

## USO DA TRANSFORMADA EM ONDELETAS PARA PROJEÇÕES DE MÉDIO PRAZO DAS VAZÕES NA BACIA DO RIO SÃO FRANCISCO

*Cleiton da Silva Silveira<sup>1</sup>; Francisco de Assis de Souza Filho<sup>2</sup>; Francisco das Chagas Vasconcelos Junior<sup>3</sup>; Tyhago Aragão Dias<sup>2</sup>; Luiz Martins Araújo Junior<sup>2</sup>; Francisco Wellington Martins da Silva<sup>1</sup>; Renan Vieira Rocha<sup>2</sup>*

**Resumo** – Este trabalho tem por objetivo criar um modelo de projeção de cenários futuros de vazões de 3 a 10 anos utilizando a transformada em ondeletas para a bacia do Rio São Francisco. Foi utilizada as vazões fornecida pela Operador Nacional de Sistemas (ONS), dividida em dois períodos: 1931 a 2006 e 2007 a 2016, para calibração e verificação, respectivamente. A série anual é padronizada e é feita uma análise do espectro global de potência para identificar as bandas mais energéticas. A série temporal é decomposta em três bandas mais o resíduo e reconstruída considerando que as bandas são ortogonais. Em seguida é feito um modelo autorregressivo (AR) por banda e resíduo. O ruído do modelo AR é obtido pela diferença entre o resultado do modelo no período de calibração e o valor da banda. A projeção é obtida pela soma dos modelos autorregressivos. Para avaliação de desempenho é feito uma análise qualitativa da distribuição de probabilidades acumulada do período de anos projetados e a verossimilhança. O modelo identificou a função de distribuição de probabilidades dos anos projetados e obteve verossimilhança maior que 1, indicando que esta metodologia pode captar a variabilidade de médio prazo.

**Palavras-Chave** – Projeção de médio prazo, São Francisco e variabilidade climática.

## USING WAVELET TRANSFORM TO THE MEDIUM-TERM PROJECTION OF STREAMFLOW IN THE SÃO FRANCISCO RIVER BASIN, BRASIL

**Abstract** – This work aims to create projection model future scenarios 3 to 10 years of streamflow using the wavelet transform in the São Francisco River Basin. We used the streamflow data provided by Operador Nacional do Sistema (ONS), divided into two periods: 1931-2006 and 2007-2016, for calibration and verification, respectively. The annual series is standardized and an analysis is made of global power spectrum to identify the most energetic bands. The time series is decomposed into three bands the residue and reconstructed whereas bands are orthogonal. It was made a auto regressive (AR) model for band and residue, with noise of the AR model obtained by the difference between the model results in the calibration period and the value of the band, and then used to generate scenarios. The projection is obtained by adding the auto regressive models. For performance evaluation is made a qualitative analysis of the accumulated probability distribution of projected years period and its verisimilitude. The model identified the distribution probabilities function of projected year and achieved verisimilitude greater than 1, indicating that this methodology can capture the variability medium term.

**Keywords-** Medium Term Projection; São Francisco river basin; Climate Variability.

<sup>1</sup>Universidade da Integração Internacional da Lusofonia Afro-Brasileira, [cleitonsilveira@unilab.edu.br](mailto:cleitonsilveira@unilab.edu.br) \*

<sup>2</sup> Universidade Federal do Ceará,

<sup>3</sup> Fundação Cearense de Meteorologia e Recursos Hídricos

## INTRODUÇÃO

As condições climáticas de um conjunto de anos ou décadas depende tanto de variações climáticas naturais como de forçantes antropogênicos. Projeções climáticas decadais devem tentar cobrir a lacuna entre a previsão sazonal/interanual com prazos de dois anos ou menos e projeções de mudanças climáticas de algumas décadas à frente (CANE, 2010). Não há nenhuma teoria amplamente aceita para esse tipo de projeção, nem se sabe se a sua evolução passada é a chave para seu futuro (CANE, 2010).

Uma grande parte da variabilidade interanual do clima sobre a América do Sul é modulado pelos padrões atmosféricos em resposta ao fenômeno El Niño – Oscilação Sul (ENSO) no Pacífico equatorial (ACEITUNO, 1988; COELHO et al., 2002) e pelo gradiente meridional de anomalias de TSM sobre o Atlântico tropical. A combinação das circulações atmosféricas anômalas induzidas pelas distribuições espaciais de TSM sobre os Oceanos Pacífico equatorial e Atlântico tropical afeta o posicionamento latitudinal da Zona de Convergência Intertropical (ZCIT) sobre o Atlântico, influenciando a distribuição da precipitação sobre a bacia do Atlântico e norte da América do Sul.

Diversos estudos analisam a estrutura de baixa frequência do clima (por exemplo, oscilações El Niño- Oscilação Sul-ENOS, Oscilação Decadal do Pacífico-ODP e Oscilação do Atlântico Norte-OAN) e têm procurado desenvolver cenários de vazões considerando essa variabilidade (DETTINGER *et al.*, 1995; KNOW *et al.*, 2007).

Kwon et al. (2007), considerando o comportamento não-estacionário das séries temporais de temperatura na Inglaterra e as precipitações na Flórida, utilizaram um modelo estatístico baseado na transformada em ondeletas e observaram que a modelagem era capaz de capturar a memória de baixa frequência das séries temporais hidroclimática.

Este trabalho tem por objetivo propor um modelo para a projeção de médio prazo para a bacia do Rio São Francisco, com base na variabilidade climática da série de vazões naturalizadas do ONS e a transformada em *ondeletas*.

## METODOLOGIA

### Região de Estudo

Uma das mais importantes fontes de água para toda a região nordeste do Brasil é o rio São Francisco; este rio é um dos maiores do Brasil. A bacia abrange 631.133 km<sup>2</sup>, que é cerca de 7,5% da área total do Brasil e se estende por quase 2900 km. A bacia serve à múltiplos usos, desde

abastecimento doméstico, abastecimento industrial e irrigação até pesca, energia hidrelétrica e transporte; virtualmente, todos os tipos de uso da água (Santos et al. 2012).

Mais de 330.000 hectares da bacia são dedicados à agricultura intensa (11% da agricultura irrigada total do Brasil). A energia hidrelétrica que é gerada ali tem um potencial maior que 10.500 MW, o que pode facilmente atender os 13 milhões de habitantes da bacia.

## **Dados Utilizados**

Para avaliar a destreza do modelo e efetuar as devidas calibrações foram utilizadas a base de dados de vazões naturalizadas do ONS para o período de 1931 a 2016 para os reservatórios dentro da bacia do Rio São Francisco. As séries de vazões naturalizadas médias anuais foram divididas em dois períodos: 1931 a 2006 e 2007 a 2016, para calibração e verificação, respectivamente.

## **O modelo WAR (*wavelets* autoregressivo)**

O modelo WAR contém pelo menos seis etapas:

- Padronização da série anual com base na média e desvio padrão da mesma.
- Análise do espectro de potência da transformada em ondeletas e identificação das bandas mais energéticas;
- Filtragem da série para as bandas de maior variância, neste caso de 2 a 8 anos, 9 a 39 anos e resíduo;
- Obtenção dos parâmetros dos modelos autoregressivo são gerados para cada uma das bandas;
- Geração do ruído para cada modelo autoregressivo, obtido a partir da média e desvio padrão da diferença entre as bandas e o valor obtido pelo modelo autoregressivo no período da calibração;
- Integração das bandas, considerando que as mesmas são ortogonais, com isso são geradas as projeções para as vazões.

## **Avaliação de desempenho do modelo**

Após calcular as projeções de vazões para a região de interesse, é necessário avaliar o desempenho dos modelos propostos. Para os modelos baseados na série de *ondeletas* é usada a análise qualitativa da distribuição de probabilidades acumulada do período de anos projetados e uma análise da verossimilhança entre a observação e a projeção. Destacando que o objetivo do modelo WAR é

identificar a distribuição de probabilidades do conjunto de anos projetados e não especificamente a previsão de um ano.

## RESULTADOS E DISCUSSÕES

As séries temporais de vazões podem apresentar diversos modos de variação em diferentes escalas temporais, estes podem ser condicionados pela atuação simultânea de diversos sistemas atmosféricos de várias escalas temporais e à dinâmica de suas interações. Devido a esses fenômenos meteorológicos em multiescalas, a combinação dos mesmos determina o estado do clima numa determinada escala temporal, e conseqüentemente o estado das variáveis do ciclo hidrológico. Além disso, mudanças climáticas e alterações no uso e ocupação do solo em uma bacia podem modificar os padrões de escoamento e gerar padrões que indicam tendência na série temporal.

As vazões naturalizadas, disponibilizadas pelo ONS para Sobradinho no período de 1931 a 2016 ilustram os modos de variação em diferentes escalas temporais. Há uma variação interanual das vazões médias anuais em Sobradinho, há anos com valores médios de 2000m<sup>3</sup>/s a 4500 m<sup>3</sup>/s, ou seja, existe uma fator multiplicativo maior que 2 entre o mínimo e o máximo, conforme Figura 1. Este modo de variação é chamado de variabilidade interanual e superpõe-se a uma pronunciada variabilidade sazonal onde em alguns meses as vazões neste posto são mais do que 3000m<sup>3</sup>/s maior do que outros meses.

Além da significativa variabilidade interanual, as séries de vazões médias anuais sinalizam significativa variabilidade hidrológica decadal, com períodos de 10 anos com média superior a 3000 m<sup>3</sup>/s, enquanto em outros intervalos a média móvel de 10 anos atinge valores de aproximadamente 2500m<sup>3</sup>/s.

Essa característica mostra um possível modo de variação de baixa frequência, já que esse comportamento é recorrente ao longo da série histórica. Essa variabilidade pode introduzir nos sistemas hídricos a alternância de anos consecutivos úmidos e secos. No caso de anos consecutivos com seca, possivelmente as políticas de racionamento de água e a redução da concessão de permissão para o uso da água devem ser intensificadas.

Os modos de variabilidade de mais baixa frequência modulam o clima em escala global (WANG et al., 2012). Esses modos de variabilidade ocorrem no Pacífico e no Atlântico, e superpostos e influenciados por modos interanuais, como o El Niño – Oscilação Sul (ENSO), podendo alterar o efeito deste em algumas regiões do globo, inclusive na América do Sul. Zhang e Delworth (2006)

documentaram mudanças no padrão da Oscilação Multidecadal do Pacífico (AMO), encontrando anomalias de TSM com maiores magnitudes e mais coerência durante 1927-1966 do que em outras décadas, enquanto a TSM esteve mais fria no período de 1967 a 2003. Mantua et al. (1997), utilizando entre outros parâmetros, a TSM do Oceano Pacífico entre os anos de 1900 a 1995, define os períodos de 1900 a 1924 e 1947 a 1976 como fases frias da ODP, ao passo que os períodos de 1925 a 1946 e 1977 a 1995 como fases quentes.

Em Sobradinho no período de 1932 a 1942 a série temporal mostra alguns anos com valores anuais de vazões abaixo da média histórica, coincidentes com períodos de ODP na fase quente e AMO na fase quente. No período seguinte, entre 1943 e 1950 as vazões anuais nesse aproveitamento atingem valores superiores que são duas vezes maiores do que a média histórica, período que compreende o final da fase quente e início da fase fria da ODP, e conforme Zhang e Delworth (2006), também dentro de um ponto de mínimo da fase quente da AMO. No período de 1973 a 1980 a AMO atingiu pontos de mínimo na fase fria, coincidente com máximos de vazões, conforme série histórica. No período de 1963 a 1970 há um período de transição entre as fases AMO e um enfraquecimento da fase quente da ODP, que é coerente com vazões anuais próximas a média histórica. O período de 2011 a 2016 sugere uma coincidência entre as fases quentes da ODP e AMO, indicando valores substancialmente abaixo da média para a região.

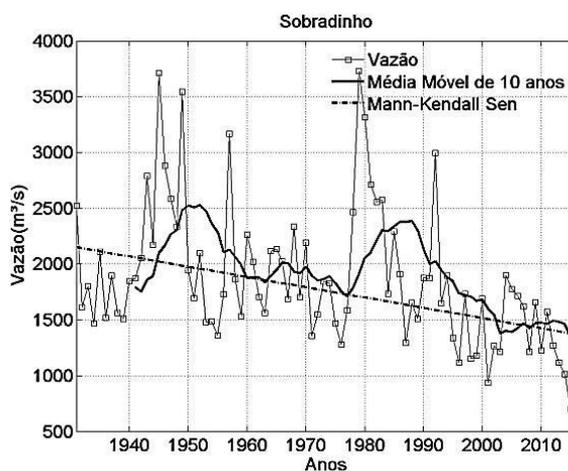


Figura 1- Série histórica de vazões médias anuais de Sobradinho.

Na Figura 2 é mostrada a calibração do modelo WAR para as diferentes bandas para Sobradinho. O modelo representa bem as bandas de alta e média frequência, com um viés muito próximo de zero nestas bandas. Porém, para a banda de alta frequência o modelo suaviza a maioria dos mínimos e máximos, indicando grande incerteza e aleatoriedade nessa banda. Há uma oscilação periódica na banda de baixa frequência, associada a uma oscilação periódica na banda de média

frequência com período entre 10 e 20 anos. Os principais picos de vazões em Sobradinho são acompanhados por máximos na banda de média frequência, possuem relação com início da fase fria da PDO.

A tendência negativa mostrada na Figura 1 em Sobradinho é representada na banda de baixa frequência, especialmente a partir da década de 90 quando esta banda atingiu valores bem abaixo dos obtidos nos demais períodos do século. Na década de 40 e início da década de 80 a banda de média frequência atingiu picos de máximos, com isso as vazões médias anuais atingiram valores superiores a 2500m<sup>3</sup>/s, o que representa valores pelo menos 25% superiores à média histórica de 1931 a 2016.

Quanto às projeções para o período de 2007 a 2016, a amplitude do ruído cresce com o horizonte da projeção, o que parece consistente com a representação da incerteza associado a processos climáticos. A banda de alta frequência apresenta ruído de amplitude elevada, superior a 1 desvio padrão, o que caracteriza bastante incerteza nesse padrão de variação. O modelo identifica os padrões das bandas de média e alta frequência, sinalizando mudanças de fase na banda de média frequência em Sobradinho no período de avaliação associado a pontos de mínimo na banda de baixa frequência, coincidentes com anos muito secos nas regiões.

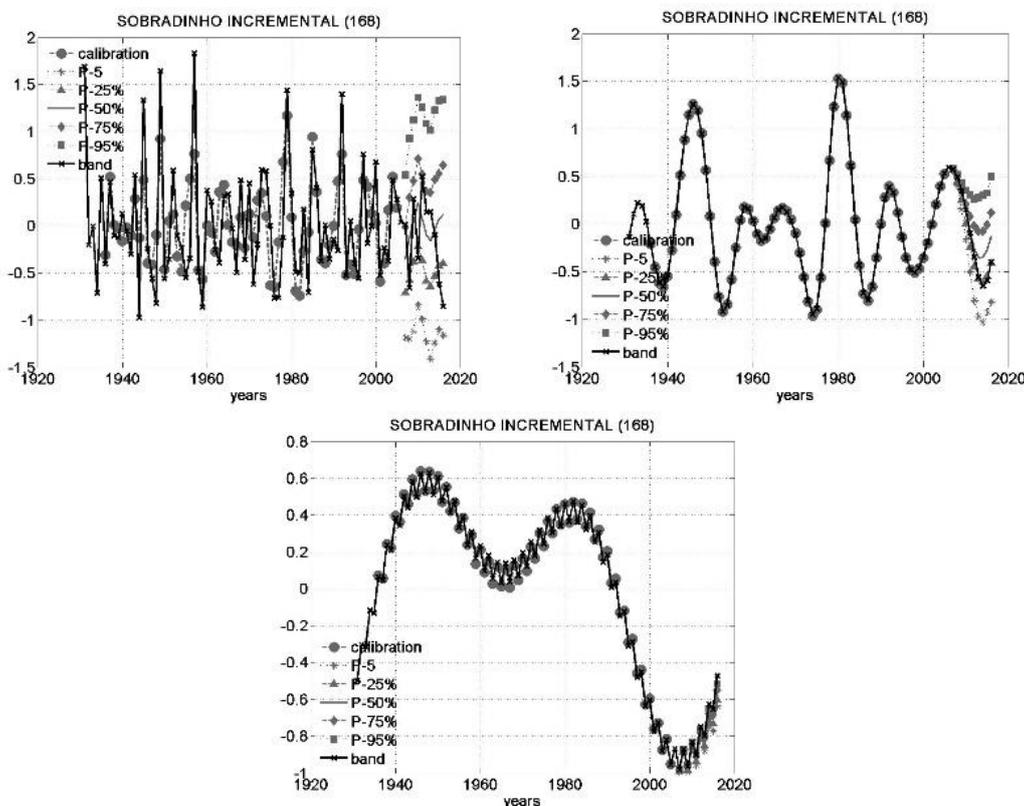


Figura 2-Bandas de variação da transformada em ondeletas, calibração e projeção do modelo WAR. Da esquerda para a direita e de cima para baixo: banda de 2 a 8 anos, banda 9 a 39 anos e resíduo para Sobradinho.

Ao compara o modelo com a climatologia da série histórica de vazões o mesmo demonstra ganho na maioria das projeções, com verossimilhança maior que 1 em todos os postos do São Francisco entre 5 e 10 anos.

Na Figura 3 são mostradas as projeções para os anos de 2017 a 2026 do modelo WAR para Sobradinho. O modelo indica vazões acima da média histórica, provavelmente associado ao fim da fase quente da PDO e da AMO.

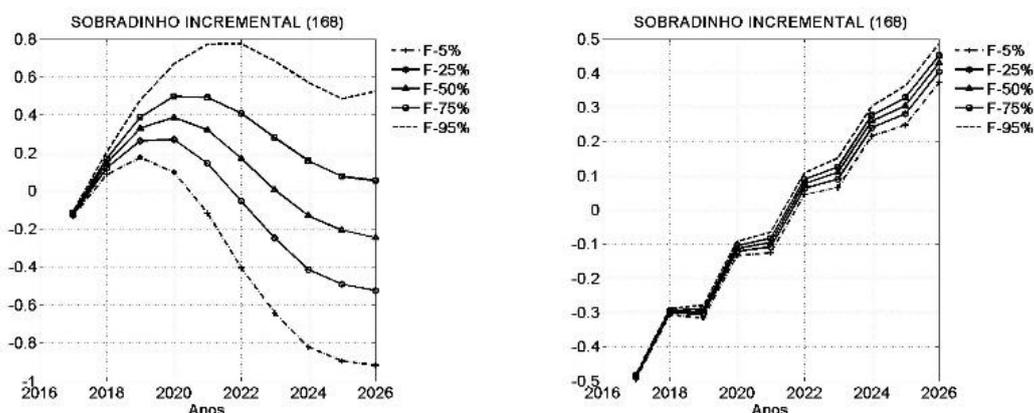


Figura 3- Projeções de Vazões das bandas de média e alta frequência do modelo WAR para o período de 2017 a 2026.

## CONCLUSÕES

As séries de vazões médias anuais mostram sinais de variabilidade interanual e decadal, este padrão pode estar associado a oscilações da temperatura da superfície do mar do pacífico e atlântico. Sobretudo os modos de baixa e média frequência são relacionados a Oscilação Decadal do Pacífico (ODP) e a Oscilação Atlântica Multidecadal(AMO) e afetam significativamente o regime de vazões no São Francisco, a análise mostrada neste trabalho indica que há mudanças de patamares nas vazões coincidentes com mudanças de patamares do índice ODP, havendo, portanto, correlação entre o índice ODP e as mudanças de patamares de vazões médias anuais, na maioria dos postos analisados. Devido a isso a hipótese da estacionariedade das séries de vazões pode ser descartada em várias localidades do Nordeste do Brasil.

O modelo WAR é capaz de capturar os padrões de variação das séries históricas e de vazões do São Francisco e projetar os anos subsequentes. Este modelo apresentou um comportamento melhor do que a climatologia, indicando que pode ser usada pelos gestores na adoção de políticas públicas e auxiliar medidas que minimizem os impactos da variabilidade climática na sociedade.

Esta metodologia pode possibilitar a avaliação das garantias das vazões e regularizações considerando a não estacionariedade das séries temporais devido a variabilidade de baixa frequência.

Possibilitando assim avaliação das garantias da outorga de uso da água considerando o risco dinamicamente.

## REFERÊNCIAS

- ACEITUNO, P. On the Functioning of the Southern Oscillation in the South American sector. Part I: Surface climate. *Monthly Weather Review*, v. 116, p. 505-524, 1988.
- CANE, M. A. Decadal predictions in demand. *Nature Geoscience*, Advance, online publication, p. 231-232, 2010.
- COELHO, C. A. S., UVO, C. B., AMBRIZZI, T. Exploring the impacts of the tropical pacific SST on the precipitation patterns over South America during ENSO periods.
- DETTINGER, M. D.; GHIL, M.; KEPPENE, C. L. Interannual and interdecadal variability of United States surface-air temperatures. *Climatic Change*, v. 31, p. 35-66, 1995.
- KWON, H.-H.; LALL, U.; KHALIL, A. F. Stochastic simulation model for nonstationary time series using an autoregressive wavelet decomposition: applications to rainfall and temperature. *Water Resour. Res.*, 43, W05407, doi:10.1029/2006WR005258, 2007.
- MANTUA, N. J. et al. A Pacific Interdecadal climate oscillation with impacts on salmon production. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, v. 78, p. 1069-1079, 1997.
- SANTOS, G.B. et al. Marcação e recaptura da curimatápioa(*Prochilodus costatus*) em um afluente do rio São Francisco e avaliação da necessidade de transposição de peixes na UHE Gafanhoto. In J.M. Lopes e F.O.Silva(Org.). *Transposição de peixes*. Belo Horizonte, 2012. p.35-58.
- WANG, HUI, ARUN KUMAR, WANQIU WANG, AND YAN XUE, Influence of ENSO on Pacific Decadal Variability: An Analysis Based on the NCEP Climate Forecast System. *J. Climate*, **25**, 6136–6151. 2012.
- Zhang, R., and T. L. Delworth (2006), Impact of Atlantic multidecadal oscillations on India/Sahel rainfall and Atlantic hurricanes, *Geophys. Res. Lett.*, 33, L17712, doi:[10.1029/2006GL026267](https://doi.org/10.1029/2006GL026267).