



Campos dos Goytacazes/RJ

ASSOCIAÇÃO ENTRE A SÉRIE HISTÓRICA DE VAZÃO NA SAÍDA DA BACIA DO RIO PARAÍBA DO SUL E ÍNDICE ENOS (1997-2019)

Letícia Maria Evangelista de Souza¹ & Marina Satika Suzuki²

RESUMO – O Rio Paraíba do Sul é um dos rios mais importantes na região sudeste do Brasil, a mais urbanizada e populosa região do país. Entretanto, esse rio foi e é constantemente desviado e represado, bem como recebe grande carga de poluentes. Além desses fatores, fenômenos climáticos como El Niño de Oscilação Sul (ENOS), também estão associados a alterações no volume de vazão. Assim, nesse trabalho analisamos a associação entre a série histórica de vazão (1997-2019) na saída da bacia do Rio Paraíba do Sul, em Campos dos Goytacazes (RJ), e o índice, por meio de análise do espectro de ondeletas cruzadas. O principal resultado de nossa análise sugere que existe associação entre as séries temporais, principalmente em anos com a ocorrência de El Niño. Estudos mais detalhados, que considerem os padrões e as variações espaciais e temporais ao longo de toda calha fluvial do rio, podem ajudar a compreender melhor a associação da vazão com esses fenômenos climáticos.

ABSTRACT – The Paraíba do Sul River is one of the most important rivers in the southeastern region of Brazil, the most urbanized and populous region of the country. However, this river was and is constantly diverted and dammed, as well as receiving a large load of pollutants. In addition to these factors, weather phenomena such as El Niño-Southern Oscillation (ENSO) are also associated with changes in flow volume. Thus, in this work we analyze the association between the historical flow series (1997-2019) at the outlet of the Paraíba do Sul River basin, in Campos dos Goytacazes (RJ), and the index, through analysis of the spectrum of crossed wavelets. The main result of our analysis suggests that there is an association between time series, mainly in years, with the occurrence of El Niño. More detailed studies, which consider the patterns and spatial and temporal variations along the entire river channel, can help to better understand the association of flow with these climatic phenomena.

Palavras-Chave – Rio Paraíba do Sul, Vazão, ENOS

INTRODUÇÃO

Os recursos hídricos são definidos como recursos naturais indispensáveis para existência da vida (Ahmad et al., 2022). Dentre os recursos hídricos disponíveis estão as águas subterrâneas e as superficiais, como a de lagos e rios. A bacia Rio Paraíba do Sul (RPS), abastece os Estados de São Paulo, Minas Gerais e Rio de Janeiro (AGEVAP, 2020) e tem como uma de suas características

1) Laboratório de Ciências Ambientais, Centro de Biociências e Biotecnologia, Universidade Estadual do Norte Fluminense, Campos dos Goytacazes, RJ, leticiaevangelista78@gmail.com

2) Laboratório de Ciências Ambientais, Centro de Biociências e Biotecnologia, Universidade Estadual do Norte Fluminense, Campos dos Goytacazes, RJ, marina@uenf.br



Campos dos Goytacazes/RJ

marcantes a intensa industrialização e o adensamento populacional, fatores com impacto direto na qualidade de suas águas (Figueiredo et al., 2011; Pacheco et al., 2017; Queiroz et al., 2017; Silva et al., 2019).

Outro fator identificado pelos especialistas foi a intensa estiagem pela qual a bacia passou entre os anos de 2014 e 2015. A discussão, contudo, não é nova, como pode ser percebido em outros trabalhos (Coelho et al., 2016; Marengo & Alves, 2005; Neves & Vilanova, 2021; Ovalle et al., 2013) que já abordavam temas como a variação no volume de vazão e a ocorrência do fenômeno El Niño de Oscilação Sul (ENOS) e eventos de precipitação anômalos.

Este trabalho está circunscrito no campo de estudos da Ecologia, e mais especificamente no subcampo da Limnologia, especialmente com atenção ao uso e degradação de recursos hídricos. Não são poucos os estudos na academia brasileira que tomam a degradação dos recursos hídricos como objetos de interesse analítico (Esteves, 2011; Kahn et al., 2017; Marengo et al., 2015; Tundisi, 2008) e é comum encontrar análises que tomam os recursos hídricos e os associam ao fenômeno El Niño de Oscilação Sul (ENOS), com eventos de precipitação anômalos, como é perceptível em outros trabalhos (Cabral et al., 2020; Hao & Lu, 2021; Ovalle et al., 2013; Prasad et al., 2010).

Além disso, os trabalhos supracitados destacam a importância e as oportunidades analíticas de se estudar essa associação para compreender os seus efeitos. Por conseguinte, pretendemos contribuir com essa discussão ao analisar a associação entre a variação no volume de vazão e fenômenos El Niño de Oscilação Sul (ENOS), com eventos anômalos de precipitação, na região do Baixo Paraíba do Sul, entre 1997 a 2019.

OBJETIVOS

O objetivo desse trabalho foi avaliar a existência de associação entre a série temporal de vazão na saída da Bacia do Rio Paraíba do Sul (1997-2019) e o índice El Niño de Oscilação Sul (ENOS). Assim, desejamos compreender os efeitos de eventos climáticos sobre o volume de vazão. Esperamos encontrar associação entre as séries temporais de vazão e índice ENOS, na saída da Bacia do Rio Paraíba do Sul para os anos de 1997 a 2019.

MATERIAIS E MÉTODOS

A bacia do Rio Paraíba do Sul abrange os estados de São Paulo, Minas Gerais e Rio de Janeiro. A área de drenagem da bacia é de 61.307 km², percorrendo cerca de 1.100 km até chegar a sua foz em São João da Barra -RJ. As águas do Rio Paraíba são responsáveis por abastecer aproximadamente

Campos dos Goytacazes/RJ

22,6 milhões de pessoas, em que os principais usos são destinados ao abastecimento da população, diluição de esgoto, irrigação e geração de energia elétrica (AGEVAP, 2020). A bacia é subdividida em 7 sub-regiões hidrográficas, sendo a Região Hidrográfica do Baixo Paraíba do Sul, a nossa área de estudo (Figura 1). Esta é a última região hidrográfica antes da foz, e recebe toda a carga de poluentes lançada ao longo do percurso do RPS (Kahn et al., 2017).

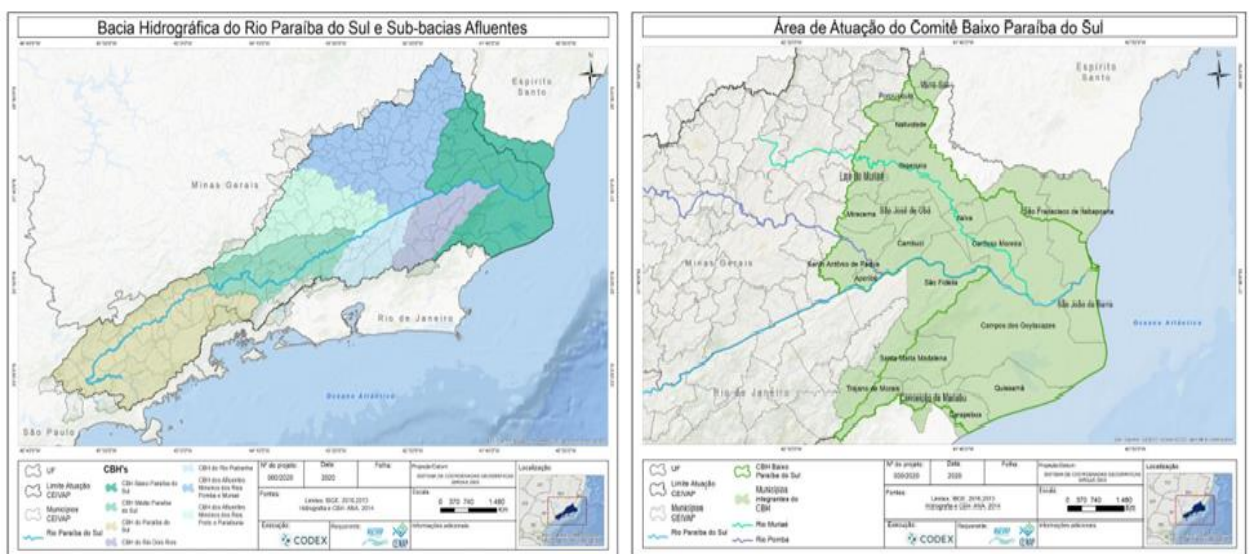


Figura 1 - Mapa da bacia do Rio Paraíba do Sul com destaque para a região hidrográfica do Baixo Paraíba do Sul. Fonte: AGEVAP, 2020.

A amostragem foi realizada de forma bimensal, com coletas realizadas na região do Baixo Paraíba em um ponto no trecho final da bacia do Rio Paraíba do Sul, em Campos dos Goytacazes (21°45'06.9"S 41°19'33.0"W) (RJ). Para estimar o volume de vazão a área de amostragem foi previamente dividida em três seções de acordo com seu comprimento e em cada uma delas foram medidas a profundidade e a velocidade de corrente no meio da coluna d'água, com o auxílio de um correntômetro (LUNUS 2030BR). A partir destes dados, foi possível estimar a vazão instantânea utilizando o seguinte cálculo:

$$V = A_s \cdot v \quad (1)$$

Onde V (m³/s) é a vazão do rio, A_s (m²) é a área da seção do rio e v (m/s) é a velocidade do rio.

Para avaliar a correlação entre as séries temporais de vazão e índice El Niño de Oscilação Sul (ENOS) realizamos o teste de correlação de Spearman ($p < 0,05$). A abordagem com o espectro de potência de ondeletas cruzadas foi utilizada para comparar a frequência entre séries temporais e



Campos dos Goytacazes/RJ

analisar a sincronicidade dessas duas séries durante o intervalo de tempo determinado (Addison, 2017; Rösch & Schmidbauer, 2018). Os dados referentes aos anos de ocorrência dos fenômenos El Niño de Oscilação Sul (ENOS) foram obtidos no portal do Centro de Previsão do Tempo e Estudos Climáticos (CPTEC) e os dados do Índice ENOS foram obtidos no portal da National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA). Todos os testes foram realizados utilizando a linguagem R na suíte do Rstudio (R Core Team 2023).

RESULTADOS E DISCUSSÃO

A série temporal de vazão na saída da bacia do Rio Paraíba do Sul (1997-2019) possui um total de 541 coletas com valor mínimo e máximo de 32 m³/s e 7.500 m³/s respectivamente, média de 713 m³/s e mediana de 507 m³/s (Tabela 1). No histograma de vazão (Figura 2) podemos observar que a maioria dos valores estão concentrados entre 0 a 2000 m³/s, com poucos casos acima de 2000 m³/s, o que condiz com os valores de médias medianas encontrados. Por se tratar de uma série sazonal e temporal, o volume de vazão apresentou algumas oscilações ao longo dos anos, o que fica mais claro ao observamos o boxplot (Figura 2), com anos em que mediana de vazão estava abaixo de 500 m³/s, como por exemplo nos anos de 2001, 2002, 2007 e os anos posteriores a 2014. E alguns anos apresentaram valores medianos acima de 700 m³/s, como nos anos de 1998, 2004, 2005, 2010 e 2012.

Tabela 1 - Valores de n, máximo, mínimo, média e mediana da série histórica de vazão na saída da bacia do Rio Paraíba do Sul (1997-2019) em m³/s.

n	Máximo	Mínimo	Média	Mediana
541	7.500	32	713	507

A variações no volume de vazão ao longo dos anos podem estar em parte associados a ocorrência de eventos de precipitação anômalos provocados por fenômenos El Niño de Oscilação Sul (ENOS). Esses fenômenos afetam o clima, a temperatura e as taxas de precipitação em diferentes locais do mundo e ocorrência desses eventos está cada vez mais frequente (Freund et al., 2019). Os trabalhos de Coelho et al. (2016), Marengo et al. (2015) e Ovalle et al. (2013) demonstram a relação entre o volume pluviométrico e fluviométrico e a ocorrência de fenômenos climáticos que afetaram a região sudeste do Brasil. Dessa forma, para verificar e compreender a associação entre a série temporal de vazão na saída da bacia (1997-2019) e o índice ENOS (1997-2019) realizamos a análise de correlação de *Spearman* e a análise de ondeletas cruzadas.

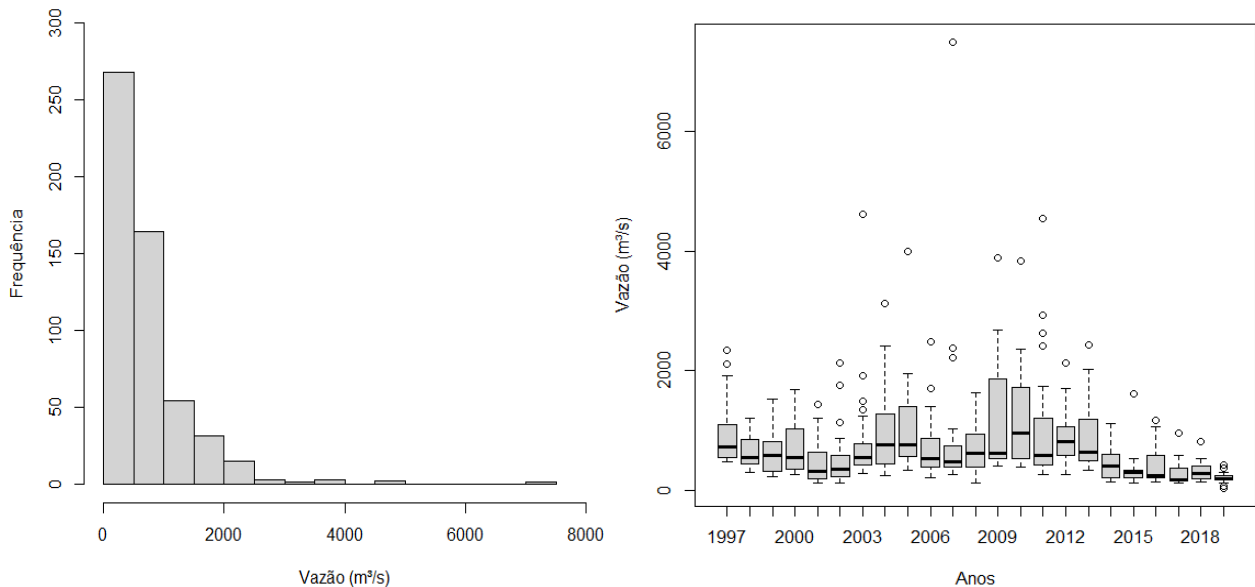


Figura 2 - Histograma e boxplot da série histórica de vazão na saída da bacia do RPS (1997-2019).

A relação entre a vazão e o índice El Niño de Oscilação Sul (ENOS) podem ser observados na Figura 3. Nesta, é possível observar que em alguns anos de índice ENSO positivo se observam vazões mais elevadas, como, por exemplo, nos anos 2003, 2007 e 2010. Por outro lado, para os anos com índice ENSO negativo, como em 2000, 2008, 2014 e 2018, apresentaram baixa vazão. Entretanto, o mesmo comportamento não foi observado para o ano de 2011, ano com valores de vazão elevados, porém com índice ENSO negativo. Outro ponto que devemos destacar é a ausência da ocorrência de fenômenos ENOS no ano de 2014, ano de início do período de estiagem na bacia. Porém, nos anos de 2015 e 2016 foi registrada a ocorrência de El Niño, proporcionando um leve aumento nos valores vazão. Estes eventos destacam a não aderência completa entre os fatores analisados em uma avaliação de longo prazo.

O teste de correlação (Spearman) entre os valores das séries temporais de vazão e índice ENOS, mostrou uma correlação fraca e inversa para essas séries ($\rho = -0,1$, $p = 0,058$), explicando a falta de associação dos índices com a vazão. Porém, é possível observar a associação entre os eventos ENOS e o volume de vazão em alguns anos de forma bastante pronunciada, como por exemplo, nos anos de 2003 e 2007. A força de ocorrência desses fenômenos também pode influenciar nesse resultado, levando a eventos precipitação anômalos mais intensos ou mais fracos. Essa variação de intensidade afeta diretamente a relação entre a vazão e o índice de ENOS.

Campos dos Goytacazes/RJ

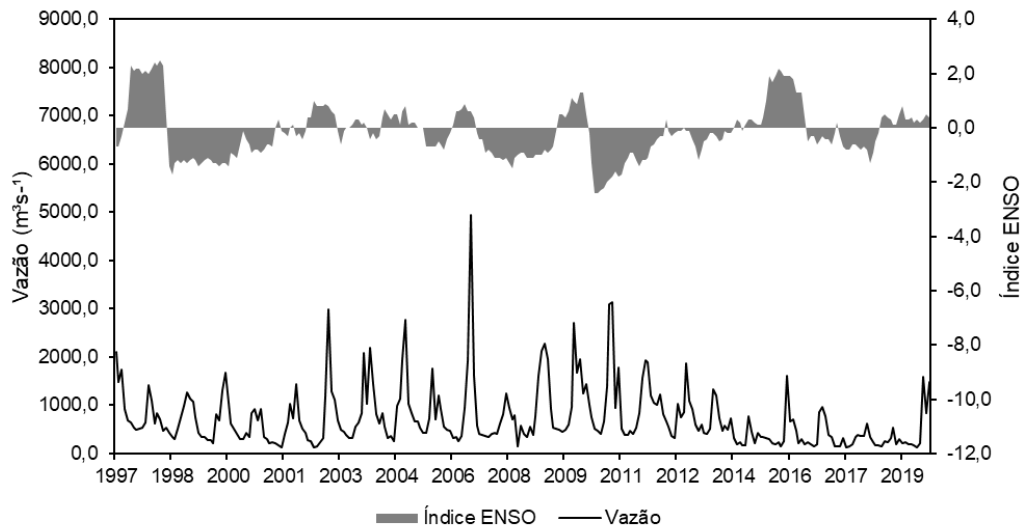


Figura 3 -Análise temporal da relação entre a vazão instantânea e o índice ENOS na saída da bacia do RPS (1997-2019).

Com intuito de entender melhor a relação entre essas duas séries temporais, utilizamos a análise do espectro de ondeletas cruzadas, para analisar regiões comuns de potência e encontrar possíveis correlações em diferentes períodos entre as duas séries temporais (Addison, 2017; Rösch & Schmidbauer, 2018). Na Figura 4 podemos observar que as duas séries temporais dividem áreas de potência comum nos períodos ao longo de toda a série. Em que as áreas de contorno são significativas (nível de significância de 5%) e as manchas mais claras representam um maior nível de espectro de potência, indicando uma maior variância para determinado período e tempo.

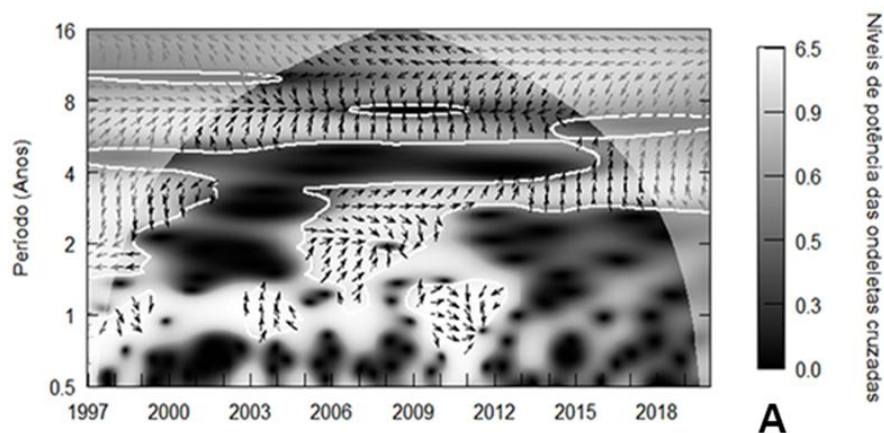


Figura 4 - Análise de espectro de ondeleta cruzada entre a série histórica de vazão na saída da bacia do RPS e o índice ENOS (1997-2019).



Campos dos Goytacazes/RJ

A série temporal encontrava-se em fase (Figura 4), com término da série em anti-fase. Algumas áreas de potência significativas e entre os períodos de 1 a 4 anos, mostram-se em fase e com alto nível de potência, o que significa que para esses períodos as séries estavam correlacionadas de forma significativa. Esse comportamento é visível entre 1997-1998, 2002-2003 e 2009-2010, anos marcados pela ocorrência de El Niño - o ano de 1997 foi marcado como um dos anos com eventos de El Niño forte. Os resultados indicam que a série temporal Índice ENOS e a série temporal vazão estão correlacionadas para o período estudado, principalmente no período de 1 a 4 anos devido a maior potência e significância

A associação entre fenômenos climáticos e o volume vazão é conhecida (Cabral et al., 2020; Hao & Lu, 2021; Prasad et al., 2010). Essa associação foi observada por Ovalle et al. (2013) na saída do Rio Paraíba do Sul, em períodos de La Niña, como os de 1998-1999, marcado por eventos de precipitação anômalas negativas, causando uma menor intensidade no volume de vazão em comparação ao outros anos no mesmo período sazonal. Os resultados encontrados mostraram que existe correlação entre a série temporal de vazão e o índice ENOS, porém essa correlação não é encontrada em todos os anos da série. Esta é, é evidente apenas em anos com ocorrência de El Niño com maior intensidade, como em 1997, ano marcado por um intenso evento de El Niño (Freund et al., 2019).

Além disso, Coelho et al. (2016) afirmam que a região sudeste do Brasil vem enfrentando anomalias de precipitação negativa desde 1998, mesmo nos anos de El Niño. A situação foi agravada, ainda segundo os autores supracitados, em 2014 devido a teleconexões geradas a partir de uma fonte de calor tropical no norte/nordeste da Austrália que foi responsável por impedir a formação de nuvens de precipitação na região sudeste do Brasil naquele período, o que resultou na pior seca nos últimos 80 anos. Assim, observamos que não só os fenômenos ENOS influenciam a precipitação da bacia, mas outros fenômenos climáticos também são responsáveis por eventos de precipitação anômalos. E no caso da bacia do Rio Paraíba do Sul a situação é agravada pela abundância de represamentos ao longo da bacia, impactando o seu volume de vazão (Ovalle et al., 2013).

Os resultados encontrados mostraram que existe associação entre a série temporal de vazão na saída do Rio Paraíba do Sul e o índice ENOS, porém este sozinho não explica a variação no volume de vazão. Outros fenômenos climáticos, a intensificação nos efeitos das mudanças no clima, os represamentos e desvios ao longo da bacia também são fatores responsáveis pelas alterações no



Campos dos Goytacazes/RJ

volume de vazão últimos anos. Essas reduções afetam diretamente a capacidade de diluição fluvial, proporcionando um ambiente favorável para proliferação de cianobactérias (Ovalle et al., 2013). Além disso, deve-se levar em consideração de que o presente estudo apresentou somente a avaliação entre o fluxo em um único ponto da bacia do RPS, apesar de teoricamente poder ser considerado um ponto integrador e índice ENOS que leva em consideração toda região SE brasileira. Dessa forma, os próximos trabalhos podem ser beneficiados por análises que consideram os índices ENOS, como variação no volume de vazão, bem como para o transporte e a dinâmica de nutrientes.

CONCLUSÃO

Os resultados encontrados para a análise de correlação entre a série temporal de vazão e o índice El Niño de Oscilação Sul (ENOS) apresentam uma correlação inversa e fraca, porém por se tratar de uma série temporal e sazonal, realizamos a análise do espectro de ondeletas cruzadas, a qual mostrou associação entre as duas séries para com maior potência e significância em períodos de ocorrência de El Niño (1997-1998, 2002-2003 e 2009-2010). O estudo demonstra a necessidade de ferramentas analíticas que considerem as variações dentro de cada série temporal. Portanto, podemos dizer que os resultados encontrados confirmam a nossa hipótese, porém não apenas as variações climáticas relacionadas aos fenômenos ENOS afetam o volume de vazão. Além desses, devemos considerar os efeitos antrópicos da bacia como o represamento e as tomadas de água. Por fim, a compreensão da associação entre os fenômenos climáticos que considerem as variações espaciais e temporais de toda calha fluvial do rio, podem ajudar a compreender associação da vazão e de outros fatores relacionados a carga fluvial com os fenômenos climáticos.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Addison, P. S. (2017). *The Illustrated Wavelet Transform Handbook Introductory Theory and Applications in Science, Engineering, Medicine and Finance* (P. S. Addison (ed.); 2nd ed.). CRC Press. <https://doi.org/https://doi.org/10.1201/9781003040408>
- AGEVAP. (2020). *Relatório de Situação*.
- Ahmad, F., Saeed, Q., Shah, S. M. U., Gondal, M. A., & Mumtaz, S. (2022). *Chapter 11 - Environmental sustainability: Challenges and approaches* (M. K. Jhariya, R. S. Meena, A. Banerjee, & S. N. B. T.-N. R. C. and A. for S. Meena (eds.); pp. 243–270). Elsevier. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/B978-0-12-822976-7.00019-3>
- Cabral, A., Bonetti, C. H. C., Garbossa, L. H. P., Pereira-Filho, J., Besen, K., & Fonseca, A. L.



Campos dos Goytacazes/RJ

- (2020). Water masses seasonality and meteorological patterns drive the biogeochemical processes of a subtropical and urbanized watershed-bay-shelf continuum. *Science of The Total Environment*, 749, 141553. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.141553>
- Coelho, C. A. S., de 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. de S., Dutra, L. M. M., Da Rocha, R. P., & Rehbein, A. (2016). The 2014 southeast Brazil austral summer drought: regional scale mechanisms and teleconnections. *Climate Dynamics*, 46(11), 3737–3752. <https://doi.org/10.1007/s00382-015-2800-1>
- Esteves, F. de A. (2011). *Fundamentos de Limnologia* (F. de A. Esteves (ed.); 3rd ed.). Editora Interciência.
- Figueiredo, R. de O., Ovalle, Á. R. C., Rezende, C. E., & Martinelli, L. A. (2011). Carbon and Nitrogen in the Lower Basin of the Paraíba do Sul River, Southeastern Brazil: Element Fluxes and biogeochemical processes. *Revista Ambiente e Agua*, 9(3), 445–458. <https://doi.org/10.4136/1980-993X>
- Freund, M. B., Henley, B. J., Karoly, D. J., McGregor, H. V, Abram, N. J., & Dommenges, D. (2019). Higher frequency of Central Pacific El Niño events in recent decades relative to past centuries. *Nature Geoscience*, 12(6), 450–455. <https://doi.org/10.1038/s41561-019-0353-3>
- Hao, Y., & Lu, J. (2021). Teleconnection between climate oscillations and riverine nutrient dynamics in Southeast China based on wavelet analysis. *Environmental Science and Pollution Research*, 28(31), 41807–41820. <https://doi.org/10.1007/s11356-021-13715-x>
- Kahn, J. R., Vásquez, W. F., & Rezende, C. E. de. (2017). Choice modeling of system-wide or large scale environmental change in a developing country context: Lessons from the Paraíba do Sul River. *Science of The Total Environment*, 598, 488–496. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.04.059>
- 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*.
- Neves, A. de O., & Vilanova, M. R. N. (2021). Caracterização da seca histórica da década de 2010 na Bacia do Rio Paraíba do Sul, Estado de São Paulo, Brasil. *Engenharia Sanitaria e*



Campos dos Goytacazes/RJ

Ambiental, 26, 339–349.

Ovalle, A. R. C., Silva, C. F., Rezende, C. E., Gatts, C. E. N., Suzuki, M. S., & Figueiredo, R. O. (2013). Long-term trends in hydrochemistry in the Paraíba do Sul River, southeastern Brazil. *Journal of Hydrology*, 481, 191–203.

Pacheco, F. S., Miranda, M., Pezzi, L. P., Assireu, A., Marinho, M. M., Malafaia, M., Reis, A., Sales, M., Correia, G., Domingos, P., Iwama, A., Rudorff, C., Oliva, P., & Ometto, J. P. (2017). Water quality longitudinal profile of the Paraíba do Sul River, Brazil during an extreme drought event. *Limnology and Oceanography*, 62(S1), S131–S146.

<https://doi.org/https://doi.org/10.1002/lno.10586>

Prasad, M. B. K., Sapiano, M. R. P., Anderson, C. R., Long, W., & Murtugudde, R. (2010). Long-Term Variability of Nutrients and Chlorophyll in the Chesapeake Bay: A Retrospective Analysis, 1985–2008. *Estuaries and Coasts*, 33(5), 1128–1143.

<https://doi.org/10.1007/s12237-010-9325-y>

Queiroz, L. G., Silva, F. T. da, & Paiva, T. C. B. de. (2017). Caracterização estacional das variáveis físicas, químicas, biológicas e ecotoxicológicas em um trecho do Rio Paraíba do Sul, SP, Brasil. In *Revista Ambiente & Água* (Vol. 12, pp. 238–248). scielo .

Rösch, A., & Schmidbauer, H. (2018). WaveletComp 1.1: A guided tour through the R package. *URL: [Http://Www. Hsstat. Com/Projects/WaveletComp/WaveletComp_guided_tour](http://www.hsstat.com/projects/waveletcomp/waveletcomp_guided_tour). Pdf.*

Silva, B. F. S. de O. e, Martins, J. A., & Romão, E. C. (2019). Dispersion of Pollutants in a River According to Its Geometry and Tributaries: A Case Study for River Paraíba do Sul—State of Sao Paulo, Brazil. *Environmental Engineering Science*, 37(2), 142–147.

<https://doi.org/10.1089/ees.2019.0281>

Tundisi, J. G. (2008). Recursos hídricos no futuro: problemas e soluções. *Estudos Avançados*, 22(63), 7–16. <https://doi.org/10.1590/S0103-40142008000200002>