

## Previsão Sazonal de Vazão na Bacia do Rio Uruguai 2: Previsão Climática-Hidrológica

Walter Collischonn, Carlos Eduardo Morelli Tucci, Robin T. Clarke

Instituto de Pesquisas Hidráulicas - UFRGS

collischon@iph.ufrgs.br

Pedro L. S. Dias

IAG - USP

Gilvan Sampaio de Oliveira

CPTEC – INPE

Recebido: 23/08/02 revisado: 09/04/03 aceito: 08/11/05

---

### RESUMO

A previsão de vazão de longo prazo ou sazonal é fundamental para o gerenciamento dos recursos hídricos em seus diversos usos, como geração de energia elétrica, navegação e suprimento de água para abastecimento e agricultura. Numa seqüência de dois artigos são apresentados os resultados da previsão de até cinco meses de antecedência para a bacia do rio Uruguai com base na combinação do modelo climático global do CPTEC com um modelo hidrológico de grandes bacias. No primeiro artigo são apresentados os resultados do ajuste do modelo hidrológico para a bacia brasileira do rio Uruguai, onde os resultados se mostraram satisfatórios. Neste artigo são apresentados os resultados do uso do modelo hidrológico ajustado, com a previsão de precipitação do modelo climático, para a previsão de vazão em Iraí, no rio Uruguai (62.200 km<sup>2</sup>). Foram realizadas previsões de vazão retrospectivamente para o período de 1995 a 2001, e os resultados obtidos foram comparados às vazões observadas e às previsões que seriam obtidas utilizando o método estatístico tradicional, que está baseado nas médias ou medianas mensais. Os resultados mostram que o modelo climático global subestima as chuvas em quase toda a bacia, especialmente no inverno, mas suas previsões representam relativamente bem a variabilidade interanual da precipitação na região. Quando corrigidas através de um método estatístico, as previsões de precipitação permitem obter previsões de vazão significativamente superiores àquelas obtidas por médias ou medianas mensais.

**Palavras-Chaves:** previsão sazonal, modelo hidrológico.

---

### INTRODUÇÃO

Normalmente a previsão de vazão em um horizonte de curto prazo (de algumas horas a alguns dias) é realizada através de modelos determinísticos, acompanhando os fenômenos climático-hidrológicos. Já em um horizonte de longo prazo, as previsões hidrológicas são realizadas geralmente através da estatística dos valores históricos, o que permite prever os valores associados a intervalos probabilísticos, mas não as datas de ocorrência. Recentemente, com a evolução dos modelos climáticos e o uso de relações empíricas entre variáveis como a temperatura do mar, a precipitação e o escoamento, introduziu-se na literatura a chamada previsão de médio prazo (até seis meses) por meio

de relações determinísticas, conceituais ou empíricas.

A previsão de longo prazo traz como benefício direto a estimativa de afluências aos reservatórios hidrelétricos, o que permite planejar a sua melhor operação e, eventualmente, antecipar a formação de preço da energia. Este benefício é particularmente interessante no Brasil, em que a matriz energética é, predominantemente, baseada em energia hidráulica. Além disso, a previsão da disponibilidade hídrica é importante para irrigação, abastecimento, navegação, entre outros usos da água.

A maior parte da incerteza da previsão hidrológica determinística de longo prazo está relacionada com a capacidade do modelo climático de prever as precipitações futuras para a bacia hidrográfica. Geralmente, o nível de qualidade da previ-

são não permite uma previsão quantitativa satisfatória desta variável, que permita melhorar as estimativas das vazões. Entretanto, a evolução contínua da modelagem atmosférica e de seus resultados de previsão (Hollingsworth, 2003; Collier e Krzysztofiwicz, 2000) motiva a pesquisa sobre a utilização destes resultados na área de recursos hídricos (Galvão, 1999). Neste artigo é apresentado o uso conjunto do modelo climático global do CPTEC, para a previsão da precipitação, e o modelo hidrológico de grandes bacias (Collischonn, 2001; Collischonn e Tucci, 2001; Collischonn e Tucci, 2002), para prever as vazões futuras.

## O MODELO GLOBAL DO CPTEC INPE

O modelo climático utilizado no CPTEC é, essencialmente, o mesmo que o modelo de previsão de tempo de baixa resolução (Marengo et al., 2003). A resolução espacial é equivalente a uma malha horizontal da ordem de 180 km. As variáveis prognósticas são cinco: componente zonal e meridional do vento, temperatura virtual (i.e., considera o efeito da umidade na densidade do ar); umidade específica e pressão à superfície do modelo. O movimento vertical é diagnosticado pela equação da continuidade.

O modelo global do CPTEC é fundamentalmente baseado no código FORTRAN do modelo utilizado pelo *Center for Ocean and Land Studies (COLA)* dos EUA. Entretanto, várias melhorias computacionais foram realizadas para adaptá-lo à arquitetura dos computadores disponíveis no CPTEC. O modelo é discretizado na vertical em 28 camadas num sistema de coordenadas que acompanha a pressão à superfície. As derivadas nos eixos horizontais são calculadas pelo método espectral, supondo a expansão das variáveis em série de harmônicos esféricos. O modelo toma cerca de 35 min de tempo de processamento em um processador de computador de arquitetura vetorial (NEC-SX4) para cada mês simulado.

Os efeitos diabáticos incluídos no modelo são: mudanças de fase do vapor d'água, efeitos dos processos radiativos de onda curta e longa, trocas turbulentas de calor, quantidade de movimento e vapor d'água entre a superfície e a atmosfera, e transportes turbulentos de quantidade de movimento, calor e umidade na atmosfera.

Os efeitos das trocas de calor no processo de condensação/evaporação da água são incluídos em duas escalas: (a) na escala da grade, como um pro-

cedimento baseado na avaliação do grau de supersaturação do ponto de grade e condensação do vapor supersaturado e eventual remoção desta quantidade através da transformação em precipitação; e (b) nos processos que ocorrem em escala espacial inferior à da grade, i.e., nas nuvens tipos *cumulus* que ocorrem com escala típica da ordem de alguns km a poucas dezenas de km. Neste último caso, o modelo global do CPTEC utilizado neste trabalho usa uma metodologia amplamente testada e validada, baseada na chamada parametrização de Kuo (1974). Nesta metodologia, supõe-se que a quantidade de precipitação é proporcional à convergência de umidade na base da nuvem que é determinada por critérios termodinâmicos locais. O perfil vertical do aquecimento associado à mudança de fase do vapor para água é determinado pela diferença de temperatura entre uma parcela que hipoteticamente sobe, sem se misturar com o ambiente.

Os processos radiativos de onda curta e onda longa são introduzidos de forma a representar os efeitos de absorção de onda curta nas principais bandas do vapor d'água, ozônio, oxigênio etc. Os processos de espalhamento molecular de radiação solar são incluídos mas o espalhamento por aerossóis ainda não é apropriadamente considerado no modelo, já que a quantidade de aerossóis não é uma variável prognóstica ou mesmo diagnóstica. O efeito da nebulosidade é considerado de forma simplificada mas realista, permitindo uma interação com os processos convectivos parametrizados na escala da grade e sub-grade. No caso da onda curta, são considerados os efeitos associados à absorção e emissão de energia radiativa nas bandas de comprimento de onda de absorção e emissão pelo vapor d'água, CO<sub>2</sub>, O<sub>3</sub>. A presença de nuvens também é considerada, com a hipótese de que constituem um corpo negro (desde que a espessura seja acima de um certo valor crítico).

Uma das características importantes do modelo do CPTEC e que o torna peculiar com relação aos demais modelos utilizados em centros internacionais de previsão climática é o procedimento utilizado para simular os efeitos de trocas de calor, quantidade de movimento e água na superfície continental. O modelo do CPTEC utiliza um procedimento denominado **S**implified **B**iophere - **SIB2** (Sellers et al. (1996) modificado por Rocha et al. (1996)), no qual o papel da vegetação é representado na forma de resistência ao transporte de água entre o solo e a superfície das folhas através das raízes, e depois entre a superfície das folhas e o ar através dos estômatos. Em adição, consideram-se de forma razoavelmente realista os processos de trans-

ferência radiativa no dossel da vegetação e de interceptação da água da chuva pelas plantas (e posterior evaporação). Os parâmetros do SIB2 foram devidamente calibrados com dados representativos de florestas e pastagens no Brasil, de forma que os processos de superfície representados pelo modelo são bastante realistas (Rocha et al., 1996). Este é, seguramente, um dos pontos fortes do modelo do CPTEC e que o torna particularmente relevante para estudos da variabilidade climática na América do Sul e também para prognósticos climáticos.

No caso dos oceanos, as trocas de calor, de quantidade de movimento e vapor d'água são dependentes da temperatura da superfície do mar (TSM). O CPTEC adota dois procedimentos para fornecer a TSM para o modelo atmosférico durante o período de integração: (a) anomalias de TSM persistidas em todos os oceanos; e (b) TSM prevista pelo NCEP (National Center for Environmental Prediction) no Pacífico Equatorial e TSM prevista por um modelo estatístico (SIMOC) no Atlântico Tropical (Pezzi e Cavalcanti, 2001). Fora das áreas tropicais do Pacífico e Atlântico, em todo o Oceano Índico e demais oceanos, utiliza-se a TSM fornecida pela persistência das anomalias observadas no início da integração. Os dois procedimentos são necessários dado que o modelo do CPTEC não é acoplado a um modelo oceânico. Os dois procedimentos também são importantes para testar a influência das anomalias de TSM que têm impacto significativo nas anomalias climáticas observadas em algumas áreas do globo. Em particular, as anomalias de TSM do Oceano Pacífico Equatorial exercem importante controle no clima da região sul do Brasil em função do fenômeno El Niño/La Niña (Grimm et al. 1998).

Dado o caráter caótico da dinâmica da evolução do estado da atmosfera, um efeito intrinsecamente associado à não linearidade do sistema, o CPTEC adota a denominada "previsão por conjuntos" (*ensemble forecasting*) (Toth and Kalnay, 1997). Entre 20 e 30 previsões de 6 meses são realizadas mensalmente, partindo de condições iniciais diferentes (dias  $i=1$  a 20 ou 30 às 12 horas de Greenwich ou UTC). Desta forma é possível estimar o grau de previsibilidade (i.e., a confiabilidade) nas previsões numéricas. Estudos teóricos indicam que a média do conjunto tem acuidade melhor que elementos individuais e, em alguns casos, observa-se claramente a existência de "atratores", ou seja, regimes climáticos preferenciais, associados a uma melhor previsibilidade. Em outros casos, observa-se que os elementos do conjunto divergem significativamente, o que significa que o grau de previsibilidade é baixo. A experiência com o modelo do CPTEC indica que

algumas regiões do Brasil apresentam maior previsibilidade que outras. Este é o caso da Região Sul, do norte do NE e da parte leste da Amazônia. As demais regiões apresentam previsibilidade baixa à moderada (Marengo et al. 2003).

Os produtos da previsão por conjuntos do CPTEC foram disponibilizados na forma de arquivos digitais, contendo a evolução diária da temperatura, altura geopotencial dos níveis de pressão padrão, umidade específica, pressão reduzida ao nível do mar, vento (componente zonal e meridional) e precipitação total diária.

## PREVISÃO DE PRECIPITAÇÃO

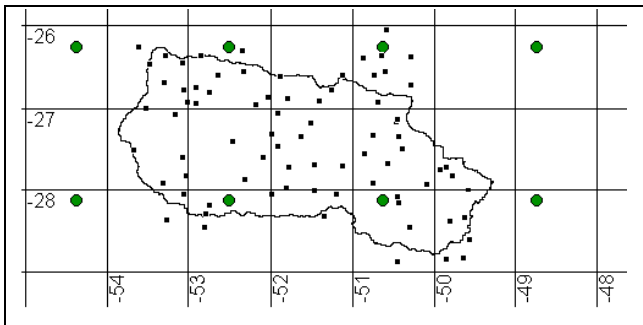
### Avaliação das previsões

O período de dados que foi extraído dos arquivos gerados pelo modelo global do CPTEC estende-se de dezembro de 1995 a fevereiro de 2002. Estes dados foram convertidos em um formato adequado para a leitura e interpolação pelo modelo hidrológico.

O conjunto inicial de 25 membros da previsão climática foi reduzido a 4 ou 5 elementos com duração de 3 meses, representativos do conjunto completo, com o objetivo de diminuir os requisitos computacionais. Uma realização do modelo climático corresponde a uma previsão sob certas condições de contorno e condições iniciais. A técnica de previsões em conjunto de realizações é necessária devido à incerteza dos resultados do modelo em função das condições iniciais. Os modelos climáticos são particularmente sensíveis às condições iniciais, as quais são obtidas a partir de dados meteorológicos de diferentes variáveis, bem como das temperaturas da superfície do mar, cuja medição tem um razoável grau de incerteza. Em consequência, as previsões por três meses realizadas a partir de condições iniciais medidas no dia 12 de setembro de 1998, por exemplo, não são exatamente iguais às previsões iniciadas no dia seguinte.

Como as condições iniciais dos parâmetros associados aos processos de superfície, principalmente a umidade do solo, não são bem conhecidos, torna-se necessário eliminar o início da integração da previsão até que ocorra o chamado "aquecimento" do módulo de hidrologia superficial. O tempo necessário para este ajuste (*spin up time*) é da ordem de 1-2 meses. Portanto, as previsões usadas neste estudo são de 5 meses mas apenas os 3 meses finais é que são usados para alimentação do modelo de chuva-vazão.

Os dados de previsão de chuva disponíveis para este trabalho são os conjuntos de previsões de três meses, a partir do dia 01 de dezembro de 1995 (neste caso a condição inicial teve início pelo menos 2 meses antes) até o dia 28 de fevereiro de 2002. As realizações foram obtidas a partir de condições iniciais do modelo em dias subsequentes (Marengo et al., 2003).

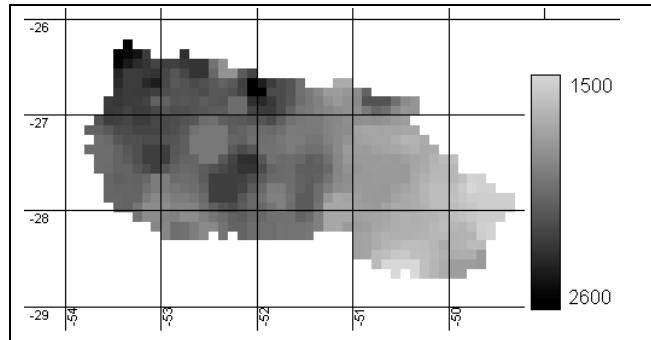


**Figura 1 - Centros das células do modelo global do CP-TEC (pontos grandes) e postos pluviométricos (pontos pequenos) na bacia do rio Uruguai.**

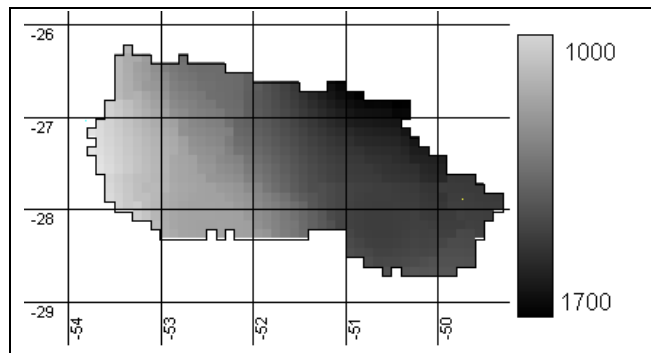
Numa primeira etapa, a qualidade da previsão de chuva do modelo de previsão de clima foi analisada na bacia do rio Uruguai, comparando os valores médios anuais previstos e observados no período de dezembro de 1995 a maio de 1999. A chuva observada foi interpolada a partir dos dados dos postos pluviométricos e a chuva prevista foi interpolada a partir dos dados para cada célula do modelo climático (Figura 1). O valor de chuva prevista corresponde à média das 4 ou 5 realizações disponíveis no período. Nos dois casos a interpolação dos dados de chuva foi realizada utilizando a função interpoladora inverso do quadrado da distância, buscando a informação dos 5 postos mais próximos. Os campos interpolados de chuva prevista e observada têm resolução espacial idêntica ao do modelo hidrológico, isto é, 0,1 x 0,1 grau. A Figura 2 apresenta a chuva média anual observada e a Figura 3 mostra a chuva média anual prevista (média do conjunto de 4 a 5 realizações) na bacia do rio Uruguai. Comparando estas duas figuras observa-se que o modelo de previsão climática subestima a precipitação em quase toda a bacia do rio Uruguai. As precipitações observadas vão de 1500 mm no leste da bacia a 2600 mm no oeste. As precipitações previstas, por outro lado, atingem, no máximo, 1700 mm no nordeste da bacia.

A partir da análise das figuras 2 e 3 observa-se que a chuva prevista pelo modelo climático é, na média, inferior à chuva que realmente ocorre na

bacia do rio Uruguai. Enquanto o modelo prevê precipitações anuais entre 1000 e 1700 mm na bacia, os dados observados mostram que a precipitação vai de 1500 a 2500 mm. A Figura 4 apresenta o mapa do erro da chuva prevista em relação à observada. Observa-se que o erro da previsão é pequeno na região leste da bacia e muito grande na região oeste.



**Figura 2 - Chuva média anual observada na bacia do rio Uruguai no período de dezembro de 1995 a maio de 1999.**



**Figura 3 - Chuva média anual prevista na bacia do rio Uruguai no período de dezembro de 1995 a maio de 1999.**

Além da variabilidade espacial, a variabilidade da chuva ao longo do ano também foi mal representada no modelo de previsão. De maneira geral, o modelo subestimou a precipitação nos meses de inverno. O modelo previu invernos secos na bacia do rio Uruguai, atribuindo a esta região um clima semelhante ao da região sudeste do Brasil, enquanto, na realidade, a bacia se caracteriza por quase nenhuma sazonalidade das precipitações, sem períodos secos ou úmidos típicos. O resultado é que, utilizando diretamente as precipitações previstas pelo modelo climático para gerar vazões com o modelo hidrológico, os maiores erros ocorrem nos meses de julho e agosto, como pode ser observado na Figura 5.

As possíveis causas para os erros sistemáticos na previsão da chuva – subestimativa no inverno e subestimativa no oeste da bacia – podem estar associadas à baixa resolução do modelo (cerca de 200 km). Grande parte da precipitação de inverno e estações de transição é associada a ciclones que se formam no norte da Argentina, Paraguai e Uruguai, e que se deslocam para o oceano (Gan e Rao, 1991; Vera et al., 2001). A escala espacial desses ciclones é da ordem de poucas centenas de km e a intensidade é bastante dependente da liberação de calor latente associada à precipitação (Bonatti e Rao, 1987) e portanto não são bem representados no modelo climático de baixa resolução.

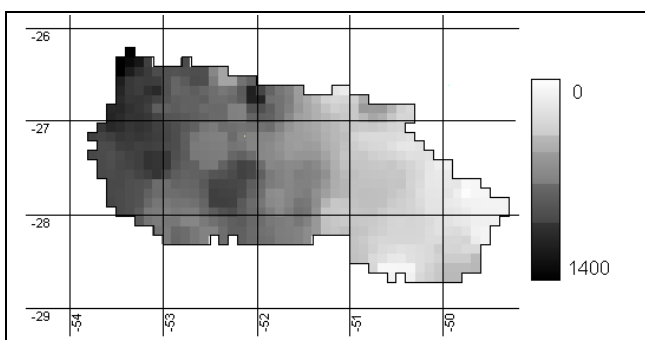


Figura 4 - Erro da chuva média anual prevista na bacia do rio Uruguai no período de dezembro de 1995 a maio de 1999.

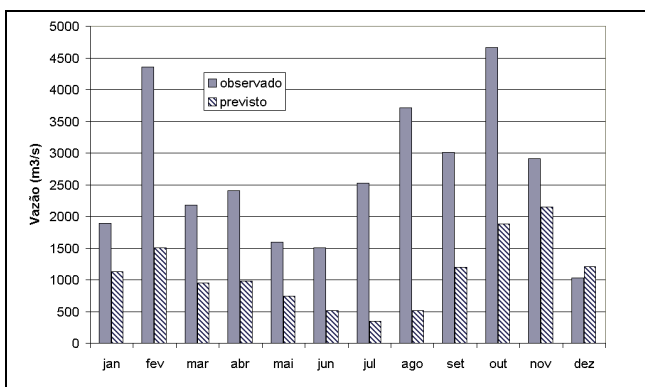


Figura 5 - Vazão média mensal observada e prevista (sem correção) na bacia do rio Uruguai.

### Correção das previsões de precipitação

As previsões de precipitação, quando comparadas diretamente aos dados observados, mostraram que o modelo de previsão climática global do CPTEC apresenta um desvio sistemático em relação aos dados observados. Entretanto, a variabilidade

interanual, isto é, a diferença entre anos úmidos e anos secos, foi razoavelmente bem captada pelo modelo. Assim, foi desenvolvida uma metodologia para reduzir o erro sistemático mantendo a previsão da variabilidade interanual.

A metodologia de correção das previsões de precipitação está baseada numa transformação da curva de distribuição de probabilidades de precipitação diária. Para cada mês do ano e para cada ponto da grade de previsão do modelo climático são desenvolvidas duas curvas empíricas de distribuição de probabilidade: a dos dados observados e a dos valores previstos de chuva diária. A Figura 6 apresenta um gráfico com as distribuições de probabilidade válidas para o mês de janeiro na célula do ponto 9 (ver Figura 7).

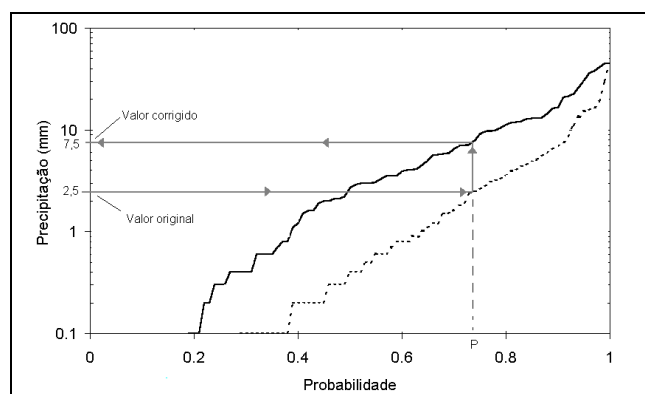
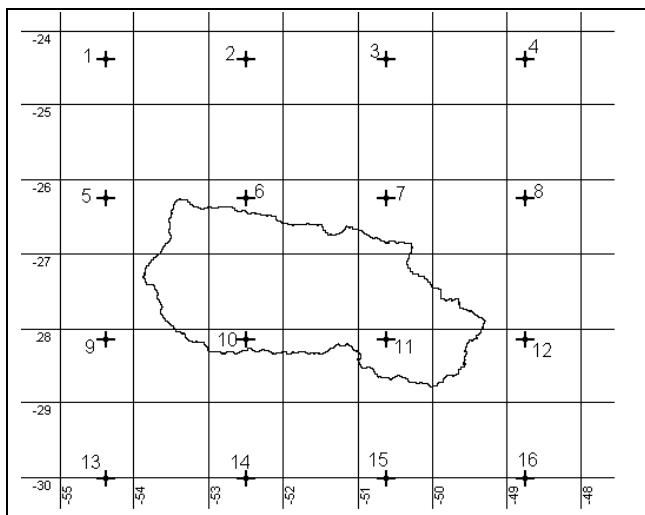


Figura 6 - Curvas empíricas de distribuição de probabilidade acumulada de precipitações diárias no ponto 9, válidas para o mês de janeiro, no período de dezembro de 1995 a dezembro de 1998 (probabilidade de que a precipitação em um dia qualquer seja inferior ao valor indicado na curva – a linha contínua corresponde aos dados observados e a linha pontilhada aos dados previstos).

A correção da previsão é feita a partir destas curvas. Um exemplo é apresentado na própria Figura 6. A probabilidade P associada ao valor previsto original é identificada, utilizando a curva de distribuição de probabilidade dos valores previstos. O valor corrigido associado a esta mesma probabilidade é identificado sobre a curva de distribuição de probabilidade das precipitações observadas. O mesmo procedimento é repetido para todos os dias em que se deseja corrigir a previsão e considerando, sempre, as curvas válidas para o mês e o ponto da grade considerados.

Esta metodologia foi aplicada a cada um dos meses do ano e a cada um dos pontos da grade do modelo global do CPTEC que apresentava alguma influência na bacia. Estes pontos correspondem às 16 células

do modelo mais próximas à bacia, conforme mostra a Figura 7. Para cada um destes 16 pontos e para cada um dos 12 meses do ano foram determinadas duas distribuições de probabilidade (observada e prevista), num total de 384 curvas de distribuição de probabilidade.



**Figura 7 - A bacia do rio Uruguai e os pontos de previsão do modelo global do CPTEC (os pontos indicam a posição do centro da célula do modelo).**

### PREVISÃO DE VAZÃO

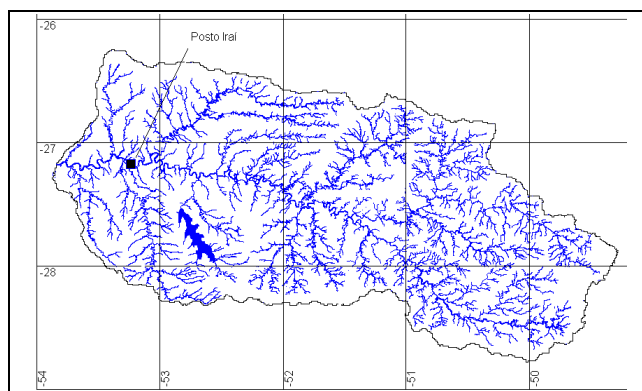
A análise dos resultados de vazão prevista foi realizada utilizando, retroativamente, os dados de 1995 a 2001. A metodologia de correção foi desenvolvida com os dados de 1995 a 1998. Assim, as previsões de 1995 a 1998 foram corrigidas *a posteriori*, isto é, a metodologia de correção foi aplicada com os mesmos dados utilizados para gerar as curvas de distribuição de probabilidades. Esta situação foi avaliada apenas para comparação, porque não seria possível na prática da previsão operacional. Já as previsões de 1999 a 2001 foram corrigidas *a priori*, isto é, as distribuições de probabilidades utilizadas na correção das previsões foram desenvolvidas com dados anteriores (1995 a 1998). Assim, esta metodologia de correção a priori poderia ser utilizada operacionalmente.

Os resultados das previsões foram analisados comparando as vazões previstas com as observadas no posto fluviométrico de Iraí, no rio Uruguai, onde a bacia hidrográfica tem uma área de 62.200 km<sup>2</sup>. A Figura 8 apresenta a localização deste posto fluviométrico na bacia.

A Figura 9 apresenta os resultados da previsão de vazão no período de 1995 a 1998, utilizando

os dados de precipitação prevista pelo modelo climático, diretamente, sem correção. Observa-se que a vazão prevista é, quase sempre, bastante inferior à observada, especialmente nos meses de inverno. Além disso, é importante observar que, em alguns meses, existe uma grande variabilidade entre as previsões obtidas com as diferentes realizações do modelo climático (linhas cinza).

As previsões de vazão no mesmo período, porém com base nas previsões de chuva corrigidas, são apresentadas na Figura 10. Observa-se, nesta figura, uma grande variabilidade das vazões previstas em alguns meses, como fevereiro de 1996 e abril de 1998. Para representar o conjunto de todas as realizações, freqüentemente é utilizada a média. A Figura 11 apresenta a previsão média do conjunto, juntamente com as vazões observadas e a previsão baseada nas médias mensais de longo prazo.



**Figura 8 - Localização do posto fluviométrico Iraí, no rio Uruguai.**

Observa-se na Figura 11 que há vantagens na previsão de vazão com base na previsão climática, especialmente no período de vazões altas a partir de setembro de 1997. Entretanto, nesta figura as previsões de precipitação foram corrigidas com base na relação estabelecida com os dados do próprio período. Isto indica que os resultados podem ter melhorado, mas não garante que esta relação será a mesma para outros períodos.

Um teste de verificação foi realizado no período de junho de 1999 a outubro de 2001, utilizando a mesma metodologia de correção da precipitação, mas com as curvas de distribuição de probabilidade para a correção da precipitação estabelecida com dados do período anterior (1995 a 1998). A Figura 12 apresenta o conjunto de vazões previstas neste caso, considerando todas as realizações disponíveis do modelo climático. Observa-se, novamente, uma grande variabilidade das vazões previstas. Esta

variabilidade pode ser interpretada como a incerteza da previsão.

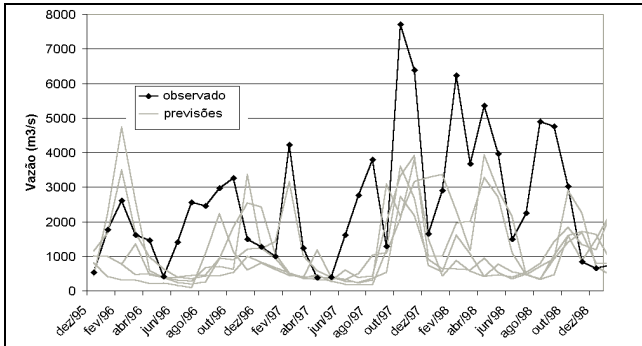


Figura 9 - Previsões de vazão no rio Uruguai com base nas previsões climáticas sem correção (as 5 linhas cinzas correspondem às 5 realizações).

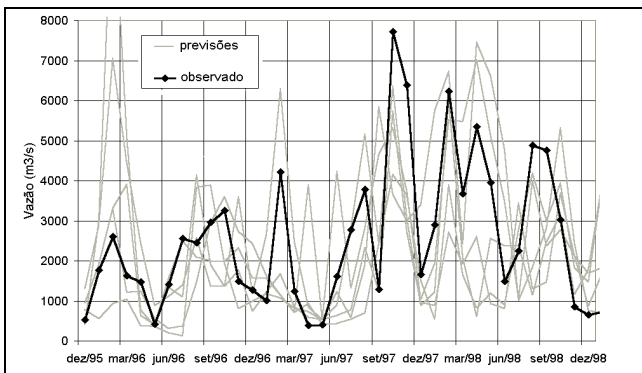


Figura 10 - Previsões de vazão no rio Uruguai com base nas previsões climáticas com correção (as 5 linhas cinzas correspondem às 5 realizações).

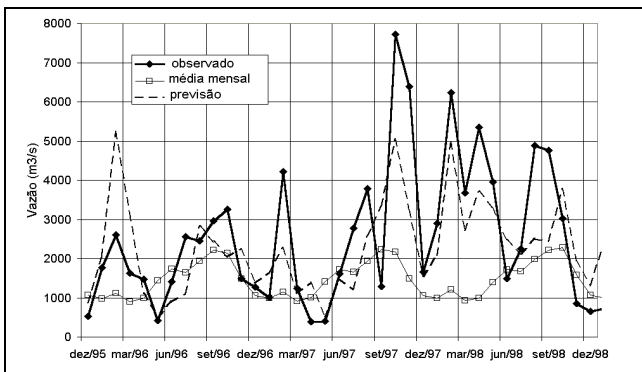


Figura 11 - Previsões de vazão no rio Uruguai com base nas previsões climáticas com correção (a linha tracejada corresponde à média das 5 realizações e a linha com quadrados vazados corresponde às vazões médias de longo prazo).

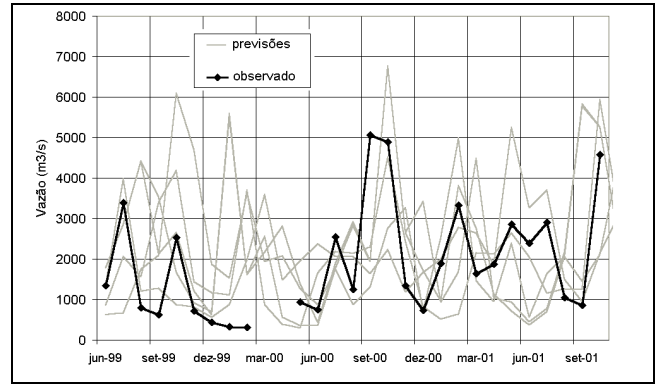


Figura 12 - Previsões de vazão no rio Uruguai com base nas previsões climáticas com correção (as 5 linhas cinzas correspondem às cinco realizações).

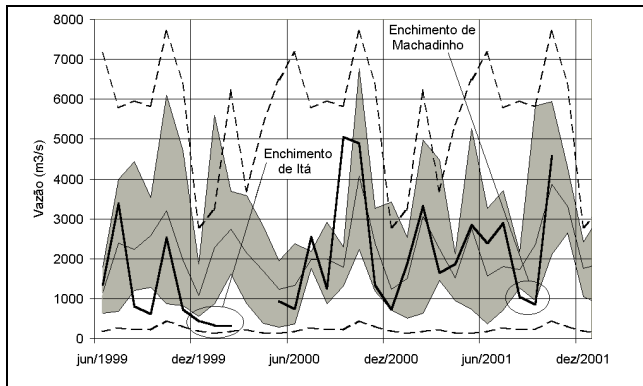
A Figura 13 apresenta as vazões previstas por todas as realizações do conjunto como uma banda sombreada. As vazões observadas são representadas pela linha grossa e a média do conjunto de vazões previstas é representada pela linha fina, no interior da região sombreada.

A banda sombreada da Figura 13 é bastante larga em muitos meses, chegando a  $5000 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$  entre o máximo e o mínimo em alguns casos. Em alguns meses, entretanto, a incerteza da previsão é da ordem de  $1000 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ . De maneira geral, no entanto, a incerteza das previsões é inferior à incerteza definida pela região entre as vazões mínima e máxima mensal da série histórica, que também está representada na Figura 13 pelas linhas tracejadas.

A Figura 13 mostra que, embora apresente uma incerteza grande em muitos meses, a previsão hidrológica com base na previsão climática pode reduzir a incerteza quanto às vazões futuras. A média do conjunto de previsões acompanha o comportamento geral das vazões observadas, especialmente no período úmido a partir do final do ano 2000. Além disso, em quase todos os meses a vazão observada está no interior da banda de incerteza da vazão prevista.

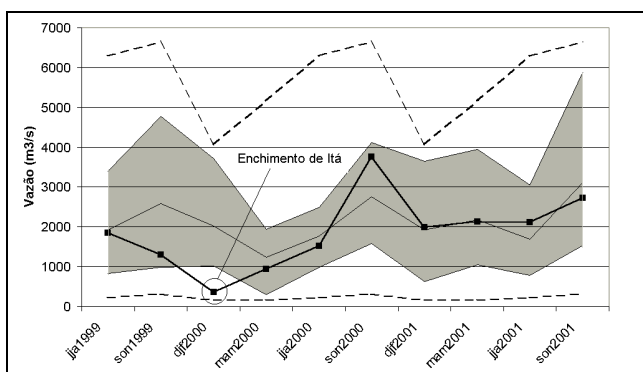
Infelizmente, os dados do período disponível para a avaliação das previsões foram afetados pela finalização de duas obras hidráulicas no rio Uruguai. Entre 1999 e 2001 ocorreu o enchimento dos reservatórios de Itá e Machadinho. O início do enchimento de Itá foi em 16/12/1999 e atingiu a soleira do vertedouro em março de 2000. O início do enchimento de Machadinho ocorreu em 28/08/2001 e o final ocorreu em 02/10/2001. Estes dois períodos, em que os dados de vazão observada podem ser considerados duvidosos, são destacados na Figura 13. É importante observar que, nestes dois

períodos, a vazão observada foi inferior a vazão prevista.



**Figura 13 - Incerteza das previsões de vazão com base na previsão climática frente à variabilidade da série histórica (a banda cinza representa a amplitude definida pelas cinco realizações; a linha fina interna a banda cinza é a média das cinco realizações; a linha escura grossa é a vazão observada e as linhas tracejadas são os valores mínimo e máximo da vazão mensal observada em no rio Uruguai em Itá.**

Em intervalo de tempo trimestral, a diferença entre a incerteza da previsão e a incerteza derivada dos limites mínimo e máximo da série histórica é mais clara, como mostra a Figura 14. Com exceção do trimestre em que ocorreu o enchimento de Itá, não houve nenhum trimestre em que a vazão observada não tenha ficado dentro dos limites da banda de incerteza da previsão. Este resultado é bastante positivo, porém deve se destacar que, durante o período analisado, não ocorreram vazões extraordinariamente altas ou baixas.



**Figura 14 - Incerteza das previsões com base na previsão climática em intervalo de tempo trimestral.**

Os resultados apresentados até aqui mostram que existe um potencial na utilização das previsões hidrológicas com antecedência de alguns meses baseadas nas previsões climáticas sazonais de modelos de circulação global. Entretanto, a utilização de uma técnica estatística de correção das previsões, com base nas precipitações observadas em um período anterior, pode sugerir que os resultados positivos obtidos são devidos, unicamente, à técnica de correção, e não à qualidade das previsões climáticas. Uma forma de repetir a análise feita até aqui, sem corrigir as previsões estatisticamente, é a comparação entre as anomalias de vazão previstas e observadas.

A anomalia observada é a diferença entre a vazão observada em um determinado mês, por exemplo junho de 2000, e a vazão média de junho, dividida pela vazão média de junho (equação 1). Assim, um mês com anomalia positiva apresentou vazão mensal superior a média e um mês com anomalia negativa, inferior a média. A anomalia pode ser expressa em números absolutos, neste caso o valor 0 indica um mês em que a vazão observada foi igual a média. Da mesma forma, a anomalia prevista é a diferença entre a vazão prevista para um determinado mês e a média das vazões previstas para aquele mesmo mês, dividida pela média (equação 2).

$$AO = \frac{QO - QMO_j}{QMO_j} \quad (1)$$

$$AP = \frac{QC - QMC_j}{QMC_j} \quad (2)$$

onde AO é a anomalia observada; AP a anomalia prevista; QC a vazão calculada; QO a vazão observada;  $QMO_j$  é média das vazões observadas no mês j; e  $QMC_j$  é a média das vazões previstas no mês j.

Em outras palavras, a anomalia de vazão prevista é o desvio relativo da vazão prevista em relação à média das vazões previstas neste mesmo mês, para todos os anos em que estão disponíveis as previsões, e a anomalia de vazão observada é o desvio da vazão observada em um mês qualquer em relação à média das vazões observadas neste mesmo mês, no mesmo período de anos em que existem as previsões. Por exemplo, as previsões climáticas do modelo global do CPTEC disponíveis para este trabalho estendem-se de dezembro de 1995 ao final de 2001. Neste período, o valor médio de vazões observadas nos meses de agosto é  $2370 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ , e o valor médio



previsto com base nas previsões do CPTEC sem correção é  $447 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ . No mês de agosto de 2000 a vazão observada foi de 1247 e a vazão prevista utilizando as previsões climáticas sem correção foi de  $337 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ . A anomalia observada foi de - 0,47, ou 47% para menos, que corresponde a  $(1247-2370)/2370$  e a anomalia prevista foi de - 0,25, ou 25% para menos, que corresponde a  $(337-447)/447$ . Neste caso, o sentido da anomalia (negativo) foi previsto de forma adequada, isto é, foi previsto um mês de agosto mais seco do que o normal e isto realmente ocorreu. No entanto, a intensidade da anomalia que realmente ocorreu foi maior do que a intensidade prevista.

As anomalias previstas e observadas foram calculadas para todo o período analisado (de 1995 a 2001). A Figura 15 apresenta os resultados para as vazões mensais e a Figura 16 apresenta as médias móveis de três meses das mesmas séries. De maneira geral, as anomalias previstas e observadas tem um comportamento semelhante. Observa-se, por exemplo, que o sentido da anomalia do período relativamente úmido, com anomalias positivas, entre 1997 e 1998 foi bem previsto, embora a intensidade tenha sido subestimada. Por outro lado, o período seco, entre 1998 e 1999, foi previsto como um período de transição, que passou a ser seco apenas no final do ano de 1999.

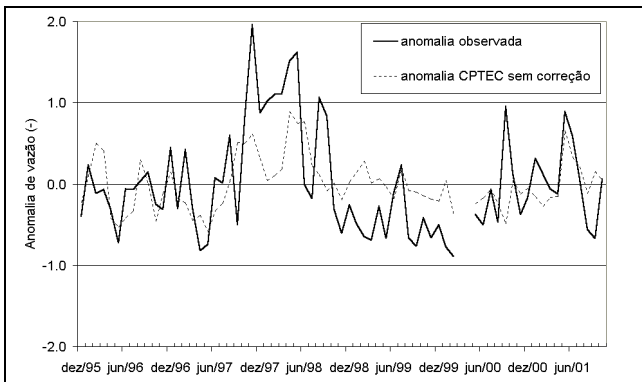


Figura 15 - Anomalia de vazão mensal observada (linha contínua) e prevista (linha pontilhada) entre dezembro de 1995 e outubro de 2001.

Evidentemente, as previsões de anomalia de vazão não são perfeitas, mas demonstram que parte da variabilidade interanual da vazão do rio Uruguai pode ser prevista por um sistema baseado em simulação hidrológica e previsões climáticas sazonais. A análise de anomalia também mostra que os bons resultados obtidos na previsão de vazão com base nas previsões de precipitação corrigidas não são

devidos a alguma tendenciosidade introduzida pelo método de correção estatístico.

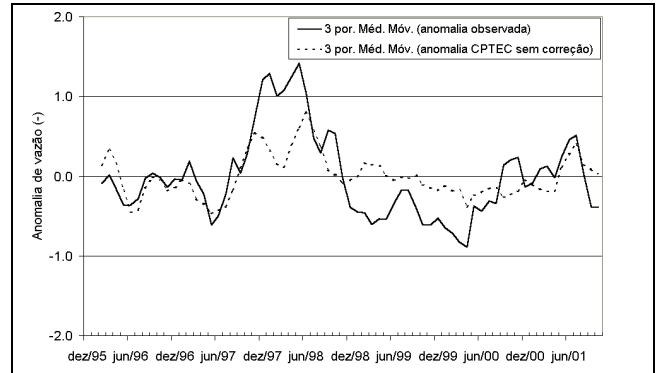


Figura 16 - Médias móveis de 3 meses das anomalias de vazão mensal observadas (linha contínua) e previstas (linha pontilhada) entre dezembro de 1995 e outubro de 2001.

Além das análises qualitativas e gráficas, os resultados também foram analisados quantitativamente, através de comparações das previsões baseadas nas previsões climáticas com a previsão mais simples e mais utilizada, baseada nas médias mensais de longo período.

Uma estimativa do benefício da previsão é a análise da redução da variância das previsões, considerando que o método de previsão padrão é a utilização de vazões médias mensais de longo período. A redução relativa da variância do método de previsão baseado na previsão climática, em relação ao método baseado nas médias históricas, é dada pela equação abaixo:

$$RV = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (QC_i - QO_i)^2}{\sum_{i=1}^n (QM_i - QO_i)^2} \quad (3)$$

onde n é o número de meses ou trimestres; QC é a vazão calculada pelo método baseado na previsão climática; QM é a vazão estimada com base nas médias mensais e QO a vazão observada. O valor de RV é igual a 1 (ou 100%) se todas as vazões previstas (QC) forem iguais às observadas (previsão perfeita); maior do que zero se as previsões com base na previsão climática forem melhores do que as previsões com base nas médias históricas e menor do que zero no caso inverso.

Considerando o período de junho de 1999 a outubro de 2001, a redução de variância obtida através das previsões de vazão baseadas na previsão climática corrigida foi de 0,15. Isto significa que o método de previsão baseado na previsão climática reduz 15% da variância da previsão original, baseada nas médias históricas. Durante o mesmo período, porém sem incluir os meses cujos dados são duvidosos em função do enchimento dos reservatórios de Itá e Machadinho (dezembro de 1999, janeiro e fevereiro de 2000; agosto e setembro de 2001), a redução de variância chega a 37%. Assim, pode-se afirmar que, neste período, a utilização da previsão climática para a previsão hidrológica é 37% melhor do que a previsão estatística baseada nas médias históricas.

Analisando as previsões em intervalo de tempo trimestral, o que é mais adequado, tendo em vista que as previsões são sazonais e não mensais, o índice de redução de variância chega a 50% considerando apenas os trimestres que não sofreram influência do enchimento dos reservatórios.

É importante destacar que o rio Uruguai apresenta um caso extremo no contexto brasileiro, no que se refere à previsibilidade. Modelos estatísticos de previsão de vazão baseados em autocorrelação das séries (modelos ARMA) em geral tem desempenho igual ao das médias ou medianas históricas para horizontes de previsão superiores a um mês nesta bacia, contrastando com outras bacias do centro do país, que apresentam maior memória e maior sazonalidade.

## CONCLUSÕES

As *previsões de precipitação* do modelo global do CPTEC apresentam um erro sistemático (subestimativa) na bacia do rio Uruguai. Esta conclusão reforça as conclusões de trabalhos anteriores, em que se percebeu que este modelo subestima a precipitação em toda a região sul (Nobre et al., comunicação pessoal).

A distribuição geográfica da chuva prevista pelo modelo é bastante diferente da distribuição geográfica da chuva observada. Enquanto a chuva gerada pelo modelo tem uma tendência crescente de oeste para leste, a chuva observada tem uma tendência crescente de leste para oeste. No extremo leste da bacia, na região serrana do Rio Grande do Sul e de Santa Catarina, o erro médio da chuva prevista é relativamente pequeno. No centro e no oeste da bacia, no entanto, o erro da chuva média anual

prevista é muito grande. Em algumas regiões o erro supera 1000 mm.ano<sup>-1</sup>. Em resumo, o modelo está prevendo pouca chuva principalmente no centro e no oeste da bacia.

Apesar do modelo global do CPTEC prever razoavelmente bem a variabilidade interanual da precipitação, o modelo está prevendo mal a distribuição temporal da chuva entre as estações do ano. Os maiores erros ocorrem no período de inverno, quando as previsões subestimam, sistematicamente, a precipitação sobre a bacia do rio Uruguai. Este período corresponde ao período de menor demanda de evapotranspiração na bacia e, em consequência, é o período em que ocorrem as maiores vazões médias. A subestimativa da chuva prevista neste período afeta profundamente os resultados da previsão hidrológica.

Utilizando uma técnica de correção empírica dos valores de precipitação previstos pelo modelo climático global do CPTEC, foi possível reduzir os erros sistemáticos da previsão de precipitação. Os resultados mostram que a metodologia baseada na combinação do modelo hidrológico e das previsões climáticas corrigidas permitiu reduzir o erro de previsão de vazão (redução de variância) em 54%, em relação às previsões baseadas nas médias mensais de longo período, considerando o intervalo trimestral. Em intervalo de tempo mensal a redução da variância foi de 37%.

Mesmo sem a correção das previsões de precipitação, a anomalia da vazão observada em cada mês e em períodos trimestrais é razoavelmente bem prevista pela combinação do modelo de previsão climática e do modelo hidrológico.

As previsões de vazão sazonal, resultantes da utilização das previsões de clima, apresentam-se na forma de conjuntos (*ensembles*) de hidrogramas. Assim, a previsão da vazão futura é gerada com uma estimativa de incerteza. Os resultados mostram que os limites mínimo e máximo da banda de incerteza desta previsão definem uma região mais estreita do que a banda definida pelos registros mínimo e máximo da série histórica.

Em sistemas de tomada de decisão, baseados em métodos estocásticos, os conjuntos de previsão poderão substituir os hidrogramas da série histórica (Faber e Stedinger, 2001), como são utilizados atualmente.

Os resultados obtidos neste trabalho indicam, portanto, que já existe um forte potencial de utilização das previsões de modelos de previsão climática sazonal em recursos hídricos. Este potencial deverá aumentar à medida que a previsão numérica de tempo e clima se desenvolve.

O trabalho atual deverá ser continuado, analisando previsões de modelos climáticos regionais (*downscaling*) e analisando os resultados das previsões em outras bacias.

## AGRADECIMENTOS

Agradecemos o apoio da Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) para a realização deste trabalho de pesquisa; do CNPq, que concedeu a bolsa de doutorado que manteve o último autor durante o início desta pesquisa; do CPTEC do INPE e aos revisores anônimos pelas sugestões.

## REFERÊNCIAS

- BONATTI, J. P. and V. B. RAO, 1987: Moist Baroclinic Instability in the Development of North Pacific and South American Intermediate-Scale Disturbances. *J. Atmos. Sci.*, 44, 2657-2667.
- COLLIER, C. G.; KRZYSZTOFOWICZ, R. 2000 Quantitative precipitation forecasting. *Journal of Hydrology* Vol. 239 pp. 1-2.
- COLLISCHONN, W. 2001 *Simulação hidrológica de grandes bacias*. Tese de Doutorado. IPH UFRGS.
- COLLISCHONN, W.; TUCCI, C. E. M. 2001 Simulação hidrológica de grandes bacias. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*. Vol. 6 No. 1.
- COLLISCHONN, W.; TUCCI, C. E. M. 2002 Previsão sazonal de vazão na bacia do rio Uruguai 1: Calibração de um modelo hidrológico distribuído. Submetido para publicação na *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*.
- FABER, B. A.; STEDINGER, J. R. 2001 Reservoir optimization using sampling SDP with ensemble streamflow prediction (ESP) forecasts. *Journal of Hydrology* Vol. 249 pp. 113-133.
- GALVÃO, C. O. 1999 *Aplicabilidade em recursos hídricos da previsão de precipitação de longo prazo no nordeste do Brasil*. Tese de Doutorado. Instituto de Pesquisas Hidráulicas. UFRGS. Porto Alegre. 151 p..
- GRIMM, A. M., S. E. T. FERRAZ e J. GOMES, 1998: Precipitation anomalies in Southern Brazil associated with El Niño and La Niña events. *J. Climate*, 11, 2863-2880.
- HOLLINGSWORTH, A. 2003 Improvements in the skill of numerical weather prediction with global models. *Bulletin World Meteorological Organization*, volume 52, nº1, pag 33-39.
- KUO, H. L., 1974: Further Studies of the Parametrization of the Influence of Cumulus Convection on Large Scale Flow. *J. Atmos. Sci.*, 31, 1232-1240.
- MARENGO, J.,; I CAVALCANTI, I.; P. SATYAMURTY, P.; I. TROSNIKOV, I.; C. NOBRE, C.; J. BONATTI, J.; H. CAMARGO, H. G. SAMPAIO, G.; M. SANCHEZ, M.; A. MAANZI, A.; CAC CASTRO, C. A. C.; C D' ALMEIDA, C. , 20022003: Ensemble simulation of regional rainfall features in the CPTEC-COLA atmospheric GCM. Skill and predictability assessments and applications to seasonal climate prediction. Accepted for publication in *Climate Dynamics*.
- PEZZI L. P., CAVALCANTI I. F. A.; 2001: The relative importance of ENSO and tropical Atlantic sea surface temperature anomalies for seasonal precipitation over South America: a numerical study. *Climate Dynamics* , Vol. 17: (2-3) 205-212 .
- ROCHA, H.R. DA,; C.A. NOBRE, ; J.P. BONATTI, ; I. R. WRIGHT; and P. J. SELLERS, 1996: A vegetation-atmosphere interaction study for Amazonia deforestation using field data and a "single column" model. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, 122, 567-594.
- SELLERS. P. J., RANDALL, D., COLLATZ, G., BERRY, J., FIELD, C., DAZLICH, D. A., ZHANG, C., COLLELO, G., BOUNOUA, L., 1996: A revised land-surface parameterization (Sib2) for atmospheric GCMs. Part I. Model formulation. *J. of Climate*, Vol. 9, pp. 676-705.
- TOTH, Z. and E. KALNAY, 1997: Ensemble forecasting at NCEP and the breeding method. *Mon. Wea. Rev.*, Vol. 125, pp. 3297-3319.

### *Seasonal Flow Forecasting in the Uruguay River Basin 2: Climatic-Hydrologic Forecasting*

#### **ABSTRACT**

*Forecasts of major hydrological variables, such as river flow, can be improved by using forecasts given by*

*models that predict climate or weather, along with a hydrological model of the rainfall-runoff process. However, forecasts of this kind have not been used operationally because models that forecast weather or climate have historically provided forecasts with relatively large errors, especially for precipitation. It is expected that current developments in forecasting, both in terms of the models themselves and of the computational infrastructure they require, will give better quantitative precipitation forecasts for water resource planning, especially on a large scale. This paper describes a procedure for predicting seasonal flow in the basin of the River Uruguay, based on rainfall forecasts given by the CPTec-INPE climate model, along with a large-basin hydrological model for transforming rainfall sequences into flow estimates. Forecasts of flow in the Uruguay river have been performed retrospectively for the 1995-2001 period, and the results obtained have been compared to observed flows and to forecasts obtained by traditional methods using monthly means or medians. The results show that the global climate model underestimates rainfall over almost the entire basin, particularly in winter; however this model provides a relatively good description of inter-annual variation of regional rainfall. Moreover, if corrected by a statistical procedure, rainfall forecasts yield flow forecasts that are significantly better than those obtained by using monthly means or medians*

*Key-words: seasonal flow, hydrologic model.*