

PREVISÃO PROBABILÍSTICA DE ENCHENTES A PARTIR DE ANÁLISE DE SÉRIES TEMPORAIS, ESTUDO DE CASO: BACIA HIDROGRÁFICA DE WEISSERITZ, SAXÔNIA, ALEMANHA

Alexandre C. Costa^{1} & Axel Bronstert² & David Kneis²*

Resumo – Modelos hidrológicos são utilizados geralmente para a previsão da vazão em rios para sistemas de alerta contra enchentes. Estes modelos necessitam normalmente de um grande levantamento de dados da bacia hidrográfica e séries de precipitação, que não são sempre disponíveis. Um método alternativo é o uso de modelos não paramétricos baseados somente nas séries temporais das vazões. Neste trabalho, foi realizada uma previsão probabilística de uma hora, duas horas e três horas à frente para uma série de vazões, atribuindo uma função densidade probabilidade para a vazão prevista, em uma pequena bacia hidrográfica (49 km²), Saxônia, Alemanha, usando análise de séries temporais. A evolução determinística dos modelos não paramétricos foram comparados com o modelo hidrológico distribuído LARSIM. As funções de probabilidade da vazão prevista com 95% de intervalo de confiança apresentaram em média um intervalo de 1,40 m³/s e erros relativos (%) entre [-30; 30]. O modelo LARSIM e os melhores modelos não paramétricos produziram resultados similares, mas a dispersão dos erros relativos foi maior para os modelos não paramétricos.

Palavras-Chave – Previsão de enchentes; Análise de séries temporais; Processos dinâmicos e estocásticos.

PROBABILISTIC FLOOD FORECASTING USING TIME SERIES ANALYSIS, CASE STUDY: WEISSERITZ CATCHMENT, SAXONY, GERMANY

Abstract – Hydrological models are commonly used to perform real-time runoff forecasting for flood warning. Their application requires catchment characteristics and precipitation series that are not always available. An alternative approach is nonparametric modelling based only on runoff series. However, the following questions arise: Can nonparametric models show reliable forecasting for headwater catchments? Can they perform as reliably as hydrological models? We performed probabilistic forecasting one-, two- and three-hours ahead for a runoff series for a headwater catchment (49 km²), with the aim of ascribing a probability density function to predicted discharge using time series analysis based on stochastic dynamics theory. The derived dynamic terms were compared to a hydrological model, LARSIM. Our procedure was able to forecast with 95% confidence interval one-, two- and three-hour ahead discharge probability functions with about 1.40 m³/s of range and relative errors (%) in the range [-30; 30]. The LARSIM model and the best nonparametric approaches gave similar results, but the range of relative errors was larger for the nonparametric approaches.

Keywords – Flood forecasting; Time series analysis; Dynamic and stochastic processes.

¹ Fundação Cearense de Meteorologia e Recursos Hídricos, Av. Rui Barbosa 1246, CEP: 60115-221, Fortaleza, Brasil, cunhacos@gmail.com.

² University of Potsdam, Karl-Liebknecht-Str. 24/25, 14476 Potsdam, Germany, axelbron@uni-potsdam.de, dkneis@uni-potsdam.de

* Autor Correspondente.

INTRODUÇÃO E OBJETIVOS

Hidrólogos e Engenheiros utilizam geralmente modelos hidrológicos (semi)distribuídos para prever a vazão em rios para sistemas de alerta contra enchentes. Estes modelos necessitam normalmente de um grande levantamento de dados das características físicas da bacia hidrográfica e séries confiáveis de precipitação, que não são sempre disponíveis. Além disso, os resultados destes modelos podem comprometer muitas incertezas devido a erros/incertezas na entrada de dados, nas condições iniciais de umidade da bacia e/ou nos parâmetros/processos da modelagem.

Um método alternativo à modelagem hidrológica (semi)distribuída é o uso de modelos não paramétricos baseados somente nas séries temporais disponíveis das vazões de rios. Entretanto, não se sabe ainda se modelos derivados exclusivamente de séries temporais podem apresentar previsão confiável da vazão de rios em pequenas bacias hidrográficas, ou se eles são tão precisos quanto, ou até mais precisos que, os modelos hidrológicos distribuídos.

O objetivo deste trabalho foi realizar uma previsão probabilística de uma hora, duas horas e três horas à frente para uma série de vazões, i.e. atribuir uma função densidade probabilidade (fdp) para a vazão prevista, em uma pequena bacia hidrográfica (49 km²), Saxônia, Alemanha, usando análise de séries temporais. A abordagem probabilística se justifica porque para a implementação de sistemas efetivos de alerta ou proteção contra enchentes é fundamental considerar as incertezas associadas à previsão da vazão em rios [Todini (2004)].

Neste contexto, assume-se que a série de vazão é governada por um sistema dinâmico estocástico [Kantz e Schreiber (2004)], em que a sua parte dinâmica pode ser modelada por um modelo de regressão e a sua parte estocástica por um ruído randômico que não depende dos estados do sistema dinâmico. Este tipo de modelo não paramétrico pode ser encontrado, por exemplo, em Tamea *et al.* (2005) e Chen e Yu (2007), e representa um avanço em relação aos modelos puramente determinísticos e não lineares [e.g. Porporato e Ridolfi (2001); Laio *et al.* (2003)].

Adicionalmente, a evolução determinística dos modelos provindos da série temporal, que foram adotados para este trabalho, foram comparados com um modelo hidrológico distribuído chamado LARSIM, que vem sendo usado para a previsão operacional de enchentes na Alemanha [e.g. Ludwig e Bremicker (2006)].

MODELAGEM NÃO PARAMÉTRICA DA SÉRIE TEMPORAL

Primeiramente, procurou-se identificar um sistema dinâmico governante para a série de vazões. Esta identificação foi baseada no comportamento esperado da função de autocorrelação de um sistema dinâmico contaminado por ruído. Definido o sistema a ser modelado, x_η , ele foi aproximado pela relação:

$$\hat{x}_\eta = F(x_{\eta-j\Delta\tau}, \dots, x_{\eta-(K\Delta\tau-1)}) + \xi \quad (1)$$

A parte determinística do sistema é representada pela função F , sendo Δt o intervalo de tempo e K o número de valores passados de x_t usados na regressão. A parte estocástica é representada pelo termo ζ que pode ser ruído branco ou colorido. Adotando *a priori* um modelo não paramétrico para F (ver abaixo), a distribuição de ζ pode ser estimada a partir de uma parte da série que foi destinada à calibração da modelagem (75% da série original). A distribuição de ζ irá determinar o intervalo da previsão da vazão, considerando um certo intervalo de confiança desta distribuição, por exemplo, 90% ou 95%.

Três modelos não paramétricos foram aplicados ao termo F : a) a média local, em que somente K deve ser determinado; b) a constante local, em que o valor previsto é igual ao valor medido anteriormente; e c) o modelo clássico de autoregressão para o teste da hipótese da série de vazões ser governada por um sistema randômico linear. A ausência de modelos não lineares globais deve-se ao fato de que a grande maioria dos estudos anteriores apontar para uma performance pior ou igual dos globais em relação aos simples modelos locais.

Como critério de performance foi adotado o erro relativo (RE , %) entre o valor de vazão medida e um dos limites (superior ou inferior) do intervalo previsto de vazão. Então, o melhor modelo foi aquele que minimizou ambos o intervalo de ζ e o RE , dado um certo intervalo de confiança da distribuição de ζ .

ÁREA DE ESTUDO

A análise de série temporal foi realizada para a estação fluviométrica de Ammeldorf que controla a bacia de Weisseritz (49 km²) no Oeste das Ore Montanhas, Alemanha, próxima da divisa entre a República Checa e a Alemanha (Fig. 1). Os dados de vazão foram disponíveis a cada hora. A série de vazões trabalhada começa em Janeiro de 2000 e termina em outubro de 2009. A vazão média foi de 1,01 m³/s e o coeficiente de variação foi de 1,5, sendo 0,04 e 35,44 m³/s o valor mínimo e máximo medido, respectivamente. O deflúvio na bacia é decorrente tanto de chuvas convectivas no verão, como do derretimento da neve acumulada sobre a paisagem na primavera.

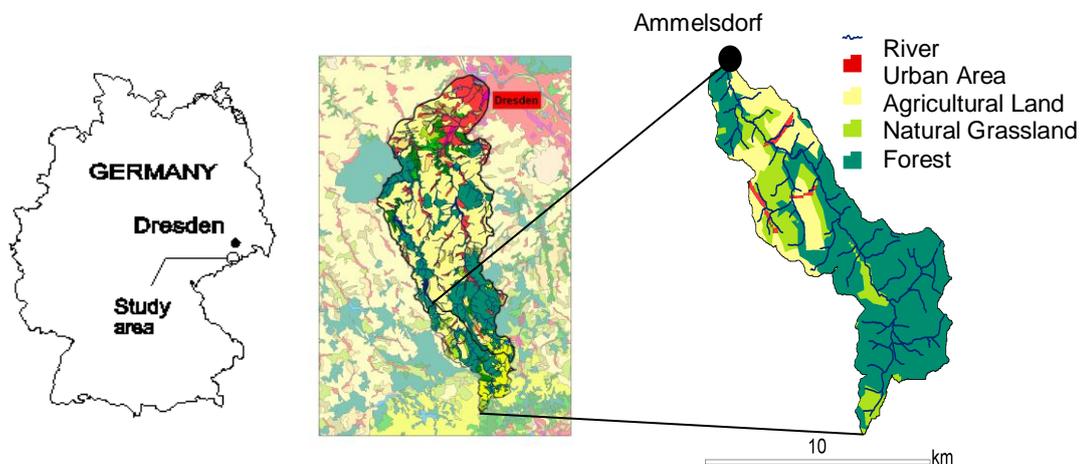


Figura 1 – Localização da bacia de Weisseritz controlada pela estação fluviométrica de Ammeldorf [adaptada de Costa *et al.* (2012)].

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Identificação do sistema dinâmico

Trabalhos anteriores sobre previsão de vazões em rios, a partir de análise das séries temporais, utilizaram a vazão como variável independente. Entretanto, se a função de autocorrelação da variável não chegar a uma região dominada por valores de coeficiente de correlação iguais ou próximos à zero (intervalo pequeno de dependência), um modelo de regressão não deveria ser ajustado ao termo F da Eq. (1), mesmo que a série temporal for governada por um sistema dinâmico.

A função de autocorrelação (fac) foi calculada para a série de vazões (Q), para sua primeira (Q') e segunda (Q'') derivadas para determinar, de forma qualitativa, se um sistema dinâmico pode ser assumido a partir da série original de vazões. A Fig. 2 mostra que a fac de Q não apresentou um intervalo pequeno de dependência. Ao contrário, esta fac mostrou um intervalo muito grande de dependência, que é caracterizado por um decaimento lento seguindo aproximadamente uma lei de potência. Este tipo de comportamento também é conhecido como o fenômeno de Hurst. Dessa forma, Q não deveria ser utilizado para previsão de vazões baseada em modelos de regressão.

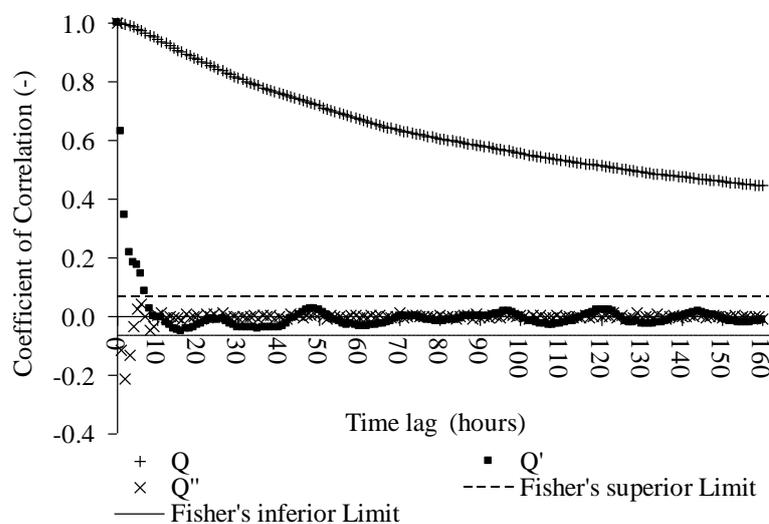


Figura 2 – Função de autocorrelação da série de vazões (Q) e de sua primeira (Q') e segunda (Q'') derivadas para a estação fluviométrica de Ammeldorf (2000-2009 com descontinuidades), o intervalo de Fischer indica a região, onde a hipótese de não correlação não pode ser rejeitada [de Costa *et al.* (2012)].

A fac da segunda derivada Q'' para um tempo de retardo igual à quatro horas chegou em uma região dominada por valores de coeficiente de correlação iguais ou próximos à zero, mas ela foi similar com aquela originada de um sistema randômico, mostrando, assim, uma previsibilidade muito baixa. Entretanto, a fac da primeira derivada Q' apresentou um pequeno intervalo de dependência, possuindo uma estrutura similar com aquela provinda de um sistema dinâmico contaminado por ruído, i.e. decaimento rápido nos primeiros tempos de retardo, então decaimento exponencial até valores de coeficiente de correlação iguais ou próximos à zero. Depois de um tempo de retardo de sete horas, a fac de Q' oscilou quase que periodicamente em torno de zero.

Consequentemente, a primeira derivada das vazões foi utilizada para a previsão da série de vazões originais a partir da seguinte relação:

$$\begin{aligned}
 \hat{Q}_{t+\Delta t} &= Q_t + \Delta \hat{Q}_{i,\Delta t} = \\
 Q_t + F(\Delta Q_{i-\Delta t,\Delta t}, \dots, \Delta Q_{i-\Delta t \cdot m,\Delta t}) & \\
 + \xi; \quad i > \Delta t \cdot m &
 \end{aligned} \tag{2}$$

em que Q_t é a vazão medida num tempo anterior e $\hat{Q}_{t+\Delta t}$ é a previsão da função probabilidade da vazão no rio.

Previsão por modelagem não paramétrica

Os modelos não paramétricos calibrados para diferentes passos de tempo (um, duas e três horas) e a distribuição de seus erros, que foram estimados a partir da aplicação dos modelos para a mesma parte da série destinada à calibração (75% da série original), são apresentados na Tabela 1.

O processo de validação mostrou que os melhores modelos para intervalos de confiança de 97,5%, 95% e 90% para cada passo de tempo foram: a média local para uma e duas horas de passo de tempo e o modelo de regressão (AR) para três horas. Isso significa que os melhores modelos do processo de validação foram aqueles que obtiveram as funções densidade probabilidade mais acentuadas para o termo estocástico originado da distribuição dos erros na série de calibração (ver Tabela 1). Também, a mudança do melhor modelo de acordo com o aumento do passo de tempo da série temporal pode indicar que o comportamento do sistema mudou de um dinâmico contaminado por ruído para um processo randômico linear. Isso é esperado inclusive para sistemas dinâmicos teóricos que são livres de ruídos [ver e.g. Kantz e Schreiber (2004)].

Os melhores modelos para um intervalo de confiança de 95% apresentaram os seguintes resultados na validação:

- a) função de probabilidade da vazão prevista com intervalo de 1,20 m³/s e erros relativos (%) entre [-12; 30] (passo de tempo de uma hora);
- b) função de probabilidade da vazão prevista com intervalo de 1,45 m³/s e erros relativos (%) entre [-21; 20] (duas horas);
- c) função de probabilidade da vazão prevista com intervalo de 1,50 m³/s e erros relativos (%) entre [-32; 31] (três horas).

Um exemplo da previsão para um intervalo de confiança de 95% é apresentado na Fig. 3. Este evento foi o maior medido na série de vazões disponível da estação fluviométrica de Ammelsdorf. Note que há uma deterioração da previsão com o aumento do passo de tempo de uma hora para três horas.

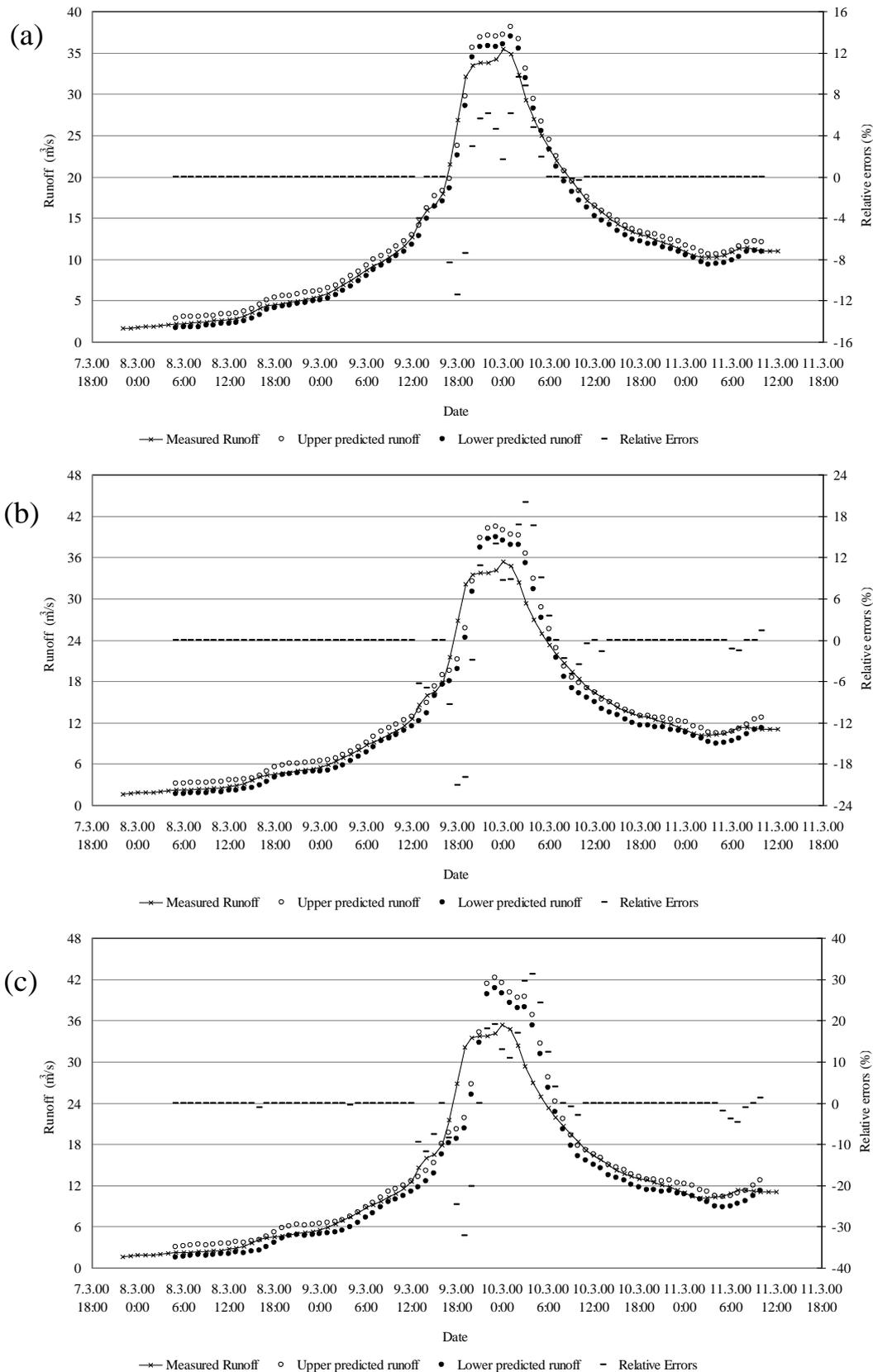
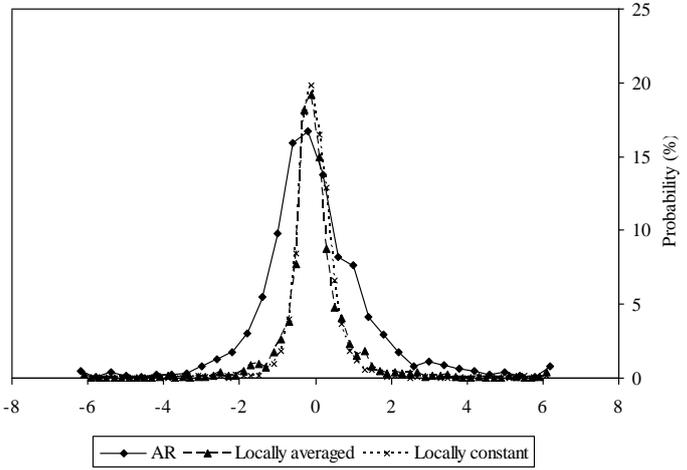
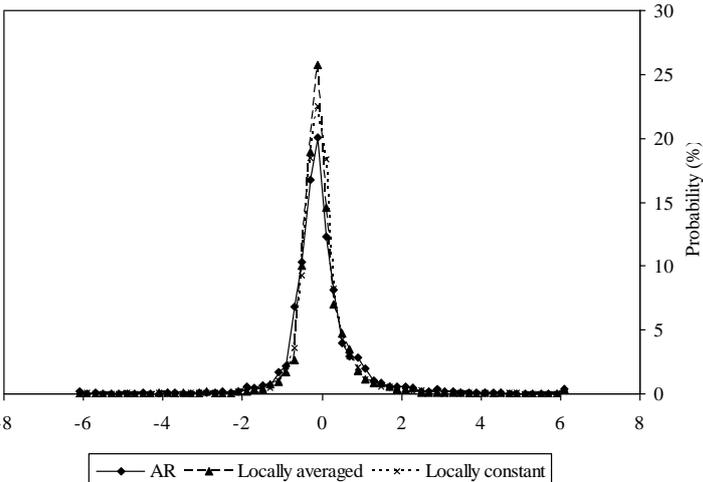
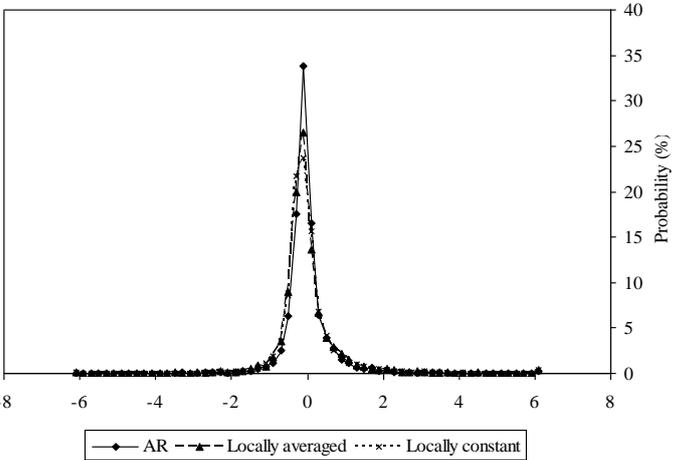


Figura 3 – Previsão probabilística com 95% de intervalo de confiança do maior evento medido na estação fluviométrica de Ammeldorf: (a) Passo de tempo igual a uma hora, (b) duas horas e (c) três horas [de Costa *et al.* (2012)].

Tabela 1 – Modelos não paramétricos calibrados e a distribuição de seus erros para parte da série destinada à calibração [adaptada de Costa *et al.* (2012)].

F	$\langle \xi \rangle$	Distribuição ($\xi - \langle \xi \rangle$)
1 hora		
AR(7)	0.17	
$\frac{\sum_{j=1}^7 x_{\eta-j}}{7}$	0.13	
$x_{\eta-1}$	0.40	
2 horas		
AR(3)	0.04	
$\frac{\sum_{j=1}^3 x_{\eta-j}}{3}$	0.04	
$x_{\eta-1}$	0.01	
3 horas		
AR(2)	0.04	
$\frac{\sum_{j=1}^2 x_{\eta-j}}{2}$	0.05	
$x_{\eta-1}$	0.04	

Comparação entre análise de série temporal e modelagem hidrológica distribuída

Os resultados dos termos dinâmicos dos melhores modelos não paramétricos foram comparados com aqueles da aplicação do modelo hidrológico distribuído LARSIM [Heistermann e Kneis (2011)]. Para aplicação do LARSIM na bacia de Weisseritz, um esquema de assimilação de dados de vazão foi considerado para o aperfeiçoamento da previsão da vazão realizada pelo LARSIM. Na média, a evolução determinística de ambos os tipos de modelo produziram resultados similares, mas os intervalos dos erros relativos foram maiores para os modelos não paramétricos. Uma razão principal para isso é provavelmente que os modelos não paramétricos adotados neste trabalho não consideraram nenhuma informação da série de precipitação ou sobre o derretimento da neve acumulada sobre a paisagem no começo da primavera.

Para maiores detalhes sobre o trabalho apresentado neste artigo e a lista completa de agradecimentos, por favor, consultar Costa *et al.* (2012).

AGRADECIMENTOS

O primeiro Autor agradece ao CNPq pela bolsa de doutorado integral no exterior.

REFERÊNCIAS

COSTA, A.C.; BRONSTERT, A.; KNEIS, D. (2012) Probabilistic flood forecasting for a mountainous headwater catchment using a nonparametric stochastic dynamic approach. *Hydrological Sciences Journal* 57(1), pp. 10-25.

CHEN, S.-T.; YU, P.-S. (2007) Real-time probabilistic forecasting of flood stages. *Journal of Hydrology* 340, pp. 63-77.

HEISTERMANN, M; KNEIS, D. (2011) Benchmarking quantitative precipitation estimation by conceptual rainfall-runoff modeling. *Water Resources Research* 47, doi: 10.1029/2010WR009153.

KANTZ, H.; SCHREIBER, T. (2004) *Nonlinear Time Series Analysis*. 2nd Ed., Cambridge University Press, Cambridge.

LUDWIG, K.; BREMICKER, M. (2006) *The water balance model LARSIM – Design, Content and Applications*. Freiburger Schriften zur Hydrologie, Freiburg.

LAIO, F.; PORPORATO, A.; REVELLI, R.; RIDOLFI, L. (2003) A comparison of nonlinear flood forecasting methods. *Water Resources Research* 39, doi: 10.1029/2002WR001551.

PORPORATO, A.; RIDOLFI, L. (2001) Multivariate nonlinear prediction of river flows. *Journal of Hydrology* 248, pp. 109–122.

TAMEA, S.; LAIO, F.; RIDOLFI, L. (2005) Probabilistic nonlinear prediction of river flows. *Water Resources Research* 41, doi: 10.1029/2005WR004136.

TODINI, E. (2004) Role and treatment of uncertainty in real-time flood forecasting. *Hydrological Processes* 18, pp. 2521-2746.