



ANÁLISE DO ESPECTRO DUAL, FREQUÊNCIA-TEMPO, DAS VAZÕES AFLUENTES E DEFLUENTES DO RESERVATÓRIO DE SOBRADINHO

Resumo

Uma das vertentes da análise de séries temporais em hidrologia visa o estudo de periodicidades existentes nestas séries e sua correlação com fenômenos climatológicos, sendo que, para esta prática, observa-se a dominância das transformadas de Fourier cujas premissas são por vezes negligenciadas, principalmente a necessidade de estacionaridade da série temporal em estudo. As transformadas *wavelets* se apresentam como uma solução mais adequada para o estudo destas periodicidades, uma vez que pode representar séries não estacionárias, bem como seus transientes. O presente artigo tem como objetivo analisar a periodicidade das séries de vazões afluentes e defluentes do reservatório de Sobradinho, tendo como singular interesse a análise do quinquênio de 2011 a 2016. Os resultados obtidos, apontam para a adequabilidade do modelo de transformadas *wavelets* contínuas para representar a periodicidade das vazões afluentes, na qual observa-se a concentração da energia próxima ao período anual e seu decréscimo no quinquênio em questão, e vazões defluentes, na qual se observa forte redução da energia e consequente variabilidade nesta janela temporal de estudo. Com isto, este artigo conclui a cerca das periodicidades das vazões afluentes e defluentes do reservatório de Sobradinho, corroborando com outros estudos que apontam as transformadas *wavelets* como uma ferramenta de grande valia para estes estudos.

Palavras-chave: Séries Temporais, Hidrologia, Transformadas *Wavelets*

Abstract

In hydrology, one of the aspects of time series analysis looks through the study of existing periodicities in these series and its correlation with climatological phenomena. For this practice, it's observed the dominance of the Fourier transform whose premises are sometimes neglected, mainly the need of stationarity of the time series under study. The wavelets transform are presented as a more adequate solution for the study of these periodicities, since it can represent non-stationary series as well as their transients. The objective of this article is to analyze the periodicity of the tributary and defluent flow series of Sobradinho's reservoir, with a particular interest in the quinquennium analysis from 2011 to 2016. The results obtained indicates to the suitability of the continuous wavelet transform model to represent the periodicity of affluent flows, in which the energy concentration close to the annual period is observed and its decrease in the five-year period in question, as well as the discharge of defluents, in which there is a strong reduction of energy and consequent variability in this study. This way, the article conclude about the periodicities of the tributary flows and defluents of the Sobradinho reservoir, corroborating with other studies that point out the wavelets transformations as a valuable tool for these studies.

Keywords: Temporal series, Hydrology, Wavelets Transform, Periodicity

Introdução

A análise de características temporais é um assunto recorrente na literatura científica acerca da hidrologia. Dentre estes estudos, destacam-se técnicas de processamento de sinais que visam a transformação de uma série no domínio do tempo para o domínio da frequência ou frequência-tempo, possibilitando, assim, análises que não são possíveis no domínio original (Gao e Ian, 2011).

Destaca-se, entre estas possibilidades, o estudo da periodicidade das características hidrológicas. Predominantemente, estas análises são realizadas através das transformadas de Fourier, que são definidas pela superposição linear de senos e cossenos com periodicidade linear, independente e não evolutiva, sendo uma técnica bastante aderente às séries estacionárias (Labat, 2005).

Ainda no que tange ao estudo das séries temporais, é pertinente destacar as transformadas *wavelets* por possibilitarem a análise de processos não-estacionários, contendo características transitórias ou fractais. Esta, diferentemente das transformadas de Fourier, é composta de janelas variáveis que permitem, por sua vez, a análise de diferentes componentes das frequências ao longo do tempo (Labat, 2005 e Gao e Ian, 2011).

No escopo deste artigo, as transformadas *wavelets* se apresentam como uma técnica para a análise de uma determinada frequência, bem como a sua variação temporal, caracterizando, assim, eventos de alta frequência ou processos variáveis em escala (Labat, 2005).

Estas possibilidades, apresentadas pelo processamento de sinal e particularmente as transformadas *wavelets*, são de grande valia para o entendimento da periodicidade das vazões afluentes, que entram nos reservatórios de múltiplos usos, e vazões efluentes, aquelas que são operadas ou regularizadas e saem dos reservatórios de múltiplos usos. Soma-se a isto, a capacidade destas técnicas de representar momentos de transitórios, como grandes secas, fornecendo uma técnica que auxilia no entendimento do impacto das secas nas características frequenciais das vazões naturais dos sistemas, regidas, principalmente, pela precipitação e pela dinâmica dos lençóis freáticos, e nas vazões regularizadas, aquelas que são oriundas da operação dos reservatórios.

As análises apresentadas neste artigo foram realizadas no ambiente R (R Core Team, 2018) com o uso dos pacotes *ggplot2* (Wickham, 2009) e *WaveletComp* (Roesch e Schmidbauer, 2018)

Objetivo

O presente artigo tem como objetivo analisar a periodicidade das vazões afluentes e regularizadas do reservatório de múltiplo uso de Sobradinho, com especial enfoque no momento de seca ocorrido a partir de 2012.

Material e Método

O estudo aqui apresentado tem como foco o reservatório de múltiplo uso de Sobradinho localizado na Bacia do Rio São Francisco, onde estão seguintes reservatórios: Três Marias, Sobradinho, Itaparica, Complexo Paulo Afonso e Xingó (Figura 1).

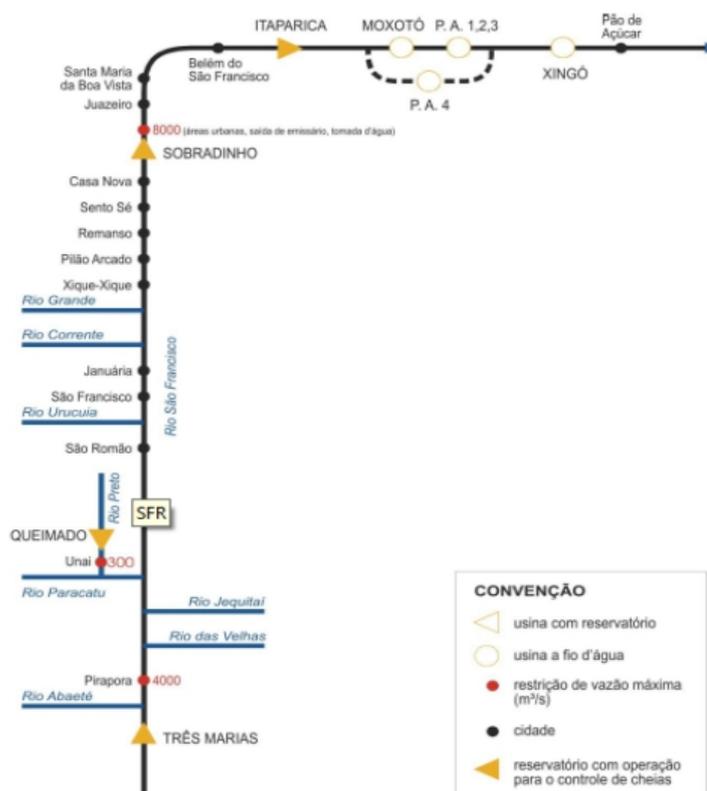


Figura 1– Os reservatórios da Bacia do Rio São Francisco. Fonte: ONS (2017).

O reservatório de múltiplos usos de Sobradinho realiza as funções de controle das cheias, geração de energia e atendimento as demandas exigidas, como o abastecimento humano e o fornecimento de água para a produção agrícola, com singular destaque para a fruticultura existente na região. Quanto a produção de energia elétrica, neste

reservatório estão instaladas seis turbinas com o total de 1050 MW de potência, operada pela Companhia Hidroelétrica do São Francisco (CHESF) (CHESF, 2018).

Este reservatório está localizado em uma região de clima semiárido com regime de chuvas anuais que variam entre 300 e 800 mm (Vieira, 2015 e CHESF, 2018). Além disso, Sobradinho possui um dos maiores lagos artificiais do mundo, com uma extensão de, aproximadamente, 4200 km², tamanho, este, que garante certa resiliência a este sistema marcado pela baixa pluviometria e grande variabilidade quanto aos padrões espaciais e temporais das chuvas.

Os dados selecionados correspondem ao intervalo de tempo diário entre 01/01/1991 e 01/01/2016. As variáveis utilizadas foram: vazão afluente naturalizada (m³/s) e vazão defluente (m³/s).

Pretende-se, a partir destas variáveis, a caracterização da periodicidade existente nas vazões afluentes e vazões defluentes dos reservatórios de múltiplos usos, bem como a identificação de transientes existentes nestas.

Os dados foram coletados do Sistema de Acompanhamento de Reservatórios, fomentado pela Agência Nacional da Água (ANA, 2017). E estão disponíveis no sítio: <<http://sar.ana.gov.br/>>.

Transformadas Contínuas Wavelets

A transformada wavelet, como visto anteriormente, é uma ferramenta de grande utilidade para a análise de uma série, que possui características não-estacionárias, sob diversas escalas periódicas (Daubechies, 1990), sendo definida como (Equação 1):

$$C_{W_f}^{\Psi}(\tau, s) = \frac{1}{\sqrt{|s|}} \int_{-\infty}^{\infty} x(t) \Psi^* \left(\frac{t - \tau}{s} \right) dt \quad | \quad s, \tau \in \mathbb{Z}, s \neq 0 \quad (1)$$

Onde:

- s → Parâmetro de dilatação de wavelets;
- τ → Parâmetro de translação das wavelets;
- $\frac{1}{\sqrt{|s|}}$ → Fator de normalização da energia;

- Ψ^* → Função complexa conjugada da *wavelet* mãe utilizada.

O fator de normalização da energia é de tal forma para que a energia da seja a mesma para diferentes valores de escala s (Komowroski&Pietraszek, 2015), respeitando, assim, os critérios matemáticos de finitude da energia e admissibilidade.

Quanto a *wavelet* mãe, optou-se pelo uso da *wavelet* Morlet, por esta se configurar como uma *wavelet* mãe complexa e de grande utilização na literatura sobre o assunto, podendo ser entendida como uma função periódica na qual a amplitude é modulada por uma gaussiana (Torrence&Compo, 1998). Define-se a *wavelet* Morlet como (Equação 2):

$$\psi(t) = \frac{1}{\sqrt[4]{\pi}} \left(e^{i\omega_0 t} - e^{-\frac{\omega_0^2}{2}} \right) e^{-\frac{t^2}{2}} \quad (2)$$

Onde:

- ω_0 → Frequência não dimensional (estimada afim de satisfazer a equação de admissibilidade).

Quando $\omega_0 = 6$, o erro é reduzido a níveis menores que os erros de arredondamento (Addison, 2005; Komowroski&Pietraszek, 2015 e Torrence&Compo, 1998). Uma vez que se assume $\omega_0 = 6$, o segundo termo dos parênteses da equação (2), o qual representa a correção, pode ser negligenciado, assim representa-se a *wavelet* Morlet pela Equação (3):

$$\psi(t) = \frac{1}{\sqrt[4]{\pi}} \left(e^{i\omega_0 t} \right) e^{-\frac{t^2}{2}} \quad (3)$$

Quanto a análise de periodicidade, será utilizado o espectograma de energia das *wavelets* para a identificação daqueles períodos que concentram as maiores variabilidades do sistema. Para isto, parte-se do pressuposto que em séries temporais com ruídos

brancos, espera-se que os valores da energia da transformada *wavelet* sejam iguais à variância dos dados para todos os valores de $s\tau$.

A energia, por sua vez, pode ser definida pela Equação (4):

$$E(s, \tau) = |Cw(s, \tau)|^2 \quad (4)$$

Resultados e Discussão

Primeiramente, neste tópico serão apresentadas características gerais que versam sobre os dados históricos disponíveis para o reservatório de múltiplos usos de Sobradinho.

Na Figura 1a, estão representadas as vazões afluentes ao reservatório de Sobradinho entre os anos de 1991 e 2016, nesta, destacam-se os maiores valores de vazões no final do ano de 1991 e início de 1992. Deve-se ressaltar, ainda, que as chuvas nesta região se concentram entre dezembro e março do ano seguinte.

Ainda, é possível observar a redução destas vazões afluentes em 2012, concorda com este resultado aquele relatado pela Agência de Águas (2018). A partir deste ano, têm se observado uma crise hídrica nesta região, causada pela redução das disponibilidades, que acirra conflitos, principalmente, entre a produção energética e a produção agrícola (Ramina, 2014).

Esta redução é evidenciada, também na Figura 2b, na qual as distribuições de probabilidade representam as vazões afluentes por quinquênios. No intervalo entre os anos de 2011 até 2016, quando comparados aos outros quinquênios, a distribuições das vazões afluentes apresenta um valor modal menor (próximo a 850 m³/s) que as demais. Fato observado pelo achatamento da curva de probabilidade em torno das menores vazões observadas.

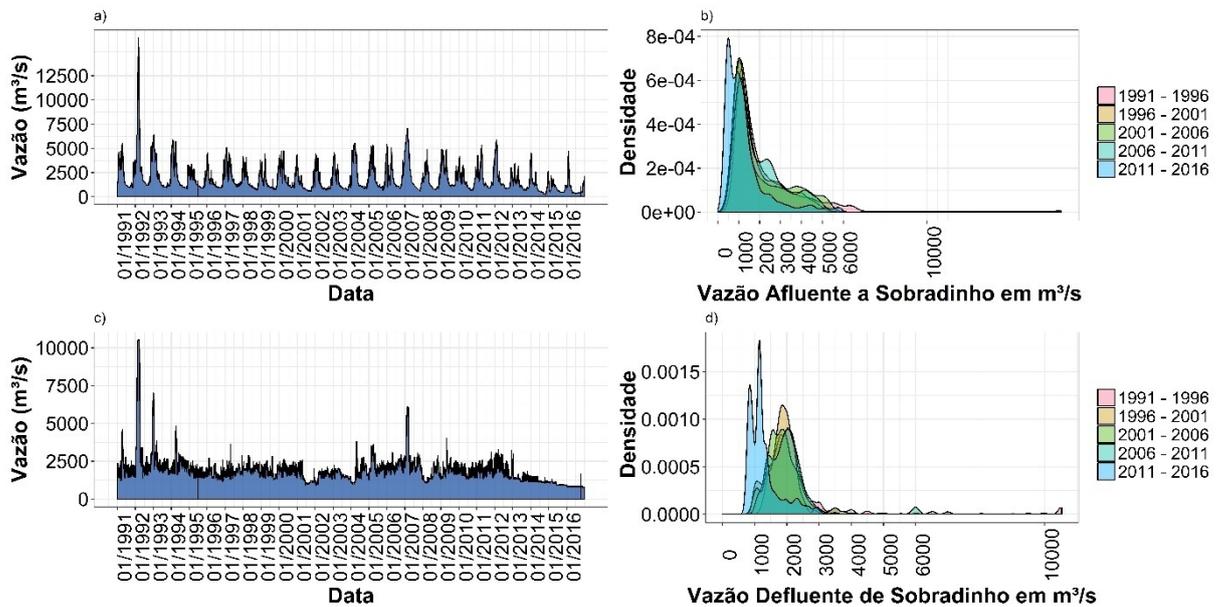


Figura 1 – a) Vazões afluentes a Sobradinho entre 1991 e 2016; b) Densidade de probabilidade das vazões afluentes a Sobradinho divididas em quinquênios; c) Vazões defluentes de Sobradinho entre 1991 e 2016; d) Densidade de probabilidade das vazões defluentes de Sobradinho divididas em quinquênios;

Fonte: Própria.

Quanto as vazões defluentes, na Figura 1c é percebida a redução mais acentuada destas a partir de 2013, sendo determinada por resoluções da Agência Nacional de Água que regulariza a vazão mínima defluente deste reservatório. Além da redução das vazões defluentes, deve-se ressaltar que a sua intensa regularização causa impactos aos ecossistemas ribeirinhos como pode ser visto em Ritcher et al. (1997).

Na Figura 1d, ao se observar a distribuição de probabilidade das vazões defluentes, encontra-se que no quinquênio de 2011 a 2016 se destaca por apresentar uma distribuição bastante diferente das demais, apresentando duas modas: 1100 m³/s e 800 m³/s que são os valores definidos como vazões mínimos pelas Resoluções emitidas pela Agência Nacional de Água (Resolução ANA nº 206/2015 e Resolução ANA nº 66/2016), além de ter seus valores mais concentrados nas vazões mais baixas do sistema.

O espectro dual, frequência e tempo, referente às vazões afluentes é apresentado na Figura 2. A partir desta, pode-se observar a variabilidade da vazão afluente em ambos espectros, uma vez que, como visto anteriormente, as energias são proporcionais a variância.

A Figura 2, ainda, coloca em evidência, primeiramente, que os períodos mais energéticos, aqueles com maior variabilidade, se concentram entre os períodos trimestrais até bienais, sendo o período anual aquele com maior energia. Para os baixos períodos, inferiores ao mensal, são observadas pouca variabilidade, representada por energias próximas a zero, ocorrendo seus maiores valores em épocas chuvosas.

Ao se ter em mente o quinquênio entre 2011 e 2016, a principal característica transiente é observada para o período anual, que por sua vez é o mais energético. Desta forma, deve-se salientar que a técnica das transformadas *wavelets* contínuas possibilitam uma avaliação dos transientes ocorridos em séries temporais não estacionárias, possibilitando a extração de informações de grande valia para a operação destes reservatórios de múltiplos usos.

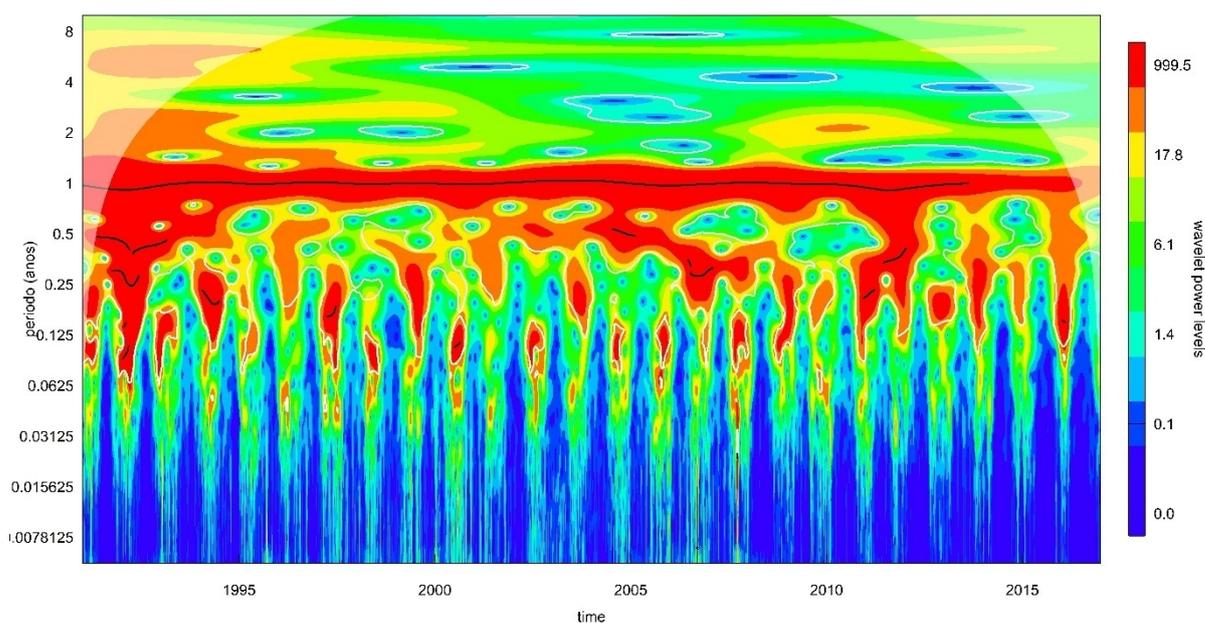


Figura 2 – Espectro dual da transformada wavelet contínua, frequência e tempo, referente às vazões afluentes a Sobradinho;

Fonte: Própria.

Na Figura 3 é apresentado o espectro dual da transformada *wavelet* contínua, frequência e tempo, referente às vazões defluentes a Sobradinho. O seu resultado aponta para pequena variabilidade em todo o seu espectro, exceto para os anos entre 1991 e 1995

e 2005 a 2007. Estas maiores energias concordam com os momentos de chuva, onde a operação dos reservatórios deve levar em conta a existência de um volume de controle de cheias, que têm como finalidade impedir o extravasamento da barragem que pode causar danos estruturais, além de garantir a segurança contra enchentes nas cidades a jusante deste.

Porém, no quinquênio de 2011 a 2016, as variabilidades foram drasticamente reduzidas, atingindo, inclusive, períodos superiores ao semestrais. Esta redução da variabilidade, segundo Ritscheret *al.* (1997) causa impactos nos ecossistemas relacionados a sobrevivência e reprodução das espécies.

A transformada *wavelet* contínua, quando aplicadas às vazões defluentes aos reservatórios de múltiplos usos, se configura como uma ferramenta pertinente para a caracterização da operação dos reservatórios e a regularização das vazões por estes. Possibilitando uma avaliação expedita das condições de operação e dos possíveis impactos desta, agravados por um momento de seca, no ecossistema local.

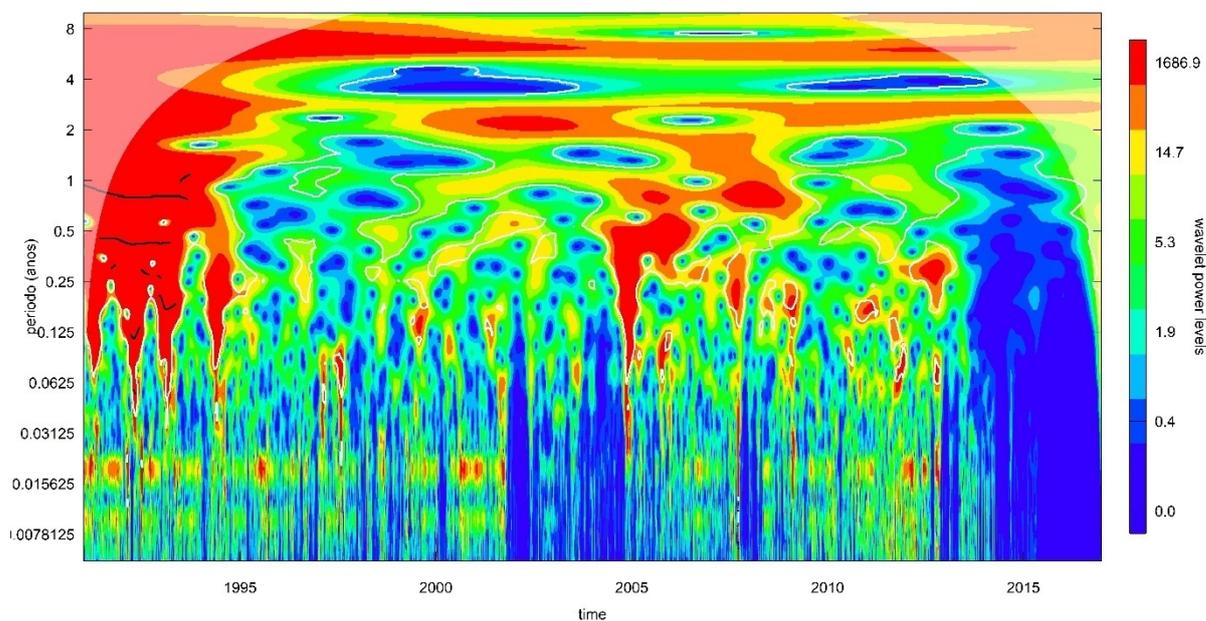


Figura 3 – Espectro dual da transformada wavelet contínua, frequência e tempo, referente às vazões defluentes de Sobradinho;

Fonte: Própria.



Conclusão

O uso das transformadas contínuas *wavelets* se demonstrou uma técnica pertinente para a análise de séries temporais não-estacionárias. A partir do seu uso foi possível identificar periodicidades na série de vazões afluentes e defluentes do reservatório de Sobradinho, bem como os transientes ocorridos ao longo do tempo, principalmente no quinquênio de 2011 – 2016.

Quanto a identificação de periodicidade, esta técnica possibilitou a análise dos períodos mais energéticos que correspondem àqueles que representam melhor a variabilidade do sistema. Para as vazões afluentes, a faixa de períodos entre três meses e dois anos é a mais energética, com especial concentração no período anual. Para as vazões defluentes do reservatório de Sobradinho, as altas energias são observadas nos momentos de cheia, onde é necessário que a operação garanta um volume de controle de cheias que evite o transbordamento do reservatório ou o alagamento de cidades a jusante.

Ainda, é importante pontuar que esta metodologia evidencia a redução da variabilidade das vazões defluentes que pode ser relacionada, em estudos futuros, a impactos no ecossistema local como fora proposto por Richter et al (1997).

O ambiente R e os pacotes utilizados possibilita que estas análises sejam feitas, apresentando bons resultados computacionais, auxiliando, também, na interpretação dos dados.

Referências

- ANA. **Sistema de Acompanhamento de Reservatórios Nacional da Água**. Disponível em: <<http://sar.ana.gov.br>>. Acesso em 2017.
- DAUBECHIES, I. **The wavelet transform, time-frequency localization and signal analysis**. IEEE transactions on information theory, v. 36, n. 5, p. 961-1005, 1990.
- GAO, R X.; YAN, R. **From Fourier transform to wavelet transform: a historical perspective**. In: Wavelets. Springer, Boston, MA, 2011. p. 17-32.
- KOMOROWSKI, D; PIETRASZEK, S. **The Use of Continuous Wavelet Transform Based on the Fast Fourier Transform in the Analysis of Multi-channel Electrogastrography Recordings**. Journal Of Medical Systems, v. 40, n. 1, p.1-15, 29 out. 2015. Springer Nature. <http://dx.doi.org/10.1007/s10916-015-0358-4>.
- LABAT, David. **Recent advances in wavelet analyses: Part 1. A review of concepts**. Journal Of Hydrology, v. 314, n. 1-4, p.275-288, nov. 2005. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jhydrol.2005.04.003>.
- ONS – **OPERADOR NACIONAL DO SISTEMA ELÉTRICO**. Disponível em: <<http://www.ons.org.br/>> Acesso em: setembro 2017.
- RAMINA, R. **Concepção de uma estratégia robusta para a gestão dos usos múltiplos das águas na bacia hidrográfica do rio São Francisco – Os Condicionantes Estruturais – Produto 1**. Comitê da Bacia Hidrográfica do Rio São Francisco, Outubro de 2014.



III Seminário Internacional de Estatística com R
R for Science Integration Challenge
Niterói-RJ-Brasil - 22,23 e 24 de maio de 2018



R CORE TEAM. 2016. **R: A language and environment for statistical computing**. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. Disponível em: <<https://www.R-project.org/>>. Acesso em 05 jan. 2018.

RICHTER, B.D.; THOMAS, G.A. **Restoring Environmental Flows by Modifying Dam Operations**. Ecology and Society, v. 12, n. 1, artigo12, 2007.

Roesch, A e Schmidbauer, H (2018). **WaveletComp: Computational**. Wavelet Analysis. R package version 1.1. <https://CRAN.R-project.org/package=WaveletComp>

TORRENCE, C; COMPO, G. P. **A practical guide to wavelet analysis**. Bulletin of the American Meteorological society, v. 79, n. 1, p. 61-78, 1998.

VIEIRA, Nayara Paula Andrade. **Estimativa da evaporação nos reservatórios de Três Marias – MG e Sobradinho – BA**. 2015. 91f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa. 2015.

WICKHAM,H. **ggplot2: Elegant Graphics for Data Analysis**. Springer-Verlag. New York, 2009.



Anexo

```
#### LIBRARY
```

```
require(dplyr)
```

```
require(ggplot2)
```

```
require(WaveletComp)
```

```
require(reshape2)
```

```
require(scales)
```

```
require(gridExtra)
```

```
require(readr)
```

DATA

```
data <- read_delim("C:/Users/tarss/Desktop/SER/ser/Sobradinho.txt.txt",  
                  "\t", escape_double = FALSE, col_types = cols(Data = col_date(format  
= "%d/%m/%Y")),  
                  trim_ws = TRUE)
```

```
data <- data %>%
```

```
  mutate(ano = as.numeric(format(Data, "%Y"))) %>%
```

```
  mutate(cinco = as.numeric(cut(data$ano, breaks = c(1990, 1996, 2001, 2006, 2011,  
2016, 2018),
```

```
    labels = c(seq(from = 1 , to = 6, by = 1)))) %>%
```

```
  filter(data$cinco < 6)
```

Transformada Wavelets

```
my.data = na.omit(data.frame(date = data$Data, x= data$Afl, y = data$Dfl))
```



```
my.w = analyze.wavelet(my.data, "x",  
                        method = "white.noise",  
                        loess.span = 0,  
                        upperPeriod = 10,  
                        dt = 1/365, dj = 1/150,  
                        make.pval = T, n.sim = 10)
```