

AVALIAÇÃO DO DESEMPENHO DE MODELOS PAR E PARX NA PREVISÃO DE VAZÕES PARA HIDRELÉTRICAS DA BACIA DO RIO SÃO FRANCISCO

Antonio Duarte Marcos Junior^{1}; José Micael Ferreira da Costa²; Cleiton da Silva Silveira³.*

Resumo – O objetivo deste trabalho é avaliar o desempenho de modelos periódicos autorregressivos simples (PAR) e com variáveis exógenas (PARX) utilizando índices climáticos com componentes principais para a previsão de vazões sazonais de hidrelétricas na bacia do rio São Francisco. Os modelos propostos de previsão de afluência utilizam os dados de vazões naturais gerados pelo Operador Nacional do Sistema Elétrico (ONS) e técnicas estatísticas como: regressão linear múltipla e método de componentes principais para escolha de variáveis explanatórias. São utilizados 8 índices climáticos do IRI. O desempenho das metodologias é avaliado no uso do coeficiente de NASH, erro médio percentual absoluto (RMSE), viés (BIAS) e correlação. Os resultados mostram que os modelos conseguem representar a sazonalidade existente na região de estudo. O PAR apresenta NASH melhores que o PARX para um mês de antecedência. Os índices de correlação e RMSE foram semelhantes em ambos os modelos. Quanto ao BIAS, o modelo PARX obteve desempenho superior ao PAR, mostrando que os modelos tendem a subestimar os valores observados das usinas. A inclusão de variáveis exógenas nos modelos mostra-se capaz de melhorar as previsões, principalmente para horizontes maiores que 1 mês.

Palavras-Chave – *Previsão sazonal, Índices climáticos, Setor elétrico.*

PERFORMANCE EVALUATION OF PAR AND PARX MODELS IN THE FORECASTING OF HYDROELECTRIC FLOWS OF THE SÃO FRANCISCO RIVER BASIN

Abstract – The purpose of this paper is to evaluate the performance of simple autoregressive periodic models (PAR) and with exogenous variables (PARX) using climatic indexes with main components for the forecast of seasonal hydroelectric flows in the São Francisco river basin. The proposed models of flow forecasting use the natural flow data generated by the National Electric System Operator (ONS) and statistical techniques such as: multiple linear regression and principal components method for choice of explanatory variables. It was used 8 IRI climate indexes. The performance of the methodologies is evaluated using the NASH coefficient, mean absolute error (RMSE), bias (BIAS) and correlation. The results show that the models can represent the seasonality in the study region. The PAR presents NASH better than the PARX for one month in advance. Correlation indexes and RMSE were similar in both models. As for the BIAS, the PARX model obtained superior performance to PAR, showing that the models tend to underestimate the observed values of the plants. The inclusion of exogenous variables in the models is shown to be able to improve predictions, especially for horizons greater than 1 month.

¹ Universidade da Integração Internacional da Lusofonia Afro-brasileira; duarte.jr105@gmail.com.

² Universidade da Integração Internacional da Lusofonia Afro-brasileira; micaelcosta@aluno.unilab.edu.br.

³ Universidade da Integração Internacional da Lusofonia Afro-brasileira; cleitonsilveira@unilab.edu.br.

Keywords – Seasonal forecast, Climatic indexes, Electrical sector.

1. INTRODUÇÃO

A matriz energética brasileira possui grande contribuição da energia proveniente de hidrelétricas (ANEEL, 2002). A capacidade de geração e distribuição de energia elétrica do Brasil é diretamente influenciada pela variabilidade hidrológicas das vazões e a interconexão dos aproveitamentos hidrelétricos, cujas previsões e incertezas devem ser consideradas no planejamento da operação do sistema (ALEXANDRE, 2012).

Em geral, a qualidade das previsões hidrológica afeta o desempenho da operação do sistema. Dessa forma, os aperfeiçoamentos metodológicos para a obtenção dos cenários hidrológicos de previsão ou geração de afluências contribuem para a melhoria do processo de planejamento e programação da operação do Sistema Integrado Nacional (SIN).

Estudos apontam para o uso de variáveis climáticas como fator de diminuição de incertezas, devido aos altos níveis de correlação dessas com variáveis hidrológicas (CATALDI, 2008; SOUZA FILHO e LALL, 2003; FOLEY *et al.* (2002) ; BARROS *et al.* (2004). Em escala global destacam-se os trabalhos de Dettinger e Diaz (2001).

O presente trabalho tem como objetivo analisar o desempenho de sistemas de previsão de vazões sazonais simultânea através de modelos periódicos autorregressivos com variáveis endógenas (PAR) e exógenas (PARX) utilizando índices climáticos e componentes principais para as principais hidrelétricas da bacia do São Francisco.

2. METODOLOGIA

A base de dados observacionais utilizada para confecção dos modelos PAR e PARX são as vazões disponibilizadas pelo ONS para o período de 1931 a 2016. Enquanto as variáveis exógenas do modelo PARX correspondem aos índices climáticos disponibilizados pelo *International Research Institute for Climate and Society* (IRI).

Foram selecionadas quatro das principais hidrelétricas da Bacia do Rio São Francisco: Sobradinho, Itaparica, Complexo Paulo Afonso e Xingó. O período de 1931 a 1990 foi utilizado para a calibração dos modelos e o período de 1994 a 2004 para validação e avaliação do desempenho dos modelos. As previsões foram feitas com um horizonte de até três meses adiante.

O método de previsão adotado é baseado em modelos periódicos autorregressivos. A manutenção da correlação espacial utiliza-se da correlação de ruídos (CRD) entre os postos em estudo, definidos no momento da calibração dos modelos de regressão, através de séries padronizadas. O primeiro procedimento para estabelecer o modelo PAR é selecionar as variáveis explanatórias, mediante uma técnica usando componentes principais.

Os modelos do tipo PAR (p) são referenciados pelo índice “ p ”, denomina a ordem ou termos autorregressivos do modelo. Em geral, “ p ” é um vetor no qual cada elemento fornece a ordem de

cada período PAR (p_1, p_2, \dots, p_{12}). A formulação geral para uma variável “Z” padronizada pode ser descrita matematicamente da seguinte forma:

$$\hat{y}_{t,m} = \sum_{\tau=1}^N \alpha_{t,m} y_{t-\tau,m} + \varepsilon_{t,m} \quad (1)$$

em que α é operador Período Autorregressivo, t a ordem do operador Período Autorregressivo “ m ”, ε a série de ruídos independentes com média zero e variância e y o valor da variável preditora.

Os ruídos são definidos no momento da calibração dos modelos, a partir da diferença entre as vazões previstas e observadas. A manutenção da correlação espacial na previsão de vazão é realizada através do uso da matriz de covariância mensal dos ruídos entre os postos em estudo para a geração da componente aleatória do erro seguindo uma distribuição normal multivariada. Este modelo tem estrutura semelhante ao PAR com o diferencial de t ser acrescentado valores de variáveis exógenas, que julga-se influenciarem no comportamento da variável em análise, que no caso deste estudo é a vazão. A Equação 2 é a formulação matemática que rege este modelo,

$$\hat{y}_{t,m} = \sum_{\tau=1}^N \alpha_{t,m} y_{t-\tau,mz} + \sum_{y=1}^K \beta_{y,m} x_t \quad (2)$$

em que α é o operador Periódico Autorregressivo da série de vazões, t a ordem do operador Período Autorregressivo “ m ”, ε a série de ruídos independentes com média zero e variância e y o valor da vazão passada, β é o operador Periódico Autorregressivo da série de índices climática e x o valor dos índices climáticos observados.

Como variáveis exógenas foram utilizados índices climáticos referentes a Temperatura da Superfície do Mar (TSM) do Atlântico e do Pacífico. Os índices utilizados foram: MEI, Niño 1-2, Niño3, Niño3-4, Niño4, Atlântico Norte, Atlântico Sul e Gradiente do Atlântico.

3. RESULTADOS

A Figura 1 mostra os resultados dos modelos PAR (1.a) e PARX (1.b) para o Complexo de Paulo Afonso. Em ambos os modelos é possível perceber que a medida que se aumenta o horizonte de previsão o desempenho dos modelos piora, comportamento este observado em todas as hidrelétricas em estudo. O mesmo ocorre devido às incertezas associadas, aos métodos de previsão, que crescem conforme se aumenta a escala de estudo.

Para as previsões de 1 e 2 meses, a frente, o modelo PARX teve desempenho ligeiramente inferior ao do PAR e na previsão para 3 meses posteriores, teve desempenho semelhante. Ambos os modelos apresentam índices de correlação, com os dados observados, semelhantes e satisfatórios. No quesito viés, o modelo PARX mostrou-se bem superior ao modelo PAR, porém ambos tendem a

subestimar os valores observados. No RMSE, o modelo PAR também apresentou resultados um pouco melhores que o modelo PARX.

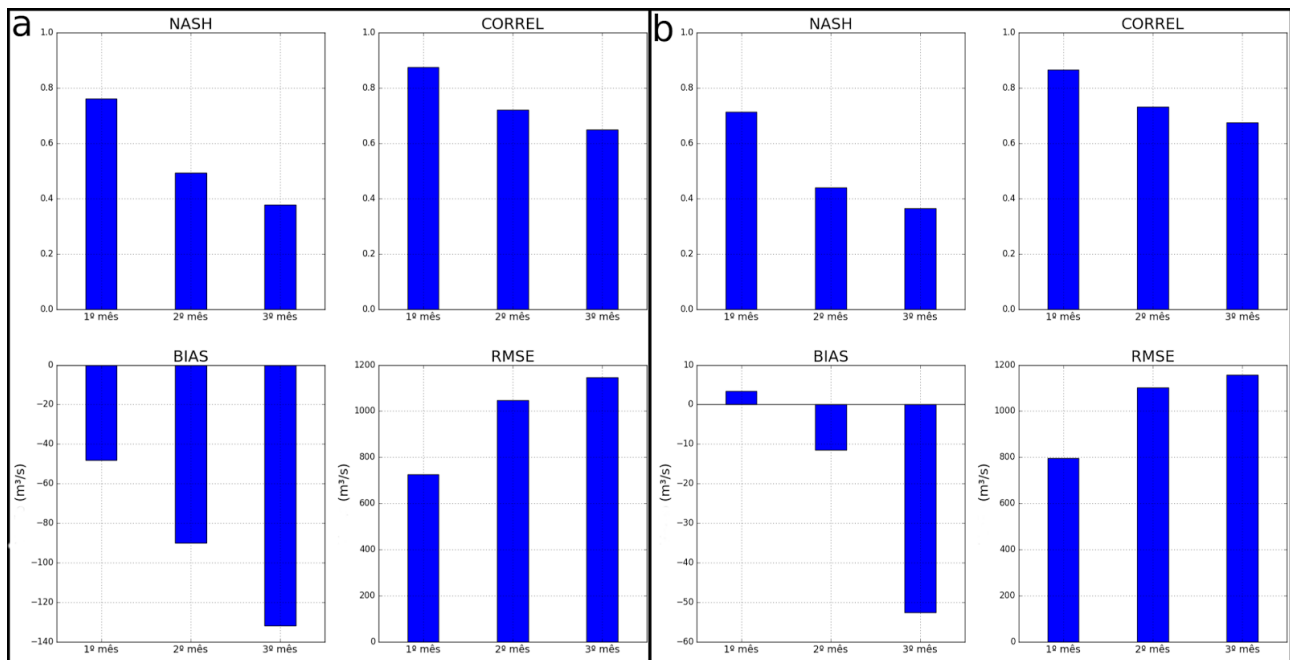


Figura 1 - Avaliação de desempenho dos modelos para o Complexo de Paulo Afonso:
(a) modelo PAR; (b) modelo PARX.

Os resultados para a Hidrelétrica de Itaparica (Figura 2), no quesito NASH mostram que o modelo PARX tem um pior desempenho para os horizontes de 1 e 2 meses e, para o horizonte de 3 meses, têm uma pequena melhora de desempenho passando de cerca de 3,9 (1.a) para 4.1(1.b). Ambos os modelos têm valores elevados de correlação, sendo o PARX melhor que o PAR para previsões de horizonte 2 e 3 meses. Assim como para o complexo de Paulo Afonso, onde o PARX é muito superior ao modelo PAR quanto ao índice BIAS, sendo ambos os modelos tendenciosos a subestimar os valores observados. O RMSE os modelos têm desempenhos semelhantes, sendo que o PARX tem resultados ligeiramente melhores que o PAR para o horizonte de 3 meses à frente.

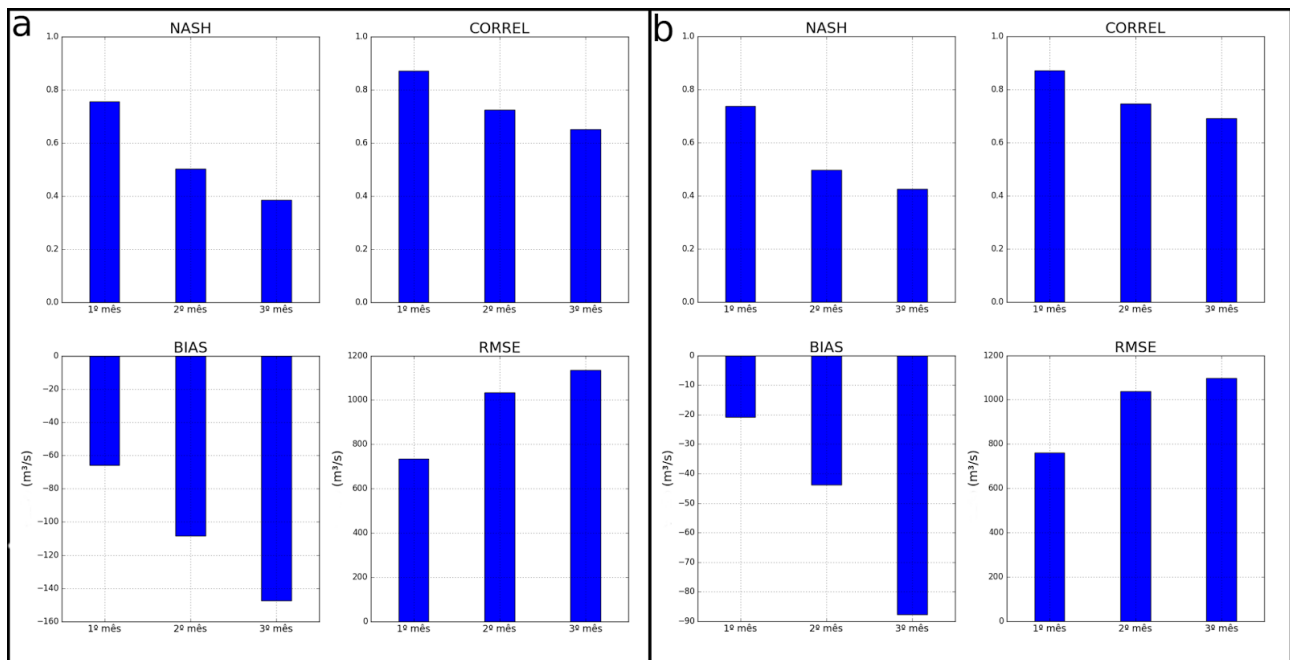


Figura 2 - Avaliação de desempenho dos modelos para a Hidrelétrica Itaparica: (a) PAR; (b) PARX.

O NASH (Figura 3) do modelo PAR se saiu melhor que o PARX nos horizontes de 1 e 2 meses para Sobradinho. Já para o horizonte de 3 meses, o PARX teve desempenho superior ao PAR. Contudo, somente as previsões para 1 e 2 meses (em ambos os modelos) ficaram dentro da faixa considera boa ou aceitável. Os dois modelos também apresentam correlação semelhante e elevada para a hidrelétrica de Sobradinho. Nos resultados referentes ao BIAS, os modelos novamente tendem a subestimar os valores observados sendo, neste quesito, o PARX melhor que o PAR. Quanto ao RMSE, os dois modelos possuem resultados semelhantes para as previsões com horizontes de 1 e 2 meses e o PARX se sai ligeiramente melhor que o PAR para as previsões horizonte de 3 meses.

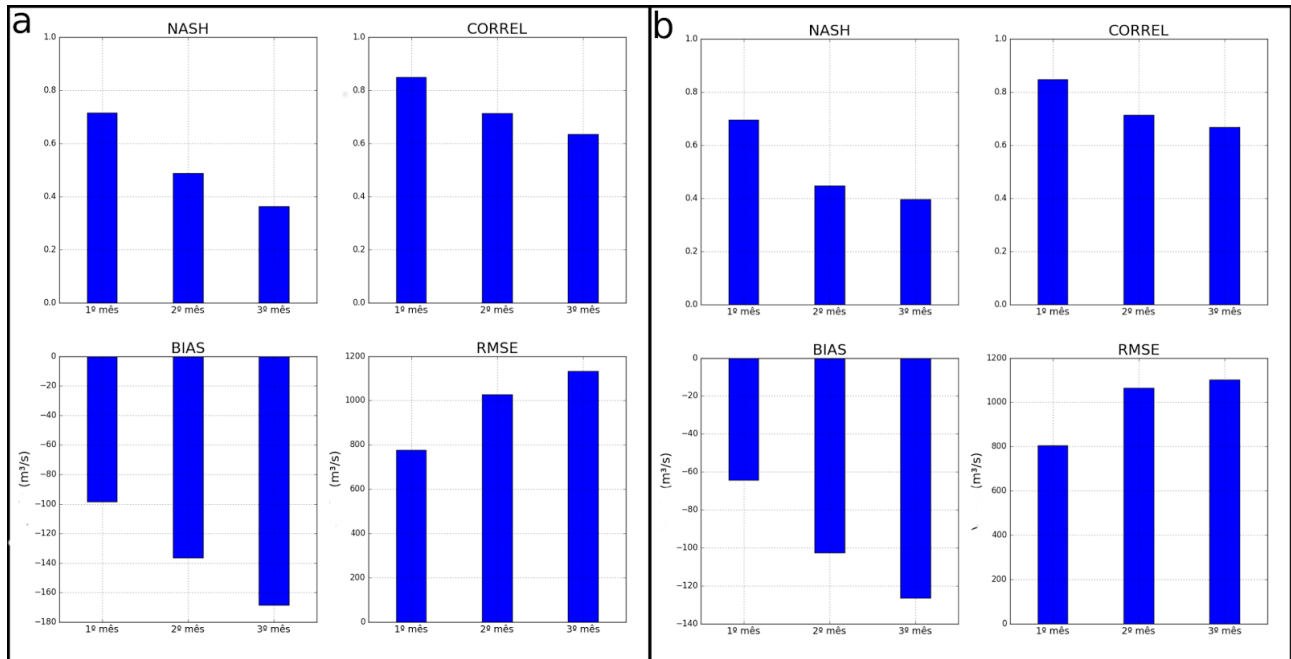


Figura 3 - Avaliação de desempenho dos modelos para a Hidrelétrica de Sobradinho: (a) modelo PAR; (b) modelo PARX.

Para a hidrelétrica de Xingó (Figura 4) os modelos obtiveram desempenho semelhante quanto ao teste de NASH, tendo o modelo PARX desempenho ligeiramente inferior que o PAR. Semelhante aos resultados das demais hidrelétricas estudadas, em Xingó ambos os modelos possuem índice de correlação elevada, sendo o PARX ligeiramente melhor que o PAR, em especial para o horizonte de 3 meses. Para Xingó o modelo PAR tende a subestimar os valores observados e tem desempenho no teste de BIAS inferior que o PARX, que para os horizontes de 1 e 2 meses tende a superestimar os valores observados. No RMSE o modelo PAR se saiu melhor que o PARX para as previsões com horizontes de 1 e 2 meses.

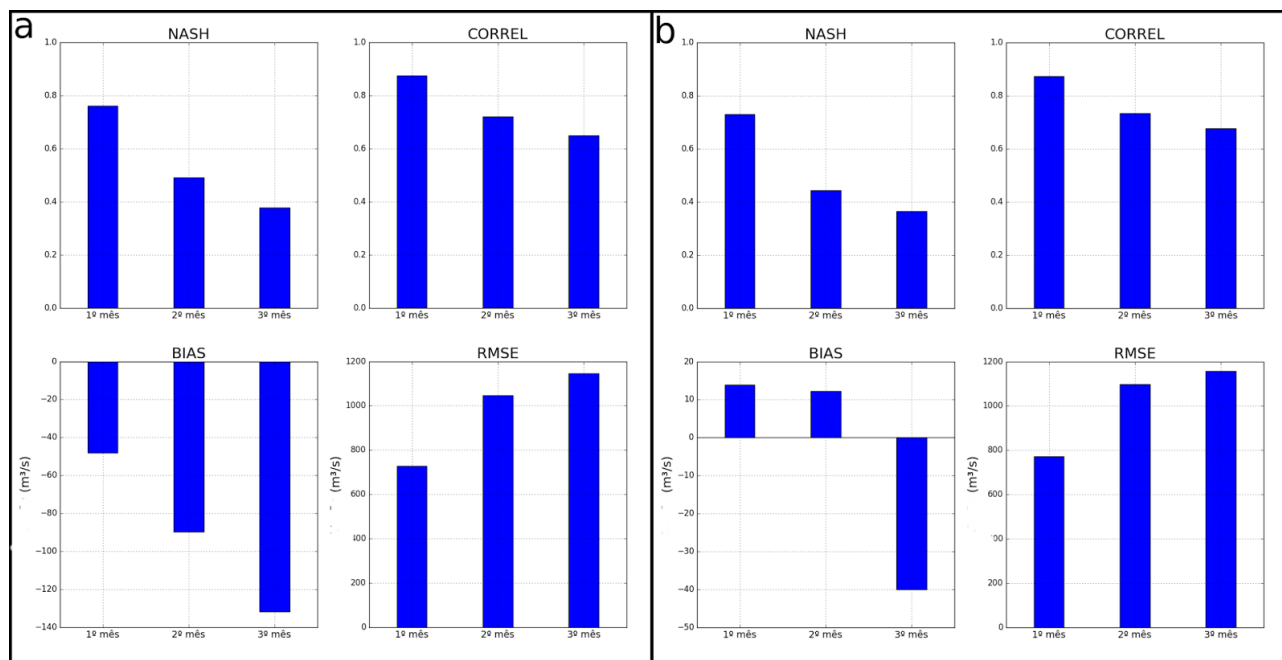


Figura 4 - Avaliação dos modelos para a Hidrelétrica de Xingó: (a) modelo PAR; (b) modelo PARX.

4. CONCLUSÕES

Estudos apontam para a melhoria do desempenho de modelos de previsão de afluência a partir da inserção de variáveis explanatórias formadas por índices climáticos (CATALDI, 2008; SOUZA FILHO e LALL, 2003). Entretanto, observa-se que o processo descrito não se confirmou para todas hidrelétricas e todos os meses do ano em especial para a previsão com um mês de antecedência. Isso se deve, provavelmente, ao forte sinal da persistência no modelo PAR.

Apenas para a Hidrelétrica de Itaparica o modelo PARX teve desempenho superior, já que se sobressai em três dos quesitos analisados, para todas as escalas de previsão. Nas demais hidrelétricas o desempenho dos modelos PAR e PARX foram semelhantes.

O modelo PARX têm desempenho superior ao PAR para horizontes de tempo maior que 1 mês, indicando que o uso da informação climática pode trazer benefícios para previsões de vazões na bacia do rio São Francisco.

AGRADECIMENTOS

Agradecemos primeiramente a Deus por nos possibilitar as condições necessárias para desenvolver esta pesquisa, à Universidade da Integração Internacional da Lusofonia Afro-brasileira (UNILAB) pelos conhecimentos adquiridos, à Fundação Cearense de Meteorologia e Recursos hídricos (FUNCEME) por nos dar as condições de trabalho, e ao Grupo de Pesquisa sobre Clima e Planejamento Energético (CLIFE) pela ajuda conjunta e aprendizado.

REFERÊNCIAS

ANEEL - Atlas de Energia Elétrica do Brasil. Brasília: Agência Nacional de Energia Elétrica – ANEEL, 153p, 2002.

ALEXANDRE, A. M. B. **Previsão de vazões mensais para o sistema interligado nacional utilizando informações climáticas**. Fortaleza-CE: Universidade Federal do Ceará, Tese de Doutorado em engenharia civil, 293p, 2012.

CATALDI, M. **Estudo Numérico da Influência das Anomalias da TSM do Atlântico Sul Extratropical e do Pacífico Equatorial no Regime Hidrometeorológico das Regiões Sul e Sudeste do Brasil**. 2008. 255f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil – COPPE), Universidade Federal do Rio de Janeiro – UFRJ, Rio de Janeiro, 2008.

SOUZA FILHO, F.A., LALL, U. Seasonal to interannual ensemble streamflow forecasts for Ceara, Brazil: applications of a multivariate, semiparametric algorithm. **Water Resources Research** Vol. 39, No. 11, p.1307, 2003.

SOUZA FILHO, F.A.; LALL, U. Modelo de Previsão de Vazões Sazonais e Interanuais. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos** v. 9, n. 2, p.61-74, ABRH, Porto Alegre, 2004.