



## Caracterização Espaço-Temporal das Secas na Bacia do Rio Paraíba do Sul Spatial-Temporal Characterization of Droughts in the Paraíba do Sul Basin

Gildo Rafael de Almeida Santana<sup>1</sup>; Eliane Barbosa Santos<sup>1</sup>  
& Maria Gertrudes Alvarez Justi da Silva<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro, Laboratório de Meteorologia,  
Av. Brenand, s/n Parque Industrial BellaVista, Imboassica, 27925 535, Macaé, RJ, Brasil  
E-mails: gildoraphael@gmail.com; elianebs@uenf.br; justi.meteoro@gmail.com

Recebido em: 09/06/2020 Aprovado em: 25/09/2020

DOI: [http://dx.doi.org/10.11137/2020\\_4\\_364\\_375](http://dx.doi.org/10.11137/2020_4_364_375)

### Resumo

Nos últimos anos os eventos de seca vêm ocorrendo com maior frequência e intensidade em algumas regiões do Brasil, causando grandes prejuízos socioeconômicos e ambientais. No período de 2014 a 2016, por exemplo, a bacia hidrográfica do rio Paraíba do Sul (situada na região Sudeste do Brasil) enfrentou uma grave crise hídrica, que passou a ameaçar o abastecimento de água das principais cidades dos estados de São Paulo e do Rio de Janeiro. Neste sentido, este trabalho teve como objetivo analisar e caracterizar os eventos de seca na região da bacia hidrográfica do rio Paraíba do Sul. Para isso, foram utilizados dados de precipitação de 92 postos pluviométricos da rede hidrometeorológica gerenciada pela Agência Nacional de Águas (ANA), referentes ao período de 1970 a 2018. Os eventos de secas foram caracterizados pelo Índice de Precipitação Padronizado, na escala de tempo de 12 meses. Posteriormente, foi usado o teste estatístico não paramétrico de Mann-Kendall para detectar tendências estatisticamente significativas. A magnitude das tendências foi obtida pelo estimador de Sen. De forma geral, os resultados obtidos sugerem que o regime pluviométrico na bacia Paraíba do Sul vem sofrendo alterações em uma escala local. Algumas regiões apresentaram tendência significativa de diminuição de precipitação, enquanto outras apresentaram tendência significativa de aumento de precipitação. Desse modo, os resultados apontam a importância do monitoramento hidrológico pontual para melhoria na definição de estratégias para o enfrentamento dos eventos de estiagens e secas.

**Palavras-chave:** *Índice de Precipitação Padronizada; Déficit de Precipitação; Análise de Tendência*

### Abstract

In recent years, drought events have been occurring more frequently and intensity in some regions of Brazil, causing significant socio-economic and environmental damage. In the period from 2014 to 2016, for example, the hydrographical basin of the Paraíba do Sul River (located in the Southeastern region of Brazil) faced a severe water crisis, threatening the water supply of the main cities in the states of São Paulo and Rio de Janeiro. This study aimed to analyze and characterize the drought events in the aforementioned region. For this purpose, precipitation data from 92 pluviometric stations in the hydrometeorological network managed by the National Water Agency of Brazil (ANA) were used, referring to 1970 to 2018. Drought events were characterized by the Standardized Precipitation Index, on the 12-month time scale. Subsequently, the Mann-Kendall non-parametric statistical test was used to detect statistically significant trends. The magnitude of the trends was obtained by the Sen estimator. In general, the results obtained suggest that the rainfall regime in the Paraíba do Sul basin had changes on a local scale. Some regions showed a significant tendency to decrease precipitation, while others showed a significant tendency to increase precipitation. This way, the results point to the importance of punctual hydrological monitoring, so as to improve the delineation of strategies to face drought and dry weather events.

**Keywords:** *Standardized Precipitation Index; Precipitation Deficit; Trend Analysis*

## 1 Introdução

A seca é um fenômeno climático natural caracterizado pela deficiência de precipitação durante um período prolongado, capaz de provocar impactos relevantes de caráter socioeconômico, agrícola e ambiental. Além de afetar o abastecimento de água, a seca também afeta a produção de energia elétrica, que no Brasil a maior parte (66,6%) é proveniente da geração de energia hidrelétrica (EPE, 2019). Também é importante destacar que, quando a economia local está diretamente ligada às atividades da agropecuária, dependendo do tamanho da cultura, da necessidade de irrigação e do seu grau de importância para a economia local, os danos econômicos podem ser catastróficos (CEPED UFSC, 2013).

Embora as secas sejam mais recorrentes no Nordeste do Brasil (Marengo *et al.*, 2016, 2017), elas também ocorrem em outras regiões do país. No período de 2014 a 2016, por exemplo, a região Sudeste enfrentou déficits de precipitação, resultando em condições de seca e uma grave crise hídrica, onde a falta de chuva no verão passou a ameaçar o abastecimento das principais metrópoles do estado de São Paulo. A redução nos reservatórios também afetou o abastecimento de água na região metropolitana do Rio de Janeiro (Silva, 2015). De acordo com a Agência Nacional de Águas (ANA, 2017a), a crise associada à escassez hídrica que ocorreu entre 2013 e 2016 afetou 48 milhões de pessoas no território nacional, sendo o ano de 2016 o mais crítico em relação aos impactos sobre a população.

Segundo Coelho *et al.* (2016a), a região Sudeste vem sofrendo com déficit de precipitação desde o final da década de 90, porém a anomalia observada no verão de 2013/2014 é a de maior magnitude, quando comparada com outros verões desde 1961/1962. A causa principal para o déficit de precipitação no verão 2013/2014 foi a atuação de um intenso, persistente e anômalo sistema de alta pressão atmosférica (Luiz-Silva *et al.*, 2015; Coelho *et al.*, 2016b). Esse sistema, atuando como um bloqueio atmosférico, teve uma duração de 45 dias (o que é extremamente raro em pleno período chuvoso) e inibiu a passagem de frentes frias, além de prejudicar o transporte de umidade da Amazônia para a porção central do Brasil, inibindo assim a formação da Zona de Convergência do Atlântico Sul (ZCAS) (Marengo *et al.*, 2015; Luiz-Silva *et al.*, 2015; Coelho *et al.*, 2016b; Nobre *et al.*, 2016).

No Brasil, a deficiência de disponibilidade de água é um fator particularmente crítico, pois além do abastecimento público, também compromete a geração de energia hidrelétrica. Além disso, a força com que o fenômeno da seca é sentindo, deve-se entre outros fatores, à deficiência na gestão dos recursos hídricos e na ineficiência da governança em políticas públicas para o enfrentamento desse tema, tendo em vista a abrangência

em que ocorre e os impactos que causa em diferentes áreas do país (ANA, 2017b).

No cenário nacional, a bacia hidrográfica do rio Paraíba do Sul destaca-se por estar localizada em uma das regiões mais desenvolvidas do país, onde encontram-se os maiores polos industriais e populacionais. Destaca-se, também, pelo número elevado de conflitos de usos múltiplos da água e pelo desvio dessa água para a bacia hidrográfica do rio Guandu, objetivando a geração de energia e abastecimento da população na região Metropolitana do Rio de Janeiro (Brasil, 2019). Portanto, o conhecimento e o monitoramento dos eventos de secas nessa região são de suma importância para o estabelecimento de propostas de planejamento, mitigação e diminuição da vulnerabilidade. Neste sentido, o objetivo deste trabalho foi analisar e caracterizar os eventos de seca na região da bacia hidrográfica do rio Paraíba do Sul.

## 2 Materiais e Métodos

### 2.1 Caracterização da Área de Estudo

A bacia hidrográfica do rio Paraíba do Sul está localizada em uma das regiões mais desenvolvidas do país, na região Sudeste do Brasil, conforme ilustrado na Figura 1. Segundo Corrêa & Costa (2016), a bacia ocupa uma área de 55.500 km<sup>2</sup>, abrange o Vale do Paraíba Paulista (13.900 km<sup>2</sup>), a Zona da Mata Mineira (20.700 km<sup>2</sup>) e quase metade do estado do Rio de Janeiro (20.900 km<sup>2</sup>).

O rio Paraíba do Sul é formado pela união dos rios Paraíba e Piratininga, a 1.800 m, na serra da Bocaina, estado de São Paulo, apresentando comprimento de 1.100 km, calculados a partir da nascente do rio Piratininga até o seu desague no Oceano Atlântico, na cidade de São João da Barra, região norte fluminense do estado do Rio de Janeiro (Corrêa & Costa, 2016).

Segundo Galvão e Bermann (2015), vinte e oito municípios que pertencem aos estados de São Paulo e Rio de Janeiro são banhados pelo rio Paraíba do Sul e captam água para abastecimento público. Além disso, há cerca de 120 usinas hidrelétricas em operação na bacia, entre grandes, médias e pequenas geradoras (Ioris, 2011). Dentre elas, as principais que pertencem ao estado do Rio de Janeiro são: Funil, Fontes, Nilo Peçanha e Pereira Passos (Galvão & Bermann, 2015).

Neste sentido, as características geográficas da bacia hidrográfica do rio Paraíba do Sul tornam o estado do Rio de Janeiro um dependente, pois se localiza a jusante dos estados vizinhos, abastece aproximadamente 12,3 milhões de pessoas (75% da população do estado), cerca de 85% das atividades agrícolas, além das grandes indústrias do estado (INEA, 2015).

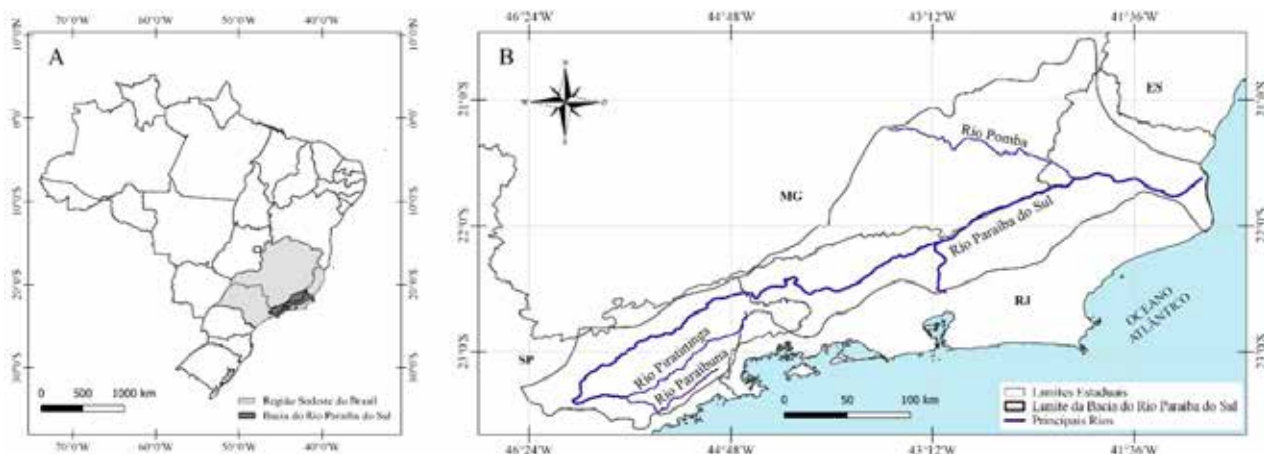


Figura 1 A. Localização da bacia hidrográfica do rio Paraíba do Sul; B. Bacia hidrográfica do rio Paraíba do Sul e seus principais rios.

## 2.2 Dados

Para este estudo, foram utilizados dados diários de precipitação de 92 postos pluviométricos da rede hidrometeorológica gerenciada pela ANA, referentes ao período de 1970 a 2018. Seguindo as recomendações da Organização Meteorológica Mundial (WMO, 1989), para o cálculo do acumulado mensal, foi descartado o mês que apresentou algum valor diário faltante. Os 92 postos pluviométricos estão relativamente bem distribuídos espacialmente (Figura 2) e apresentam um percentual de falhas inferior ou igual a 10% nas séries históricas.

## 2.3 Índice de Precipitação Padronizada

Para caracterizar os eventos de secas foi utilizado o Índice de Precipitação Padronizado (SPI, sigla em inglês de *Standardized Precipitation Index*), que é comumente utilizado para o monitoramento de condições associadas a secas. Esse indicador apresenta a grande vantagem de padronizar a análise, permitindo que se compare regiões com características climáticas distintas. O SPI foi desenvolvido por McKee *et al.* (1993, 1995) e quantifica o déficit ou excesso de precipitação, acumulados para quaisquer escalas de tempo. Essas escalas de tempo refletem o impacto da

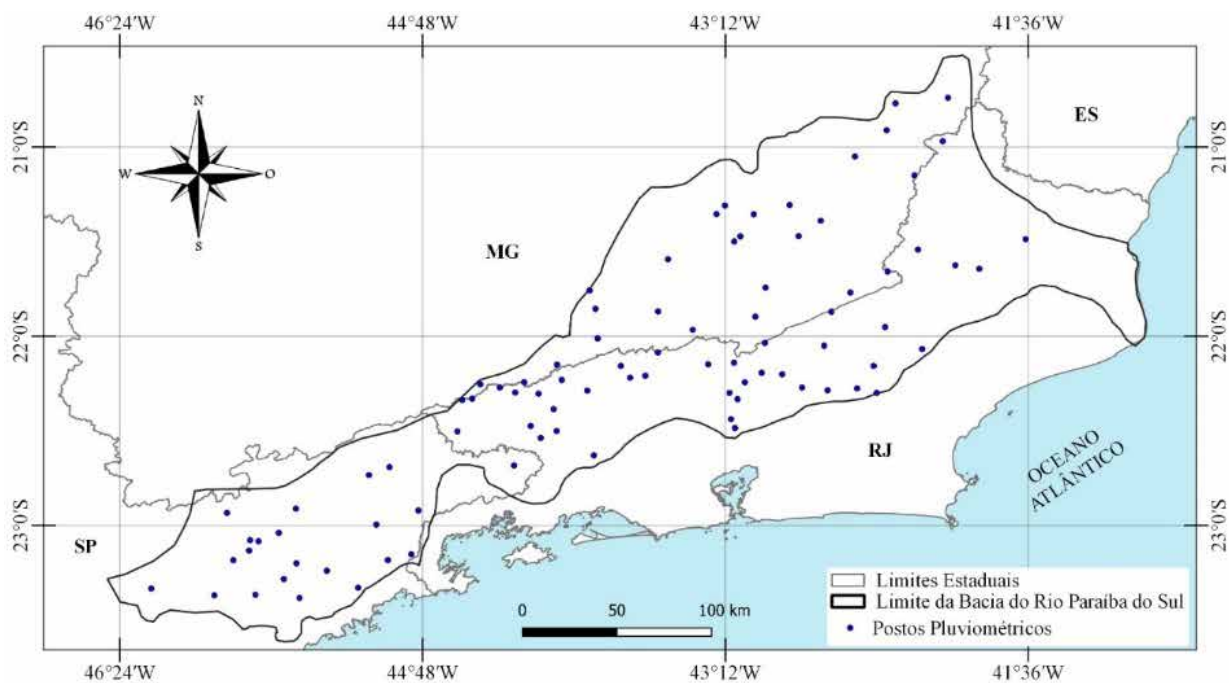


Figura 2 Bacia do rio Paraíba do Sul e a localização dos postos pluviométricos utilizados neste trabalho.

seca e a disponibilidade de água para os seus diferentes usos (Hayes *et al.*, 1999).

Neste trabalho, o SPI foi calculado na escala de tempo de 12 meses (SPI-12), que reflete o impacto das secas nos fluxos dos rios e nos reservatórios. O cálculo do SPI para cada localidade é baseado em uma série longa de dados de precipitação. Inicia-se com a determinação da distribuição de probabilidades de precipitação, a qual é ajustada por meio da distribuição gama e, posteriormente, transformada em uma distribuição normal que, por definição, apresenta sua média com valor zero e variância unitária (Edwards & McKee, 1997; Wu *et al.*, 2005).

A função de densidade de probabilidade é definida por (Thom, 1966):

$$g(x) = \frac{1}{\beta^\alpha \Gamma(\alpha)} x^{\alpha-1} e^{-\frac{x}{\beta}} \quad (1)$$

onde:  $\alpha > 0$  é parâmetro de forma,  $\beta > 0$  parâmetro de escala,  $x > 0$  o total de precipitação e  $\Gamma(\alpha)$  a função Gama, que é definida por:

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

Para estimar os parâmetros  $\alpha$  e  $\beta$ , foi utilizado o método da máxima verossimilhança (Thom, 1966):

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

$$\hat{\beta} = \frac{\bar{x}}{\hat{\alpha}} \quad (4)$$

sendo:  $\bar{x}$  o valor médio dos dados de precipitação para  $n$  observações, e  $A$  é definido por:

$$A = \ln(\bar{x}) - \frac{\sum \ln(x)}{n} \quad (5)$$

Os resultados dos parâmetros de forma e de escala são utilizados para encontrar a probabilidade cumulativa  $G(x)$  (Edwards & McKee, 1997):

$$G(x) = \int_0^x g(x) dx = \frac{1}{\beta \Gamma(\hat{\alpha})} = \int_0^x x^{\hat{\alpha}-1} e^{-\frac{x}{\beta}} dx \quad (6)$$

A função Gama  $\Gamma(\alpha)$  não é definida em  $x = 0$ , mas como a distribuição de precipitação pode conter zeros, a probabilidade cumulativa é dada pela seguinte expressão:

$$H(x) = q + (1-q)G(x) \quad (7)$$

sendo:  $H(x)$  a distribuição da probabilidade cumulativa,  $G(x)$  a distribuição cumulativa teórica e  $q$  é a probabilidade de ocorrer zero, em que  $q = \frac{m}{n}$ , onde  $m$  é o número de zeros da série temporal de precipitação e  $n$  é o número de observações da série.

O valor  $H(x)$  é transformado em uma variável normal que resulta no valor do SPI (Edwards & McKee, 1997), definido por (Abramowitz & Stegun, 1965):

$$SPI = \begin{cases} -\left( t - \frac{c_0 + c_1 t + c_2 t^2}{1 + d_1 t + d_2 t^2 + d_3 t^3} \right), & 0 < H(x) \leq 0,5 \\ +\left( t - \frac{c_0 + c_1 t + c_2 t^2}{1 + d_1 t + d_2 t^2 + d_3 t^3} \right), & 0,5 < H(x) < 1 \end{cases} \quad (8)$$

onde:  $c_0, c_1, c_2, d_1, d_2, d_3$  são constantes.  $c_0 = 2.51551$ ;  $c_1 = 0.802853$ ;  $c_2 = 0.010328$ ;  $d_1 = 1.432788$ ;  $d_2 = 0.189269$ ;  $d_3 = 0.001308$ , e  $t$  é dado por:

$$t = \begin{cases} \sqrt{\ln \left[ \frac{1}{(H(x))^2} \right]}, & 0 < H(x) \leq 0,5 \\ \sqrt{\ln \left[ \frac{1}{(1-H(x))^2} \right]}, & 0,5 < H(x) < 1 \end{cases} \quad (9)$$

A classificação dos eventos foi feita de acordo com os limites propostos por McKee *et al.* (1993), de modo que o evento seca se inicia quando o SPI toma valores menores ou iguais a -1, conforme classificação apresentada na Tabela 1.

SPI	Categorias
$\geq 2.00$	Extremamente úmido
1.50 a 1.99	Muito úmido
1.00 a 1.49	Moderadamente úmido
-0.99 a 0.99	Normal
-1.49 a -1.00	Moderadamente seco
-1.99 a -1.50	Muito seco
$\leq -2.00$	Extremamente seco

Tabela 1 Valores do SPI e categorias de períodos secos ou períodos úmidos.

### 2.3.2 Análise de Tendência

Para detectar tendências estatisticamente significativas nas séries temporais de precipitação anual e do SPI-12, foi utilizado o teste estatístico não paramétrico de Mann-Kendall (Mann, 1945; Kendall, 1975), que vem sendo utilizado em diversas pesquisas visando identificar eventuais tendências monotônicas em séries hidrometeorológicas (Yue *et al.*, 2002; Marengo & Alves, 2005; Santos *et al.*, 2015; Salviano *et al.*, 2016; Guedes *et al.*, 2019; entre outras).

Para uma dada série temporal  $X_1, X_2, \dots, X_n$ , no teste de Mann-Kendall, deseja-se testar a hipótese nula ( $H_0$ ), de inexistência de tendência, contra a hipótese alternativa

( $H_1$ ), em que há uma tendência monotônica de aumento ou redução. A estatística do teste é determinada por:

$$Z = \begin{cases} \frac{S-1}{\sigma}, se S > 0 \\ 0, se S = 0 \\ \frac{S+1}{\sigma}, se S < 0 \end{cases} \quad (10)$$

onde:

$$S = \sum_{k=1}^{n-1} \sum_{j=k+1}^n \text{sin}al(x_j - x_k) \quad (11)$$

em que:  $n$  o número de observações e  $x_j$  e  $x_k$  são valores sequenciais. Já o  $\text{sin}al(x_j - x_k)$  é obtido por meio da equação:

$$\text{sin}al(x_j - x_k) = \begin{cases} 1, se (x_j - x_k) > 0 \\ 0, se (x_j - x_k) = 0 \\ -1, se (x_j - x_k) < 0 \end{cases} \quad (12)$$

Segundo Kendall (1975),  $S$  é normalmente distribuída, ou seja,  $S \sim N(\mu, \sigma^2)$  com:

$$\mu = 0 \quad (13)$$

$$\sigma^2 = \frac{n(n-1)(2n+5) - \sum_{j=1}^p t_j(t_j-1)(2t_j+5)}{18} \quad (14)$$

onde:  $n$  é o número de observações,  $p$  é o número de grupos com observações iguais (considerando o caso em que a série pode ter grupos com observações iguais) e  $t_j$  representa o número de observações iguais no grupo  $j$ .

Em um teste bilateral, não rejeitamos a hipótese nula ( $H_0$ ) para um certo nível de significância  $\alpha$ , se para o quantil  $Z_{\alpha/2}$  de uma distribuição normal padrão temos  $|Z| \leq Z_{\alpha/2}$ . Neste estudo, foi utilizado o nível de confiança de 95%, ou seja, nível de significância  $\alpha$  igual a 5%.

Apesar da eficiência do teste de Mann-Kendall, ele não fornece a magnitude das tendências detectadas. Para isso, foi utilizado o teste não paramétrico de Sen (Sen, 1968), denominado de estimador de declive de Sen. Para se estimar a tendência ( $T$ ), primeiramente calcula-se todos os declives entre cada par de variáveis  $j$  e  $k$  (Sen, 1968):

$$T_i = \frac{X_j - X_k}{j - k} \text{ com } j > k, \text{ para } i = 1, 2, 3, \dots, N \quad (15)$$

onde  $X_j$  e  $X_k$  representam os valores da variável em estudo nos anos  $j$  e  $k$ . Valor positivo ou negativo para  $T$  indica tendência crescente ou decrescente, respectivamente. Se há

$n$  valores na série analisada, então existe  $N = n(n-1)/2$  estimativas para a tendência  $T$ . O estimador de declive de Sen é a mediana dos  $N$  valores de  $T_i$ , calculada por:

$$T_{med} = \begin{cases} T_{[N+1/2]}, se N \text{ é ímpar} \\ \frac{1}{2}(T_{[N/2]} + T_{[N+2/2]}), se N \text{ é par} \end{cases} \quad (16)$$

### 2.3.3 Interpolação

A análise espacial foi realizada por meio da interpolação, que é o processo de utilização de pontos com valores conhecidos para estimar os valores em outros pontos desconhecidos (Lam, 1983). Neste trabalho, foi utilizado o método do inverso do quadrado da distância de forma similar a Mello *et al.* (2003):

$$x_p = \frac{\sum_{j=1}^n \left( \frac{1}{d_{ij}^2} \cdot x_i \right)}{\sum_{i=1}^n \left( \frac{1}{d_{ij}^2} \right)} \quad (17)$$

em que:  $x_p$  é a variável interpolada;  $x_i$  é o valor da variável da  $i$ -ésima localidade vizinha;  $n$  é o número de amostras e  $d_{ij}$  é a distância euclidiana entre o  $i$ -ésimo ponto de vizinhança e a amostra  $j$ , conforme descrito por (Camargo *et al.*, 2004):

$$d_{ij} = \sqrt{(x_i - x_j)^2 + (y_i - y_j)^2} \quad (18)$$

A resolução da malha (linhas x colunas) para o domínio espacial amostral foi de aproximadamente 1 km (latitude) x 1,8 km (longitude).

## 3 Resultados e Discussões

A Figura 3 mostra a precipitação média anual acumulada na bacia do rio Paraíba do Sul para o período de 1970 a 2018. Observa-se que os valores variam entre 900 e 2700 mm, sendo os maiores totais pluviométricos registrados na divisa dos estados de São Paulo e do Rio de Janeiro com o de Minas Gerais, com valores maiores que 1800 mm. Esses maiores valores ocorrem em regiões montanhosas que possuem altitudes acima de 1000 metros (Brasiliense *et al.*, 2020). Já os menores valores são observados no Norte do estado do Rio de Janeiro, apresentando núcleos com médias anuais de chuva abaixo de 1200 mm.

As médias dos acumulados trimestrais da precipitação são apresentados na Figura 4. Observa-se que o verão (dezembro, janeiro e fevereiro – DJF) é o período mais chuvoso da região, com acumulados trimestrais entre 400 e 1200 mm, correspondendo em média a 46,5% do total pluviométrico anual da região.

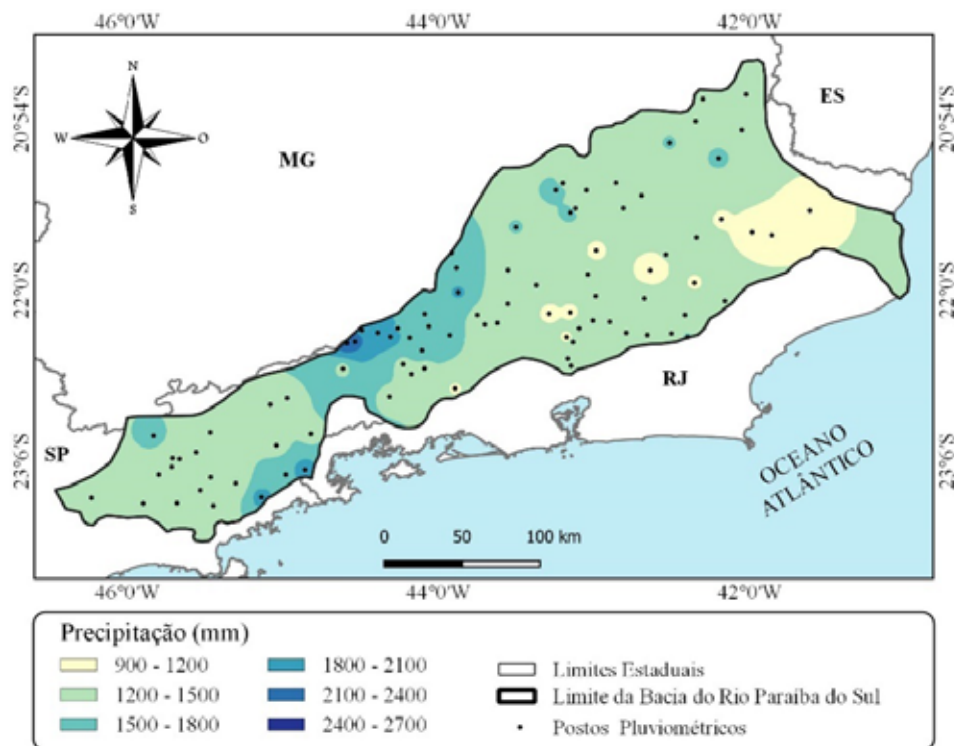


Figura 3 Média do total pluviométrico anual na bacia do rio Paraíba do Sul para o período de 1970 a 2018.

Na bacia do rio Paraíba do Sul, os valores pluviométricos são em média mais elevados nos meses de verão devido ao estabelecimento de sistemas atmosféricos típicos da América do Sul nessa estação do ano, como a ZCAS (Reboita *et al.*, 2010, Luiz-Silva & Dereczynski, 2014) e ocasionais passagens de frentes frias.

As chuvas registradas na primavera (setembro, outubro e novembro – SON) e no verão (DJF) correspondem, em média, a 72,4% do total pluviométrico anual da região. Dentre os 92 postos pluviométricos analisados neste estudo as porcentagens variam entre 64 e 78%, caracterizando assim uma estação mais chuvosa em relação a outra mais seca. Esses resultados estão de acordo com os obtidos por Brasiense *et al.* (2020), que também observou que os maiores volumes de chuva na região da bacia do rio Paraíba do Sul ocorrem durante as estações do verão e da primavera, com cerca de 73% do total de chuva anual da região.

Nas estações do outono (março, abril e maio – MAM) e primavera (SON), foi observado um comportamento similar. As médias dos acumulados trimestrais estão entre 200 e 400 mm na maior parte da região e alguns núcleos de 400 a 600 mm, principalmente na primavera, correspondendo em média a 21,4% (outono) e 25,8% (primavera) da chuva anual da região. Tais resultados também estão de acordo com Brasiense *et al.* (2020), que destacaram, ainda, que os menores valores pluviométricos ocorrem no inverno (junho, julho e agosto – JJA),

representando em média apenas 6% do total de chuva anual da bacia do rio Paraíba do Sul.

Neste estudo, as menores médias dos acumulados trimestrais também foram observadas no inverno (JJA), com valores entre 30 e 200 mm, correspondendo em média a 6,1% da chuva anual. Esses baixos valores pluviométricos no inverno estão relacionados à atuação do Anticiclone Subtropical do Atlântico Sul (ASAS), que se encontra mais próximo ao continente nessa época do ano (Reboita *et al.*, 2010). As chuvas registradas no inverno (JJA) e outono (MAM) correspondem, em média, a 27,5% do total pluviométrico anual da região.

A Figura 5 apresenta os resultados da aplicação do teste de Mann-Kendall nas séries dos totais anuais de precipitação e do SPI-12. Dos 92 postos pluviométricos analisados, 8 apresentaram tendências estatisticamente significativas a um nível de confiança de 95% apenas no SPI-12, sendo 1 positiva e 7 negativas. Em outros 8 postos pluviométricos, foram observadas tendências significativas apenas nas séries dos totais anuais de precipitação, onde 5 foram positivas e 3 negativas. Também foram observados, em outros 7 postos pluviométricos, tendência significativa em ambas as séries analisadas (precipitação anual e SPI-12), onde 2 foram positivas e 5 negativas. Esses resultados sugerem que o regime pluviométrico vem sofrendo alterações em uma escala local, com tendências heterogêneas.

**Caracterização Espaço-Temporal das Secas na Bacia do Rio Paraíba do Sul**  
 Gildo Rafael de Almeida Santana; Eliane Barbosa Santos & Maria Gertrudes Alvarez Justi da Silva

Marengo & Alves (2005) analisaram a chuva em alguns postos pluviométricos na bacia do rio Paraíba do Sul, para o período da análise 1930-2000 e, verificaram

que não houve tendências significativas, positivas ou negativas, durante a estação chuvosa (DJF) na bacia. No entanto, esses autores encontraram tendências

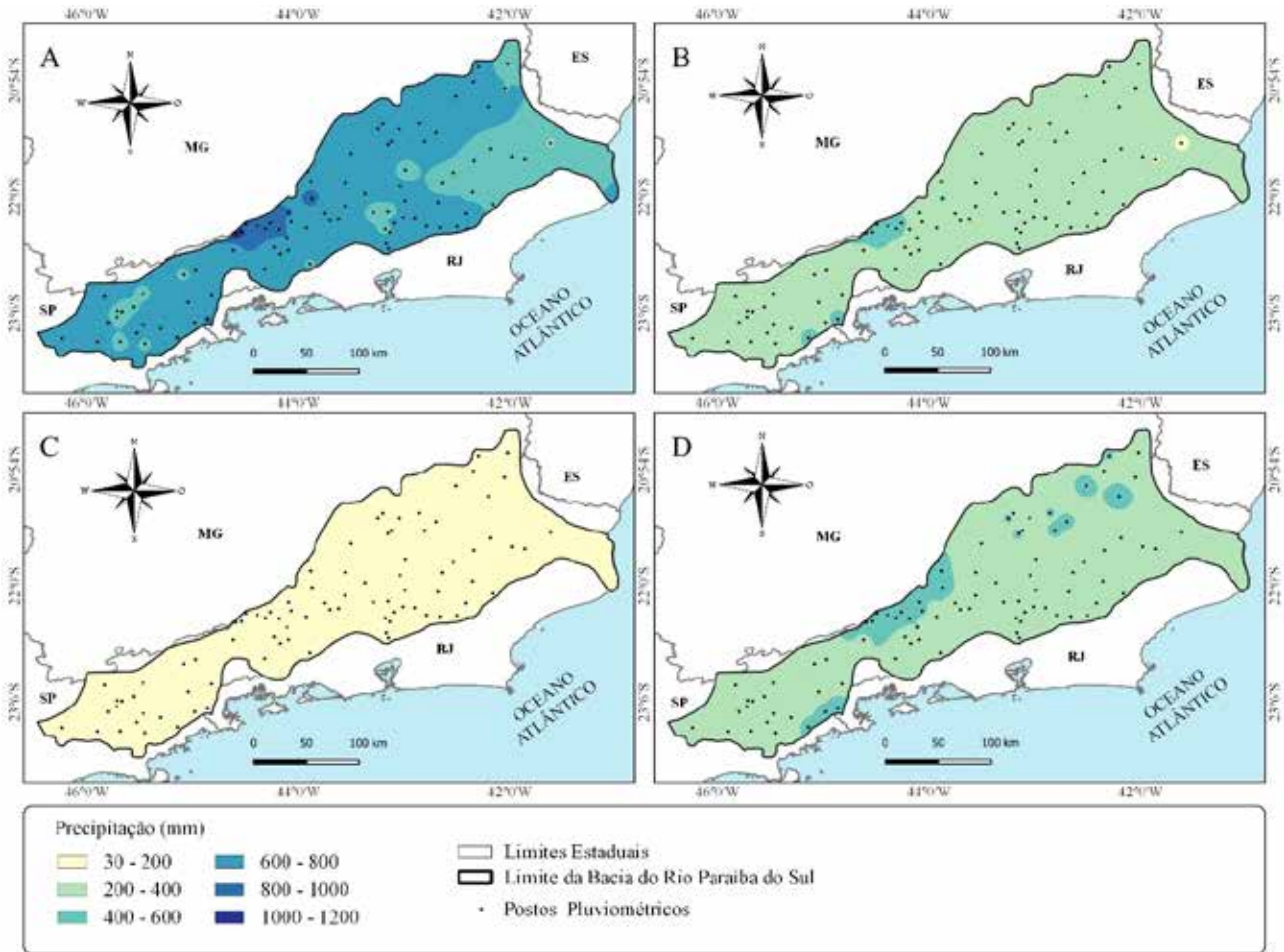
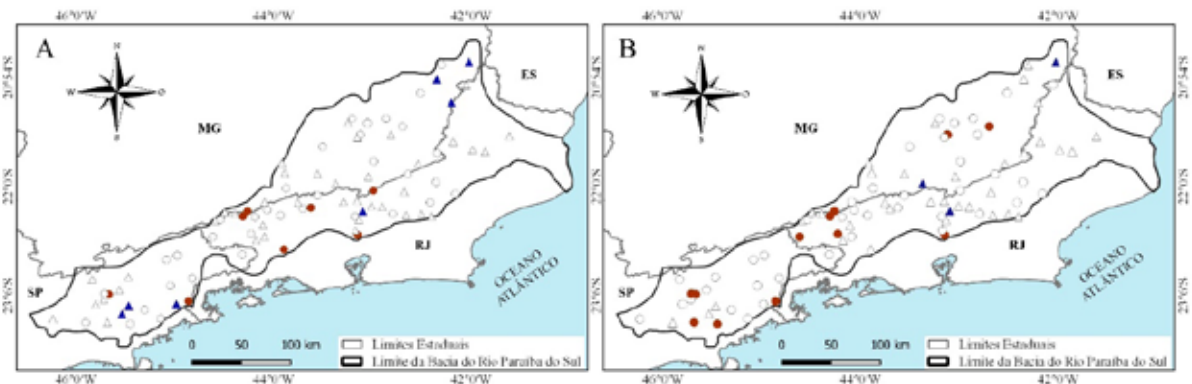


Figura 4 Média do acumulado trimestral da precipitação na bacia do rio Paraíba do Sul para o período de 1970 a 2018: A. Verão (DJF); B. Outono (MAM); C. Inverno (JJA); D. Primavera (SON).



▲ (+) Significativo a 5%    △ (+) Não significativo a 5%    ● (-) Significativo a 5%    ○ (-) Não significativo a 5%

Figura 5 Tendências identificadas nas séries temporais da bacia do rio Paraíba do Sul no período de 1970 a 2018: A. Precipitação anual; B. SPI-12. As tendências estatisticamente significativas ao nível de significância de 5% estão representadas por triângulos azuis (aumento) e círculos vermelhos (diminuição).

estatisticamente significativas nas vazões do Rio Paraíba do Sul, considerando os níveis de significância de 5% ou 1%, que não parecem estar associadas às variações de chuva na bacia. Neste estudo, todavia, foram observadas tendências estatisticamente significativas a um nível de confiança de 95% nas séries dos totais anuais de precipitação e do SPI-12 em alguns postos pluviométricos, para o período de 1970-2018.

A Figura 6 exibe apenas os postos pluviométricos que apresentaram tendência estatisticamente significativa ao nível de 5% em ambas as séries analisadas (precipitação anual e SPI-12). Observa-se que dos 7 postos pluviométricos que apresentaram tendências significativas, 2 estão localizadas no estado de Minas Gerais, 3 no Rio de Janeiro e 2 em São Paulo.

A Tabela 2 apresenta a magnitude das tendências das séries dos totais anuais dos postos pluviométricos que apresentaram tendência estatisticamente significativa. Observa-se que a tendência é positiva nas estações Areal – RJ e Carangola – MG, sugerindo aumento acima de 9 mm no total pluviométrico anual. As demais regiões, Alto S. do Mar-B Mato Limpo – SP, Cerâmica Quirino – SP, Fumaça – RJ, Itamarati – RJ e Zelinda – MG, apresentaram tendência negativa, sendo as maiores taxas de diminuição observadas nos postos pluviométricos localizados no estado de São Paulo, -34,47 mm/ano em Alto S. do Mar-B Mato Limpo – SP e -18,49 mm/ano em Cerâmica Quirino – SP.

As séries temporais de SPI-12 e dos totais pluviométricos anuais dos postos pluviométricos que apresentaram tendência positiva significativa (Carangola – MG e Areal – RJ) são mostradas na Figura 7, onde observa-se uma maior concentração de valores positivos do SPI-12

Postos Pluviométricos	Estimador de Sen ( $T$ ) (mm/ano)
Alto S. do Mar-B Mato Limpo – SP	-34,47 mm
Areal – RJ	+9,92
Carangola – MG	+9,67
Cerâmica Quirino – SP	-18,49
Fumaça – RJ	-11,35
Itamarati – RJ	-5,52
Zelinda – MG	-8,10

Tabela 2 Resultado do estimador de Sen para as séries dos totais anuais de precipitação dos postos pluviométricos que apresentaram tendência estatisticamente significativa ao nível de 5% tanto nas séries temporais de precipitação anual quanto de SPI-12 na bacia do rio Paraíba do Sul.

a partir do ano 2000. Nota-se ainda que há uma maior frequência de valores negativos a partir de 2014 na região de Areal – RJ. Esses valores negativos, que se configuram como período seco, foram registrados no período da crise hídrica de 2014-2015, quando foram observados expressivos déficits de precipitação na região Sudeste, com impactos em diversos setores econômicos, como já mencionado.

Segundo Coelho *et al.* (2016a), os déficits de precipitação encontrados na região Sudeste em 2014 foram expressivos, com acúmulo de apenas 439 mm de dezembro de 2013 a março de 2014 na região sudeste do estado de São Paulo. Luiz-Silva *et al.* (2015) destacaram o mês de fevereiro de 2014, que tem média climatológica em torno de 180 a 220 mm na região sudeste do Brasil, no entanto,



Figura 6 Postos pluviométricos que apresentaram tendência estatisticamente significativa ao nível de 5% tanto nas séries temporais de precipitação anual quanto de SPI-12 na bacia do rio Paraíba do Sul.



o volume de chuvas não passou de 50 mm na maior parte dessa área.

Em Areal – RJ, os menores totais pluviométricos da série temporal analisada (1970 – 2018) foram registrados em 2014 (612,20) e 1974 (683,00 mm). Vale ressaltar que o período de déficit de precipitação de maior duração foi registrado em 1974 – 1981, com totais anuais abaixo da precipitação média anual (1296,2 mm) e valores negativos de SPI-12 nos 8 anos. Já em Carangola – MG, o período seco de maior duração foi de 1986 a 1997, quando houve totais anuais de precipitação abaixo da média (1205,2 mm) e valores negativos acentuados de SPI-12. De forma geral, observa-se em ambas regiões uma variabilidade decadal, com precipitações abaixo (acima) da média antes (depois) de 1982 e 1998 em Areal – RJ e Carangola – MG, respectivamente.

A Figura 8 apresenta as séries temporais do SPI-12 e dos totais pluviométricos anuais dos postos pluviométricos que apresentaram tendência negativa significativa. De maneira geral, observa-se uma maior frequência de valores negativos nas últimas décadas. Das cinco regiões analisadas, destacam-se dois postos pluviométricos localizados no estado de São Paulo (Alto S. do Mar-B Mato Limpo e Cerâmica Quirino), por apresentar uma maior duração dos eventos secos, ou seja, pela quantidade de anos consecutivos com valores negativos. Em Alto S. do Mar-B. Mato Limpo – SP, por exemplo, observa-se valores negativos de SPI-12 e totais pluviométricos abaixo da média (2019,4 mm)

de 1990 a 2018, com exceção de 1996 (2159,6 mm) e 2009 (2169,2 mm).

Observa-se nas Figuras 7 e 8 que os valores do SPI-12 estão de acordo com os totais pluviométricos anuais. É importante ressaltar que o SPI-12 corresponde à precipitação acumulada em 12 meses e que, neste estudo, não foram calculados os acumulados de precipitação nos períodos com falhas (ausência de dados), resultando assim nas interrupções aparentes nas séries temporais do SPI-12 (Figura 7 e 8).

Destaca-se ainda, nas Figuras 7 e 8, os diferentes padrões de comportamento nas séries temporais do SPI-12 e dos totais pluviométricos anuais. Algumas regiões mostraram evidências de uma variabilidade interanual mais destacada, como Itamarati-RJ, enquanto em outras (Alto S. do Mar-B. Mato Limpo -SP) a variabilidade é praticamente decadal. Isso evidencia que o comportamento das chuvas na bacia do rio Paraíba do Sul não é homogêneo.

Os postos pluviométricos que apresentaram tendência positiva significativa (Figura 7), tanto nas séries temporais de SPI-12 quanto nas séries dos totais pluviométricos anuais, estão localizados no centro-leste (Areal – RJ) e norte da bacia (Carangola – MG). Enquanto que os postos pluviométricos que apresentaram tendência negativa significativa (Figura 8) estão localizados na região central e sul da bacia. Esses diferentes padrões espaço-temporal de precipitação sugerem que o sul e norte da bacia são influenciados de forma diferente.

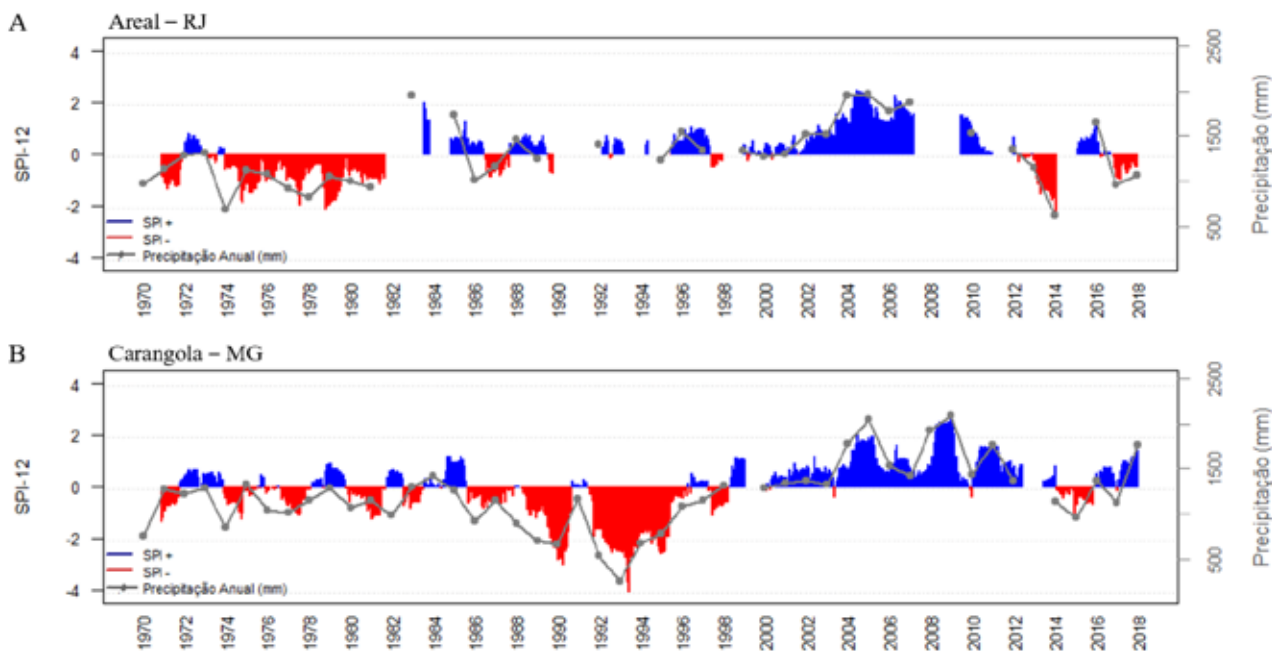


Figura 7 Série temporal de SPI-12 e dos totais pluviométricos anuais para os postos pluviométricos que apresentaram tendência positiva significativa (ao nível de significância de 5%) na precipitação anual e SPI-12: A. Areal – RJ; B. Carangola – MG.

**Caracterização Espaço-Temporal das Secas na Bacia do Rio Paraíba do Sul**  
Gildo Rafael de Almeida Santana; Eliane Barbosa Santos & Maria Gertrudes Alvarez Justi da Silva

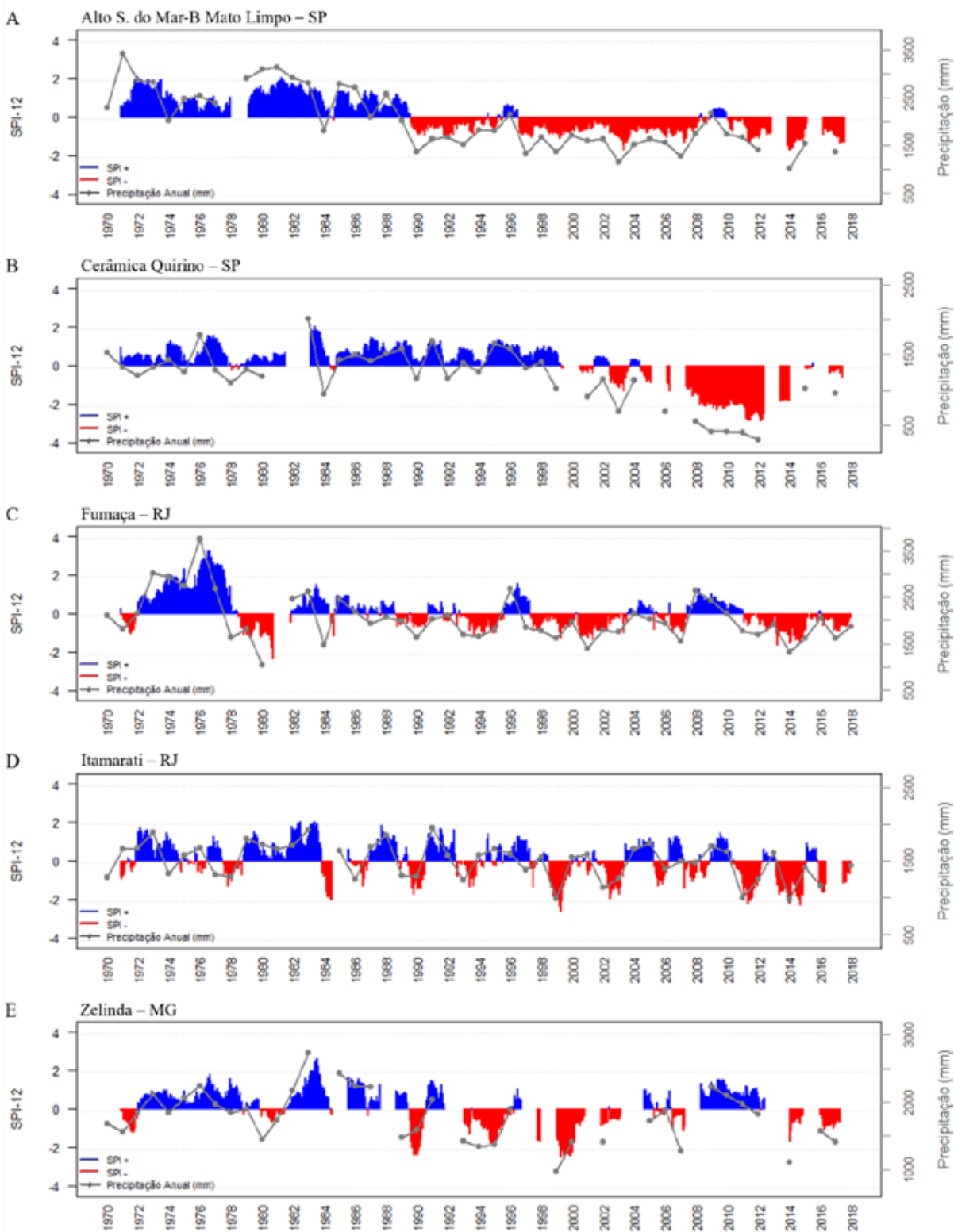


Figura 8 Série temporal de SPI-12 e dos totais pluviométricos anuais para os postos pluviométricos que apresentaram tendência negativa significativa (ao nível de significância de 5%) na precipitação anual e no SPI-12: A. Alto S. do Mar-B Mato Limpo –SP; B. Cerâmica Quirino – SP; C. Fumaça – RJ; D. Itamarati – RJ; E. Zelinda – MG.

Por fim, ressalta-se que os eventos de seca podem causar diversos impactos sociais e econômicos, como a diminuição nas vazões de rios e nos reservatórios de abastecimento, além de contribuir para a intensificação dos conflitos pelos usos múltiplos da água. Segundo Costa *et al.* (2018), em 2014 e 2015 a região Sudeste do Brasil viveu a pior seca já registrada, onde a fração paulista da bacia Paraíba do Sul registrou as menores vazões para o rio Paraíba do Sul em mais de 80 anos de monitoramento e, na fração fluminense, foi registrado em algumas estações, os piores valores do histórico.

## 4 Conclusões

Este estudo consistiu em analisar os eventos de seca na bacia hidrográfica do rio Paraíba do Sul, que é uma região estratégica para o país, onde encontram-se os maiores polos industriais e populacionais, altamente dependentes da disponibilidade hídrica da região. Os eventos de déficit de precipitação foram caracterizados pelo índice de precipitação padronizada utilizando dados de precipitação de 92 postos pluviométricos no período de 1970 a 2018.

De forma geral, os menores totais pluviométricos são observados no norte da bacia, com médias anuais entre 900 e 1500 mm. Já os maiores valores (entre 1800 e 2700 mm) são registrados na divisa dos estados de São Paulo e do Rio de Janeiro com o de Minas Gerais. Desses totais, a maior parte ocorre no verão austral, com acumulados trimestrais entre 400 e 1200 mm em toda a bacia do rio Paraíba do Sul, correspondendo em média a 46,5% do total pluviométrico anual da região.

Na análise de tendência, os resultados obtidos sugerem que o regime pluviométrico na bacia Paraíba do Sul vem sofrendo alterações em uma escala local. Em alguns postos pluviométricos a tendência significativa dos totais anuais de precipitação e do SPI-12 foi positiva e em outras foi negativa, ou seja, em algumas regiões os totais de precipitação vêm diminuindo e em outras vêm aumentando.

Nas séries temporais do SPI-12 com tendência negativa estatisticamente significativa ao nível de significância de 5%, destacam-se dois postos pluviométricos localizadas no estado de São Paulo (Cerâmica Quirino e Alto S. do Mar-B Mato Limpo), onde os valores negativos foram persistentes nas últimas décadas. Nas séries temporais com tendência positiva estatisticamente significativa a 5%, destaca-se a persistência dos valores positivos do SPI entre 1999 e 2012, e a ocorrência de valores negativos a partir de 2014, corroborando com o evento da crise hídrica ocorrido no período de 2014/2016.

Este estudo aponta a importância do monitoramento hidrológico pontual e regional, buscando melhorias na definição de estratégias para o enfrentamento dos eventos

de déficit de precipitação assim como para um planejamento que vise a segurança hídrica.

## 5 Referências

- Abramowitz, M. & Stegun I.A. (eds.). 1965. Handbook of Mathematical Functions with Formulas, Graphs, and Mathematical Tables. Dover Publications, Inc., New York, New York, 1046 pp.
- ANA. 2017a. Agência Nacional de Águas. Conjuntura dos recursos hídricos no Brasil 2017: relatório pleno/ Agência Nacional de Águas. Brasília: ANA.
- ANA. 2017b. Ministério do Meio Ambiente. Índice de vulnerabilidade aos desastres naturais relacionados às secas no contexto da mudança do clima/ Ministério do Meio Ambiente, Ministério da Integração Nacional, WWF-Brasil. Brasília, DF: MMA.
- ANA. 2019. Agência Nacional de Águas. Sala de Situação. Disponível em: <https://www.ana.gov.br/sala-de-situacao/paraiba-do-sul/paraiba-do-sul-saiba-mais>. Acesso em: ago. 2019.
- Brasiliense, C.S.; Dereczynski, C.P.; Satyamurty, P.; Chou, S.C. & Calado, R.N. 2020. Climatologias da Temperatura do Ar e da Precipitação na Bacia do Rio Paraíba do Sul, Região Sudeste do Brasil. *Anuário do Instituto de Geociências*, 43(1): 355-365.
- Camargo, E.C.G.; Fucks, S.D. & Câmara, G. 2004. Análise de superfícies por geoestatística linear. *In*: DRUCK S., CARVALHO M.S., CÂMARA G., MONTEIRO A.V.M. (EDS). Análise espacial de dados geográficos. Brasília, EMBRAPA, p.1-25.
- CEPED UFSC. 2013. Centro Universitário de Estudos e Pesquisas Sobre Desastres. Universidade Federal de Santa Catarina. Atlas Brasileiro de Desastres Naturais 1991 a 2012: volume Rio de Janeiro. Florianópolis.
- Coelho, C.A.S.; Cardoso, D.H.F. & Firpo, M.A.F. 2016a. A seca de 2013 a 2015 na Região Sudeste do Brasil. *Climanálise – Edição Especial de 30 anos*, p. 55-61.
- Coelho, C.A.S.; Oliveira, C.P.; Ambrizzi, T.; Reboita, M.S, Carpenedo, C.B.; Campos, J.L.P.S.; Tomaziello, A.C.N.; Pampuch, L.A.; Custódio, M.S.; Dutra, L.M.M.; Da Rocha, R.P & Rehbein, A. 2016b. The 2014 Southeast Brazil Austral summer drought: regional scale mechanisms and teleconnections. *Climate Dynamics*, 46(11): 3737-3752.
- Corrêa, C.A. & Costa, A.J.T. 2016. Usos na bacia hidrográfica do paraíba do sul: considerações acerca da escassez de água, inundações e área de preservação permanente no trecho fluminense. *Revista de Geografia*, 33(3): 62-81.
- Costa, L.F.; Farias Júnior, J.E.F.; Formiga-Johnsson, R.M; Petrunaro, A.C.N & Ramos, N.P. 2018. Análise da precipitação da bacia do rio Paraíba do Sul com enfoque nos anos de 2014 a 2017. *In*: III SIMPÓSIO DE RECURSOS HÍDRICOS DA BACIA DO RIO PARAÍBA DO SUL, 03: Anais. Minas Gerais: SRH-PS.
- Edwards, D.C. & Mckee, T.B. 1997. Characteristics of 20th century drought in the United States at multiple time scales. *Climatology Report 97-2*, Department of Atmospheric Science, Colorado State University, Fort Collins, Colorado.

## Caracterização Espaço-Temporal das Secas na Bacia do Rio Paraíba do Sul

Gildo Rafael de Almeida Santana; Eliane Barbosa Santos & Maria Gertrudes Alvarez Justi da Silva

- EPE. 2019. Empresa de Pesquisa Energética. Balanço Energético Nacional: ano base 2018. Ministério de Minas e Energia, Brasília. Disponível em: <http://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-377/topico-494/BEN%202019%20Completo%20WEB.pdf>. Acesso em: maio 2020.
- Galvão, J. & Bermann, C. 2015. Crise hídrica e energia: conflitos no uso múltiplo das águas. *Estudos avançados*, 29(84): 43-68.
- Guedes, H.A.S.; Priebe, P.D.S. & Manke, E.B. 2019. Tendências em séries temporais de precipitação no Norte do Estado do Rio Grande do Sul, Brasil. *Revista Brasileira de Meteorologia*, 34(2): 283-291.
- Hayes, M.J.; Svoboda, M.D.; Wilhite, D.A. & Vanyarkho, O.V. 1999. Monitoring the 1996 drought using the Standardized Precipitation Index. *Bulletin of the American Meteorology Society*, 80(3): 429-438.
- INEA. 2015. Instituto Estadual do Ambiente. Nota Técnica DIGAT/INEA N°01-A/2014. *Revista ineana*, 3(1), Rio de Janeiro.
- Ioris, A.A.R. 2011. Os limites políticos de uma reforma incompleta: a implementação da Lei dos Recursos Hídricos na Bacia do Paraíba do Sul. *Revista Brasileira de Estudos Urbanos e Regionais*, 10(1): 61-85.
- Kendall, M.G. 1975. Rank Correlation Methods. 4 ed. London: Charles Griffin.
- Lam, N.S.N. 1983. Spatial interpolation methods: a review. *The American Cartographer*, 10(2): 129-149.
- Luiz-Silva, W. & Dereczynski, C.P. 2014. Caracterização Climatológica e Tendências Observadas em Extremos Climáticos no Estado do Rio de Janeiro. *Anuário do Instituto de Geociências*, 37(2): 123-138.
- Luiz-Silva, W.; Nascimento, M.A. & Menezes, W.F. 2015. Atmospheric Blocking in the South Atlantic during the summer 2014: a synoptic analysis of the phenomenon. *Atmospheric and Climate Sciences*, 5: 386-393.
- Mann, H.B. 1945. Non-parametric tests against trend. *Econometrica*, 13: 245-259.
- Marengo, J.A.; Cunha, A.P. & Alves, L.M. 2016. A seca de 2012-15 no semiárido do Nordeste do Brasil no contexto histórico. *Revista Climanalise*, 3: 49-54.
- Marengo, J.A. & Alves, L.M. 2005. Tendências hidrológicas da bacia do rio Paraíba do Sul. *Revista Brasileira de Meteorologia*, 20(2): 215-226.
- Marengo, J.A.; Nobre, C.A.; Seluchi, M.E.; Cuartas, A.; Alves, L.M.; Mendiondo, E.M.; Obregón, G. & Sampaio, G. 2015. A seca e a crise hídrica de 2014-2015 em São Paulo. *Revista USP*, 106: 31-44.
- Marengo, J.A.; Torres, R.R. & Alves, L.M. 2017. Drought in Northeast Brazil—past, present, and future. *Theoretical and Applied Climatology*, 129(3-4), 1189-1200.
- McKee, T.B.; Doesken, N.J. & Kleist, J. 1993. The relationship of drought frequency and duration to the time scales. In: 8TH CONFERENCE ON APPLIED CLIMATOLOGY, p. 179-184.
- McKee, T.B.; Doesken, N.J. & Kleist, J. 1995. Drought monitoring with multiple time scales. In *Proceedings of the 9th Conference of Applied Climatology*. Dallas TX. American Meteorological Society, Boston, MA. p. 233-236.
- Mello, C.R.; Lima, J.M.; Silva, A.M.; Mello, J.M. & Oliveira, M.S. 2003. Krigagem e Inverso do Quadrado da Distância para Interpolação dos Parâmetros da Equação de Chuvas Intensas. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, 27: 925-933.
- Nobre, C.A.; Marengo, J.A.; Seluchi, M.E.; Cuartas, L.A. & Alves, L.M. 2016. Some characteristics and impacts of the drought and water crisis in Southeastern Brazil during 2014 and 2015. *Journal of Water Resource and Protection*, 8: 252-262.
- Reboita, M.S.; Gan, M.A.; Rocha, R.P. & Ambrizzi, T. 2010. Regimes de precipitação na América do Sul: uma revisão bibliográfica. *Revista Brasileira de Meteorologia*, 25(2): 185-204.
- Salviano, M.F.; Groppo, J.D & Pellegrino, G.Q. 2016. Análise de Tendências em dados de precipitação e temperatura no Brasil. *Revista Brasileira de Meteorologia*, 31(1): 64-73.
- Santos, E.B.; Lucio, P.S. & Silva, C.M.S. 2015. Análise de Tendência da Precipitação Diária na Amazônia Brasileira. *Revista Brasileira de Geografia Física*, 8(4): 1041-1052.
- Sen, P.K. 1968. Estimates of the regression coefficient based on Kendall's Tau. *Journal of the American Statistical Association*, 63(234): 1379-1389.
- Silva, C.A.M. 2015. Os Desastres no Rio de Janeiro: Conceitos e Dados. Rio de Janeiro: Cadernos do Desenvolvimento Fluminense, p. 55-71.
- Thom, H.C.S. 1966. Some Methods of Climatological Analysis. WMO Technical Note Number 81, Secretariat of the World Meteorological Organization, Geneva, Switzerland, 53 pp.
- WMO. 1989. World Meteorological Organization. Calculation of Monthly and Annual 30-Year Standard Normals. WCDP-No. 10, WMO-TD/No. 341.
- Wu, H.; Svoboda, M.D.; Hayes, M.J.; Wilhite, D.A. & Wen, F. 2005. Appropriate application of the standardized precipitation index in arid locations and dry seasons. *International Journal of Climatology*, 27: 65-79.
- Yue, S.; Polon, P. & Cavadias, G. 2002. Power of the Mann-Kendall and Spearman's rho tests for detecting monotonic trends in hydrological series. *Journal of Hydrology*, 259: 254-271.