximo tempo de retorno da série. Tais diferenças podem influenciar significativamente na intensidade e severidade das secas. Resultados similares foram obtidos para os outros índices analisados. A utilização do método não paramétrico tem a vantagem de não necessitar de uma distribuição paramétrica. No entanto, para que seja possível a sua aplicação, a série de dados não deve possuir falhas, limitando a utilização do método.

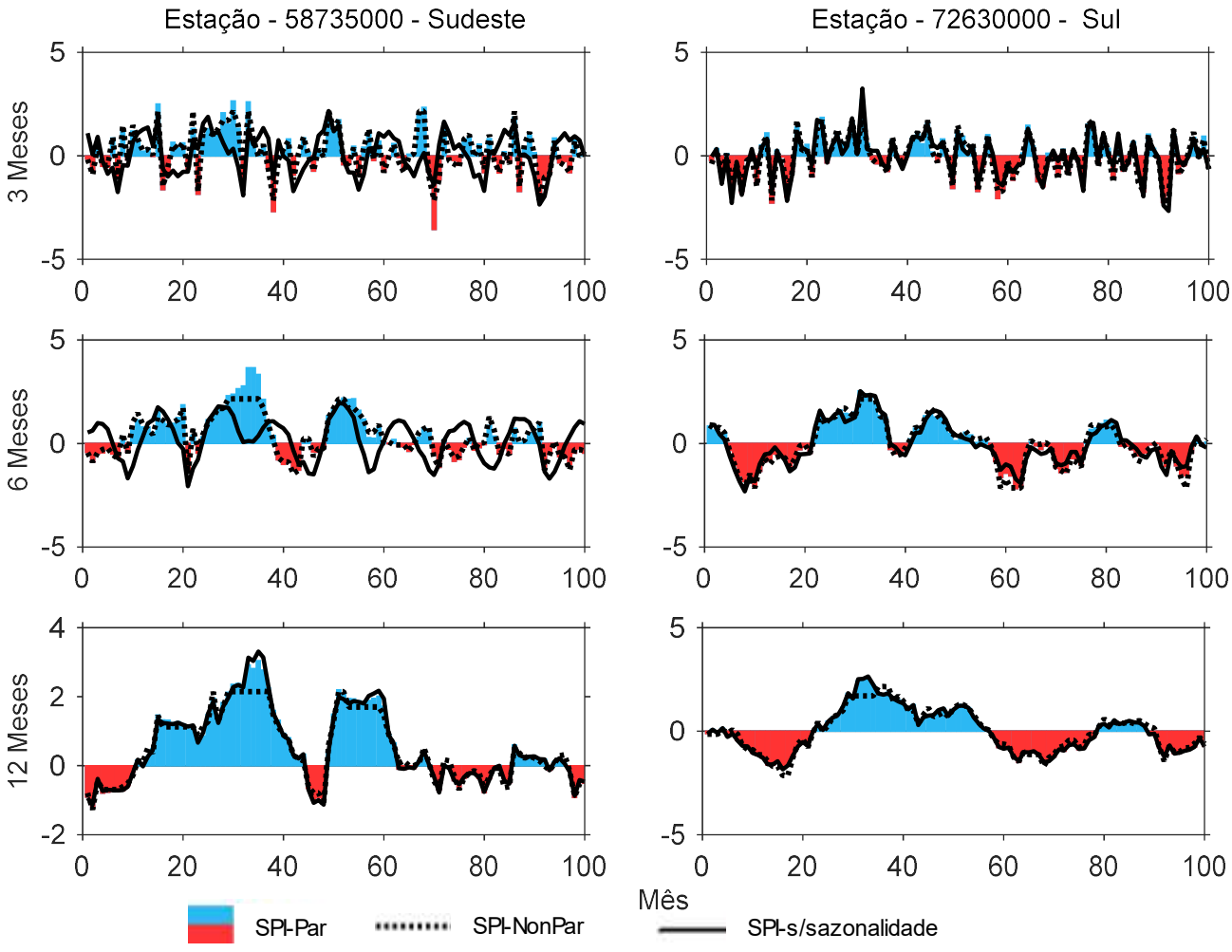

Figura 3- Análise dos métodos utilizados. A série inicia em janeiro de 1981 e termina em abril de 1989 A área em azul e vermelho apresenta o SPI obtido pelo método paramétrico considerando a sazonalidade (SPI-Par). A linha tracejada corresponde ao método não paramétrico levando em consideração os efeitos da sazonalidade (SPI-NonPar). Já a linha continua representa o método paramétrico sem considerar a sazonalidade (SPI-s/sazonalidade). A bacia localizada no Sudeste possui uma área de aproximadamente 2400 km². Já a bacia na região Sul possui uma área de aproximadamente 2800 km².

3.3 – MSDI

A Figura 4 apresenta uma comparação entre o SPEI, SSI e MSDI. Os resultados indicam que um evento de seca para o MSDI começa sempre que um evento seja identificado pelo SPEI ou SSI. Na maioria das vezes, o SPEI reconhece um evento antes ou ao mesmo tempo que o SSI. Pode haver essa diferença de reconhecimento porque existe um tempo de propagação de uma seca meteorológica (identificada pelo SPEI) para uma seca hidrológica (identificada pelo SSI). Além disso, nem sempre uma seca meteorológica leva a uma seca hidrológica. Seguindo o mesmo princípio, o SPEI geralmente identifica o final da seca antes do SSI. O MSDI continua a reconhecer uma seca até que ambos o SPEI e SSI não a reconheçam mais. Portanto, quando a vazão ou o balanço de precipitação e evapotranspiração potencial indicarem um evento de seca, o MSDI também indicará um evento.

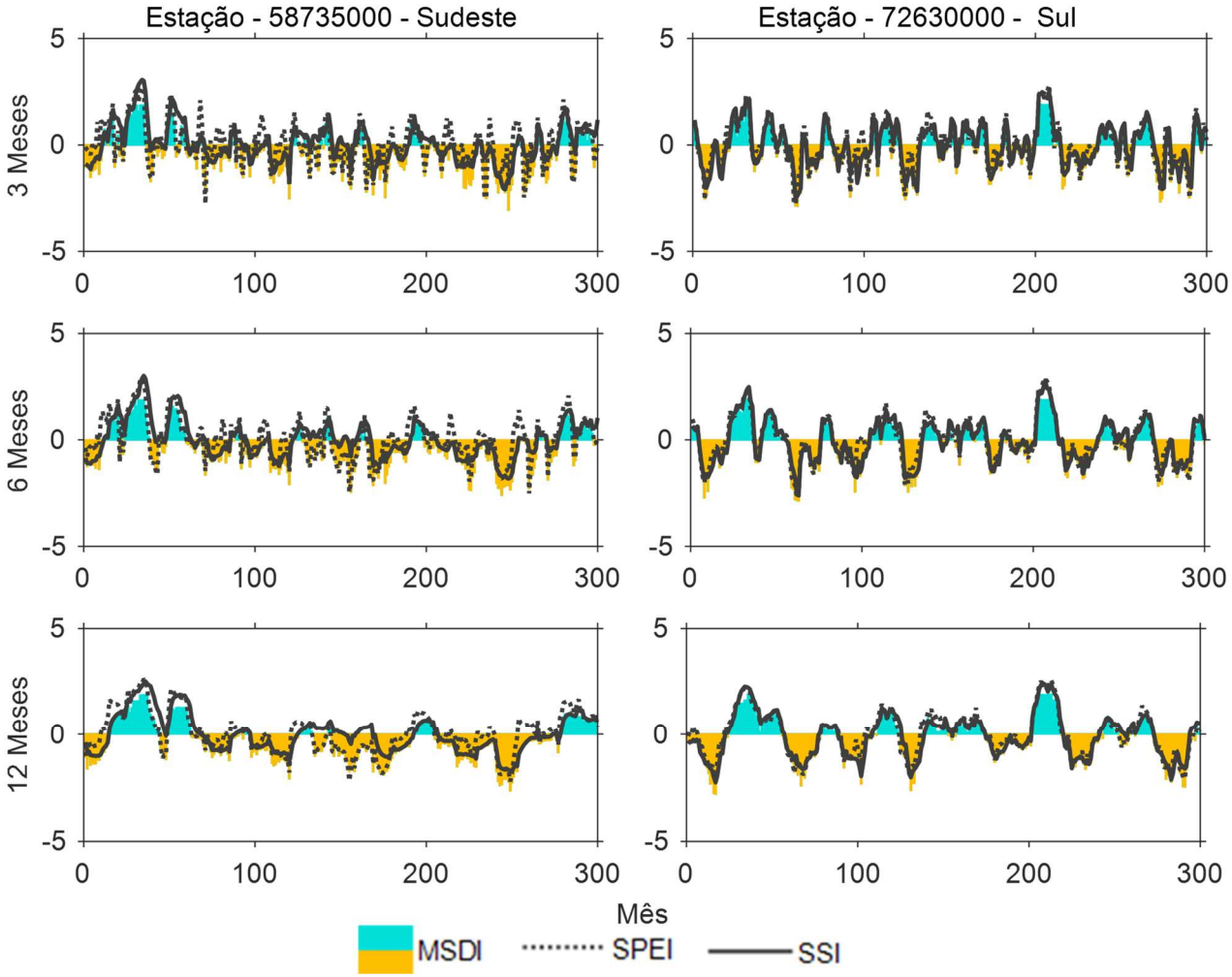

Figura 4-Comparação entre os índices MSDI, SPEI e SSI pelo método paramétrico considerando os efeitos da sazonalidade. A série inicia em janeiro de 1981 e termina em dezembro de 2005. A bacia localizada no Sudeste possui uma área de aproximadamente 2400 km². Já a bacia na região Sul possui uma área de aproximadamente 2800 km².

4 – CONCLUSÃO

Este trabalho teve por objetivo realizar uma análise dos índices de secas no Brasil. As principais conclusões obtidas foram:

I. Não há influência considerável da sazonalidade na obtenção dos índices de secas para bacias hidrográficas presentes na região sul.

II. Há influência significativa da sazonalidade nos índices de secas para períodos de acumulação inferiores a 12 meses em bacias hidrográficas localizadas em todas as regiões do país, exceto a região sul.

III. A computação dos índices com os métodos paramétricos e não-paramétricos pouco diferenciam na identificação do início, fim, e na duração das secas. No entanto, podem diferenciar significativamente na identificação da intensidade e severidade dos eventos de secas.

IV. Para o MSDI, os eventos de secas começam sempre que o SPEI ou o SSI reconheçam um evento, e duram até que o evento tenha terminado para ambos os índices.

Como consequência dos resultados obtidos, fica evidente que os estudos dos eventos de secas podem depender completamente dos índices utilizados e recomenda-se critério na escolha dos mesmos.

AGRADECIMENTOS

V.B.P. Chagas agradece ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pela bolsa de estudos.

REFERÊNCIAS

ANA - AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS. HidroWeb: Sistema de Informações Hidrológicas. Disponível em: http://hidroweb.ana.gov.br. Acesso em 15 fev. 2018.

BARKER, L. J. et al. (2016) "*From meteorological to hydrological drought using standardised indicators.*" Hydrology and Earth System Sciences, 20, pp. 2483–2505.

CPC- CLIMATE PREDICTION CENTER. CPC US Unified Precipitation Data. Colorado, USA, Disponível em: https://www.esrl.noaa.gov/psd/ . Acesso em outubro 2018.

FARAHMAND, A.; AGHAKOUCHAK, A. (2015) "*A generalized framework for deriving nonparametric standardized drought indicators."* Advances in Water Resources, 76, pp. 140–145.

HAO, Z. et al. (2014) "*Global integrated drought monitoring and prediction system.*" Scientific data, v. 1, p. 140001.

HAO, Z.; AGHAKOUCHAK, A. (2013) *"Multivariate Standardized Drought Index: A parametric multi-index model."* Advances in Water Resources, 57, pp. 12–18.

MARTENS, B. et al. (2017) *"GLEAM v3: Satellite-based land evaporation and root-zone soil moisture."* Geoscientific Model Development, 10, pp. 1903–1925.

MCKEE, T. B.; NOLAN, J.; KLEIST, J. (1993) *"The relationship of drought frequency and duration*

to time scales." Preprints, Eighth Conf. on Applied Climatology, Amer. Meteor, Soc**.**, n. January, p. 179–184.

MELO, D. D. C. D. et al. (2016) *"Reservoir storage and hydrologic responses to droughts in the Paraná River basin, south-eastern Brazil."* Hydrology and Earth System Sciences, 20, pp. 4673–4688.

MIRALLES, D. G. et al. (2011) *"Global land-surface evaporation estimated from satellite-based observations."* Hydrology and Earth System Sciences, 15,pp. 453–469.

STAGGE, J. H. et al. (2015) *"Candidate Distributions for Climatological Drought Indices (SPI and SPEI)."* International Journal of Climatology, 36, pp. 2132–2138.

USGS - U.S. GEOLOGICAL SURVEY. (2006). Shuttle Radar Topography Mission 1 Arc Second scene. Maryland, EUA. Disponível em: http://earthexplorer.usgs.gov/. Acesso em: 10 out. 2015.

VAN LOON, A. F. et al. (2014) *"How climate seasonalitymodifies drought duration and deficit."* Journal of Geophysical Research-Atmospheres, 119, pp. 4640–4656.

VAN LOON, A. F. (2015)*"Hydrological drought explained."* Wiley Interdisciplinary Reviews: Water, 2, p. 359–392.

VICENTE-SERRANO, S. M. et al. (2012)*"Accurate Computation of a Streamflow Drought Index."* Journal of Hydrologic Engineering, 17, pp. 318–332.

VICENTE-SERRANO, S. M.; BEGUERÍA, S.; LÓPEZ-MORENO, J. I.(2010) *"A multiscalar drought index sensitive to global warming: The standardized precipitation evapotranspiration index."* Journal of Climate, 23, pp. 1696–1718.

WILHITE, Donald A. (2000). *"Drought as a Natural Hazard: Concepts and Definitions." In: Drought: A Global Assesment.* Routledge, Londres. pp. 3-18.

WILHITE, D. A.; GLANTZ, M. H.; AND GLANTZ, M. H. (1985) *"Understanding the Drought Phenomenon:The Role of Definitions."* Water International, 10, pp. 111-120.

XAVIER, A. C.; KING, C. W.; SCANLON, B. R. (2016) *"Daily gridded meteorological variables in Brazil (1980–2013)."* International Journal of Climatology, 36, pp. 2644–2659.