

## Previsão Hidroclimática de Vazão de Curto Prazo na Bacia do Rio São Francisco

Benedito Cláudio da Silva, Walter Collischonn, Carlos Eduardo Morelli Tucci  
Robin Thomas Clarke, Martín Delgado Corbo

Instituto de Pesquisas Hidráulicas IPH – UFRGS

silvabenedito@gmail.com, collischonn@uol.com.br, tucci@iph.ufrgs.br, clarke@iph.ufrgs.br, aravena10@hotmail.com

Recebido: 25/05/06 revisado: 22/08/06 aceito: 20/03/07

---

### RESUMO

A previsão da vazão com grande antecedência depende da estimativa da previsão da precipitação. O aprimoramento dos modelos atmosféricos e hidrológicos permitiu aumentar a antecedência da previsão pela integração destes modelos (previsão hidroclimática). Neste artigo é apresentado o resultado da integração do modelo regional de tempo ETA e do modelo precipitação-vazão distribuído MGB-IPH, para a previsão de vazões de curto prazo. Adicionalmente, empregou-se um modelo estocástico para correção da vazão prevista através da previsão dos resíduos do modelo hidroclimático.

O modelo hidrológico distribuído MGB-IPH foi ajustado à bacia do rio São Francisco (cerca de 639.000 km<sup>2</sup>). As previsões de precipitação do modelo ETA, operado pelo Centro de Previsão do Tempo e Estudos Climáticos - CPTEC, foram utilizadas como entrada no modelo hidrológico. Foram feitas previsões de vazão para toda bacia do rio São Francisco, mas os resultados foram analisados com enfoque nas usinas de Três Marias e Sobradinho. Foram usadas previsões de precipitação do modelo ETA com alcance de 10 dias e produziram-se previsões de vazão média semanal para até duas semanas em Três Marias e quatro semanas em Sobradinho, sendo que após o décimo dia considerou-se chuva igual a zero. Os resultados mostram que as previsões obtidas nas duas usinas apresentam melhora com relação aos métodos tradicionalmente empregados.

**Palavras-chave:** Previsão de vazão, previsão de precipitação, rio São Francisco

---

### INTRODUÇÃO

As metodologias normalmente utilizadas para a previsão de vazão podem ser diferenciadas de acordo com as variáveis empregadas para realizar a previsão e de acordo com as metodologias de cálculo. Com relação às metodologias de cálculo usadas, os modelos podem ser classificados em empíricos, conceituais ou combinados. Dentre os principais técnicas atualmente utilizadas pode-se citar: modelos físicos; modelos estocásticos; modelos estatísticos e modelos baseados em técnicas de inteligência artificial.

Os modelos empíricos não utilizam conceitos físicos dos processos hidrológicos. A vantagem dos modelos empíricos é a rapidez na elaboração e a facilidade na atualização dos parâmetros em tempo real, enquanto que os modelos conceituais têm maior capacidade de extrapolação e tratamento das variantes hidrológicas.

Os modelos empíricos do tipo estocásticos tem sido utilizados na prática em vários setores. No Brasil estes modelos são usados principalmente pelo setor elétrico, que possui uma cadeia de modelos,

com diferentes antecedências, para previsão de vazões afluentes aos reservatórios do Sistema Interligado Nacional – SIN (ONS, 2001). Entretanto, eventos recentes, como o período de estiagem anterior à crise de energia em 2001, mostraram a necessidade de se buscar novas metodologia de previsão, tendo como requisito principal a capacidade de incorporar crescente variabilidade climática do globo.

Neste sentido, destaca-se o aprimoramento da integração entre os modelos atmosféricos e hidrológicos determinísticos, como destacado por trabalhos como de Anderson *et al.* (2002) na bacia do rio Calavera (Califórnia, EUA), Koussis *et al.* (2003) para a bacia do rio Kifissos (2190 km<sup>2</sup>) em Atenas e de Collischonn *et al.* (2005) para o rio Uruguai (32.000 km<sup>2</sup>). Todos estes trabalhos apresentam resultados que podem ser considerados bastante promissores.

Dentre as principais limitações destacadas nestes trabalhos está a estrutura de atualização dos modelos conceituais distribuídos. De maneira geral, os modelos de previsão de vazões pode ser operado com atualização de variáveis e/ou parâmetros du-

rante o processo de previsão (Toth *et al.*, 1999; Madsen e Skotner, 2005; Moore *et al.*, 2005).

A atualização é um processo recursivo de determinação de variáveis de estado e parâmetros, baseados nos dados observados de variáveis como a precipitação, temperatura, vazão, volume armazenado e umidade do solo (Hsu *et al.*, 2003). Um novo ajuste dos parâmetros pode ser feito após cada previsão, mas isto normalmente é aplicado quando a estrutura do modelo é bastante simples (Moore *et al.*, 2005), devido ao elevado custo computacional requerido.

Nos modelos hidrológicos distribuídos existe grande quantidade de parâmetros e variáveis de estado. A análise dos erros, ou resíduos, da previsão é uma alternativa para correção das previsões e atualizações. Consiste em corrigir somente a variável de saída do modelo (vazão prevista), ou seja, a correção é feita externamente ao modelo e simplifica consideravelmente o processo de atualização.

A persistência nos erros pode ser usada para desenvolver um procedimento de previsão (Lettenmaier e Wood, 1993). Uma estrutura simples para um modelo de erros pode ser obtida com o uso de um modelo estocástico auto-regressivo AR, mas modelos de erros com maior complexidade podem ser testados, como ARMA ou ARIMA (Toth *et al.*, 1999), ou ainda modelos estocásticos função de transferência, que permitem introduzir outras variáveis como a chuva e variáveis de estado do modelo hidrológico (Makridaris *et al.*, 1998).

Conforme descrito nos itens a seguir, neste artigo buscou-se aprimorar a previsão de vazão de curto prazo, através do uso integrado de um modelo atmosférico e um modelo precipitação-vazão determinístico, também denominada por previsão hidroclimática (Silva, 2006). Este modelo foi complementado por um modelo estocástico para prever o resíduo resultante da previsão. A metodologia e os resultados obtidos são apresentados ao longo do texto que segue.

## METODOLOGIA

O modelo utilizado tem os seguintes componentes: (a) previsão de precipitação: modelos de previsão de tempo CPTEC e ETA; (b) previsão de vazão: modelo hidrológico de grandes bacias MGB-IPH; (c) modelo de estimativa dos resíduos.

O modelo *ETA* (Mesinger, 1988; Black, 1994); foi utilizado para gerar previsões de chuva, utilizando as condições de contorno do modelo global desde dezembro de 1996, na resolução de 40 km sobre toda América do Sul. O modelo possui 38

camadas na vertical, sendo que a primeira camada do modelo *ETA* possui apenas 20 m. As condições de contorno laterais são provenientes do modelo AGCM do CPTEC. Estas condições são atualizadas a cada 6 horas, sendo que as tendências nos contornos laterais são interpoladas linearmente neste intervalo.

A previsão da vazão é estimada pelo modelo MGB-IPH (Collischonn, 2001; Collischonn e Tucci, 2001) tendo como entrada as precipitações observadas até o tempo  $t$  e as precipitações previstas para o futuro. O Modelo de Grandes Bacias (MGB-IPH) foi desenvolvido por Collischonn (2001), com base na estrutura do modelo LARSIM (Bremicker, 1998) e com algumas adaptações do modelo VIC-2L (Liang *et al.*, 1994). Uma descrição das aplicações do modelo em bacias da América do Sul é apresentada em Allasia *et al.* (2006). O modelo é ajustado à bacia com base nos dados observados de vazão e precipitação observados no passado.

A previsão de curto prazo é realizada com periodicidade semanal e, no início de cada previsão, são atualizadas as variáveis de estado do modelo hidrológico com base nas vazões observadas até a data atual. Os resultados são analisados em termos de vazões médias semanais.

O modelo estocástico dos resíduos, ou erros, está baseado nos modelos “função de transferência” (Makridakis *et al.*, 1998), que relacionam um conjunto de variáveis de entrada (umidade nas camadas do solo, previsões da precipitação, ...) a uma variável de saída (vazão semanal natural), além dos resíduos das previsões anteriores.

Os resíduos são definidos por:

$$E(t) = Q_{obs}(t) - Q_{prev}(t) \quad (1)$$

onde:  $t$  é o intervalo de tempo (semanal),  $E(t)$  é o resíduo;  $Q_{obs}(t)$  é a vazão observada e  $Q_{prev}(t)$  é a vazão prevista pelo modelo hidroclimático.

Os modelos “função de transferência” testados possuem a seguinte forma:

$$E(t) = a_1.E(t-1) + a_2.E(t-2) + \dots + b_1.P_{ETA}(t) + b_2.WCI(t-1) + \xi(t) \quad (2)$$

onde:  $P_{ETA}(t)$  é a precipitação prevista pelo modelo *ETA* para a semana  $t$ ;  $WCI(t-1)$  é a umidade do solo no modelo hidrológico antes do início da previsão, semana  $t-1$ ;  $a_1, a_2, \dots, b_1, b_2, \dots$  são parâmetros do modelo; e  $\xi(t)$  é um termo completamente aleatório.

Dessa forma, a vazão prevista pelo modelo MGB, com chuva prevista pelo *ETA*, é corrigida por:

$$Q_{corr}(t) = Q_{prev}(t) + E(t) \quad (3)$$

onde:  $Q_{corr}(t)$  é a vazão prevista corrigida;  $Q_{prev}(t)$  é a vazão prevista pelos modelos ETA/MGB;  $E(t)$  é o resíduo previsto.

O modelo hidrológico foi calibrado para toda a bacia do rio São Francisco, utilizando-se os dados observados do período 1977 a 1986, sendo que o período de 1986 a 1996 foi utilizado na sua verificação. Para avaliação da qualidade das previsões são usados os erros médios relativos – EMR (Equação 4).

$$EMR = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{|QP_i - QO_i|}{QO_i} \quad (4)$$

onde,  $i$  é a semana,  $n$  é o número total de semanas;  $QO$  a vazão observada;  $QP$  é a vazão prevista pelo modelo hidroclimático.

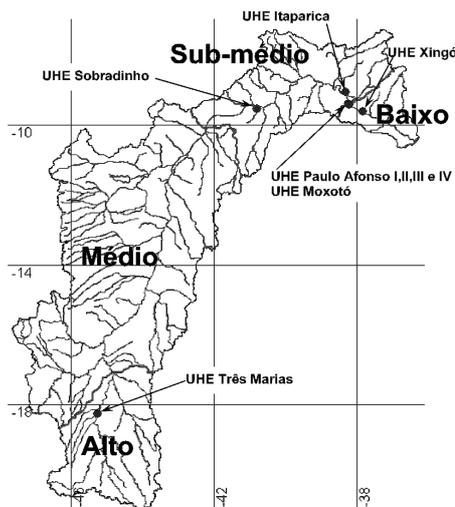


Figura 1 - Regiões fisiográficas da bacia do rio São Francisco e localização dos principais aproveitamentos hidrelétricos.

## BACIA DO RIO SÃO FRANCISCO

A bacia do São Francisco possui uma área de 639.000 km<sup>2</sup> e seu curso principal tem extensão de 2.700 km. A área da bacia corresponde a aproximadamente 8% do território nacional e abrange parte de seis estados e do distrito federal. O clima

regional apresenta uma variabilidade associada à transição do úmido para o árido, com temperatura média anual variando de 18o a 27oC e, ainda, um baixo índice de nebulosidade e grande incidência de radiação solar. As maiores declividades no curso principal do São Francisco são encontradas nas cabeceiras e nas proximidades da foz, e são nesses trechos que estão localizados os principais aproveitamentos hidrelétricos, apontados na Figura 1.

## AJUSTE DO MODELO HIDROLÓGICO

Devido a deficiências nos dados meteorológicos e hidrológicos disponíveis para a região semi-árida do médio e sub-médio São Francisco, a bacia foi separada em duas regiões com diferentes resoluções, ou seja: das nascentes do rio São Francisco até a foz do rio Urucuia (inclusive) são utilizadas células de 0,1 grau (aproximadamente 10x10 km) e para o restante da bacia são usadas células de 0,2 grau (aproximadamente 20x20 km).

Os resultados dos períodos de calibração e verificação mostraram que o modelo apresenta bom desempenho para representar tanto as vazões observadas nos postos fluviométricos, quanto às vazões naturais dos aproveitamentos hidrelétricos. Detalhes sobre o ajuste do modelo MGB-IPH na bacia do rio São Francisco são apresentados em Silva (2005).

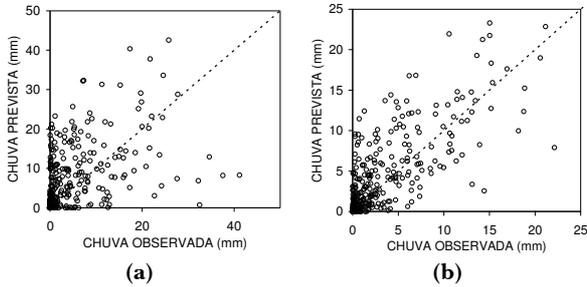
## PREVISÕES DE PRECIPITAÇÃO

Foram disponibilizados arquivos de dados de previsão de precipitação do modelo ETA, gerados pelo CPTEC, para o período de janeiro de 1996 a dezembro de 2003. Estes arquivos foram cedidos pelo ONS e correspondem às previsões de periodicidade semanal, que iniciam sempre às quartas-feiras. O horizonte de previsão é de 10 dias, iniciando sempre na quarta-feira de uma semana (inclusive) e terminando na sexta-feira da semana seguinte (inclusive). Os dados referem-se às chuvas acumuladas em períodos de 24 horas.

Para análise e comparação das previsões de chuva com os valores observados, ambos os dados foram interpolados para os pontos de grade do modelo hidrológico e, posteriormente, foram determinadas precipitações médias (previstas e observadas) sobre as áreas das seguintes sub-bacias (Figura 1): a) rio São Francisco até Três Marias; b) rio São Francisco até Sobradinho (essa bacia contém a primeira).

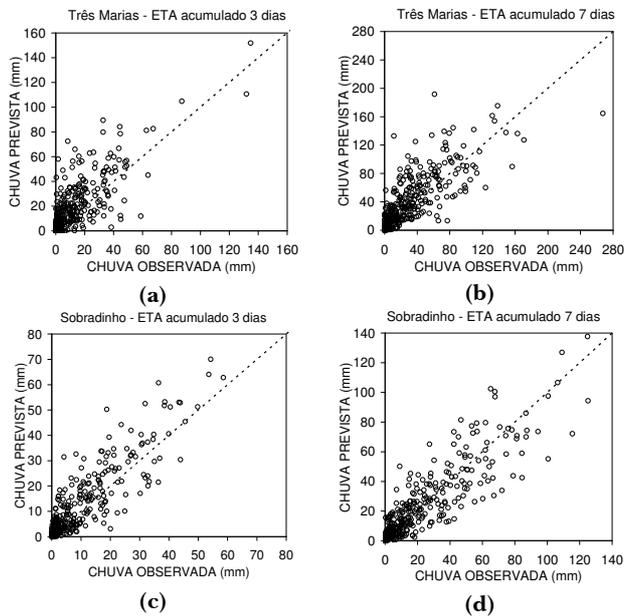
A Figura 2a apresenta a comparação entre os valores de chuva observada e prevista para 1 dia

de antecedência, na bacia até Três Marias. Observam-se freqüentes super-estimativas da chuva (pontos acima da linha tracejada) e, também, vários dias de elevada chuva observada com pouca chuva prevista (sub-estimativas).



**Figura 2 - Correlação entre chuvas observadas e previstas pelo modelo ETA na bacia do rio São Francisco (a) até Três Marias e (b) até Sobradinho, com 1 dia de antecedência.**

A Figura 2b apresenta resultados semelhantes para a bacia do rio São Francisco até Sobradinho, onde se observa que a previsão de chuva média tem erros inferiores à bacia de Três Marias, devido à área maior da bacia. Nestas análises se observou que o horizonte que apresenta a melhor correlação é, normalmente, o terceiro dia. Ou seja, o desempenho das previsões cresce até o terceiro dias e só passa a reduzir.



**Figura 3 - Correlações entre chuvas acumuladas observadas e previstas para horizontes de 3 e 7 dias nas bacias de Três Marias e Sobradinho.**

As mesmas análises de correlação entre chuvas observadas e previstas foram realizadas considerando os valores totais acumulados em intervalos de 1 a 10 dias. A Figura 3 apresenta os gráficos de correlação entre chuvas acumuladas observadas e previstas para os horizontes de 3 e 7 dias. O modelo ETA apresenta uma tendência de superestimativa da precipitação acumulada para o horizonte de 3 dias, em ambas as sub-bacias, mas com maior evidência em Sobradinho. Entretanto, de maneira geral, os gráficos mostram que os valores acumulados reduzem a dispersão em relação à Figura 2.

### PREVISÕES DE VAZÃO

Os dados observados de chuva nos postos pluviométricos foram utilizados como dados de entrada para o modelo hidrológico até o dia anterior ao início da previsão. A partir do primeiro dia da previsão foram utilizados os dados de previsão de chuva do modelo ETA, até o décimo dia de previsão. A partir do décimo primeiro dia de previsão considerou-se que a chuva é nula. Dados de vazão observada em diferentes postos fluviométricos também foram utilizados para o procedimento de atualização do modelo hidrológico.

As previsões foram iniciadas sempre as quartas feiras, estendendo-se por duas semanas para Três Marias e por quatro semanas para Sobradinho. Para comparação, também é calculada a previsão de vazão baseada na chuva observada que, embora não seja possível de ser obtida operacionalmente, é importante de ser calculada para efeitos de comparação, pois pode ser considerada como a “previsão perfeita” de chuva.

### Resultados em Três Marias

Para que futuramente se possa realizar uma avaliação comparativa do desempenho do modelo ETA/MGB, com os resultados obtidos com os modelo do ONS, as previsões diárias foram transformadas em vazões médias semanais, seguindo os formatos adotados pelo ONS.

Na Figura 4 são apresentados os resultados de alguns anos do período estudado. Para previsões com base na chuva prevista pelo modelo ETA, o desempenho geral é muito bom com uma semana de antecedência (Figura 4). Nota-se que essas previsões acompanham de forma muito próxima à previsão com chuva observada, indicando que a chuva prevista pelo modelo ETA é muito boa sobre a bacia contribuinte a Três Marias para uma semana de antecedência. Os maiores picos são bem represen-

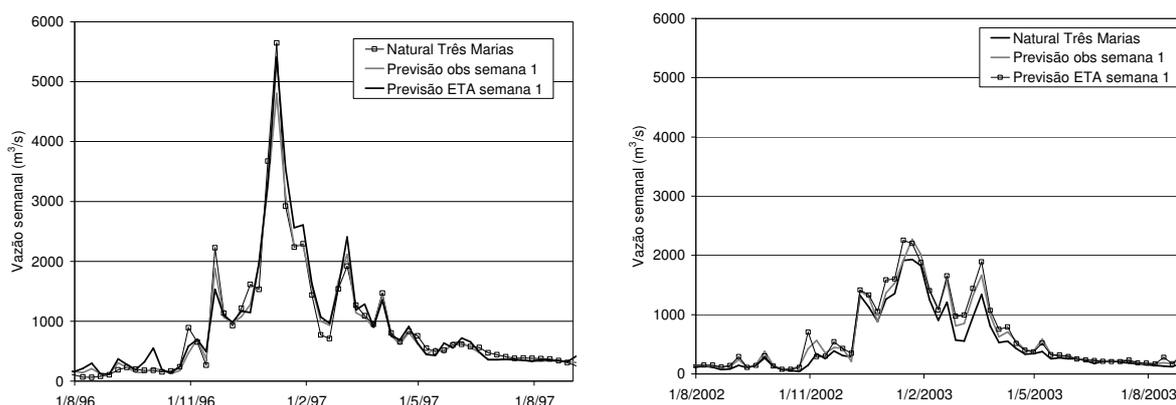


Figura 4 - Previsões de vazão semanal com uma semana de antecedência para a usina hidrelétrica de Três Marias.

tados, sendo o verão de 2000/2001 o período que apresenta as maiores discrepâncias com a vazão natural.

Os erros médios das previsões de vazão para as antecedências de uma a quatro semanas em Três Marias são apresentados na Figura 5.

Nota-se que, na previsão com chuva observada os valores são de aproximadamente 20% para todas antecedências. Valores considerados elevados para as duas primeiras semanas de antecedência.

Os valores relativamente elevados de *EMR* para a previsão com chuva observada, na primeira e segunda semana, se devem a erros de ajuste do modelo MGB nas vazões de estiagem, ou a inconsistências nas vazões naturais. O modelo ETA em algumas ocasiões gerou eventos de chuva durante as estiagens que não ocorreram. Estes eventos, embora de pequena magnitude, são percentualmente grandes, elevando os valores de *EMR*. Para as antecedências de três e quatro semanas, a chuva prevista pelo ETA perde a influência sobre as vazões, reduzindo os erros na estiagem devidos a falsos eventos e, com isso, reduzindo os valores de *EMR*.

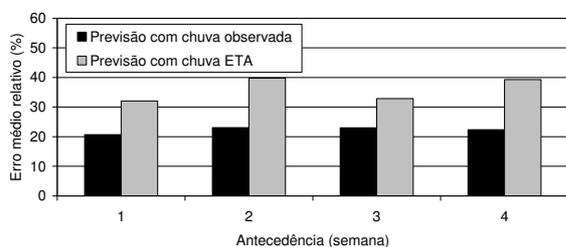


Figura 5 - Médias dos erros das previsões de vazão semanal em Três Marias.

### Resultados em Sobradinho

A Figura 6 apresenta as vazões previstas pelos modelos com uma semana de antecedência para anos entre 1996 e 2003. Observa-se que não foi inserida a previsão baseada na chuva observada, uma vez que praticamente não existe diferença entre esta e a vazão natural. Pois, no horizonte de uma semana a vazão afluente a Sobradinho depende, basicamente, do volume de água que já se encontra na calha do rio principal. As previsões de chuva do ETA têm muito pouca influência para a antecedência de uma semana em Sobradinho.

Nas vazões máximas, nota-se que os picos dos últimos três períodos úmidos (2000/2001 a 2002/2003) são bem previstos. Entretanto, nos verões de 1996/1997 a 1999/2000 os principais picos de vazão são subestimados. Em relação aos períodos de estiagem, o modelo hidroclimático apresenta tendência de superestimativa até outubro de 2000.

No ano de 2001 as vazões de estiagem são bem representadas, em 2002 existem semanas de sub e superestimativa, e em 2003 o modelo subestima todo o período seco. A explicação para estas diferenças se deve provavelmente aos problemas de balanço no reservatório de Sobradinho, descritos em ONS (2003a), que interferem diretamente no cálculo das vazões naturais de Sobradinho e, conseqüentemente nas previsões.

Os erros das previsões de vazão para as antecedências de uma a quatro semanas em Sobradinho são apresentados na Figura 7. Observa-se que as previsões com chuva prevista pelo modelo ETA apresentam valores praticamente idênticos à previsão com chuva observada, nas antecedências de uma e duas semanas. Isto se deve à longa memória da bacia

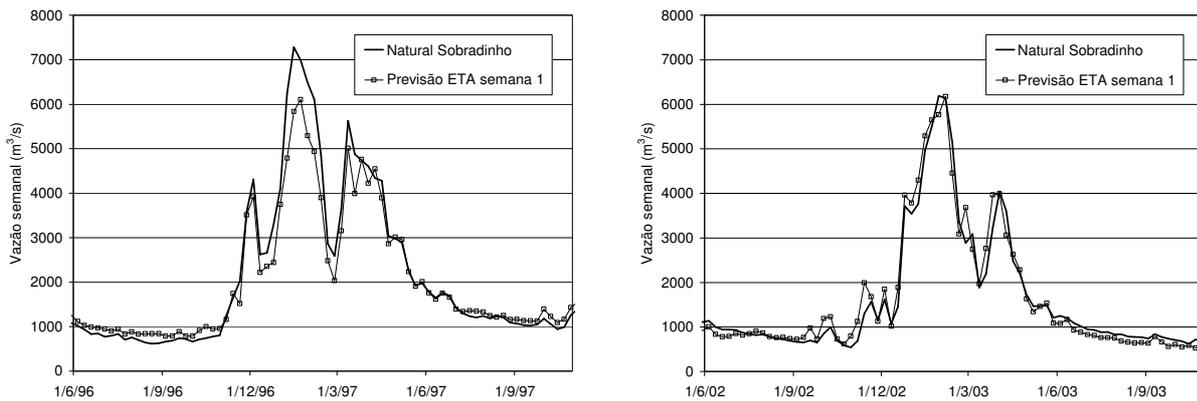


Figura 6 - Previsões de vazão semanal com 1 semana de antecedência para a usina hidrelétrica de Sobradinho no período de janeiro de 1996 a dezembro de 2003.

contribuinte à usina de Sobradinho. Para três semanas os valores ampliam de forma significativa, mas somente para quatro semanas é que os erros devido à chuva (ETA e nula após 10 dias) se tornam maiores do que a parcela de erros devido ao modelo hidrológico MGB.

Em Sobradinho não ocorrem os problemas observados em Três Marias, porque a bacia contribuinte é consideravelmente maior e a influência de pequenos eventos de chuva durante a estiagem não é tão importante no cálculo do *EMR*, como em Três Marias.

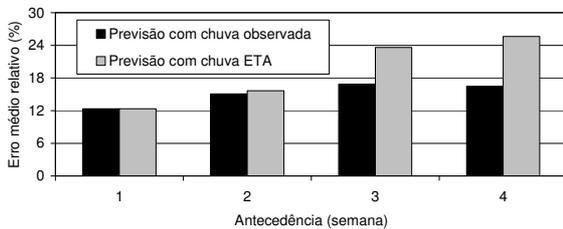


Figura 7 - Médias dos erros absolutos das previsões de vazão em Sobradinho, nas antecedências de uma a quatro semanas.

## PREVISÃO DOS RESÍDUOS

### Previsão dos resíduos: Três Marias

Na Tabela 1 são apresentados os valores de média e desvio padrão das séries de resíduos em Três Marias, para 1 e 2 semanas de antecedência. Nota-se que, embora o erro médio das previsões com antecedência de duas semanas seja menor do

que no caso de uma semana (-65,48 e -43,66 m<sup>3</sup>/s, respectivamente), a variância nas previsões de duas semanas é significativamente maior.

Tabela 1 - Estatísticas dos resíduos da previsão de vazões em Três Marias

Antecedência	Média (m <sup>3</sup> /s)	Desvio (m <sup>3</sup> /s)	Padrão
1 semana	-65,48	177,31	
2 semanas	-43,66	389,57	

Os parâmetros dos modelos dos resíduos foram determinados através da minimização do somatório dos quadrados dos erros, utilizando o algoritmo de otimização SCE-UA (Duan et al., 1994), baseado na técnica de algoritmos genéticos. Para uma primeira estimativa, esse procedimento foi realizado utilizando as semanas de 1 a 156, sendo que a semana 1 tem início em 03/01/1996 e a semana 156 se inicia em 23/12/1998. Para escolha do melhor modelo de previsão dos resíduos, foram avaliados os resultados em termos de erros médios entre a vazão natural ( $Q_{nat}$ ) e a vazão prevista corrigida ( $Q_{corr}$ ), além da análise gráfica dos hidrogramas.

Para uma semana de antecedência a previsão com o modelo hidroclimático apresenta *EMR* igual de 26,2% nas 156 semanas de ajuste do modelo de resíduos. Aplicando a previsão dos resíduos, o melhor desempenho foi obtido com o modelo função de transferência que usa um termo autoregressivo de ordem 1 e a chuva prevista pelo modelo ETA acumulada nos 7 dias de previsão, conforme a Equação 5. Com esse modelo o valor *EMR* se reduziu para 19,9%.

$$E(t) = a1.E(t-1) + b1.P_{ETA}(t) + \xi(t) \quad (5)$$

Para as previsões com duas semanas de antecedência, os termos do lado direito  $E(t-1)$  e  $WCI(t-1)$  alterados para  $E(t-2)$  e  $WCI(t-2)$ , uma vez que a previsão operacional dos resíduos de duas semanas é possível somente com o defasagem igual a 2. Além disso, o termo  $P_{ETA}$  corresponde ao total de chuva prevista pelo modelo ETA nos 10 dias do horizonte de previsão. Novamente, o modelo com a chuva prevista (Equação 6) resultou em melhor ajuste, pois reduziu o valor de  $EMR$  para 42,5%, obtidos com o modelo hidroclimático, para 35,3%.

$$E(t) = a1.E(t-2) + b1.P_{ETA}(t) + \xi(t) \quad (6)$$

Após a definição do modelo com melhor resultado para as duas antecedências, foram feitas previsões dos resíduos para as demais semanas, ou seja, da semana 157 (iniciada em 30/12/1998) até a 413 (iniciada em 26/11/2003). Nesta etapa, foram testadas duas formas de atualização dos parâmetros, em relação à quantidade de dados usados para ajuste do modelo. Na primeira, a partir da semana 156 os parâmetros foram sendo atualizados para cada nova previsão, mas utilizando-se sempre uma janela móvel de 156 semanas. Isto significa que, para a previsão da semana 157 os parâmetros foram otimizados considerando os erros das semanas 1 a 156, para a semana 158 foram usadas os dados das semanas 2 a 157, e assim por diante. No segundo critério, a janela de dados é sempre crescente, ou seja, o limite inferior é sempre a primeira semana da série, resultando que, na previsão da semana 413, por exemplo, foram usados os dados da semana 1 a 412 para atualização dos parâmetros.

**Tabela 2 - Erros médios das previsões de vazão corrigidas em Três Marias, para o período total de 413 semanas e os critérios de atualização dos parâmetros com janela constante de 156 semanas e janela crescente.**

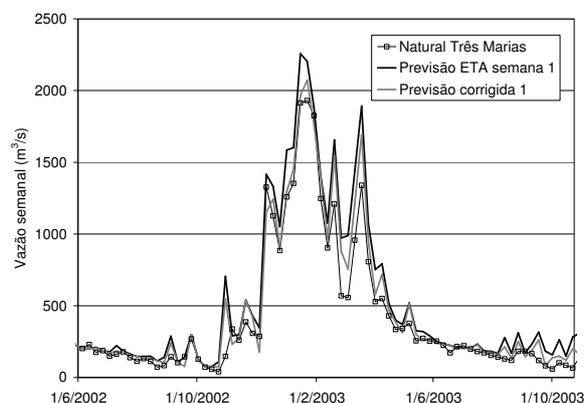
Antecedência	Janela Constante	Janela Crescente
	EMR (%)	
1 semana	23,0	23,8
2 semanas	34,0	33,4

Os resultados de ambos os critérios, medidos em termos de erros médios das vazões naturais previstas corrigidas, são apresentados na Tabela 2. Nota-se que os resultados são praticamente idênti-

cos, mostrando que, para o período analisado, a janela constante de 156 semanas (3 anos) se mostrou suficientemente representativa para um ajuste adequado do modelo de previsão dos resíduos.

Além destes resultados, a escolha de uma janela móvel se justifica porque o comportamento dos resíduos da previsão pode se modificar por alterações permanentes nos modelos ou na rede hidrometeorológica. Com isso, os dados anteriores perdem rapidamente a influência sobre o modelo, gerando contribuições insignificantes ou, até mesmo, pode provocar a piora dos resultados.

Assim, os resultados das correções com a janela móvel de atualização dos parâmetros são utilizados em comparação com as previsões originalmente geradas pelos modelos hidroclimático. Na Figura 8 são apresentados os resultados das correções para 1 semana de antecedência no verão de 2002/2003.



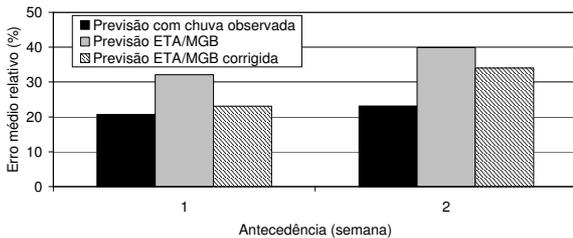
**Figura 8 - Previsões corrigidas de vazão semanal com 1 semana de antecedência para Três Marias no verão de 2002/2003.**

A Figura 9 apresenta os resultados em termos de erros médios relativos. Verifica-se nessa figura que as maiores reduções de erros ocorrem para 1 semana de antecedência, de forma que os erros das previsões corrigidas ficaram muito próximos das previsões com chuva observada, para 1 semana.

### Previsão dos resíduos em Sobradinho

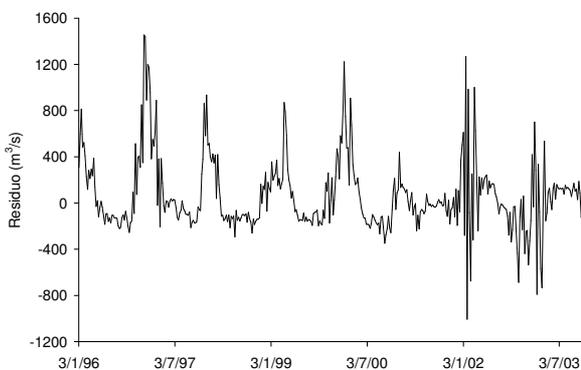
As séries de resíduos em Sobradinho apresentam dois períodos de comportamento bastante distintos, pois até o final do ano de 2000 os erros possuem um comportamento sazonal bem definido, com valores positivos e de grande amplitude durante os verões e valores negativos e de menor amplitu-

de durante as estiagens. A partir de 2001 o comportamento das séries muda e, embora a amplitude dos erros se mantenha, a sazonalidade praticamente desaparece. Na Figura 10 é apresentada a série dos resíduos para 1 semana de antecedência. Este comportamento se deve, provavelmente, a dois motivos principais: i) vazões excepcionalmente baixas no verão 2000/2001 e ii) as séries de vazões naturais foram revisadas somente até dezembro de 2001 (ONS, 2003b). Os valores de 2002 e 2003 apresentam “ruídos”, originários dos cálculos de balanço hídrico dos reservatórios, que influenciam diretamente nos resíduos das previsões.



**Figura 9 - Erros médios relativos das previsões em Três Marias, no período de janeiro de 1996 a dezembro de 2003.**

Devido a essas características dos resíduos em Sobradinho, optou-se por realizar o ajuste de modelos diferentes para os dois períodos identificados. Para os anos de 1996 a 2000, assim como em Três Marias, inicialmente foram considerados os três primeiros anos das séries, ou seja, as primeiras 156 semanas. Nesse caso, antes de realizar o ajuste, retirou-se a sazonalidade das séries. Para os anos de 2001 a 2003 o ajuste inicial dos modelos foi realizado utilizando-se apenas 52 semanas (1 ano), uma vez que todo esse período possui o total de 153 semanas.



**Figura 10 – Série de resíduos das previsões de vazão com 1 semana de antecedência em Sobradinho**

Através de análises semelhantes às realizadas para Três Marias, para 1 semana de antecedência escolheu-se o modelo da Equação 7 para previsão dos resíduos no período de 1996 a 2000 e o modelo da Equação 8 para 2001 a 2003. Devido a grande memória da bacia em Sobradinho, o acréscimo de outras variáveis não trouxe benefícios significativos.

$$E(t)_i = a1.Y(t-1)_i + a2.Y(t-2)_i + \xi(t) \tag{7}$$

com,  $Y(t)_i = E(t)_i - EM_i$ , para  $i = 1, 2, \dots, 52$  semanas.

onde:  $EM_i$  é o resíduo médio histórico da semana  $i$ ;  $Y(t)_i$  é o resíduo sem a sazonalidade.

$$E(t)_i = a1.E(t-1) + a2.E(t-2) + \xi(t) \tag{8}$$

Para duas semanas de antecedência escolheu-se o modelo da Equação 9 para o período de 1996 a 2000 e o modelo da Equação 10 para 2001 a 2003.

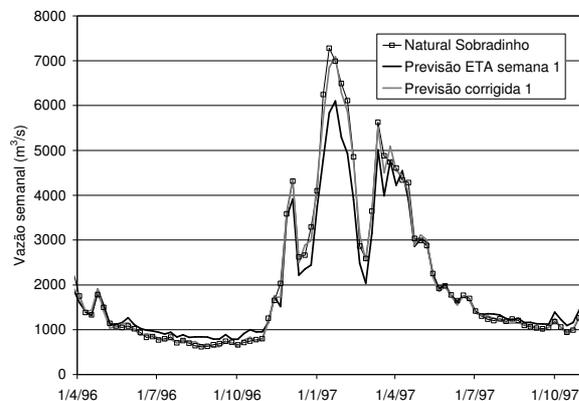
$$E(t)_i = a1.Y(t-2)_i + \xi(t) \tag{9}$$

$$E(t)_i = a1.E(t-2) + \xi(t) \tag{10}$$

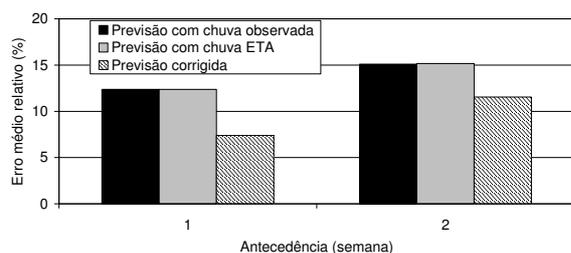
Para correção das previsões nas demais semanas do período de 1996 a 2000, os parâmetros do modelo de resíduo foram sendo atualizados para cada nova previsão, a partir da semana 156, mas utilizando-se sempre uma janela móvel de 156 semanas. No segundo período das séries (2001 a 2003), foi utilizada uma janela de dados sempre crescente, ou seja, o limite inferior é sempre a primeira semana da série. A Figura 11 apresenta o resultado das correções nas previsões com 1 semana de antecedência para o período de março de 1996 a setembro de 1997.

Na Figura 12 são apresentados os erros médios das vazões corrigidas, para 1 e 2 semanas de antecedência. Os gráficos mostram que a redução nos erros foi maior, proporcionalmente, do que em Três Marias, tanto para uma como para duas semanas. Também se observa que as diferenças são muito pequenas entre as previsões com chuva observada e com chuva do ETA, devido à grande memória da bacia. Com isso os erros da previsão se devem quase que totalmente ao modelo hidrológico, para até duas semanas de antecedência. Dessa forma, os erros médios com as correções dos resíduos são meno-

res do que com a chuva observada, pois são corrigidas as deficiências no ajuste do modelo hidrológico e/ou inconsistência nas séries de vazões observadas e naturais.



**Figura 11 - Previsões corrigidas de vazão semanal com 1 semana de antecedência para Sobradinho.**



**Figura 12 - Erros médios relativos das previsões em Sobradinho, no período de 1996 a 2003.**

## CONCLUSÕES

O presente estudo integra o conhecimento climático e hidrológico para a previsão de vazão de curto prazo, afluente a reservatórios hidrelétricos da bacia do rio São Francisco. As previsões foram feitas com base em previsões de precipitação do modelo ETA, com intervalo de tempo diário até o horizonte de 10 dias. Utilizando o modelo hidrológico MGB-IPH, as previsões de vazão foram avaliadas para antecedências de duas semanas em Três Marias e até quatro em Sobradinho. Além disso, foram testados modelos de estimativa dos resíduos das previsões em

Três Marias e Sobradinho. O modelo utilizado foi do tipo função de transferência, que inclui um termo autoregressivo dos resíduos e a precipitação prevista pelo ETA como variável explicativa.

Em relação à precipitação prevista pelo modelo ETA, conclui-se que os melhores resultados são obtidos para valores acumulados de 3 dias ou mais. Ou seja, o modelo possui melhor desempenho na previsão de volumes totais de um conjunto de dias (nos casos estudados, 3 dias ou mais).

Os modelos atmosféricos de uso operacional são, normalmente, ajustados com base em um resultado médio de áreas bem maiores do que a maioria das bacias hidrográficas. Por isso, o desempenho pode ser bastante distinto para diferentes bacias, principalmente se estiverem em regiões influenciadas por diferentes condicionantes climáticos. Dessa forma, cada bacia deve ser analisada de forma particular e, com o rápido desenvolvimento dos computadores em *clusters*, a tendência futura poderá ser um ajuste específico do modelo atmosférico regional para cada bacia de interesse. Ou ainda, o uso de modelos diferentes para cada bacia.

Em relação à previsão de vazão, foi observado que o modelo hidroclimático apresentou um desempenho bastante promissor. O principal ponto positivo está relacionado à capacidade de antecipar eventos de forte crescimento nas vazões, que os modelos estocásticos normalmente têm dificuldades em representar.

Os erros nas vazões para a bacia até Três Marias são relativamente grandes, mas estão abaixo do esperado para os modelos do tipo estocásticos. Além disso, deve-se considerar que estes resultados podem ter melhoras significativas, uma vez que existem postos de medição de vazão e chuva, como os da empresa CEMIG, que não foram usados neste trabalho.

É importante salientar que os resultados foram comparados com as séries de vazões naturais dos aproveitamentos, que podem conter inconsistências inerentes ao processo de cálculo, que inclui o balanço hídrico dos reservatórios. Pequenos erros na estimativa dos volumes armazenados podem causar diferenças importantes nas vazões. No caso de Sobradinho, a dificuldade em realizar o balanço hídrico já é bastante conhecida (ONS, 2003a) e, certamente, é a principal fonte dos erros sistemáticos das previsões, corrigidas posteriormente pelo modelo de previsão dos resíduos.

A integração de modelos do tipo estocástico, para correção da vazão prevista pelo modelo hidroclimático, apresentou benefícios significativos. Ou seja, apesar da grande sofisticação dos modelos de

terminísticos usados nessa pesquisa, a carência de dados e a dificuldade em representar alguns processos conduzem a erros que justificam o emprego dos modelos de correção.

Apesar das limitações ainda existentes, este tipo de previsão tem sido objeto crescente de estudos, motivados pela minimização dos riscos da variabilidade climática global. Esta é, certamente, a principal vantagem deste método pois, o processo de previsão integra informações atuais do clima em todo o globo e não somente dados do passado da bacia hidrográfica.

A principal desvantagem da previsão hidroclimática reside na sua operacionalização, que demanda a existência de uma extensa rede de postos telemétricos de chuva e vazão, além de estações meteorológicas. E ainda são pouquíssimas as bacias brasileiras que dispõem de um monitoramento adequado a este tipo de aplicação.

Os resultados obtidos devem ser vistos dentro de um processo evolutivo de conhecimento e de resposta às necessidades de diversos setores da sociedade, como energia, agricultura, navegação, abastecimento, dentre outros. Ainda são muitos os desenvolvimentos possíveis de serem implementados neste tipo de previsão, dentre os quais destacam-se: i) avaliar a influência do método de interpolação da chuva observada e prevista; ii) desenvolver métodos de assimilação de dados de satélite, como evapotranspiração, umidade do solo e chuva; iii) testar as previsões por conjunto (Georgakakos e Krzysztofowicz, 2001); iv) operacionalizar o modelo (Habets *et al.*, 2004); v) incorporar novos desenvolvimentos nos modelos atmosféricos e hidrológicos. Finalmente, pode-se concluir que o desenvolvimento do trabalho permitiu ampliar o conhecimento dos processos meteorológicos e hidrológicos na bacia do rio São Francisco, podendo contribuir para o melhor gerenciamento dos sistemas hidrelétricos da bacia. Também incrementou o conhecimento científico e tecnológico, até mesmo em nível mundial, sobre a aplicabilidade de ferramentas poderosas de previsão, como os modelos determinísticos.

## AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao CNPq/CT-Hidro pela concessão da bolsa de estudos a Benedito C. Silva, a Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) e Agência Nacional de Águas (ANA) Operador Nacional do Sistema Elétrico (ONS) pelo fornecimento de dados hidrometeorológicos, e a Organiza-

ção Meteorológica Mundial (OMM) e ANEEL pelo financiamento dos estudos.

## REFERÊNCIAS

- ALLASIA, D.G.; SILVA, B.C.; COLLISCHONN, W.; TUCCI, C.E.M. Large basin simulation experience in Brazil. In: SIVAPALAN, M. et al. PUB: Promises and Progress. Proceedings of VII IAHS Scientific Assembly - Freshwater: Sustainability within Uncertainty. Foz do Iguaçu, Brazil. 2006.
- ANDERSON, M.L.; CHEN, Z.-Q.; KAVVAS, M.L.; FELDMAN, A. Coupling HEC-HMS with Atmospheric Models for Prediction of Watershed Runoff. *Journal of Hydrologic Engineering*. V.7, n.4, jul, p.312-318. 2002.
- BLACK, T.L. The new NMC mesoscale Eta Model: description and forecast examples. *Wea. Analyses and Forecasting*. v.9,p.265-278. 1994.
- BREMICKER, M. A *ufbau eines Wasserhaushaltsmodells für das Weser und das Ostsee Einzugsgebiet als Baustein eines Atmosphären-Hydrologie-Modells*. Dissertation - Geowissenschaftlicher Fakultät, Albert-Ludwigs-Universität. Freiburg. Juli. 1998.
- COLLISCHONN, W. *Simulação Hidrológica de Grandes Bacias*. Porto Alegre: UFRGS. Tese, Instituto de Pesquisas Hidráulicas da Universidade Federal do Rio Grande do Sul. 194p. 2001.
- COLLISCHONN, W.; TUCCI, C. E. M. Simulação hidrológica de grandes bacias. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*. Vol.6, n.1. 2001.
- COLLISCHONN, W; HAAS, R.; ANDREOLLI, I.; TUCCI, C.E.M. Forecasting River Uruguay flow using rainfall forecasts from a regional weather-prediction model. *Journal of Hydrology*. Vol.305, p.87-98. 2005.
- DUAN, Q.; SOROOSHIAN, S.; GUPTA, V. Optimal use of the SCE – UA global optimization method for calibrating watershed models. *Journal of Hydrology*, Vol 158 pp. 265-284. 1994.
- GEORGAKAKOS, K.P.; KRZYSZTOFOWICZ, R. Probabilistic and ensemble forecasting. *Journal of Hydrology*. 249, p.1. 2001.
- HABETS, F.; LEMOIGNE, P.; NOILHAN, J. On the utility of operational precipitation forecasts to served as input for streamflow forecasting. *Journal of Hydrology*. V.293, P.270-288. 2004.
- HSU, M.-H.; FU, J.-C.; LIU, W.-C. Flood routing with real-time stage correction method for flash flood forecasting in the Tanshui River, Taiwan. *Journal of Hydrology*. V. 283, p.267-280. 2003.
- KOUSSIS, A.D.; LAGOUVARDOS, K.; MAZI, K.; KOTRONI, V.; SITZMANN, D.; LANG, J.; ZAISS, H.; BUZZI, A.; MALGUZZI, P. Flood Forecasts for Urban Basin with

- Integrated Hydro-Meteorological Model. *Journal of Hydrologic Engineering*. V.8, n.1, jan/fev, p.1-11. 2003.
- LETTENMAIER D.P., WOOD E.F. Hydrologic Forecasting. In: MAIDMENT D., *Handbook of Hydrology*. McGraw-Hill, Chapter 26. 1993.
- LIANG, X.; LETTENMAIER, D.P.; WOOD, E.F.; BURGESS, S.J. A simple hydrologically based model of land surface water and energy fluxes for general circulation models. *Journal of Geophysical Research*, Vol. 99, No. D7, p. 14415-14428. 1994.
- MADSEN, H.; SKOTNER, C. Adaptive state updating in real-time river flow forecasting—a combined filtering and error forecasting procedure. *Journal of Hydrology*, Vol.308, P.302-312. 2005.
- MAKRIDAKIS, S.; WHEELWRIGHT, S.C.; HYNDMAN, R.J. *Forecasting – Methods and Applications*. John Wiley & Sons: United States.1998. 642p.
- MESINGER, F.; JANJIC, Z. I.; NICKOVIC, S.; GAVRILOV, D.; DEAVEN, D. G.: The step-mountain coordinate: Model description and performance for cases of Alpine lee cyclogenesis and for a case of Appalachian redevelopment. *Monthly Weather Review*, v.116, p.1493-1518, 1988.
- MOORE, R.J.; BELL, V.A.; JONES, D.A. Forecasting for flood warning. *Computes Rendus Geoscience*. Vol.337, p.203-217. 2005.
- ONS, OPERADOR NACIONAL DO SISTEMA ELÉTRICO. *Modelos Computacionais (Submódulo 18.2)*. Rio de Janeiro: ONS, jun, 26p. 2001.
- ONS, OPERADOR NACIONAL DO SISTEMA ELÉTRICO. *Balço Hídrico de Reservatório de Sobradinho: caracterização do Problema, Definição de Ações*. Rio de Janeiro: ONS, 27p., 2003a.
- ONS, OPERADOR NACIONAL DO SISTEMA ELÉTRICO. *Reavaliação de Séries de Vazões Naturais – Bacia do São Francisco: Análise de Dados das Estações Fluviométricas e Pluviométricas*. São Paulo: Themag/Aquavia, 128p., 2003b.
- SILVA, B.C.; TUCCI, C.E.M.; COLLISCHONN, W. Previsão Hidroclimática de Vazão para a Bacia do Rio São Francisco. Porto Alegre: UFRGS. Tese, Instituto de Pesquisas Hidráulicas da Universidade Federal do Rio Grande do Sul. 228p. 2005..
- SILVA, B.C. ; COLLISCHONN, W. ; TUCCI, C. E. M. . Previsão de Vazão com Modelos Hidroclimáticos. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos* (aceito). 2006.
- TOTH, E.; MONTANARI, A.; BRATH A. Real-Time Flood Forecasting via Combined Use of Conceptual and Stochastic Models. *Physics and Chemistry of the Earth*. V.24, n.7, p.793-798. 1999.

**Short-Range hydroclimatic Streamflow Forecast to the São Francisco River Basin**

**ABSTRACT**

*The streamflow forecast with large ranges depends on the precipitation forecast. The increase in the forecast ranges, in recent years, was because the development in the atmospheric and hydrologic models and their integrated application (hydroclimatic forecast). In this article is presented the result of integration between ETA atmospheric regional model and MGB-IPH distributed hydrologic model, to short-range streamflow forecast. In addition, a stochastic model was used to correct the forecasted streamflow by the forecasting of hydroclimatic model residues.*

*The MGB-IPH distributed hydrologic model was adjusted to the São Francisco river basin (about 639,000 km<sup>2</sup>). The precipitation forecasts of ETA model, operated by Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos – CPTEC, was used as input to the hydrologic model. Streamflow forecasts were made for the whole São Francisco basin, but the results were analyzed in details to the Três Marias and Sobradinho hydropowers. The precipitation forecasts of ETA model was made up to 10 days range and were produced streamflow forecasts up to two weeks to Três Marias and four weeks to Sobradinho. After the tenth day of forecast the precipitation was consider equal to zero. The results show that the hydroclimatic forecasts obtained to both hydropowers presents improvements in relation to the methods traditionally employed.*

*Key-words: Streamflow forecast, precipitation forecast, São Francisco River*