

ALERTA – UM SISTEMA PARA O AUXÍLIO À DEFESA CIVIL PARA MINIMIZAR OS DANOS DECORRENTES DE CHEIAS FLUVIAIS

Acioli Antonio de Olivo¹ & Armando Zeferino Milioni²

Resumo - São apresentados dois tipos de abordagens envolvendo modelos do tipo “caixa-preta” para a previsão de cheias fluviais, modelos baseados na metodologia de Box e Jenkins e redes neurais artificiais. Os modelos foram testados na bacia do rio Itajaí (SC) e os resultados encorajam o autor propor o sistema ALERTA, cuja finalidade é auxiliar a defesa civil de regiões que não possuam recursos humanos, computacionais e tecnológicos para fazer frente às enchentes periódicas que as assolam.

Abstract - This paper describes the results obtained by applying multiple regression techniques combined with Box and Jenkins models and artificial neural networks to the hydrologic problem of predicting flooding hazards in a location by predicting the level of the river, based on the information of an upstream location. The results showed the adequacy of the model for predicting the level of river.

Palavras-chave - Redes neurais artificiais; Modelos econométricos; Previsão de cheias fluviais.

INTRODUÇÃO

O controle de inundações em bacias urbanizadas envolve um elenco de alternativas estruturais (construção de diques, reservatórios, canais e outras ações físicas) paralelamente aplicadas às ações não estruturais, como a adoção de sistemas de alarme-resposta através de modelos matemáticos, o mapeamento de áreas inundadas utilizando Modelos de Elevação Digital (DEM), a educação e o próprio processo de aprendizado do convívio com o problema, e, em casos extremos, a realocação humana. Para tanto, torna-se fundamental ter o conhecimento das características urbanísticas,

¹ INPE Av. dos Astronautas, 1758, J. Granja, São José dos Campos, SP, Brasil (012)-3945-6549 acioli@lac.inpe.br

² CTA- ITA-IEMB CEP: 12228-900 – São José dos Campos, SP Fone/fax: (012)-3947-5912 milioni@mec.ita.cta.br

hidráulicas, hidrológicas e físicas da área em questão e tratar o problema com ferramentas matemáticas e computacionais.

Mas nem sempre as regiões afetadas por cheias periódicas têm acesso ao ferramental necessário para desenvolver estudos que gerem sistemas que venham a minimizar suas tribulações. Falta de conhecimento detalhado da bacia, ausência de séries confiáveis de precipitação e vazão, bem como de pessoal capacitado para equacionar modelos mais completos podem deixar populações à margem dos mais significativos avanços que poderiam sanar em grande parte suas adversidades. Está claro para o autor que os modelos aqui apresentados não substituem os modelos baseados na natureza física do processo hidrológico, mas servem apenas como alternativa quando não for possível, pelos mais diversos motivos, a construção de sistemas previsores mais eficientes.

Visando suprir estas deficiências, propõe-se aqui um conjunto de alternativas aos modelos hidrológicos, através de modelos tipo “caixa-preta”, que baseados somente na observação de níveis fluviométricos em postos de uma bacia, possam oferecer previsões com confiabilidade aceitável e suficiente para servirem ao poder público alertar a população em casos de cheias mais graves.

A abordagem aqui apresentada compreende modelos econométricos e de redes neurais artificiais, testados com registros dos níveis fluviométricos de mais de 30 anos na bacia do rio Itajaí em Santa Catarina.

REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Modelos econométricos

Modelos econométricos, como regressão múltipla e séries temporais, têm sido utilizados em Hidrologia desde o início da década de 60. Box e Jenkins (1976) e Kottegoda (1980) são as principais referências teóricas para estas abordagens, muito populares por se tratarem de modelos que prescindem de informações mais detalhadas do processo físico que conduz às cheias fluviais. Maiores detalhes teóricos dos modelos ARMA e ARIMA utilizados largamente nas referências do presente trabalho podem ser encontrados em Souza e Camargo (1996).

Um modelo linear auto-regressivo do tipo ARIMAX foi apresentado por Lanna e Valença (1985) para a previsão de níveis de cheias de rio Itajaí-Açu, na cidade de Blumenau, SC. Cordero e Lanna (1985) e Cordero e Tachini (1989) desenvolveram trabalhos importantes analisando modelos para a previsão de cheias em tempo real aplicados às bacias brasileiras. Neste último foi utilizado um modelo ARMAX para prever o nível do rio Itajaí-Açu na cidade de Gaspar, SC. Os parâmetros do modelo foram ajustados pelo método dos mínimos quadrados. Os resultados apresentados pelos autores indicam que o modelo escolhido pode ser usado com sucesso para a previsão de cheias do rio citado.

A conjugação de modelos empíricos lineares com modelos conceituais pode ser observada em Cruz et al. (1987), onde o modelo IPH-II teve seus erros de previsão ajustados por um modelo ARIMAX. Vale lembrar que o modelo IPH-II, descrito em Tucci e Clarke (1980) e Tucci (1998), é da classe transformação chuva-vazão, bastante empregado em trabalhos para a previsão de cheias fluviais. A introdução de uma variável exógena no modelo ARMA (o X representa a variável exógena vazão em uma seção a montante) permitiu que se corrigisse com eficiência o erro da previsão realizado pelo modelo hidrológico IPH-II. Lanna e Valença (1985) usaram idéia semelhante em um modelo de previsão para o rio Itajaí-Açu. Cordero (1991) aplicou um modelo do tipo ARMAX para a previsão de vazão em tempo real do rio Itajaí em Blumenau, SC, em função do nível do rio em dois pontos de controle a montante da cidade.

Olivo e Milioni (2002) e Olivo (2003) combinaram modelos de regressão múltipla com um modelo auto-regressivo dos resíduos para fazer a previsão do crescimento do nível de um rio. O estudo de caso realizado na bacia do rio Itajaí (SC) apresentou bons resultados para previsão do nível na seção de controle em Blumenau, com antecedência de até 8 horas. Estes trabalhos formam a base do que aqui será apresentado.

Redes Neurais Artificiais

Uma tendência atual na modelagem matemática para prever cheias fluviais é a adoção de modernas técnicas de inteligência artificial para auxiliar no aprendizado do fenômeno hidrológico, como também facilitar a construção de algoritmos mais eficientes para a solução destes modelos. Galvão e Valença (1999) coordenaram a edição de um livro da Associação Brasileira de Recursos Hídricos (ABRH) em que vários autores descrevem estas técnicas denominadas de Sistemas Inteligentes, destacando as técnicas de inteligência artificial, redes neurais artificiais e algoritmos genéticos, que segundo os autores, parecem ter qualidades e potencial suficientes para em breve se tornarem ferramentas das mais valiosas na área de Recursos Hídricos.

Considerando a necessidade deste conhecimento empírico para a aplicação de Redes Neurais, a previsão de vazões se mostra um campo promissor, dada a disponibilidade de séries pluviométricas e fluviométricas que podem ser usadas para treinar um sistema até que ele aprenda como a chuva é transformada em vazão. Este enfoque é claramente do tipo “caixa-preta”, mas os defensores da sua utilização têm obtido resultados bastante satisfatórios em seus modelos. Estes resultados encorajam muitos pesquisadores a adotarem estas técnicas, ao menos como linha auxiliar na construção de sistemas previsores.

Valença (1997) analisou a aplicação de rede neural artificial *perceptron* de múltiplas camadas na área de recursos hídricos e, em especial, na previsão de vazões médias mensais. Os resultados do modelo desenvolvido pelo autor foram comparados com os resultados gerados por modelos hidrológicos como o MOTHSAR (Modelo Hidrológico para o Trópico Semi-Árido) e com aqueles encontrados com a utilização de técnicas de regressão múltipla e metodologia Box e Jenkins. Foram realizados testes em quatro pequenas bacias, as bacias do Sumé e Mumbaba (PB), a bacia do Juatama (CE) e a bacia do Guarapiranga (SP). Os resultados encontrados, segundo o autor, foram de ótima qualidade.

Sajikumar e Thandaveswara (1999) publicaram extenso trabalho relatando as suas experiências com um modelo de rede neural artificial conhecido como *temporal backpropagation* do tipo chuva-vazão para explicar a vazão mensal de duas pequenas bacias, uma da Índia, o rio Thuthapuzha, e outra na Inglaterra, o rio Lee. Dados de chuva nas regiões de 1984 a 1992 foram utilizados como entradas do modelo e os critérios de eficiência para avaliar o desempenho do modelo foram o erro médio quadrático e o coeficiente de correlação. Os autores concluem que o modelo apresentado teve um bom desempenho e sugerem que modelos semelhantes podem ser usados sempre que houver insuficiência de dados para ajustar modelos hidrológicos.

Sperb et al. (1999) desenvolveram o PREVENT, um modelo baseado em rede neural artificial, usando a analogia com um modelo de transformação chuva-vazão, cujo treinamento da rede foi realizado no rio Itajaí-Açu na cidade de Blumenau, SC. Usando dados fluviométricos e pluviométricos de 57 anos colhidos em 20 estações ao longo do rio, os autores construíram duas redes neurais artificiais, com 15 a 20 neurônios por camada, utilizaram o algoritmo de Levenberg-Marquardt para minimizar o erro e relataram resultados excelentes, com 93% de acerto nas previsões diárias de vazão, concluindo que esta é uma boa alternativa comparada aos modelos estatísticos e numéricos.

A comparação do desempenho entre rede neural artificial e modelos Box e Jenkins utilizados para a previsão de vazões mensais nos reservatórios de Sobradinho (CE), Itumbiara (GO) e Furnas (MG) foi objeto de estudo de Kadowaki et al. (2000). Os dados utilizados no trabalho consistem em séries históricas mensais de vazões que abrangem o período de 1931 a 1990 obtidas do banco de dados da Eletrobrás. A metodologia proposta pelos autores foi uma arquitetura de rede *backpropagation* com as seguintes entradas: uma entrada, a vazão do mês $t-1$; duas entradas, as vazões dos meses $t-1$ e $t-2$; doze entradas, com as vazões dos meses $t-1, \dots, t-12$. Nas camadas escondidas foram usadas arquiteturas com 10 e 20 neurônios em uma ou duas camadas. Este modelo foi comparado com o modelo tradicional operado pela Eletrobrás, baseado em Box e Jenkins, e mostrou que os erros de previsão através de redes neurais artificiais são bem menores que os fornecidos pelos modelos Box e Jenkins nos três postos de observação. Os autores ainda

concluem que os ganhos de desempenho obtidos com redes neurais artificiais, se aplicados num estudo de planejamento da operação, podem significar a diferença entre a necessidade de realizar um racionamento ou até de corte de carga durante períodos críticos.

Olivo et al. (2002) desenvolveram uma arquitetura de redes neurais artificiais *perceptron* de Múltiplas Camadas com aprendizagem por retropropagação do erro para efetuar previsão de nível do rio Itajaí (SC), cujos resultados serão mostrados na próxima seção.

PREVISÃO DE CHEIAS FLUVIAIS POR MÍNIMOS QUADRADOS E CORREÇÃO DA PREVISÃO ATRAVÉS DA ANÁLISE DOS RESÍDUOS

A construção de um modelo para a previsão de cheias fluviais poderá ser realizada pela observação e monitoramento de uma variada gama de fenômenos hidro-meteorológicos, tais como: a precipitação ocorrida na bacia, a velocidade de deslocamento da onda de cheia, o nível do rio nas diversas estações de coleta de dados fluviométricos situados a montante da seção de controle, bem como diversos fatores que influenciam no processo de transformação de chuva em vazão, como o tipo, declividade, porosidade e uso do solo na bacia, o tipo de vegetação predominante, a área de drenagem da bacia e o comprimento e profundidade do leito.

Uma alternativa é o emprego de modelos do tipo “caixa-preta”, dentro dos quais situamos a análise de regressão múltipla, que procura usar de parcimônia na escolha do elenco de variáveis independentes. Neste contexto, se for construída uma relação que mapeie a transformação de vazão a montante em vazão a jusante e se tal relação tiver seus resíduos minimizados de maneira eficiente e criteriosa, então se acredita que grande parte da complexa dinâmica hidro-meteorológica possa ser capturada por um modelo de natureza econométrica.

Sintetizando, a metodologia empregada por Olivo e Milioni (2002) e Olivo (2003), pode ser resumida através dos seguintes passos:

1. Dado um conjunto de eventos de cheias através de registros de vazões ou de níveis medidos em diversos pontos da bacia hidrográfica, faz-se um ajuste polinomial da massa de dados, separando-se os registros em dois conjuntos, um para a calibração e o outro para a validação. O ajuste polinomial, através do método dos mínimos quadrados, buscará explicar a variação do nível do rio em uma seção de controle em função da observação do nível do mesmo rio em um posto fluviométrico a montante, observação esta defasada de um “*lag time*” correspondente ao alcance da previsão.
2. Obtenção da série de resíduos, sua análise e remoção dos “*outliers*”.
3. Testes para detecção da autocorrelação serial markoviana de 1ª ordem e subsequente remoção através do procedimento de Durbin.

4. Calibração de um modelo auto-regressivo linear para a série de resíduos através de uma equação que explique a variação dos resíduos em função dos resíduos encontrados e defasados de um “lag time”, caracterizando-se assim uma forma de prever os resíduos com os mesmos alcances utilizados na previsão original.
5. Correção das previsões originais através do agregamento das séries de resíduos.

Estudo de caso

No estudo de caso levado a efeito por Olivo e Milioni (2002) e Olivo (2003), na bacia do rio Itajaí, após sucessivas rodadas, foram calibrados quatro modelos para prever o nível do rio Itajaí em Blumenau com alcance de 4, 6, 8 e 10 horas, resultando nas seguintes equações:

$$NB(t+4) = 1,4391 + 1,2285*NA(t) + 0,1987*[NA(t)]^2 - 0,0198*[NA(t)]^3$$

$$NB(t+6) = 1,3193 + 1,7188*NA(t) + 0,0697[NA(t)]^2 - 0,0199*[NA(t)]^3$$

$$NB(t+8) = 1,3435 + 2,8167*NA(t) - 0,0521*[NA(t)]^2 + 0,0023*[NA(t)]^3$$

$$NB(t+10) = 1,2698 + 2,3897*NA(t) - 0,1078*[NA(t)]^2 + 0,0012*[NA(t)]^3$$

onde:

NB(t+h): nível do rio Itajaí no posto fluviométrico de Blumenau no instante t+h;

NA(t): nível do rio Itajaí no posto fluviométrico de Apiúna (situado a montante de Blumenau), no instante t.

Mesmo sendo os resultados razoáveis para previsões com 4, 6, 8 e 10 horas de alcance, com coeficientes R^2 aceitáveis, detectou-se na séries dos resíduos a forte presença de autocorrelação serial, evidenciada pela aplicação do teste de Durbin-Watson, cujas estatísticas foram conclusivas, conforme pode-se observar na Tabela 1.

Tabela 1: Estatísticas da calibração

	Alcance 4h	Alcance 6h	Alcance 8h	Alcance 10h
R ²	0,93	0,92	0,89	0,86
Erro Médio (m)	0,38	0,76	1,04	1,24
Coefficiente de Durbin-Watson	0,104	0,093	0,086	0,060
Correlação Serial	0,94	0,95	0,95	0,96

Autocorrelação serial

Quando os resíduos de um modelo de regressão são positivamente autocorrelacionados o uso de procedimentos baseados nos mínimos quadrados pode acarretar graves conseqüências, pois mesmo que os coeficientes estimados continuem não tendenciosos, eles deixam de ter variância mínima, podendo ocorrer sérios erros de subestimação e os parâmetros estimados se tornarem instáveis. Uma das técnicas mais empregadas, o procedimento de Durbin, é um processo iterativo que elimina a autocorrelação serial dos resíduos da regressão múltipla. O procedimento de Durbin, como descrito em Pindyck e Rubenfield (1999), pode ser sumarizado nos seguintes passos:

Correção de Durbin

1. Ajustar a massa de dados e obter os resíduos;
2. Calcular ρ , a correlação entre RSD, série dos resíduos e RSD+1, série dos resíduos defasada de um *lag time*;
3. Enquanto $|\rho(t) - \rho(t-1)| > \epsilon$, fazer:
 - a. $Y^* = Y(t) - \rho Y(t-1)$, $X^* = X(t) - \rho X(t-1)$, ...
 - b. Regredir o novo modelo
4. Obter as novas estimativas de β_1 , β_2 e β_3 ;

Após a aplicação do procedimento de Durbin β_0 deve ser novamente estimado de modo a minimizar o erro médio quadrático.

No caso da bacia do rio Itajaí em questão, após a remoção da autocorrelação serial pelo método de Durbin, modelou-se a série dos resíduos através de um ARMA (2,0,1) da forma:

$$R(t+H) = a_0 + a_1R(t+H-1 \text{ intervalo de tempo}) + a_2R(t+H-2 \text{ intervalos de tempo}) + \varepsilon(t+H-1 \text{ intervalo de tempo})$$

onde:

$R(t+H)$ é a previsão do resíduo com alcance H a partir do instante t;

$\varepsilon(t+H-1)$ é a componente das médias móveis no instante t+H-1.

Resultados

Obtida a expressão para a previsão dos resíduos partiu-se finalmente para a correção da previsão através da incorporação da série de resíduos. A tabela 2 mostra alguns resultados para previsões com alcance de 4, 6, 8 e 10 horas.

Tabela 2: Estatísticas da validação

	Alcance 4h	Alcance 6h	Alcance 8h	Alcance 10h
R^2	0,95	0,3	0,90	0,87
Erro Médio (m)	0,25	0,38	0,75	1,00

As figuras 1, 2 e 3 a seguir mostram os gráficos com a validação dos modelos econométricos para o evento de dezembro de 1978, com alcance de 4, 6 e 8 horas. Note-se que a qualidade da previsão começa a decair a partir de seis horas de alcance. Os resultados completos são relatados em Olivo (2003).

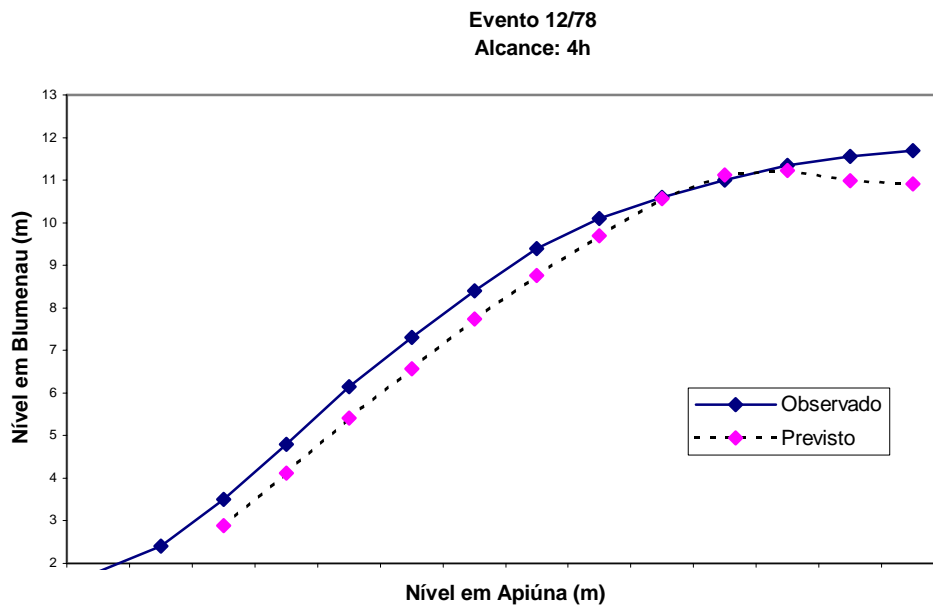


Figura 1: Previsão do evento 12/78 com alcance de 4 horas.

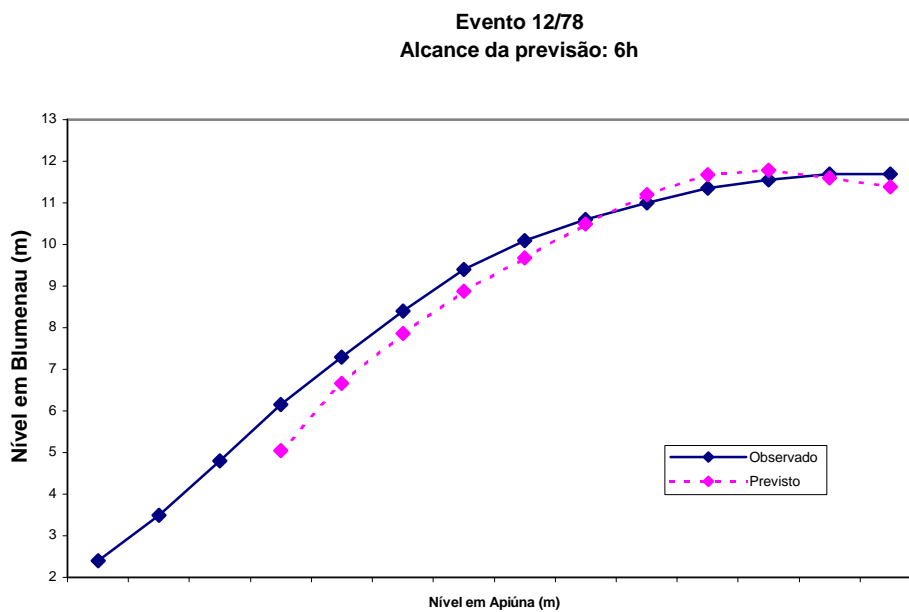


Figura 2: Previsão do evento 12/78 com alcance de 6 horas

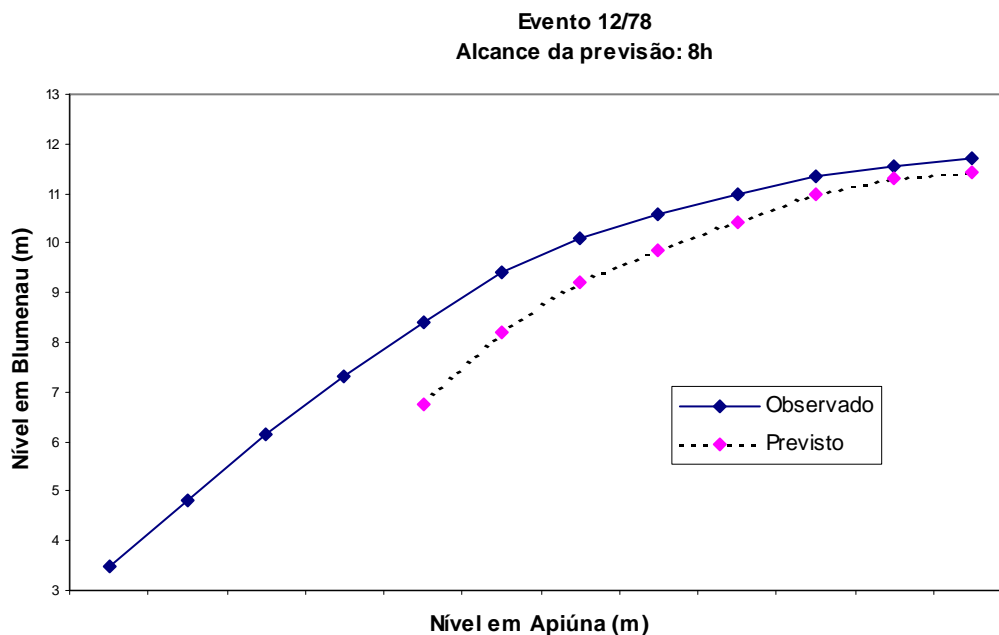


Figura 3: Previsão do evento 12/78 com alcance de 8 horas.

UMA PROPOSTA ALTERNATIVA: O USO DE REDES NEURAIS ARTIFICIAIS

Grosso modo uma rede neural artificial é um modelo matemático baseado na analogia do comportamento estímulo/resposta de uma rede neural biológica, e da sua habilidade de aprendizado através da alteração da energia de ativação nas sinapses existentes nos neurônios. Nesta analogia, os estímulos estão associados aos dados de entrada (no caso de modelos hidrológicos, por exemplo, a precipitação, ou o nível do rio medido a montante ou ainda o nível do rio medido em instantes anteriores ao considerado na seção de interesse), enquanto que as respostas correspondem às saídas (por exemplo, o volume de água escoado em uma seção de controle). Já para a energia de ativação, a analogia é feita através de ponderações nas conexões entre os neurônios, o que possibilita o aprendizado, no caso, o mapeamento da função transformação de chuva em vazão ou da transformação vazão-vazão.

Estudo de caso

No estudo de caso empreendido por Olivo et al. (2002) e Olivo (2003) foi estabelecida uma relação de causa e efeito com os níveis observados na cidade de Blumenau e os postos de observação a montante. Levando-se em conta os coeficientes obtidos na análise desta relação foram construídas diversas arquiteturas de redes neurais artificiais onde a entrada foi o nível registrado em um posto a montante e a saída o nível que se desejava explicar, ou seja, em Blumenau, com antecedência de 4, 6 e 8 horas.

A rede neural utilizada nos experimentos conduzidos foi o *perceptron* de Múltiplas Camadas com aprendizagem por retropropagação do erro, sendo também o modelo mais utilizado nas diversas áreas de aplicação. Os resultados detalhados são apresentados em Olivo (2003), salientando-se que o *perceptron* de Múltiplas Camadas utilizado possuía uma camada de entrada com uma unidade de entrada, uma camada de saída com um neurônio sigmoidal e uma camada escondida com 50 neurônios sigmoidal. O termo sigmoidal está relacionado com o tipo de função de ativação do neurônio mencionado.

O número de neurônios escondidos é um dos parâmetros mais difíceis de especificar em uma rede neural deste tipo, pois não existe uma forma genérica para se especificar. Assim, diferentes arquiteturas de redes foram testadas até se atingir uma que fosse satisfatória, no sentido de se atingir um menor erro quadrático médio e que fosse compatível com uma medida de erro estabelecido como objetivo. Este critério é utilizado como condição de parada do algoritmo de aprendizagem.

Resultados

A tabela 3 ilustra a dificuldade de se obter bons resultados na fase de generalização, mesmo quando o treinamento se revelou bastante adequado. Sobre este assunto Ramos e Galvão (2001) apontam um problema estrutural decorrente do uso de redes neurais artificiais em modelagem hidrometeorológica, a dificuldade de obter resultados satisfatórios na fase de validação, tão bons quanto os obtidos na fase de treinamento. Segundo os autores, tais incongruências devem-se ao fato de se ter na fase de treinamento um número excessivo de parâmetros ou dados mais consistentes, recomendando que se efetue um pré-processamento dos dados de entrada na rede neural antes de calibrá-los.

Tabela 3. Erro médio quadrático para a fase de generalização.

Evento	Generalização	Treinamento
07/1973	1,17	0,50
12/1978	0,62	0,23
07/1983	0,91	0,19

As figuras 3 e 4 a seguir mostram os resultados da generalização da rede para os eventos dezembro de 1978 e julho de 1983 com alcance de 4 horas.

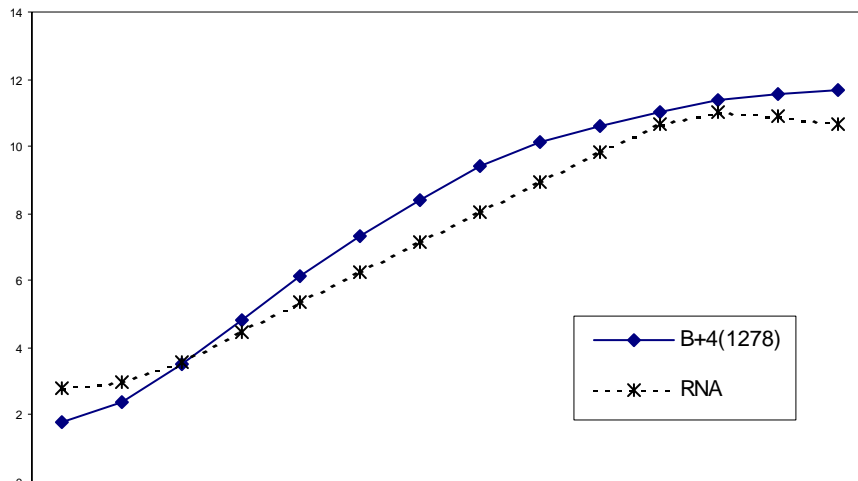


Figura 4: Previsão do evento 12/78 com alcance de 4 horas.

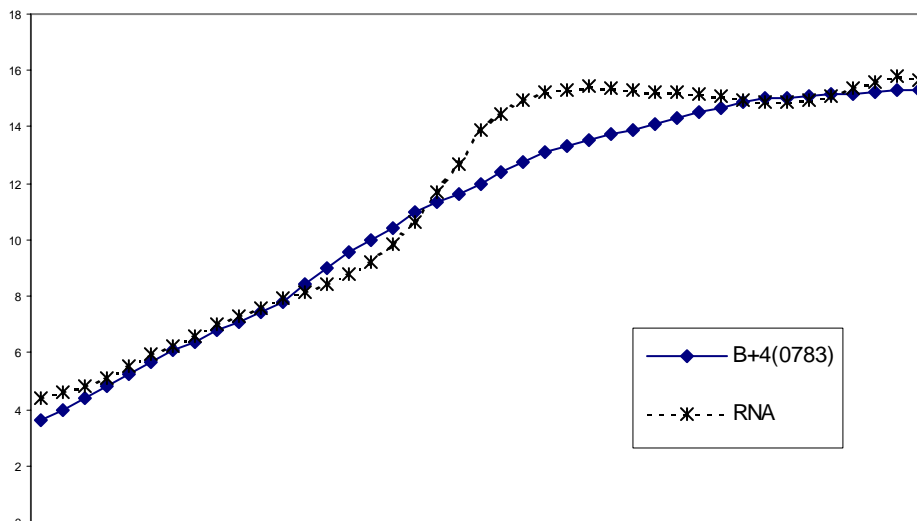


Figura 5: Previsão do evento 07/83 com alcance de 4 horas.

Os resultados relatados não foram superiores àqueles obtidos com o uso de modelos econométrico. Isto não significa que as técnicas de redes neurais artificiais seja menos eficiente que a de modelos econométricos, mas sim que as arquiteturas utilizadas não foram escolhidas da maneira mais eficiente. O mais importante, além dos resultados obtidos, foi mostrar que o emprego de redes neurais artificiais se configura como uma ferramenta de elevado potencial para a construção de sistemas previsores de cheias fluviais.

Diniz e Clarke (2001) usaram técnicas de redes neurais para calibrar um modelo chuva-vazão, o SMAP, na regionalização de 14 bacias hidrográficas localizadas na região Semi-Árida do Nordeste brasileiro. Os autores associaram um conjunto de parâmetros a uma rede neural artificial do tipo *perceptron* de múltiplas camadas, treinadas com algoritmo *backpropagation*. Em cada caso

estudado, uma bacia foi omitida na fase de calibração e a rede neural foi usada para estimar os parâmetros da bacia omitida. Para os casos em que as bacias omitidas possuíam diferenças hidrológicas significativas das demais os resultados não foram satisfatórios. Numa analogia com a bacia aqui estudada, parece ser o caso em que os eventos usados para a validação tinham características muito distintas daqueles eventos usados na fase de treinamento da rede. O autor continua pesquisando na direção de se tentar, através de redes neurais artificiais, obter classes distintas de eventos, de modo a permitir agrupar vários eventos semelhantes em um mesmo “*cluster*”.

CONCLUSÕES

A partir dos resultados obtidos com as metodologias apresentadas neste trabalho, está se propondo no âmbito do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE) um sistema para auxiliar a defesa civil de regiões afetadas por enchentes, que possa ser operado por pessoal não especializado e que prescindia de informações completas sobre a natureza morfológica e hidrológica da bacia hidrográfica. O sistema, provisoriamente chamado de **ALERTA**, pode ser enquadrado como um sistema chuva-vazão, mas com ênfase em uma metodologia tipo “caixa-preta”, que passa ao largo da natureza física do processo de formação da onda de cheia, pois só considera as entradas (chuvas ocorridas na bacia hidrográfica e níveis do rio observados a montante da seção de controle) e saídas (nível do rio na seção de controle, previsto com um certo tempo de antecedência).

O sistema **ALERTA** será composto por quatro módulos, a saber:

- Módulo Previsão de Chuvas;
- Módulo Identificador de Padrões de Cheias;
- Módulo Banco de Modelos Previsores;
- Módulo Mapa de Alagamento (SPRING).

O Módulo **Previsão de Chuvas** será implementado com os modelos meteorológicos desenvolvidos pelo Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos (CPTEC) a partir de dados disponibilizados pelo INPE e também por Plataformas de Coleta de Dados (PCD) instaladas na bacia hidrográfica.

O Módulo **Identificador de Padrões de Cheias** consistirá de um estudo baseado em Redes Neurais Artificiais (RNA), que procurará determinar para a bacia em estudo “*clusters*” de cheias que tenham padrões de similaridade. Ocorrendo o início de precipitações que excedam um nível crítico, poderão ser identificadas as características de uma futura enchente.

O Módulo **Banco de Modelos Previsores** consiste de vários modelos econométricos e de redes neurais artificiais aqui apresentados, calibrados sobre as séries históricas de vazões e precipitações ocorridas na bacia hidrográfica. Identificado o padrão da futura cheia usar-se-á o modelo mais adequado para prever o nível com um determinado tempo de antecedência.

O Módulo **Mapa de Alagamento** será realizado com o auxílio do SPRING, um Sistema Geográfico de Informações e baseado nas informações fornecidas pelo modelo predictor da cheia, que poderá fornecer com precisão e antecedência razoáveis, os sítios urbanos que serão inundados e qual a magnitude desta inundação.

A idéia deste sistema é gerar um produto que possa ser executado em uma plataforma computacional dotada de poucos recursos e que seja operada por técnicos treinados somente nas operações básicas do sistema.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] BOX, G.E.P., JENKINS, G.M. (1976). *Time Series Analysis, forecasting and Control*. Holden-Day, Inc., 2nd ed., San Francisco, USA.
- [2] CORDERO, A. (1991). Previsione di Piena in Tempo Reale con Modelli ARMAX. Milano, Italia, 1991. Tese (Curso Internazionale di Aggiornamento in Idrologia e Gestione delle Risorce Idriche) - Politecnico di Milano, DIIAR.
- [3] CORDERO, A. (1996). Previsione di Piena in Tempo Reale con un Modello Distribuito. Milano, Itália, 1996. Tese (doutorado em Engenharia Hidráulica) - Politecnico di Milano, DIIAR.
- [4] CORDERO, A., TACHINI, M. (1989). Modelo de previsão de cheias em tempo atual para a cidade de Gaspar, SC. In: Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, 8, 1989, Foz do Iguaçu, Brasil. **Anais...Foz do Iguaçu: - ABRH, 2**, 62-73.
- [5] CORDERO A., LANNA, A.E. (1989). Previsão de cheia em tempo atual com modelo recursivo baseado no hidrograma unitário. In: Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, 8, 1989, Foz do Iguaçu, Brasil. **Anais...Foz do Iguaçu: - ABRH, 2**, 1-12.
- [6] CORDERO A., LANNA, A. E. (1995). Simulação de Cheias com um Modelo Distribuído Baseado em um Sistema de Informações Geográficas. In: Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, 11, 1995, Foz do Iguaçu, Brasil. **Anais...Foz do Iguaçu: - ABRH, 1**, 1-6.
- [7] DINIZ, L. S.; CLARKE, R.T. (2001). Regionalização de parâmetros de modelo chuva-vazão usando redes neurais. In: Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, 14, 2001, Aracaju, Brasil. **Anais em CD-ROM...Aracaju: - ABRH**. pp:168
- [8] GALVÃO, C.O; VALENÇA, M.J.S. (1999). *Sistemas Inteligentes – Aplicações a Recursos Hídricos e Ciências Ambientais*. Editora da Universidade/UFRGS/ABRH, Porto Alegre, RS.

- [9] KADOWAKI, M.; ANDRADE, M.G.; SOARES, S. (2000). Previsão de vazões mensais utilizando redes neurais multicamadas com algoritmo *backpropagation*. In: “Site do IV SBRN2000” http://www.densis.fee.unicamp.br/~makoto/Artigos/IV_SBRN/Ivsbrn.html
- [10] KOTTEGODA, N. (1980). *Stochastic Water Resources Technology*. MacMilan, London.
- [11] LANNA, A.E., VALENÇA, M.J. (1985). Previsão em tempo atual de cheias com técnica recursiva dos mínimos quadrados aplicação à cidade de Blumenau, SC. In: Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, 6, 1985, São Paulo, Brasil. **Anais...**São Paulo: - ABRH, **3**, 328-344.
- [12] OLIVO, A. A. (2003). Estudos de modelos matemáticos e de redes neurais artificiais para a previsão de cheias fluviais. Tese de Doutorado, 2003. Instituto Tecnológico da Aeronáutica, São José dos Campos, SP.
- [13] OLIVO, A. A.; MILIONI, A. Z. (2002). Modelos matemáticos para a previsão de cheias fluviais: uma abordagem econométrica.. In: II Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos do Centro-Oeste, 2002, Campo Grande, MS. **Anais em CD-ROM...**Campo Grande: - ABRH. pp:1-18.
- [14] OLIVO, A A ; SILVA, J.D.S., VIJAYKUMAR, N.L. (2002). Previsão de cheias fluviais usando Redes Neurais Artificiais. In: IV Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos do Nordeste, 2002, Maceió, AL. Anais em CD-ROM...Maceió: - ABRH.
- [15] PINDYCK, R.S.; RUBINFELD, D.L. (1999). *Econometric Models and Economic Forecast*. McGraw-Hill Book Company, New York, USA.
- [16] SAJIKUMAR, N.; THANDAVESWARA, B.S. (1999). A non-linear rainfall-runoff model using artificial neural network. *Journal of Hydrology*, **216**, 32-55.
- [17] SOUZA, R.C., CAMARGO, (1996). M.E. Análise e Previsão de Séries Temporais: Os Modelos ARIMA, SEDIGRAF, Ijuí, RS.
- [18] SPERB, R.M.; MODRO, N.R.; MARCONDES, P.; FOES, P.A.; BRACIA, R.M.; PACHECO, R.C.S.; TAVARES, G. (1999). PREVENT: Protótipo de um sistema de previsão de enchentes baseado em redes neurais. **Anais** do XIII Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos. Belo Horizonte, MG, 28/11 a 02/12, 1-8.
- [19] TUCCI, C.E.M.; CLARKE, R.T. (1980). Adaptive forecasting with conceptual Rainfall Runoff model. *Hydrologic Forecasting Proc.*, **129**, 425-454.
- [20] TUCCI, C.E.M. (1998) *Modelos Hidrológicos*. Editora da Universidade/UFRGS/ABRH, Porto Alegre, Brasil.
- [21] VALENÇA, M.J.S. (1997). Aplicação de Redes Neurais na Área de Recursos Hídricos. **Anais** do XII Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos. Vitória, Es, 16-20 de novembro, 597-603.