

Metodologia para Previsão Sazonal de Vazões na Bacia do Alto Rio São Francisco, Incorporando as Estimativas das Prováveis Trajetórias Temporais de Precipitação Associadas às Condições de Indicadores Climáticos

Eber José de Andrade Pinto

CPRM – Serviço Geológico do Brasil

eber@bh.cprm.gov.br

Mauro Naghettini

Escola de Engenharia UFMG

naghet@netuno.lcc.ufmg.br

Magda Luzimar de Abreu

Instituto de Geociências UFMG

magda@csr.ufmg.br

Recebido: 03/04/06 – revisado: 12/07/06 – aceito: 28/09/06

RESUMO

Este artigo apresenta uma proposta metodológica para definição das prováveis trajetórias de precipitação para aplicação da técnica ESP (Extended Streamflow Prediction) na bacia do Alto São Francisco. A metodologia visa utilizar os resultados de um modelo de previsão probabilística, por categorias, de precipitações semestrais que usa como preditores alguns indicadores climáticos, tais como, anomalias de temperatura da superfície do mar em diferentes regiões dos oceanos e o índice de Oscilação Sul (SOI). As previsões desse modelo são empregadas para estabelecer uma curva de frequência para cada ano em que se realiza a previsão e, a partir dela, gerar as trajetórias de precipitações a serem simuladas. A idéia básica da definição da curva anual de frequência é a de que a variável aleatória, precipitação semestral, é oriunda de uma distribuição mista de probabilidades, cujas ponderações marginais são os resultados do modelo de previsão probabilística por categorias. A curva anual de frequência permite a estimativa das alturas de chuva semestrais associadas a diferentes probabilidades de excedência, as quais são distribuídas temporalmente por meio de hietogramas adimensionais. As trajetórias de precipitação são utilizadas como entradas do modelo chuva-vazão MSD-30, em intervalo mensal. A verificação dos resultados da previsão de longo termo de vazões mensais em cinco estações fluviométricas da bacia do Alto São Francisco foi realizada comparando os índices de Half-Brier calculados para as vazões simuladas e os obtidos caso fosse utilizada apenas a previsão climatológica. Além disso, também foi avaliada a confiança das previsões realizadas, a qual é definida como a probabilidade das vazões mensais observadas estarem contidas em intervalos de previsão. Os resultados alcançados mostraram que a metodologia elaborada para a definição da entrada de dados da técnica ESP representa um avanço, pois permite incorporar, no cálculo da curva de frequência, as informações dos indicadores climáticos, não levando em consideração a simplificação usual de que as observações do passado são equiprováveis de ocorrer no futuro, pois a curva de frequência irá se alterar em função das informações dos indicadores climáticos.

Palavras-chave: previsão hidrológica; Extended Streamflow Prediction (ESP); distribuições mistas.

INTRODUÇÃO

As primeiras experiências de previsão hidrológica certamente ocorreram nas civilizações do mundo antigo. Rodda e Rodda (2000) sugerem, como exemplos, a antecipação da notícia da chegada das cheias no baixo curso do rio Nilo, bem como, já no século XIII, as tentativas de controle dos níveis

dos rios holandeses, a partir de observações pontuais de montante (Naghettini *et al.*, 2001).

As previsões hidrológicas podem ser classificadas em diversas categorias, quando se considera o período de antecedência de realização. Lettenmaier e Wood (1993) apresentam o período de 7 dias como limite para as previsões de curta duração, e de 7 dias a 1 ano, no caso de circunstâncias favoráveis, para previsões de longo termo. Tucci (2002) define

o período de horas, ou poucos dias, para a previsão de curta duração e de um a alguns meses de antecedência para previsão de médio termo. WMO (1983) delimita a previsão de longo termo quando a antecedência é maior que 10 dias e previsão hidrológica sazonal como aquela realizada para um período ou estação do ano. As previsões hidrológicas de longo termo são realizadas para durações específicas, quais sejam, vazões anuais, sazonais ou mensais. Como essas previsões se estendem por um espaço de tempo maior que as previsões meteorológicas, a possibilidade de erros aumenta, em função de outros fatores intervenientes não previstos. Por isso, é comum que as previsões de longo termo sejam expressas em termos estatísticos.

Dentre os métodos para a realização das previsões de longo termo de vazões, destaca-se o uso de modelos hidrológicos conceituais. Esses podem ser utilizados na previsão de longo termo com a execução repetida do modelo utilizando como dados de entrada séries climáticas históricas ou sintéticas. Os resultados de saída do modelo podem ser ajustados a uma distribuição de probabilidade, permitindo que se faça a previsão de vazão associada a uma probabilidade de excedência. Além disso, a média da distribuição empírica de probabilidade pode ser usada como a previsão mais esperada. Essa técnica é comumente aplicada e conhecida como *Extended Streamflow Prediction* (ESP), consistindo na transformação das condições meteorológicas, observadas no passado, em trajetórias de vazões por meio de modelos conceituais de simulação chuva-vazão. Os cenários históricos utilizados nas simulações são considerados equiprováveis e geram séries sintéticas de vazões futuras que podem ser analisadas estatisticamente.

A principal vantagem da técnica ESP é a possibilidade de se avaliar diferentes cenários hipotéticos, além de proporcionar a geração de séries temporais de vazões, úteis no gerenciamento dos recursos hídricos. A desvantagem desses métodos é que são trabalhosos, necessitando da estimativa de um grande número de parâmetros. Lettenmaier e Wood (1993) afirmam que os erros causados por uma estimativa pouca adequada dos parâmetros do modelo de simulação chuva-vazão não podem ser eliminados se não houver um procedimento de atualização de previsão.

Nos últimos anos, as previsões climáticas estão sendo utilizadas em conjunto com os modelos hidrológicos para se realizar as previsões de médio e longo prazo. Essa abordagem apresenta duas vertentes principais. A primeira está relacionada à previsão das condições climáticas futuras a partir de indica-

dores de anomalias e simulação de dados históricos associados às condições previstas. A outra vertente se refere à utilização conjunta de modelos de previsão climática, tais como o modelo global do CPTEC (Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos - <http://www.cptec.inpe.br>), e os modelos de simulação hidrológica. Esse enfoque determina o desenvolvimento de modelos de simulação hidrológica para a escala das grandes bacias, uma vez que as saídas dos modelos de previsão climática são células com áreas maiores que 1600 km². Nesse contexto, um grupo de pesquisa que se destaca é o *Land Surface Hydrology Research Group*, do Departamento de Engenharia Civil e Ambiental da Universidade de Washington, nos Estados Unidos (<http://www.hydro.washington.edu>), que atualmente é responsável pelo desenvolvimento e a manutenção da versão oficial do modelo VIC-2L. No Brasil, destaca-se o modelo desenvolvido por Collischonn (2001), cuja estrutura se baseia nos modelos LARSIM e VIC-2L, e é composto dos módulos de balanço de água no solo; evapotranspiração; escoamentos superficial, sub-superficial e subterrâneo na célula; assim como o de escoamento na rede de drenagem. Os estudos de utilização de previsões climáticas para realização de previsões hidrológicas também vêm sendo desenvolvidos no Brasil. Como exemplos podem ser mencionados os trabalhos realizados pelo Instituto de Pesquisas Hidráulicas (IPH-UFRGS), o Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas da Universidade de São Paulo (USP) e a Fundação Cearense de Meteorologia e Recursos Hídricos (FUNCEME).

O ajuste dos modelos de simulação para previsão também pode ser realizado pelo acompanhamento das medições das variáveis de estado, para comparação com os valores simulados pelo modelo. A escolha apropriada do procedimento de ajuste depende de vários fatores, tais como a sistemática de previsão, os equipamentos utilizados na coleta, transmissão e processamento dos dados, a quantidade e a qualidade dos dados disponíveis e a qualificação e experiência dos profissionais.

Quando se utiliza a análise de previsão de longo termo para vazões de estiagem deve-se levar em consideração a influência da infiltração, da evapotranspiração, da evaporação das superfícies líquidas e, principalmente, dos diversos usos dos recursos hídricos na bacia hidrográfica em foco.

Este artigo descreve uma nova metodologia para definir as trajetórias de precipitações que podem ser simuladas em um modelo chuva-vazão, bem como sua aplicação na previsão de longo termo das vazões mensais do período chuvoso (Outubro a

Março), na bacia do Alto São Francisco, incorporando algumas idéias essenciais da técnica ESP.

METODOLOGIA

A metodologia proposta visa utilizar os resultados do modelo de previsão probabilística, por categorias, das precipitações semestrais do alto São Francisco, descrito por Pinto *et al.* (2006), em um segundo artigo no presente número desta revista, para estabelecer uma curva de frequência para cada ano em que se realiza a previsão e, a partir dela, gerar as trajetórias de precipitações a serem simuladas. A idéia básica da definição da curva anual de frequência é a de que a variável aleatória, precipitação semestral do Alto São Francisco, possui uma distribuição mista de probabilidades. A função mista de densidade de probabilidade (fdp) resulta da soma ponderada das densidades das distribuições de probabilidades associadas às categorias, normal, acima e abaixo do normal, na qual os ponderadores são os resultados do modelo de previsão probabilística, por categorias, das precipitações semestrais. Dessa maneira, é possível estabelecer, para o ano em que se realiza a previsão, a curva de frequência da altura de precipitação semestral a partir das condições dos indicadores climatológicos utilizados como preditores no modelo de previsão probabilística, por categorias, das chuvas semestrais. Após a definição da curva anual de frequência, estimam-se as alturas de chuva semestrais associadas a diferentes probabilidades de excedência. Esses totais semestrais de precipitação são distribuídos temporalmente por meio de hietogramas adimensionais, os quais também podem ser associados a várias probabilidades de ocorrência. Assim, é possível definir n trajetórias de precipitação para simulação em um modelo de simulação hidrológica. O número de trajetórias a serem simuladas é estabelecido pelo previsor, que definirá quais quantis de precipitação semestral serão utilizados, bem como o número de hietogramas adimensionais a serem usados para efetuar a distribuição temporal dos quantis. Em regiões, onde se verifica a influência da Oscilação Sul sobre a distribuição temporal das precipitações, os hietogramas adimensionais podem estar associados às fases da Oscilação Sul (OS), permitindo, assim, que as previsões sejam realizadas considerando a possibilidade de ocorrência das três fases da OS.

O método consiste em utilizar as previsões por categoria do modelo de previsão consensual das precipitações do período chuvoso (Pinto, 2005 e

Pinto *et al.* 2006), para definir as prováveis trajetórias de precipitações que serão utilizadas no modelo MSD-30 de simulação mensal chuva-vazão. Esse modelo é uma simplificação do modelo RIO GRANDE elaborado por Naghettini *et al.* (2002) e foi desenvolvido por Fernandes *et al.* (2003) para simular vazões mensais a partir dos dados mensais de precipitação espacial e evaporação da bacia em análise. Na essência, a metodologia, aqui proposta, faz uso das estimativas dos totais precipitáveis e de suas distribuições ou trajetórias temporais.

Em relação aos totais precipitáveis, a idéia é admitir que a distribuição da variável aleatória contínua de alturas de precipitação de outubro a março do Alto São Francisco, X , é uma distribuição mista, ou seja, tem o seu comportamento probabilístico descrito por uma composição de m distribuições, denotadas por $f_i(x)$, ponderadas por parâmetros

λ_i , com $i = 1, 2, \dots, m$, tais que $\sum_{i=1}^m \lambda_i = 1$. Nesse caso,

a função densidade de probabilidades de X , do tipo mista, é dada por:

$$f_X(x) = \sum_{i=1}^m \lambda_i f_i(x) \quad (1)$$

A função acumulada de probabilidades é expressa por

$$F_X(x) = \int_{-\infty}^x \sum_{i=1}^m \lambda_i f_i(x) dx \quad (2)$$

A distribuição mista da precipitação semestral do Alto São Francisco pode ser a soma das distribuições associadas às categorias abaixo do normal, normal e acima do normal. Como as previsões obtidas na combinação linear ótima descrita em Pinto (2005) e Pinto *et al.* (2006) são probabilidades de ocorrência nas três categorias, esses resultados podem ser adotados como sendo os pesos λ_i . Assim, para cada semestre em que se realize uma previsão, será obtida uma curva de frequência que adota os resultados da previsão probabilística por categorias na sua elaboração. Em outras palavras, essa abordagem permite incorporar, no cálculo da curva de frequência, as informações dos indicadores climáticos e, além disso, não considera que as observações do passado são equiprováveis de ocorrer no futuro, pois a curva de frequência irá se alterar em função das informações dos indicadores climáticos.

Além dos resultados do modelo probabilístico por categorias para as precipitações do Alto São

Francisco (Pinto, 2005 e Pinto *et al.*, 2006), é preciso definir as distribuições de probabilidade que melhor se ajustam às precipitações do semestre chuvoso do Alto São Francisco. Para tanto, é necessária a realização de estudos de análise de frequência, considerando as séries com os valores de totais pluviométricos classificados como abaixo do normal, normal e acima do normal. Sendo assim, a primeira etapa consiste na montagem das séries por categorias. Após o ordenamento decrescente, os limites para o estabelecimento das séries por categoria são: Acima do normal (Percentil 71-100); Normal (Percentil 31-70) e Abaixo do normal (Percentil 0-30).

A análise de frequência pode ser realizada com uma série da precipitação média sobre o Alto São Francisco ou por um estudo de regionalização. Geralmente, ao se dividir as séries em categorias, elas podem ter sua extensão muito reduzida. Assim, é aconselhável que se faça uma análise de frequência regional para incorporar o máximo de informações disponíveis.

Na metodologia proposta, foi aplicado o método *Index-flood*, por facilitar os trabalhos de ajuste de uma distribuição teórica de probabilidades aos dados adimensionais regionais. Nesse caso, empregou-se o método de regionalização *Index-flood*, com inferência estatística por momentos-L e emprego das estatísticas-L, desenvolvidas por Hosking e Wallis (1997).

Hosking e Wallis (1997) desenvolveram as três estatísticas-L para serem utilizadas nas etapas de consistência de dados, delimitação de regiões homogêneas e seleção da distribuição de probabilidades regional com o objetivo de minimizar as incertezas e subjetividades dessas etapas.

A medida de discordância D_i , definida em termos dos momentos-L dos locais estudados, procura identificar as estações que são grosseiramente discrepantes das características médias regionais.

Hosking e Wallis (1997) sugerem os valores críticos de D_i e recomendam o uso dessa estatística somente quando $N \geq 7$. Em regiões com mais de 15 estações, uma delas é discordante quando $D_i \geq 3$.

A medida de heterogeneidade H tem por objetivo verificar o grau de heterogeneidade de uma região por meio da comparação da variabilidade amostral observada e a variabilidade esperada de uma região homogênea, a qual é simulada através do método de Monte Carlo.

De acordo com Hosking e Wallis (1997), numa região homogênea todas as estações com as séries adimensionalizadas dispõem dos mesmos

momentos populacionais. Porém, devido à variabilidade amostral, os seus momentos amostrais são diferentes.

Os critérios de classificação propostos por Hosking e Wallis (1997) são:

- $H \leq 1,0 \Rightarrow$ região “aceitavelmente homogênea”
- $1,0 \leq H < 2,0 \Rightarrow$ região “possivelmente heterogênea”
- $H \geq 2,0 \Rightarrow$ região “definitivamente heterogênea”

O teste de aderência Z , sugerido por Hosking e Wallis (1997), auxilia na escolha da distribuição de frequência apropriada para a estimação dos quantis regionais e consiste de uma estatística-L, denotada por Z , para verificar se a distribuição candidata fornece um bom ajuste aos dados regionais, isto é, se os momentos-L médios regionais são coerentes com os da distribuição candidata. Se $|Z^{\text{DIST}}| \leq 1,64$, a distribuição é apropriada. Os detalhes sobre a construção das estatísticas-L podem ser encontrados em Hosking e Wallis (1997). Após a discriminação das distribuições candidatas aceitáveis, devem ser plotados, no diagrama de Assimetria-L e Curtose-L ($\tau_3 \times \tau_4$), o ponto médio regional da assimetria-L e da curtose-L (t_3 e t_4), e verificada, graficamente, a aderência da distribuição ajustada.

A definição das trajetórias temporais está associada aos resultados da análise da influência da Oscilação Sul ou outro fenômeno de larga escala na distribuição temporal das precipitações do período chuvoso do Alto São Francisco. A existência dessa influência irá certamente se manifestar nos hietogramas acumulados adimensionais associados às fases da Oscilação Sul (OS), os quais representam as trajetórias temporais para diferentes percentis relacionados às fases quente, fria e neutra da OS.

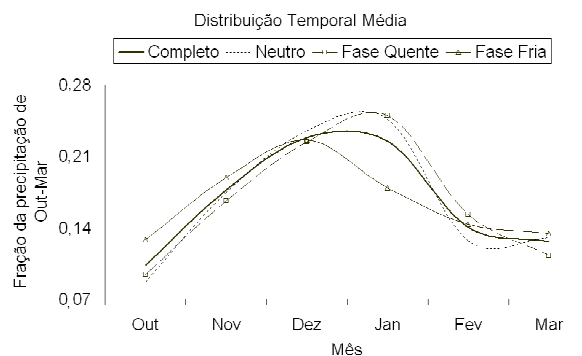


Figura 1 – Distribuição temporal das precipitações

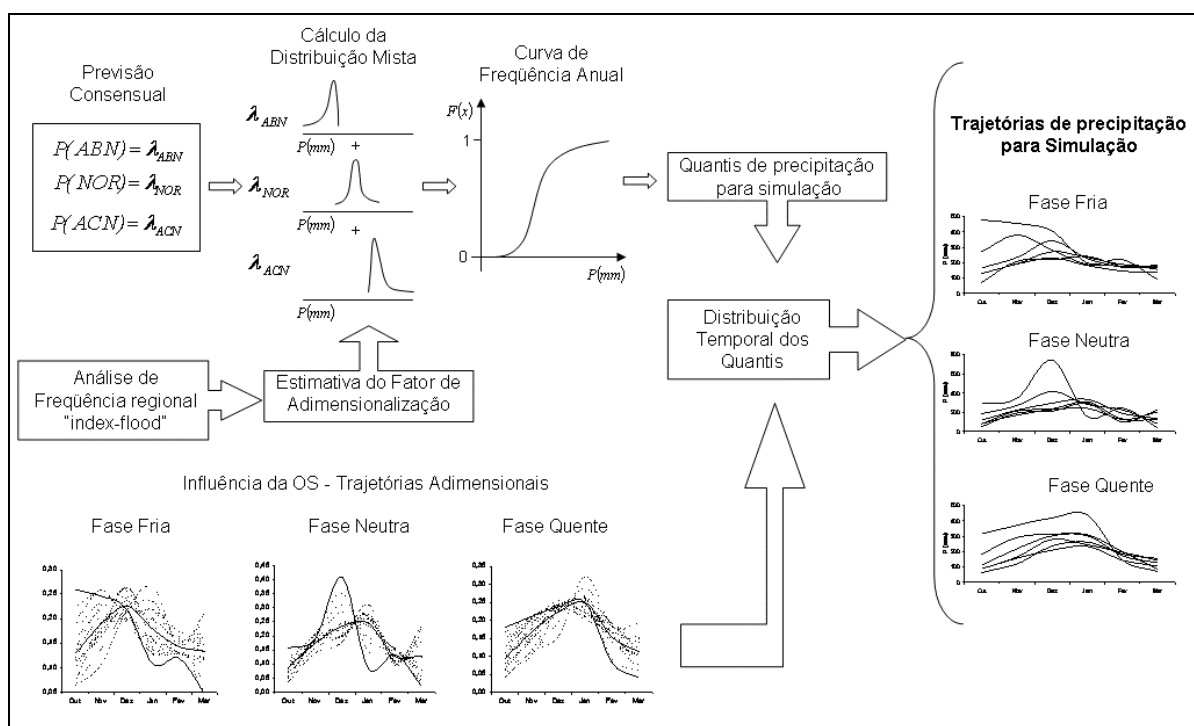


Figura 2 – Esquema de definição das trajetórias de precipitações

O gráfico da Figura 1, obtido por Pinto (2005), mostra as distribuições temporais médias das precipitações do Alto São Francisco associadas às fases da OS.

Finalmente, a definição das trajetórias de precipitação, as quais são utilizadas como entradas do modelo mensal chuva-vazão MSD-30, é realizada distribuindo temporalmente os diferentes quantis da distribuição de probabilidades das precipitações de outubro a março do Alto São Francisco. As distribuições temporais podem ser estimadas para diferentes percentis. Assim, o número total de trajetórias a serem simuladas no modelo MSD-30 é o resultado do produto da quantidade de quantis de precipitações calculados pelo número de percentis de distribuição temporal utilizados.

A Figura 2 mostra um esquema com as etapas necessárias para a definição das trajetórias de precipitação que podem ser simuladas pelo MSD-30 ou por outro modelo de características similares.

RESULTADOS

A metodologia descrita anteriormente foi aplicada na bacia do Alto São Francisco. Essa bacia situa-se na região central do Estado de Minas Gerais, abrangendo uma área da ordem de 90.000km² entre as nascentes do rio São Francisco e a foz do rio das Velhas, correspondendo aproximadamente às latitudes 17°20' e 20°40' Sul e longitudes 43°30' e 46°20' Oeste. Essa região engloba, além do alto rio São Francisco, todos os seus afluentes até foz do rio das Velhas, sendo os principais tributários os rios Paraopeba, Pará, Indaiá, Borrachudo, Abaeté e Velhas.

A Figura 3 apresenta a localização da bacia do Alto São Francisco no Estado de Minas Gerais. Maiores informações sobre as características climáticas da região em estudo estão apresentadas em Pinto *et al.* (2006).

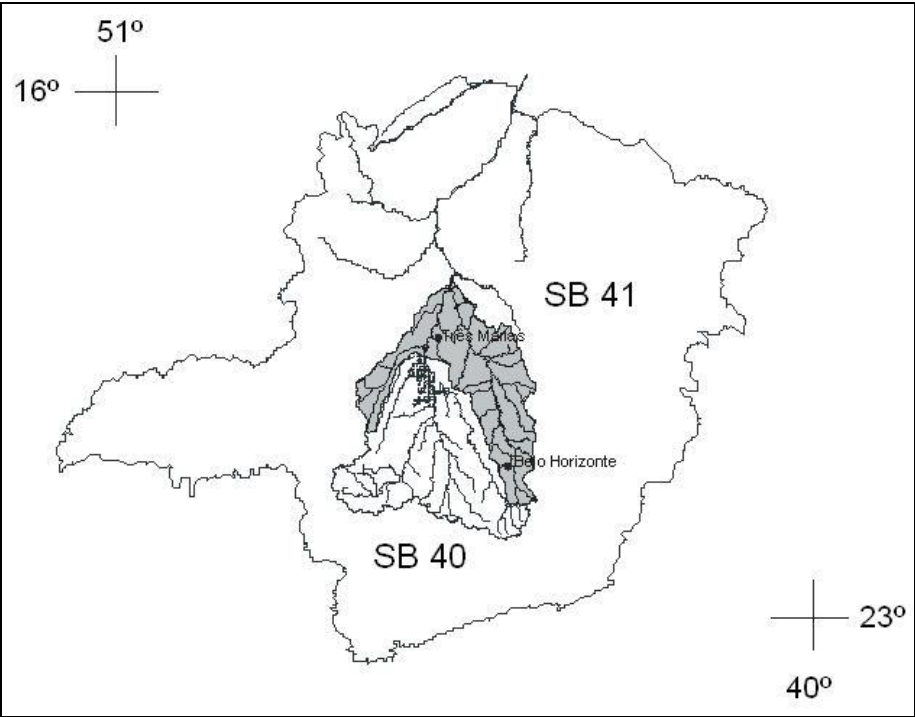


Figura 3 – Localização da bacia do Alto São Francisco

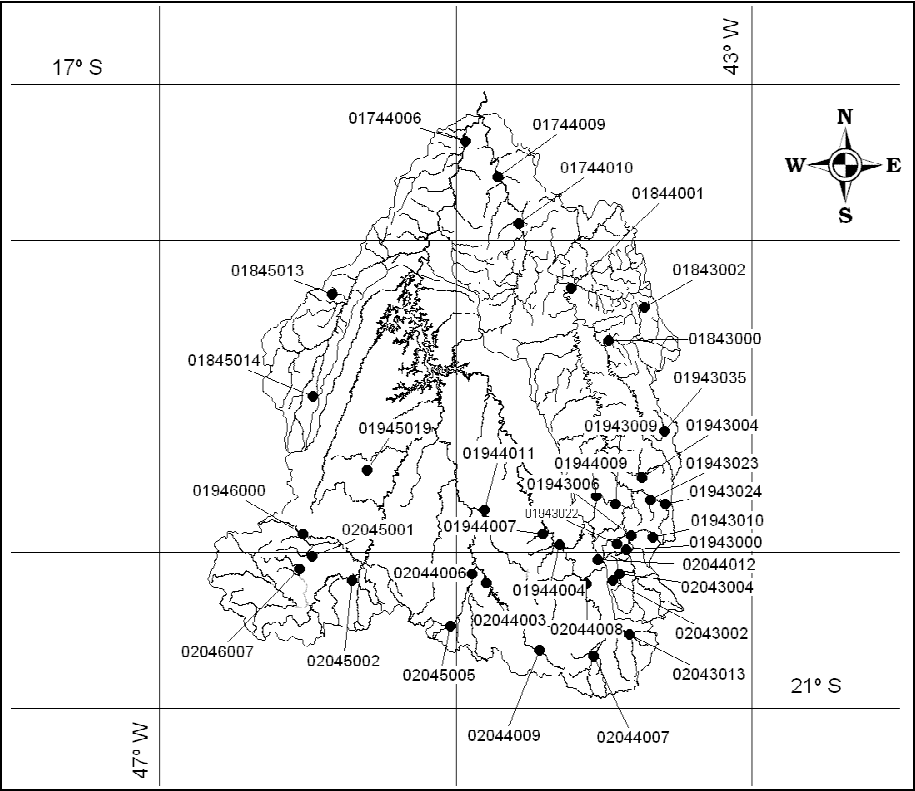


Figura 4 – Estações Pluviométricas

A metodologia, aqui proposta, conforme menção anterior, necessita das estimativas dos totais precipitáveis e a definição de suas trajetórias temporais. A estimação dos totais precipitáveis é concretizada por meio da análise de frequência regional das precipitações semestrais (Out-Mar), nas categorias normal (NOR), abaixo (ABN) e acima do normal (ACN), empregando o método *Index-flood*, com momentos-L e razões-L.

Na análise de frequência regional por categorias, foram utilizados os dados de precipitação semestral das 36 estações apresentadas na Figura 4. Os dados de cada uma das estações foram separados nas categorias normal, abaixo e acima do normal, e adimensionalizados pelo valor médio das séries categorizadas. Além da análise de frequência regional por categorias, também foi realizada uma análise regional empregando as séries completas das 36 estações para comparação dos resultados. Após a organização das informações, aplicou-se o método de regionalização *Index-flood* para as três categorias e para as séries completas.

As regiões homogêneas foram definidas em três etapas. Na primeira etapa, foi realizada uma análise de agrupamentos, ou de *clusters*, das seguintes variáveis: coordenadas de localização das estações (Lat/Long), altitude e precipitação média. A utilização da análise de agrupamento na definição de regiões homogêneas encontra-se descrita em Davis e Naghettini (2000).

Após a normalização dos dados, o método das K-médias foi executado para formar 3 grupos. A definição desse número de grupos foi realizada a partir de várias simulações com o objetivo de se obter grupos com número de estações que não fossem muito discrepantes. De início, o método foi aplicado a cada variável e, em seguida, ao conjunto altitude e precipitação média.

Em uma segunda etapa, foram plotadas as curvas empíricas adimensionais para verificação das regiões formadas na análise de agrupamento. O fator de adimensionalização utilizado foi a média das séries categorizadas. Ao final dessa etapa, alguns postos foram deslocados de uma região para outra, alterando as delimitações anteriores e formando apenas uma região homogênea para as três variáveis analisadas.

A definição final das regiões foi realizada utilizando as sub-rotinas descritas por Hosking (1991), as quais permitiram o cálculo da medida de heterogeneidade da região definida na etapa anterior. Os resultados obtidos estão na Tabela 1.

Tabela 1 – Medidas de Heterogeneidade, H

Séries	L-CV	L-CV/ Assimetria-L	Assimetria-L / Curtose-L
COMPLETAS	0,71	-1,75	-2,01
ABN	-1,68	0,12	0,63
NOR	8,52**	1,77*	1,63*
ACN	0,43	1,9*	1,2*

* possivelmente heterogênea e ** definitivamente heterogênea.

ABN: abaixo do normal. NOR: normal e ACN: acima do normal.

Mesmo com o resultado da medida de heterogeneidade da categoria Normal, que foi calculado considerando a variabilidade do L-CV, indicando que a região seria definitivamente heterogênea, admitiu-se que o Alto São Francisco, como mostrado na Figura 4, forma uma região homogênea para as três categorias. Admitiu-se essa condição pelo fato das medidas de heterogeneidade da categoria normal, calculadas com as relações entre L-CV e Assimetria-L e entre Assimetria-L e Curtose-L, indicarem uma região apenas possivelmente heterogênea. Além disso, como o objetivo é a definição da distribuição mista das precipitações semestrais, também é significativo que a verificação da heterogeneidade da região seja feita com as séries completas, conforme indicado na Tabela 1.

A seleção das distribuições de frequências regionais foi efetuada conforme a proposta de Hosking (1991). Em resumo, faz-se o ajuste das distribuições Logística Generalizada (LG), Generalizada de Valores Extremos (GEV), Log-Normal (LN-3P) ou Generalizada Normal (GN), Pearson tipo III (P-III) e Generalizada de Pareto (GP), estimando os seus parâmetros a partir dos momentos-L regionais, e aplica-se o teste de aderência entre a distribuição candidata e os dados regionais. A Tabela 2 mostra os valores das razões-L regionais obtidos a partir das séries adimensionalizadas.

Tabela 2 – Valores regionais das razões-L

Séries	l_1	L-CV (τ_2)	Assimetria-L (τ_3)	Curtose-L (τ_4)
COMP.	1	0,1115	0,1108	0,1439
ABN	1	0,0598	-0,231	0,0971
NOR	1	0,0327	0,0412	0,0313
ACN	1	0,0595	0,1915	0,0601

COMP: completo. ABN: abaixo do normal. NOR: normal e ACN: acima do normal.

A Tabela 3 apresenta os resultados dos testes de aderência para as regiões homogêneas, segundo

os critérios propostos por Hosking e Wallis (1997), ou seja, o de aceitar a distribuição candidata se $|Z^{\text{DIST}}| \leq 1,64$.

A definição final das distribuições regionais foi realizada a partir dos resultados do teste de aderência e pelo posicionamento dos valores regionais no diagrama Curtose-L x Assimetria-L apresentado na Figura 5.

Os parâmetros estimados e os limites, inferiores e superiores, das distribuições adotadas para as três categorias e as séries completas encontram-se na Tabela 4. As funções densidade de probabilidade e de distribuição acumulada da Generalizada de Pareto (GP), da Generalizada Normal (GN) e da GEV, além das inversas dessas distribuições, estão apresentadas em Hosking e Wallis (1997).

Tabela 3 – Resultados dos testes de aderência (Z)

Séries	Distribuições				
	LG	GEV	GN	P-III	GP
COMP	4,01	-1,79**	-1,45*	-2,2	-13,54
ABN	6,81	1,96**	4,1	2,74	-5,04
NOR	12,3	7,53	8,49	8,39	-1,41*
ACN	9,2	6,73	6,25	5,17	1,16*

* Distribuições aprovadas no teste com nível de significância de 5%. ** Distribuições aprovadas no teste com nível de significância de 2,5%. COMP: completo. ABN: abaixo do normal. NOR: normal e ACN: acima do normal.

Tabela 4 – Parâmetros das distribuições regionais adimensionais

Séries	Dist.	Posição	Escala	Forma	LI	LS
COMP.	GN	0,978	0,193	-0,227	0,128	∞
ABN	GEV	0,987	0,120	0,743	$-\infty$	1,149
NOR	GP	0,907	0,171	0,842	0,907	1,110
ACN	GP	0,860	0,19	0,357	0,860	1,392

COMP: completo. ABN: abaixo do normal. NOR: normal e ACN: acima do normal.

As funções densidade de probabilidade das precipitações semestrais adimensionais podem ser visualizadas na Figura 6. Nessa figura, também estão apresentadas as funções densidade de probabilidade, válidas para o Alto São Francisco. Os fatores de adimensionalização foram estimados pelas precipitações médias obtidas pelo método de Thiessen. As precipitações médias calculadas são de 1.186,3 mm, para as séries inteiras, de 924,7 mm, 1163,0 mm e 1472,3 mm, para as categorias abaixo do normal, normal e acima do normal, respectivamente.

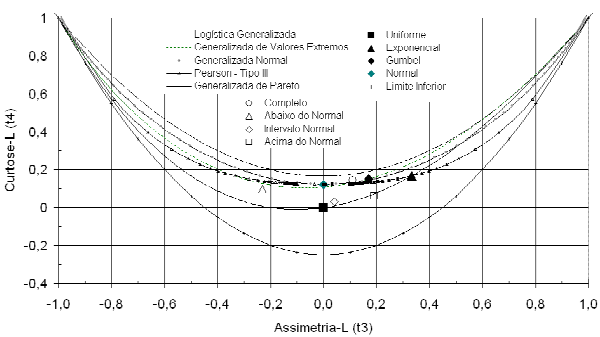


Figura 5 – Diagrama Assimetria-L x Curtose-L

Após a definição das distribuições de probabilidade associadas a cada categoria sobre o Alto São Francisco, foi possível estimar a distribuição mista de probabilidade das precipitações semestrais, ou seja, a combinação das distribuições ajustadas às três categorias utilizando os pesos λ_i , que são os resultados do modelo de previsão consensual para as precipitações, como está delineado em detalhes em Pinto (2005) e Pinto *et al.* (2006). Exemplos de curvas anuais de frequência do Alto São Francisco são apresentados na Figura 7, onde é possível compará-las com a curva resultante da análise de frequência da série completa.

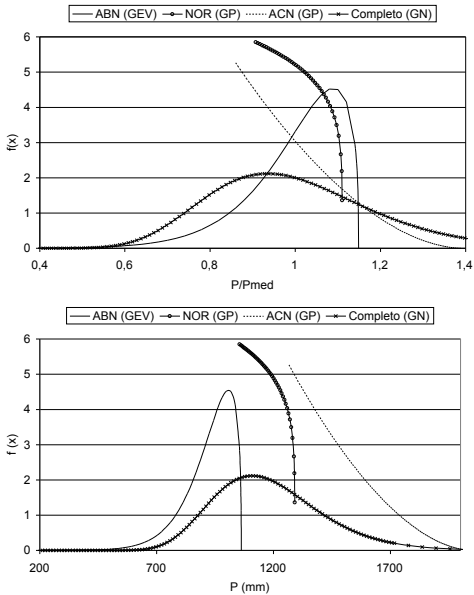


Figura 6 – Funções densidade de probabilidade

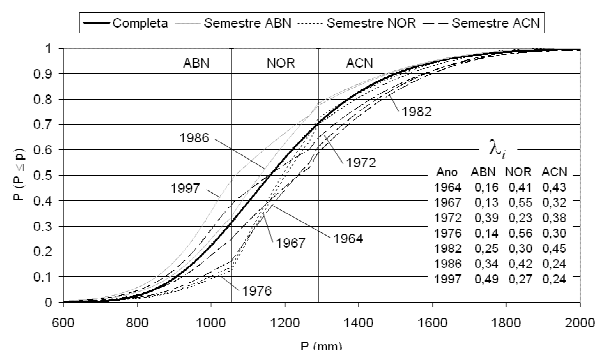


Figura 7 – Curvas anuais de frequência

A definição das trajetórias temporais está associada aos resultados da análise da influência da Oscilação Sul na distribuição temporal das precipitações do período chuvoso do Alto São Francisco. Pinto (2005) verificou que a Oscilação Sul influencia a distribuição temporal das precipitações como pode ser observado na Figura 1. Desse modo, as trajetórias temporais podem ser estimadas para diferentes percentis relacionados às fases quente, fria e neutra da OS. As Figuras 1 e 8 ilustram a visualização das trajetórias adimensionais que possibilitam a distribuição temporal dos quantis calculados com a distribuição mista de precipitações do período chuvoso do Alto São Francisco.

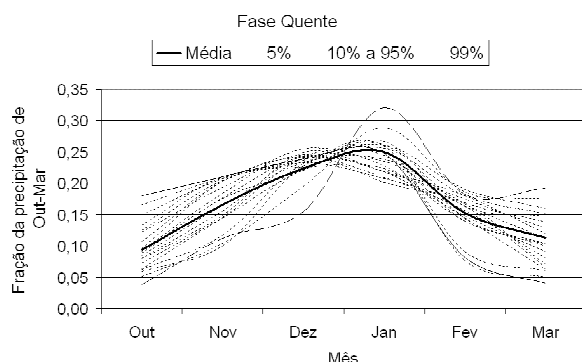


Figura 8 – Trajetórias adimensionais da fase quente da Oscilação Sul

Na aplicação da técnica ESP, após a definição das trajetórias de precipitação é necessário estimar as vazões por meio de um modelo de simulação hidrológica. Assim, o modelo de simulação mensal

chuva-vazão MSD-30 foi calibrado e validado para as áreas de drenagem das estações fluviométricas de Fazenda São Felix, no rio Borrachudo; de Porto Indaiá, no rio Indaiá; de Porto Andorinhas, no rio São Francisco; de Porto Pará, no rio Pará; e de Porto Mesquita, no rio Paraopeba. A localização dessas estações pode ser visualizada na Figura 9.

Na calibração e validação do MSD-30 são necessárias a utilização de séries de precipitação, evaporação e vazão com períodos comuns. As séries de evaporação utilizadas foram constituídas a partir dos dados de evaporação do tanque Classe A das estações de Três Marias e Porto Pará, ambas operadas pela CEMIG, e usadas, respectivamente, na simulação da sub-bacia do rio Borrachudo, em Fazenda São Félix (código 40975000), e nas demais sub-bacias. As séries pluviométricas foram obtidas a partir do cálculo das precipitações espaciais, com o uso do método de Thiessen, empregando as estações pluviométricas apresentadas na Figura 10.

Os procedimentos utilizados para a calibração e a validação dos parâmetros foram realizados, inicialmente, com a divisão das séries temporais disponíveis em duas sub-séries, uma para a calibração dos parâmetros e a outra para validação dos parâmetros.

A calibração dos parâmetros foi efetuada com os métodos automáticos do modelo na seguinte seqüência. Primeiro, os parâmetros sugeridos pelo MSD-30 foram considerados como os valores iniciais para calibração. Em seguida, a técnica de busca local de Rosenbrock (1960) e o método SCE-UA, proposto por Duan (1991), foram executados para se obter dois novos conjuntos de parâmetros. Em seguida, foram usados os valores médios dos dois conjuntos de parâmetros, estimados anteriormente, como parâmetros iniciais de uma nova execução com os métodos automáticos. Esse processo foi repetido até a obtenção de um conjunto de parâmetros que proporcionasse o maior coeficiente de Nash. Finalmente, foi feita uma análise dos resíduos, por meio dos gráficos entre as vazões observadas e simuladas, do desvio percentual com o tempo, do desvio percentual em relação às vazões observadas e da dispersão das vazões observadas com as simuladas.

A etapa da validação consistiu na simulação no MSD-30 das sub-séries separadas para esse fim, adotando-se os parâmetros definidos na calibração. A precisão da validação também foi avaliada com o coeficiente de Nash e os mesmos gráficos citados acima. Os períodos de calibração e validação aqui utilizados e os coeficientes de Nash obtidos estão na Tabela 5.

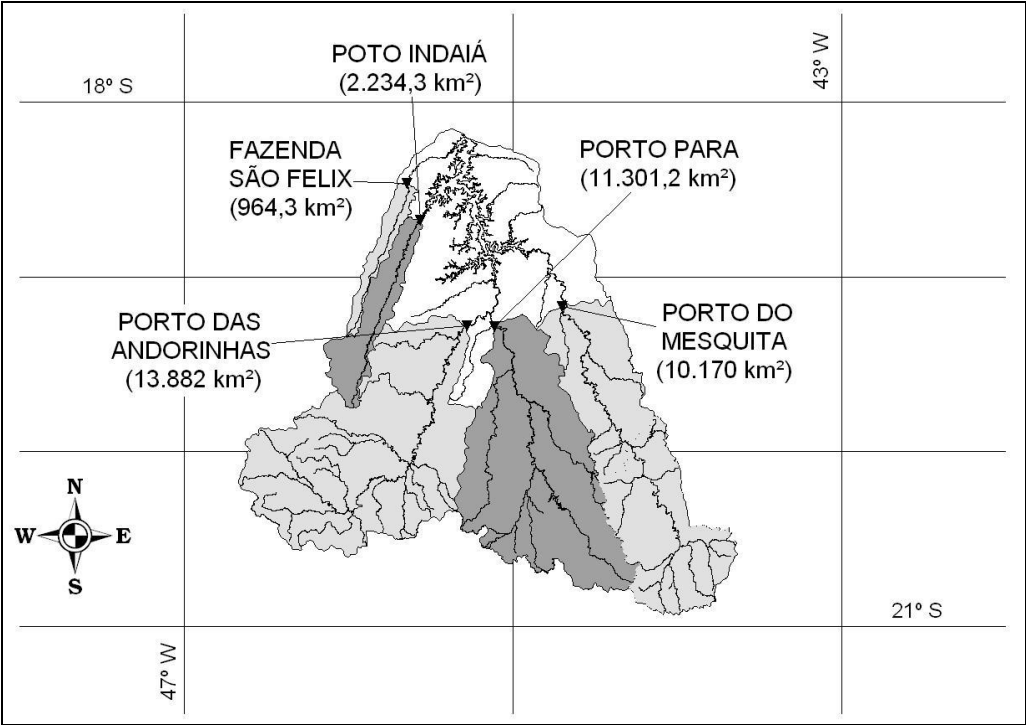


Figura 9 – Áreas de drenagem simuladas

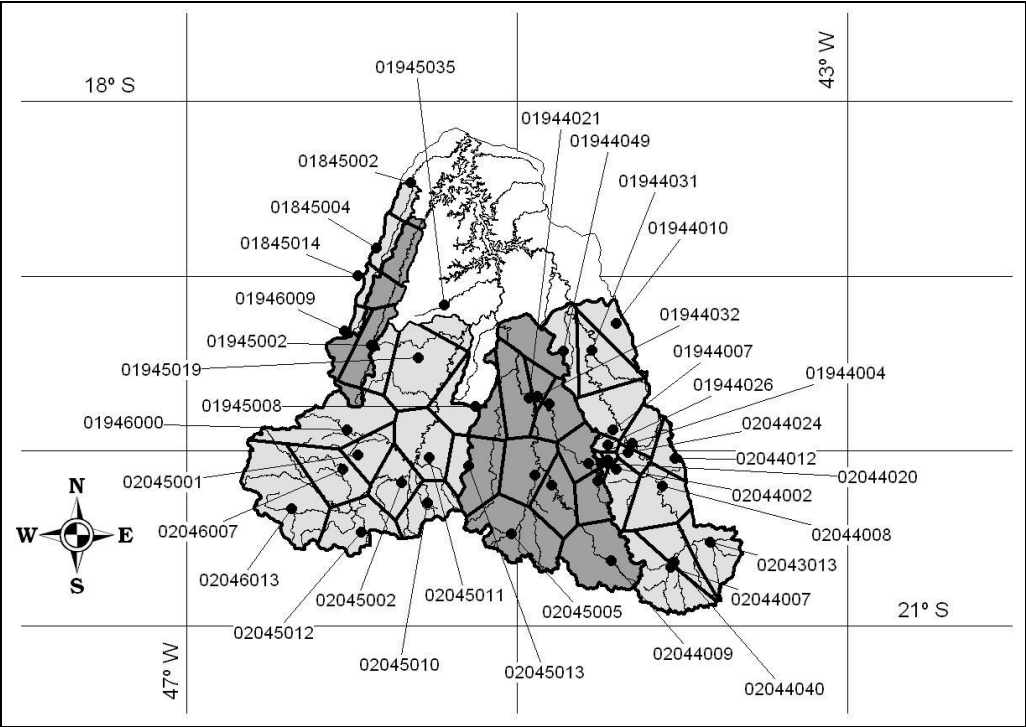


Figura 10 – Estações pluviométricas utilizadas na calibração e simulação

Após a calibração e a validação do modelo de simulação mensal chuva-vazão MSD-30, foi realizada a última etapa da técnica ESP, ou seja, a simulação das trajetórias de precipitação previstas para as áreas de drenagem das estações fluviométricas apresentadas na Figura 9. A primeira etapa consistiu no cálculo das curvas de frequência regional para cada categoria de precipitação semestral sobre as áreas de drenagem selecionadas para análise. Como foi aplicado o método de regionalização *Index-flood*, foi necessário estimar o fator de adimensionalização para definir essas curvas de frequência, no caso, as precipitações médias das três categorias sobre as áreas drenagem das estações fluviométricas.

Tabela 5 – Critérios de Nash da calibração e da validação

Estação	Critério de NASH		Período	
	Calib.	Valid.	Calibração	Validação
40975000	0,879	0,819	fev/75 a dez/81	jun/91 a dez/98
40963000	0,923	0,753	mai/77 a jan/87	out/87 a dez/94
40100000	0,816	0,761	out/74 a set/84	out/84 a dez/99
40450001	0,792	0,834	jun/70 a set/81	out/81 a dez/94
40865000	0,838	0,796	jun/70 a set/86	out/85 a dez/00

Depois da definição das distribuições de probabilidade associadas a cada categoria sobre as áreas de drenagem, foi feita a estimativa das distribuições mistas de probabilidade das precipitações semestrais, ou seja, das distribuições ajustadas às três categorias multiplicadas pelos pesos λ_i , os quais são os resultados do modelo de previsão consensual para as precipitações, conforme descrito por Pinto *et al.* (2006). Assim, foi possível calcular de out/1958 a mar/2004 uma curva de frequência para cada semestre chuvoso sobre as áreas escolhidas para simulação.

Os quantis de precipitações semestrais calculados para a simulação estão associados às probabilidades de não excedência iguais a 10%, 20%, 30%, 40%, 50%, 60%, 70%, 80%, 90% e 98%.

Como mencionado anteriormente, a definição das trajetórias temporais pode ser associada aos resultados da análise da influência da Oscilação Sul na distribuição temporal das precipitações do período chuvoso do Alto São Francisco. A partir da influência verificada por Pinto (2005), foram estima-

das as trajetórias temporais para diferentes percentis relacionados às fases quente, fria e neutra da OS. Além da trajetória de distribuição temporal média, foram utilizadas as associadas aos percentis de 5%, 10%, 15%, 20%, 25%, 30%, 35%, 40%, 45%, 50%, 55%, 60%, 65%, 70%, 75%, 80%, 85%, 90%, 95% e 99%. Alguns exemplos das trajetórias adimensionais podem ser visualizados nas Figuras 1 e 8. Assim, como são calculados dez quantis e adotadas vinte e uma distribuições temporais, foram simuladas, para cada ano de registro, 210 trajetórias de precipitações.

As simulações foram feitas no MSD-30 empregando-se os parâmetros calibrados e adotando-se as trajetórias adimensionalizadas associadas à fase da Oscilação Sul, observada no ano para o qual foi realizada a simulação. Dessa maneira, para cada semestre chuvoso simulado, foram geradas 210 trajetórias de vazões referentes aos meses de outubro a março. As condições iniciais do MSD-30, antes de principiar a simulação das trajetórias de precipitação, foram estabelecidas após uma fase de “aquecimento” do modelo, a qual compreendia a sua execução, com os parâmetros calibrados e validados para a área de drenagem, por pelo menos 6 anos de dados observados de precipitação e evaporação, antecedentes ao período de simulação.

Ao final das simulações anuais, foram realizadas análises de frequência das vazões mensais para definir a probabilidade de ocorrência nas categorias normal, acima e abaixo do normal.

A comparação entre as vazões simuladas e observadas foi realizada através do cotejo entre os índices de *Half-Brier* (Brier e Allen, 1951 *apud* Piechota *et al.* 1998) calculados para as vazões simuladas e os obtidos caso fosse utilizada apenas a previsão climatológica (probabilidade de 30% para as categorias acima e abaixo do normal; e de 40% para a categoria normal). O cálculo do índice de *Half-Brier* é feito pela equação:

$$HBS = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^r (\delta_{ij} - \phi_{ij})^2 \quad (3)$$

na qual ϕ_{ij} é probabilidade prevista de que o evento irá ocorrer na categoria j ; δ_{ij} assume o valor 1 (um) se o evento ocorreu na categoria j e 0 (zero) se não ocorreu nesta categoria; r é o número de categorias, nesse estudo são três, e n é o número de eventos previstos. Caso a previsão seja perfeita, ou seja, a probabilidade prevista seja igual a 1 para a categoria

observada, o índice de *Half-Brier*, *HBS*, terá um valor de zero.

Tabela 6 – Resultados dos índices de Half Brier

40975000 Fazenda São Felix						
	Out	Nov	Dez	Jan	Fev	Mar
HSB	0,9224	0,7667	0,6973	0,7024	0,8129	0,6526
HSB-CLI	0,6483	0,6567	0,6673	0,6600	0,6663	0,6663
N (me- ses)	24	24	22	20	19	19
NPSDC	24	22	10	19	19	0
40963000 Porto Indaia						
	Out	Nov	Dez	Jan	Fev	Mar
HSB	0,8213	0,6273	0,7148	0,5670	0,5316	0,6844
HSB-CLI	0,6622	0,6622	0,6511	0,6576	0,6650	0,6650
N (me- ses)	18	18	18	17	16	16
NPSDC	18	9	10	9	3	11
40100000 Porto Andorinhas						
	Out	Nov	Dez	Jan	Fev	Mar
HSB	0,7412	0,6278	0,7317	0,6118	0,6588	0,6143
HSB-CLI	0,6631	0,6631	0,6631	0,6680	0,6680	0,6680
N (me- ses)	26	26	26	25	25	25
NPSDC	23	13	22	12	19	2
40450001 Porto Pará						
	Out	Nov	Dez	Jan	Fev	Mar
HSB	0,6528	0,5844	0,6102	0,6056	0,6179	0,6403
HSB-CLI	0,6680	0,6680	0,6680	0,6567	0,6567	0,6567
N (me- ses)	25	25	25	24	24	24
NPSDC	16	8	5	13	4	18
40865000 Porto Mesquita						
	Out	Nov	Dez	Jan	Fev	Mar
HSB	0,6579	0,7061	0,6260	0,5884	0,6216	0,6787
HSB-CLI	0,6650	0,6567	0,6567	0,6617	0,6617	0,6617
N (me- ses)	24	24	24	23	23	23
NPSDC	10	15	2	9	6	16

NPSDC é o número de meses que a previsão foi significativamente diferente da climatologia

Também foi aplicado o teste do Qui-Quadrado, com um nível de significância de 10%, para verificar se as previsões obtidas com essa metodologia são significativamente diferentes das previsões realizadas a partir da climatologia. Os resultados estão na Tabela 6.

Além disso, também foi avaliada a confiança das previsões realizadas, a qual é definida como a probabilidade das vazões mensais observadas estarem contidas em um intervalo de previsões. A medida da confiança foi realizada considerando dois intervalos de previsões. O primeiro intervalo se refere aos valores máximos e mínimos previstos. Já o segundo intervalo é delimitado pelos valores médios das previsões acrescidos e subtraídos dos respectivos desvios padrão. A Figura 11 ilustra a delimitação desses intervalos, apresentando os resultados das previsões de vazões mensais da área de drenagem referente à estação fluviométrica de Porto Pará, realizada para o ano de 1989, quando foi observada a condição neutra da oscilação Sul de outubro/1989 a março/1990.

A estimativa da confiança foi efetuada com o uso das seguintes equações:

$$C_{MM} = \left(1 - \frac{nme}{n}\right) \cdot 100 \quad (4)$$

$$C_{DP} = \left(1 - \frac{nme}{n}\right) \cdot 100 \quad (5)$$

nas quais, C_{MM} é a confiança para o intervalo de previsões máximas e mínimas; C_{DP} é a confiança para o intervalo delimitado pela média das previsões, somada e diminuída do desvio padrão; nme é o número de vazões mensais observadas que extrapolou os intervalos; e n é número total de previsões.

Os resultados das estimativas da confiança, para os dois intervalos, constam da Tabela 7. Nessa tabela encontra-se o número de semestres analisados, os valores de confiança para cada um dos meses, os valores máximos e mínimos de confiança, a confiança total e por semestre.

A confiança total é estimada considerando todos os meses analisados, ou seja, multiplicando-se por 6 o valor de n nas equações 4 e 5. A confiança por semestre é calculada tendo-se em conta a extra-polação dos intervalos de previsões em pelo menos um dos seis meses previstos. Assim, no caso da área de drenagem de Fazenda São Felix, na bacia do rio Borrachudo, quando se considera o intervalo limitado pelos valores médios das previsões, acrescidos e subtraídos dos respectivos desvios-padrão, verifica-se

Tabela 7 – Confiância das Previsões

Confiância para o intervalo média \pm desvio padrão das previsões												
Estação	Bacia	N	Out	Nov	Dez	Jan	Fev	Mar	Min	Max	Total	Semestre
40975000	Borrachudo	19	84%	95%	84%	42%	37%	84%	37%	95%	71%	0%
40963000	Indaiá	15	73%	73%	73%	60%	67%	87%	60%	87%	72%	20%
40100000	SF	25	84%	92%	88%	76%	72%	88%	72%	92%	83%	36%
40450001	Para	24	79%	88%	92%	83%	75%	88%	75%	92%	84%	46%
40865000	Paraopeba	23	91%	87%	96%	87%	65%	91%	65%	96%	86%	48%
Confiância para o intervalo de valores máximos e mínimos das previsões												
Estação	Bacia	N	Out	Nov	Dez	Jan	Fev	Mar	Min	Max	Total	Semestre
40975000	Borrachudo	19	100%	95%	100%	95%	89%	100%	89%	100%	96%	79%
40963000	Indaiá	15	100%	93%	100%	100%	80%	100%	80%	100%	96%	80%
40100000	SF	25	100%	100%	100%	92%	96%	100%	92%	100%	98%	88%
40450001	Para	24	100%	100%	100%	100%	96%	100%	96%	100%	99%	96%
40865000	Paraopeba	23	100%	100%	100%	100%	96%	100%	96%	100%	99%	96%

que, em pelo um mês de cada um dos 19 semestres previstos, os limites foram extrapolados, pois a confiança foi de 0%.

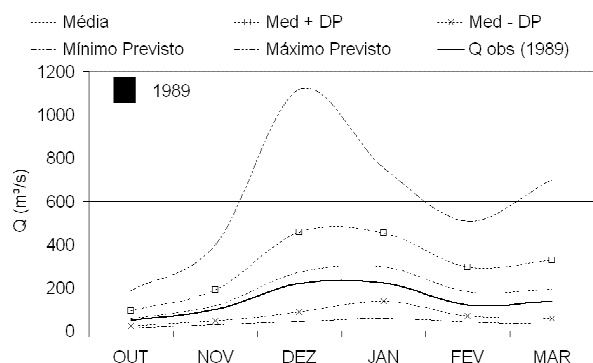


Figura 11 – Intervalos de Previsão

DISCUSSÃO

Nos 30 meses (6 meses vezes 5 bacias) em que foram comparados os valores do índice de *Half Brier*, apenas em 13 casos os resultados não superaram as previsões realizadas somente com base na climatologia, dos quais 6 referem-se à bacia do rio Borrachudo. Essa foi a única bacia em que a metodologia aplicada não melhorou a previsão em nenhum mês. Provavelmente, esse fato está relacionado à modelagem, ou ao cálculo do fator de adimensionalização para definição da distribuição de pro-

babilidade das precipitações semestrais da bacia. Nas outras bacias, houve uma melhoria na previsão em pelo menos três dos meses considerados. Na bacia do rio Pará, a previsão melhorou em todos os meses. Além disso, foi elevada a probabilidade das vazões mensais observadas estarem contidas nos dois intervalos de previsões avaliados. A confiança para o intervalo compreendido pela média das vazões previstas, acrescida e subtraída do desvio padrão, ficou compreendida entre 71% e 86%, enquanto que, para o intervalo definido pelas vazões máximas e mínimas previstas, variou de 96% a 99%. Quando se considerou o semestre completo, ou seja, durante os seis meses nenhuma das vazões mensais observadas extrapolou os limites do intervalo definido pelas previsões de vazões máximas e mínimas, verificou-se índice de confiança superior a 79%. Entretanto, para o intervalo definido pela média das vazões previstas, acrescida e subtraída do desvio padrão, ainda considerando o semestre completo, a confiança foi inferior a 50%, implicando que, em mais da metade dos semestres analisados, pelos menos um valor mensal observado extrapolou os limites estabelecidos. Novamente, os piores resultados foram obtidos com a simulação da estação fluviométrica do rio Borrachudo.

CONCLUSÕES

A metodologia, aqui proposta, modifica a entrada de dados da técnica ESP, utilizando a distribuição mista da precipitação semestral do Alto São

Francisco, a qual é dada pela soma das distribuições associadas às categorias abaixo do normal, normal e acima do normal, adotando os resultados do modelo de previsão consensual descrito em Pinto *et al.* (2006) como sendo os pesos λ_i , e empregando as distribuições temporais das chuvas associadas às fases da Oscilação Sul.

Os resultados alcançados com a aplicação da metodologia em algumas estações da bacia do Alto São Francisco indicam que a modificação realizada na definição da entrada de dados da técnica ESP representa um avanço, pois permite incorporar, no cálculo da curva de frequência, as informações dos indicadores climáticos, não levando em consideração a simplificação usual de que as observações do passado são equiprováveis de ocorrer no futuro, pois a curva de frequência irá se alterar em função das informações dos indicadores climáticos. Além disso, as previsões são realizadas em associação às fases da Oscilação Sul.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pelo financiamento desta pesquisa através do Fundo Setorial de Recursos Hídricos, processo 521261/01-5. Os autores são gratos também aos revisores anônimos pelas diversas sugestões que proporcionaram maior clareza a este artigo.

REFERÊNCIAS

- BEDIOT, G. (1980) *Préface du Numéro Spécial Précipitations et Hydrologie*, La Météorologie, 20-21, 3-7.
- COLLISCHONN, W. (2001) *Simulação Hidrológica de grandes bacias*. Tese de Doutorado. IPH-UFRGS. Dez.
- DAVIS, E. G.; NAGHETTINI, M. C. (2000) *Estudo de Chuvas Intensas no Estado do Rio de Janeiro*. Brasília: C-PRM. CD-ROM.
- DUAN, Q. (1991) *A Global Optimization Strategy for Efficient and Effective Calibration of Hydrologic Models*. PhD thesis, University of Arizona 371 p..
- FERNANDES, W. S.; STOCHIERO, F. C.; MAGALHÃES, G. R.; NAGHETTINI, M. C. (2003) MSD-30: Um modelo de simulação de descargas médias mensais In: *XV Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos da ABRH*, Curitiba, PR, CD-ROM, nov.
- HOSKING, J. R. M. (1991) Fortran routines for use with the method of L-moments - Version 2. In: *IBM Research Report*, New York, IBM Research Division, RC 17097, 117p., Ago.
- HOSKING, J. R. M.; WALLIS, J. R. (1997) *Regional Frequency Analysis - an approach based on L-moments*. Cambridge University Press, P.224.
- LETTENMAIER, D. P.; WOOD, E. (1993) Hydrologic Forecasting. In: MAIDMENT, D. R. *Handbook of hydrology*. New York: McGraw Hill, Cap. 26, p. 26.1 – 26.30.
- NAGHETTINI, M. C.; NASCIMENTO, N. O.; LIMA, A. A.; BALBI, D.; THIMOTTI, T.; QUEIROGA, Y. G. (2001) *Relatório Técnico Parcial 1 - Modelos de Simulação Hidrológica para Previsão de Vazões de Curto Prazo*. Departamento de Engenharia Hidráulica e Recursos Hídricos da UFMG, Belo Horizonte, 117p., Set..
- NAGHETTINI, M. C.; NASCIMENTO, N. O.; THIMOTTI, T.; LIMA, A. A.; SILVA, F. E. O. (2002) *Relatório Técnico Parcial 2 - Modelo Rio Grande de Simulação Hidrológica para Previsão de Vazões de Curto Prazo: Formulação Teórica*. Departamento de Engenharia Hidráulica e Recursos Hídricos da UFMG, Belo Horizonte, 75 p..
- PIECHOTA, T. C.; CHIEW, F. H. S.; DRACUP, J. A.; MCMAHON, T. A. (1998) Seasonal streamflow forecasting in eastern Australia and the El Niño-Southern Oscillation. In: *Water Resources Research*. Vol. 34, Nº 11, pag. 3035-3044, Nov..
- PINTO, E. J. A. (2005) *Estudo de indicadores climáticos para a previsão de longo termo de vazões na bacia do alto São Francisco*. Tese de Doutorado. Escola de Engenharia da UFMG. Belo Horizonte.
- PINTO, E. J. A.; NAGHETTINI, M. C.; ABREU, M. L. (2006) Utilização de Indicadores Climáticos na Previsão Probabilística de Precipitações e Vazões na Bacia do Alto São Francisco. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*. (nesta edição)
- RODDA, J. C.; RODDA, H. J. E. (2000) *Hydrological forecasting, in dealing with natural disasters*, IAHS Publication, p. 75-99.
- ROSENBROCK, H. H. (1960) An automatic method for finding the greatest or least value of a function, In: *Computer Journal*, Vol. 3, pp. 175-184.
- TUCCI, C. E. M. (2002) *Flood flow forecasting*. 54th session of Executive Council of World Meteorological Organization in Geneva. Jul.
- WMO (1983) *Guide to Hydrological Practices. Analysis, Forecasting and other Applications*. Fourth edition. Report WMO-Nº168. Geneva – Switzerland, Vol. II.

Methodology of Seasonal Flow Forecasting For The Upper São Francisco River Basin by Incorporating Estimates of Probable Time-distributions of Rainfall As Associated With Climate Indexes

ABSTRACT

This paper presents a methodology to estimate probable trajectories of 6-month (Oct-Mar) precipitation in order to apply the Extended Streamflow Prediction method in the upper São Francisco river basin, located in the tropical climate zone of southeastern Brazil. The method consists of using the mixed distribution of 6-month (Oct-Mar) precipitation volumes, that is the sum of the distributions associated with the below-normal, normal and above-normal rainfall, adopting the results of a long-range probabilistic forecasting model for 6-month (Oct-Mar) precipitation, as weights, and thus applying the precipitation time distribution. The probabilistic forecasting model employs a few climate indexes, such as the sea surface temperature (SST), as observed in different ocean regions, and the Southern Oscillation Index (SOI) as predictor variables. The time trajectories of 6-month (Oct-Mar) precipitation are used as input data to the MSD-30 rainfall-runoff model. Considering the results of the Half-Brier scores, this method yields goods results, as compared to the climatology-based-only forecasts. The results show that this method is an advance, as it allows the inclusion of climate indexes to estimate the mixed distribution of 6-month (Oct-Mar) precipitation volumes. Furthermore, the proposed method does not require the usual ESP assumption that past observations have the same probability of occurring in the future, since the distribution curve will change with the climate indexes information.

Key-words: hydrologic forecasting, Extended Streamflow Prediction (ESP), mixed distribution.