

QUANTIFICAÇÃO DE VAZÃO EM PEQUENAS BACIAS SEM DADOS

Geraldo Lopes da Silveira

Universidade Federal de Santa Maria
ger_ufsm@sma.zaz.com.br

Carlos E. M. Tucci e André L. L. da Silveira

Instituto de Pesquisas Hidráulicas - Universidade Federal do Rio Grande do Sul
Caixa Postal 15029 CEP 91501-970 Porto Alegre, RS

RESUMO

A falta de dados hidrológicos em pequenas bacias gera incertezas que comprometem o gerenciamento dos Recursos Hídricos. Atualmente, inexistem métodos confiáveis para estimativa de disponibilidade hídrica na ausência de dados, o que limita a avaliação de aproveitamentos de pequenos mananciais, com pequenas centrais hidrelétricas, sistemas de irrigação e abastecimento urbano, além de prejudicar os estudos de avaliação da qualidade das águas e os de apoio à instrução de processos de outorga. O método proposto, baseia-se na combinação de um modelo chuva-vazão simplificado, com amostragem reduzida de vazões para obtenção de séries cronológicas contínuas de descargas (fluviograma), sintetizando informações produzidas somente por monitoramento convencional. A rápida interação com o meio através de algumas medições locais conduziu a boa avaliação da disponibilidade hídrica através de um modelo com dois parâmetros. Os resultados encontrados para 6 bacias localizadas no Rio Grande do Sul, indicam um erro padrão para as estimativas da curva de permanência na ordem de 20%.

INTRODUÇÃO

A realidade brasileira contempla uma carência enorme de energia para propriedades e aglomerados rurais em pontos isolados da rede interligada de transmissão de energia elétrica, e para localidades próximas a perímetros urbanos e distritos agro-industriais de grande demanda energética.

Segundo as conclusões do II FOREMA (1996) - Fórum de Energia e Meio-Ambiente da Região Sul - somente no estado do Rio Grande do Sul existem, aproximadamente, 150 mil propriedades rurais carentes de energia elétrica que, em parte, poderiam ser atendidas através de aproveitamentos hidrelétricos de pequeno porte.

Entretanto, quando se parte para o estudo de viabilidade econômica e social dos aproveitamentos de pequeno porte, depara-se com a quase

total ausência de dados fluviométricos de pequenos mananciais para o desenvolvimento de avaliações de potencialidades hídricas e energéticas.

Além disso, o abastecimento de água humano, a irrigação e o controle ambiental das bacias necessitam conhecer a distribuição temporal e espacial da vazão dos rios de pequenos mananciais.

A atual rede hidrometeorológica do Brasil contempla praticamente as grandes bacias hidrográficas (áreas maiores que 500 km²) conforme pode-se observar no inventário das estações fluviométricas do DNAEE (1991). Considerando-se bacias pequenas aquelas com drenagens inferiores a 100 km², pode-se constatar a carência quase total de dados através do inventário da rede nacional.

Portanto, com a carência de dados fluviométricos, fica-se sujeito a grandes incertezas quanto aos resultados da quantificação de vazões. Em consequência, por avaliações incorretas, pode-se considerar viável um aproveitamento inviável. Do modo inverso, também pode-se considerar inviável um aproveitamento adequado à sociedade.

No âmbito do controle ambiental, o conhecimento do escoamento é fundamental para avaliar a qualidade da água de pequenos rios, decorrente de cargas pontuais e difusas. Para estimar as condições ambientais sujeitas a essas cargas poluidoras, é necessário conhecer as vazões de estiagem do rio.

Da mesma forma, para a instrução de processos de outorga de uso dos recursos hídricos, as Agências Governamentais necessitam conhecer as respectivas disponibilidades hídricas de modo a não gerarem conflitos nem conceder outorga superior à real. Este é um processo de desenvolvimento corrente no Brasil e no Rio Grande do Sul, função das atribuições definidas pelas últimas constituições Federal e Estadual (Brasil, 1997; Rio Grande do Sul, 1994).

Há, portanto, grande demanda por estudos hidrológicos confiáveis para pequenas bacias que

levem em conta a carência de dados fluviométricos da rede existente de monitoramento.

MÉTODOS

Os métodos utilizados para estimativa de vazões em locais sem dados são: (a) estudos de regionalização da curva de permanência de vazões; (b) modelos hidrológicos com parâmetros extrapolados e; (c) medida direta de vazão no local de interesse (Eletrobrás, 1983). Este último tipo de metodologia não relaciona a vazão medida às estatísticas de ocorrência no local.

Estimativa da curva de permanência por regionalização hidrológica

A curva de permanência representa a relação entre a magnitude e a frequência de vazões diárias, semanais, mensais (ou de qualquer outra duração) de uma determinada bacia hidrográfica, fornecendo a porcentagem de tempo que uma dada vazão é igualada ou superada num período histórico definido (Vogel e Fennessey, 1994). Considerando-se o seu uso freqüente em engenharia, há relativamente pouca pesquisa sobre seu desenvolvimento em bacias sem dados (Murdock e Gulliver, 1993). Os trabalhos mais frequentemente citados na literatura internacional são os de Dingman (1978), Quimpo et al (1983), Mimikou e Kaemaki (1985) e Fennessey e Vogel (1990). No Brasil, destacam-se os trabalhos de Kavisky e Fior (1985) e Tucci (1991). Um roteiro prático para o cálculo da curva de permanência é encontrado em Tucci (1993).

A regionalização hidrológica, em geral, caracteriza-se por uma variedade de métodos que utilizam informações regionais para sintetizar dados de vazão. Estas informações podem ser características fisiográficas e hidrometeorológicas da bacia e parâmetros estatísticos calculados a partir das séries de vazões de postos da região. São exemplos típicos de métodos de regionalização aqueles que fazem ajuste de uma distribuição estatística a uma variável (ou a um parâmetro ou a uma função hidrológica), combinando-a com a regressão desta mesma variável com características físicas das bacias (a área contribuinte quase sempre é uma delas) e características hidrometeorológicas (pluviometria média anual, freqüentemente). Fica claro, assim, que, entre várias regionalizações usuais (vazões máximas, médias e mínimas), a regionalização da curva de

permanência é apenas um entre vários estudos possíveis.

Na regionalização da curva de permanência podem ser adotados dois procedimentos (Tucci, 1991) baseados:

- na *parametrização* da curva, relacionando os parâmetros com características fisiográficas e climatológicas da bacia, e;
- na *interpolação*, gráfica ou analítica, de uma curva, passando por vazões com permanências pré-definidas e estimadas a partir das referidas características da bacia.

Os modelos de regionalização que definem a curva de permanência na forma parametrizada podem provocar erros nas estimativas do ramo inferior da curva, onde os escoamentos são menores, embora possa apresentar um bom ajuste global. O uso de modelos do tipo interpolativos minimizam este erro pela estimativa ponto a ponto da curva no trecho de interesse.

O estudo de Dingman (1978) para New Hampshire (EUA), com dados diários de 24 estações fluviométricas com mais de 10 anos de observação (bacias de 7 a 8000 km², mediana de 260 km²), é tipicamente do tipo interpolativo, definindo as vazões nas permanências de 2, 5, 30 e 95%. As três primeiras, como uma proporção constante da vazão média, cujo valor por unidade de área é função linear da altitude média da bacia e a última, também tomada por unidade de área, é uma função polinomial de segunda ordem da altitude média da bacia. O autor apresenta intervalos de 95% de confiança empíricos com base na variabilidade das vazões adimensionais (para as permanências de 2, 5 e 30%) e na variabilidade da altitude média das bacias (considerada em todas as quatro vazões). Para as variabilidades citadas, foram assumidas distribuições normais.

Quimpo et al (1983) propuseram para as Filipinas um modelo regional parametrizado para as curvas de permanência, voltado para o aproveitamento hidroenergético. Basearam-se em 35 estações com dados diários de vazão e séries de 8 a 21 anos (bacias de 29 a 4150 km², mediana de 190 km²). De cada curva de permanência observada foram retiradas 13 pares vazão-permanência (vazão por unidade de área) correspondentes aos percentis 1, 5, 95, 99 e de 10 a 90, de 10 em 10. Para cada estação, aos 13 pares, foi ajustada por mínimos quadrados a equação:

$$q = q_A e^{-cD} \quad (1)$$

onde q é a vazão por unidade de área, D é a permanência (%) e q_A e c são os parâmetros.

O parâmetro c foi regionalizado por intermédio de isolinhas no mapa das Filipinas, seguindo tendências climáticas e o parâmetro q_A foi relacionado com a área da bacia por:

$$q_A = p A^{-m} \quad (2)$$

onde A é a área da bacia (km^2) e p e m são parâmetros que foram ajustados com base apenas nas 12 bacias com área maior que 100 km^2 em razão de problemas amostrais nas pequenas bacias.

O estudo de Quimpo et al (1983) não aborda o problema das incertezas nos resultados.

A regionalização da curva de permanência apresentada por Mimikou e Kaemaki (1985) para as regiões oeste e noroeste da Grécia seguiu também um modelo parametrizado. Foram utilizados dados mensais de vazão de 13 postos (bacias de 86 a 5005 km^2 , mediana de 700 km^2), sendo 11 para o desenvolvimento e 2 para a validação do estudo. De cada curva de permanência observada foram retirados 25 pares vazão-permanência correspondentes aos percentis de 4 a 100%, de 4 em 4, cujos valores foram ajustados por mínimos quadrados ao polinômio:

$$Q = a - bD + cD^2 - dD^3 \quad (3)$$

onde Q é a vazão, D é a permanência (%), e a , b , c e d são parâmetros, que foram correlacionados com a precipitação média anual P , a área da bacia A , o desnível máximo da bacia H e o comprimento do rio principal L pela expressão:

$$p = b_0 P^{b_1} A^{b_2} H^{b_3} L^{b_4} \quad (4)$$

onde p representa os parâmetros a , b , c e d , e b_0 , b_1 , b_2 , b_3 e b_4 são os parâmetros da regressão.

Um efetivo de apenas 11 realizações e 5 parâmetros (portanto apenas 6 graus de liberdade) fragilizam as regressões de Mimikou e Kaemaki (1985). Como medida de validação, reservaram duas curvas de permanência que não participaram do estudo. O erro médio quadrado de 3% para uma bacia de 86 km^2 e de 10% para a outra bacia com 1481 km^2 .

Fennessey e Vogel (1990) utilizaram dados de vazões diárias de 26 estações (bacias de 4 a 390 km^2 , mediana de 52 km^2) para também estabelecer um modelo paramétrico de regionalização da curva de permanência em Massachusetts (EUA). Distingue-se dos modelos paramétricos acima porque ajusta uma função (no caso a lognormal) diretamente às vazões diárias observadas e suas

permanências (previamente as vazões foram ordenadas de forma decrescente e as correspondentes probabilidades de excedência, as permanências, calculadas pela fórmula de Weibull). O ajuste realizado para 23 estações (3 foram guardadas para validação) restringiu-se ao trecho entre as permanências de 50 e 99%. A estimativa dos parâmetros, a saber a média, μ , e a variância σ^2 dos logaritmos neperianos das vazões, foi feita por minimização do erro médio quadrático porcentual (como a curva de permanência engloba vazões correlacionadas temporalmente, logo não independentes, a estimativa dos parâmetros pelo método estatístico da máxima verossimilhança era inaplicável). As estimativas de μ foram correlacionadas com as áreas, e as estimativas de σ^2 com os desníveis máximos das bacias. Foram calculados intervalos de 95% de confiança de acordo com a teoria estatística (com uso da estatística de Student) onde foi deduzida uma expressão para a variância da estimativa do logaritmo da vazão, função da área contribuinte e do desnível máximo. A validação com as 3 curvas de permanência, que não participaram do estudo, mostraram o bom desempenho do modelo.

Kavisky e Fior (1985) compararam o desempenho de vários modelos paramétricos na regionalização da curva de permanência no Estado do Paraná (Exponencial, Pareto, Lomax, Weibull, Log-logística, Log-gumbel, Log-normal). Foram utilizadas as vazões diárias de 63 bacias com áreas entre 54 e 5000 km^2 (mediana de 900 km^2). Os parâmetros regionalizados foram os momentos de primeira e segunda ordem para os quais foram feitos mapas de isolinhas. Também foi regionalizada a vazão média de longo período por unidade de área na forma de um mapa de isolinhas. Os melhores resultados foram obtidos com a lei Lomax. Para a construção dos intervalos de confiança, os autores se basearam na distribuição estatística da vazão média de longo período.

Tucci (1991) apresentou um estudo da curva de permanência para o estado do Rio Grande do Sul, dividido em seis regiões, pelo método interpolativo. Foram utilizados dados de vazões médias diárias de 105 postos com áreas de contribuição entre 41 e 189.300 km^2 (mediana de 2058 km^2 e média de 8292 km^2). Foi feita uma comparação entre as alternativas de considerar a curva de permanência na sua forma empírica ou representada por uma função lognormal, com parâmetros ajustados pelo método dos momentos. Esta última, que caracterizaria um modelo paramétrico, foi descartada pelos seus resultados julgados imprecisos (o critério de análise foi a verificação do ajuste para as vazões com permanências de 50 e 95%, deno-

minadas por Q_{50} e Q_{95} , respectivamente). Assim, foi adotado um modelo interpolativo exponencial que passa por Q_{50} e Q_{95} :

$$Q = e^{aD+b} \quad (5)$$

onde Q é a vazão, D é a permanência (%) e a e b são dados por:

$$a = -(\ln(Q_{50}/Q_{95}))/0,45$$

$$b = \ln Q_{50} - 0,50 a$$

A regionalização ocorreu pela regressão de Q_{50} e Q_{95} com a área da bacia através de uma equação de potência do tipo:

$$Q_{50} \text{ ou } Q_{95} = cA^d \quad (6)$$

onde A é a área da bacia e c e d são parâmetros.

Mesmo não presentes no estudo, intervalos de confiança para Q_{50} e Q_{95} poderiam ter sido estabelecidos conforme indicado em Fennessey e Vogel (1990). Por outro lado, foi apresentada uma análise de sensibilidade para avaliar o impacto da consideração ou não, de dados da década de 40, uma década de vazões mais baixas, na curva de permanência. Em alguns postos as diferenças foram importantes, sobretudo para a Q_{95} .

Os estudos acima mostraram que há uma variedade de abordagens, tanto para modelos paramétricos como para interpolativos, para a regionalização da curva de permanência, sem que nenhuma possa ditar sua superioridade sobre a outra. Ressalte-se a adequabilidade da regionalização da curva de permanência para uma ampla gama de variação de áreas de bacias em diferentes regiões do mundo. Por outro lado, ficou evidente, pelo conteúdo dos trabalhos analisados, que faltam ainda serem desenvolvidos critérios de validação dos modelos análogos aos que Klemes (1986) preconiza para os modelos chuva-vazão. Também sentiu-se a necessidade de que análises de incertezas sejam incorporadas de ofício aos estudos, para uma correta avaliação dos erros envolvidos no uso dos modelos. Alguns estudos são mais claros que os outros em relação às hipóteses básicas adotadas, como, por exemplo, a hipótese de estacionaridade que é geralmente feita em estudos deste tipo.

A simples observação dos intervalos de áreas abrangidas nos estudos acima, todos com bons resultados, permite avaliar sua aplicabilidade para pequenas bacias. Metade das bacias estudadas por Dingman (1978) têm entre 7 e 260 km²; as de Quimpo et al (1983) têm entre 29 e 190 km²; as

de Mimikou e Kaemaki (1985) têm entre 86 e 700 km², e as de Fennessey e Vogel (1990) têm entre 4 e 52 km². Fica evidente que bacias pequenas foram consideradas nesses estudos. O fato de que elas possuem um regime hidrológico diferenciado em relação às grandes bacias não impede, aparentemente, que a regionalização da curva de permanência produza bons resultados.

Para a realidade brasileira, os estudos de regionalização hidrológica, por serem definidos a partir de uma base de dados proveniente de bacias maiores (área > 500 km²) não devem, por consequência, serem aplicados fora dos limites estabelecidos pelas equações regionais e, principalmente, para as bacias consideradas pequenas (área < 100 km²). Estas limitações devem-se principalmente aos seguintes fatores:

1. diferenças nas escalas espaciais e temporais dos mecanismos de transformação chuva-vazão nas pequenas e grandes bacias;
2. dificuldades de caracterização de regiões hidrologicamente homogêneas devido às especificidades locais do meio-físico. Quando a área da bacia diminui, baixa a escala de detalhamento, e fica difícil a caracterização de regiões homogêneas, ou seja, a heterogeneidade das pequenas bacias é muito grande;
3. dificuldades de obtenção de dados confiáveis convencionais para as vazões mínimas. Muitas vezes, ao priorizar as vazões máximas e médias, os segmentos inferiores das curvas-chave dos postos fluviométricos deixam a desejar. A mobilidade do leito é uma das causas destas incertezas.

Estimativa da disponibilidade hídrica por simulação chuva-vazão

Dentre os vários usos dos modelos chuva-vazão, podem ser destacadas as seguintes aplicações:

- a extensão de séries de vazões em seções fluviais monitoradas, com parâmetros estimados a partir dos dados existentes;
- geração de séries de vazões em seções não monitoradas, com estimativa de parâmetros a partir de valores de outras bacias.

Existe um grande número de modelos chuva-vazão na literatura, cada qual com variantes de algoritmos empíricos dos processos hidrológicos representados. No entanto, a variabilidade temporal e espacial da precipitação pode embutir erros superiores a qualquer refinamento de metodologia que simule os processos hidrológicos em bacia.

Independente da classificação dos modelos chuva-vazão, seu uso eficiente para calcular vazões em bacias sem dados está condicionado à sua validação. Neste campo, Klemes (1986) propõe os seguintes testes hierarquizados:

1. **Teste com amostra dividida** (*split-sample test*): consiste na calibração dos parâmetros do modelo com base em 3 a 5 anos de dados (primeira parte da amostra) com posterior validação num período similar (segunda parte da amostra);
2. **Teste com amostra dividida não estacionária** (*differential split-sample test*): envolve a calibração do modelo num período anterior a modificações na bacia ou no clima (primeira parte da amostra) e subsequente validação com os dados após estas modificações (segunda parte da amostra, não estacionária em relação à primeira). Antes desta validação, os parâmetros do modelo devem estar definidos, incorporando eventualmente uma evolução lógica dos seus valores em função do impacto esperado das modificações nos processos hidrológicos simulados.
3. **Teste com amostras de bacias próximas** (*proxy basin test*): baseia-se na calibração do modelo em uma bacia próxima com dados e validação em outra bacia da vizinhança (com dados) com regime hidrológico semelhante. Evidentemente, para a simulação de validação, os parâmetros são eventualmente adaptados para refletir as condições da bacia (por exemplo, um parâmetro que é dependente da área da bacia). Adaptações similares são feitas nos parâmetros quando da aplicação do modelo aprovado numa bacia sem dados fluviométricos da região;
4. **Teste com amostras não estacionárias de bacias próximas** (*proxy basin differential split-sample test*): a calibração do modelo é feita em uma bacia próxima com dados, que não sofreu modificações, e a validação em outra bacia com dados da vizinhança, mas com o regime hidrológico original que era semelhante ao da bacia de calibração, alterado por causa de variações

no clima ou pela ocupação do solo. Diferencia-se do teste anterior porque exige uma estipulação prévia dos parâmetros para a bacia de validação em função das alterações que ela sofreu em relação à bacia de calibração. Em posterior uso do modelo aprovado em uma bacia da região sem dados fluviométricos, conforme seja sua situação (modificada ou não), um dos dois jogos de parâmetros seria aplicável. O jogo de parâmetros compatível, eventualmente sofre adaptações para se adequar à bacia simulada (por exemplo, maior ou menor presença de determinado tipo de solo).

Em resumo, para os modelos chuva-vazão, o teste 1 de Klemes (1986) trata da validação de um modelo com vazões observadas na própria bacia; o teste 2 refere-se à validação do modelo em uma bacia sob condições não estacionárias; o teste 3 qualifica um modelo para gerar vazões em bacias não monitoradas com condições semelhantes às bacias vizinhas de calibração e validação e, por fim, o teste 4 avalia a capacidade do modelo também para gerar vazões em bacias sem dados, mas abrangendo situações de mudanças (climáticas ou de ocupação do solo) captada no processo de calibração e validação em bacias vizinhas (bacia de validação com condições alteradas em relação à bacia de calibração).

Refsgaard e Knudsen (1996) aplicaram os testes acima para comparar o desempenho de três modelos correspondentes às categorias em que acreditam poderem ser classificados os modelos hidrológicos: a) um conceitual concentrado; b) outro com base física distribuído e c) um terceiro conceitual distribuído, pois usa informações distribuídas de natureza meteorológica, topográfica, pedológica e de ocupação do solo, mas calcula as respostas hidrológicas em cada unidade espacial de forma conceitual e não fisicamente baseada. A comparação feita com dados de três bacias do Zimbawe (áreas de 254, 1040 e 1090 km²) resultou o seguinte:

1. Alguns poucos anos de dados (1-3 anos) parecem ser suficientes para calibrar um modelo chuva-vazão para simular o comportamento hidrológico de uma bacia, mesmo sob condições climáticas não estacionárias. E o uso de um modelo conceitual concentrado seria tão adequado quanto um mais sofisticado de natureza distribuída.
2. Para bacias sem dados fluviométricos, os modelos distribuídos parecem dar resulta

dos um pouco melhores que um modelo concentrado, desde que informações básicas da bacia possam ser obtidas (como a posição das superfícies livres dos aquíferos).

Os modelos hidrológicos são, portanto, fortemente dependentes de dados locais devido à grande incerteza na definição dos seus parâmetros. A questão básica é avaliar qual o período necessário e sua representatividade. A metodologia a seguir busca resolver parte desta questão.

METODOLOGIA

Este estudo apresenta um método para avaliação da disponibilidade hídrica fluvial de pequenas bacias hidrográficas com carência de dados fluviométricos.

O método baseia-se na estimativa do comportamento da bacia na estiagem. A depleção de uma bacia é um retrato do seu comportamento (Figura 1) após a ocorrência das precipitações. Em pequenas bacias esse processo é mais marcante devido à resposta rápida da bacia a estímulos de precipitações, função do seu pequeno tempo de concentração. Assim, o escoamento superficial produzido ocorre normalmente nos próprios dias chuvosos, e os períodos de recessão representam o período mais longo de tempo no fluviograma.

Portanto, obtidas algumas medições que reproduzam o comportamento da bacia nas estiagens, busca-se representar sua resposta através da simulação da precipitação em vazão.

Em resumo, a metodologia consiste de duas etapas básicas (Figura 2):

1. **Amostragem de vazões** onde desenvolve-se o levantamento de uma amostra reduzida de vazões em período de descarga do aquífero, num curto espaço de tempo (uma a duas semanas), sem necessidade de onerosas instalações tradicionais de funcionamento contínuo (linígrafos). Esta amostra é a condição inicial para a aplicação do método.
2. **Simulação de série de vazões** que envolve as seguintes etapas: (i) o ajuste de um modelo simplificado de balanço hídrico com a amostra reduzida, ou seja, com poucos valores de vazão conhecidos; (ii) a síntese de vazões diárias através da simulação chuva-vazão, a partir do histórico de precipitações e evapotranspirações regionais; e,

(iii) determinação da curva de permanência.

A amostragem reduzida de vazões objetiva dar uma vinculação local às estimativas, funcionando como ancoragem hidrológica aos procedimentos de simulação.

A caracterização preliminar do deplecionamento fluvial em termos de magnitude e taxa de decaimento das vazões, exige um mínimo de três medições de descargas na seção de interesse, espaçadas de alguns dias, em período de estiagem, de modo a se avaliar a estabilidade do decaimento de vazões (Roche, 1963).

O modelo

O modelo proposto nesse estudo contém as seguintes premissas:

- possuir o menor número de parâmetros possíveis que permita estimar a série de vazões médias diárias em uma pequena bacia hidrográfica e;
- permitir fácil ajuste e extensão de séries.

Para tanto, foram estabelecidas as seguintes simplificações principais no seu equacionamento:

1. O armazenamento na camada superior do solo é desprezível no intervalo de tempo de análise (diário);
2. A evapotranspiração potencial é retirada da precipitação, quando houver, em cada intervalo de tempo.

Formulação - a estrutura do modelo é descrita a seguir (Figura 3):

- A precipitação P_t (mm), em cada intervalo de tempo (diário), é subtraída da evapotranspiração potencial E_t (mm). Quando $P_t - E_t < 0$ não resulta precipitação para gerar escoamento.
- Na situação em que $P_t - E_t > 0$, uma parcela da precipitação irá gerar escoamento superficial e outra infiltrará. Neste caso:

$$P_r = P_t - E_t \quad (7)$$

A precipitação efetiva fica:

$$P_{ef}(t) = (1 - C_{inf}) \cdot P_r(t) \quad (8)$$

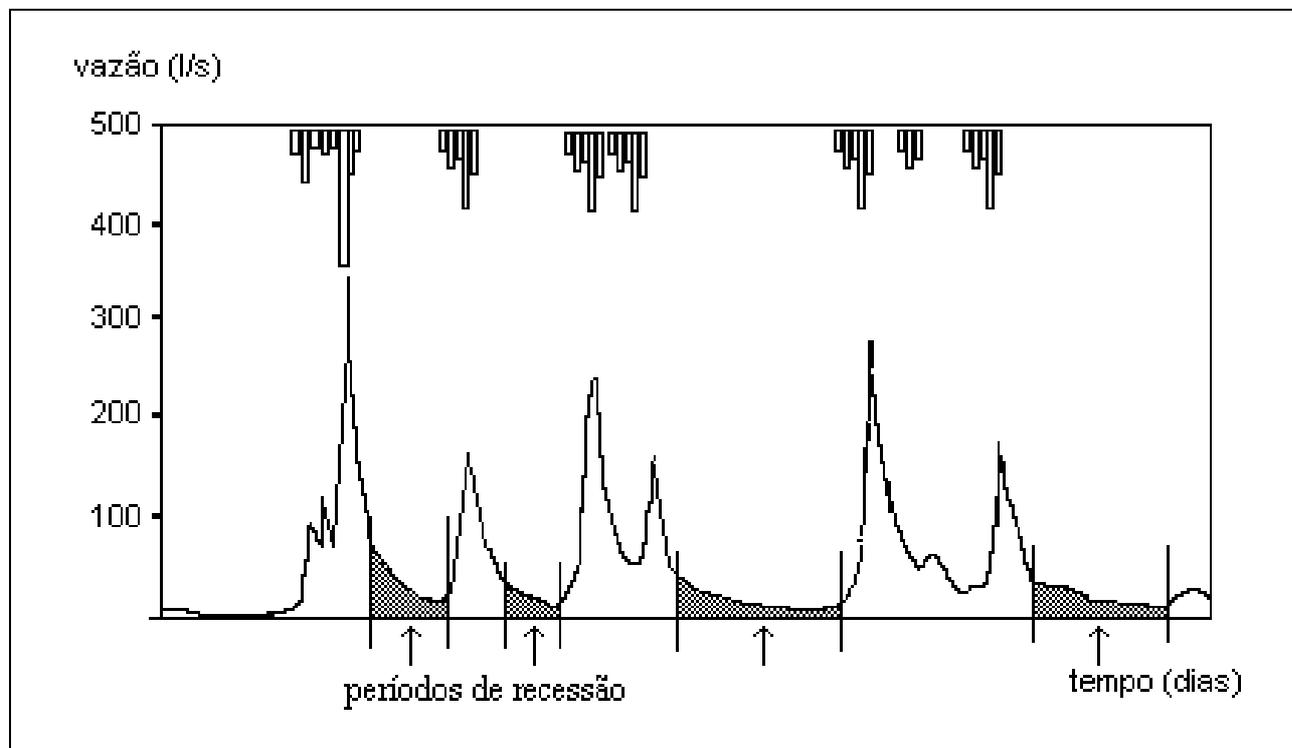


Figura 1. O hidrograma e os períodos de recessão.

onde C_{inf} representa a parcela da precipitação que infiltra; P_{ef} , a precipitação efetiva. O volume de infiltração V_i , fica expresso por:

$$V_i = C_{inf} \cdot P_r(t) \quad (9)$$

A parcela infiltrada alimenta diretamente o aquífero, desprezando-se a variabilidade da camada superior do solo associada a períodos úmidos e, geralmente, de pequena profundidade na cabeceira das bacias.

O reservatório subterrâneo pode ser expresso pela equação da continuidade

$$\frac{dS}{dt} = V_i - Q_b \quad (10)$$

onde S é o armazenamento em mm; e Q_b , a vazão de escoamento subterrâneo em mm/dia.

O armazenamento (mm) e a vazão de saída estão relacionados pela expressão

$$S = K_b \cdot Q_b \quad (11)$$

onde K_b representa o tempo de esvaziamento do reservatório em segundos.

Derivando-se a Equação 11 e substituindo-se na equação da continuidade resulta a equação

diferencial do modelo do reservatório linear simples.

$$K_b \frac{dQ_b}{dt} + Q_b = V_i \quad (12)$$

A solução desta equação é a seguinte:

$$Q_b(t) = Q_b(t-1) \cdot e^{-\Delta t / K_b} + V_i(t) \cdot (1 - e^{-\Delta t / K_b}) \quad (13)$$

No período chuvoso em que $Pr > 0$, a vazão incorpora também a parcela de origem superficial e é dada por:

$$Q(t) = [Q_s(t) + Q_b(t)] \quad (14)$$

onde $Q(t)$ é a vazão total em mm/dia; $Q_s(t) = P_{ef}(t)$.

Quando $Pr = 0$, a equação se reduz a

$$Q(t) = Q_b(t) \quad (15)$$

Para transformar as vazões de mm/dia para $m^3 \cdot s^{-1}$, basta multiplicá-las pela área da bacia em km^2 e, em seguida, dividir o resultado pelo fator 86,4.

O valor inicial do parâmetro K_b para simulação pode ser obtido a partir das medições onde

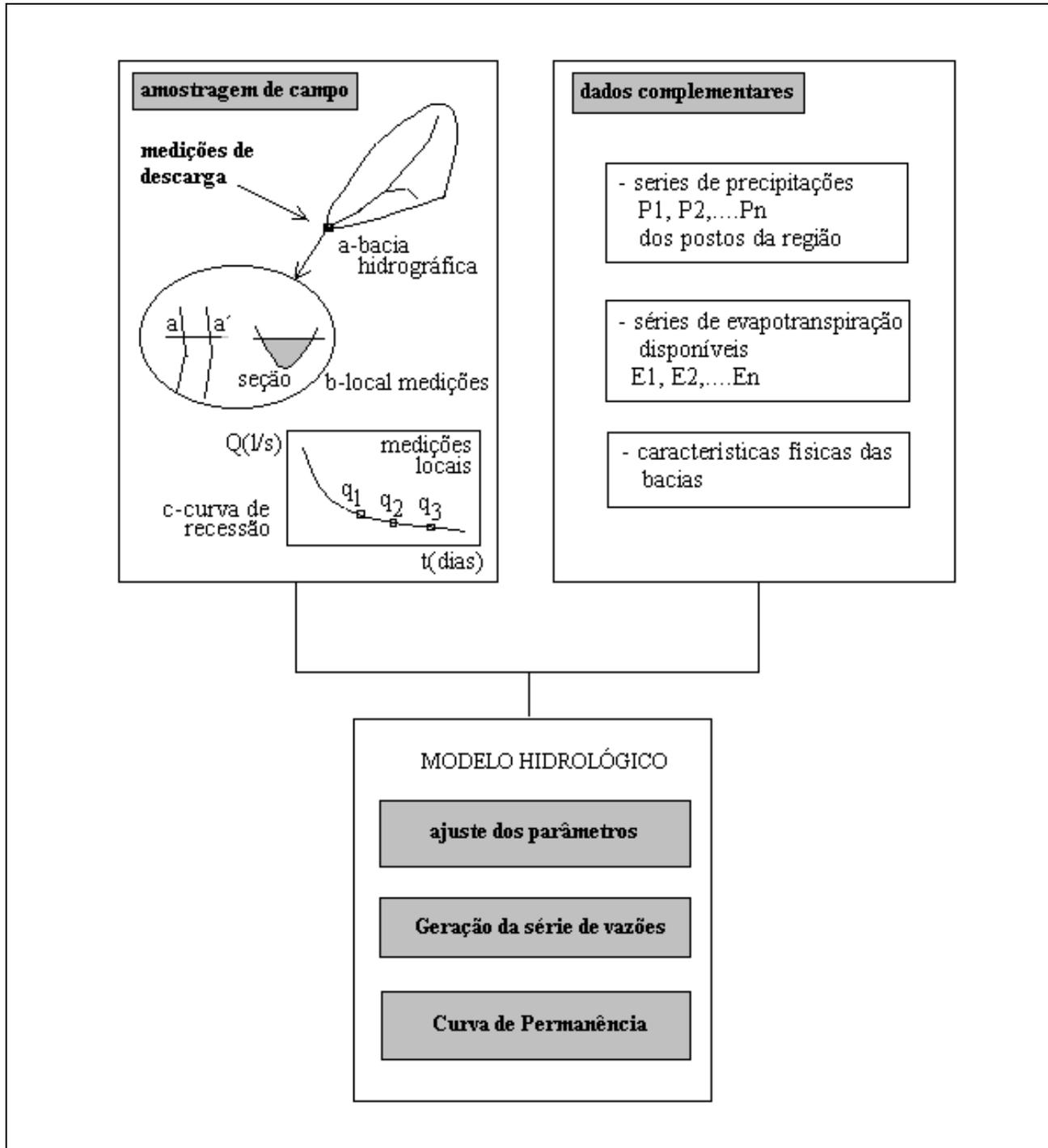


Figura 2. Estrutura metodológica.

Q1, Q2 e Q3 são as vazões conhecidas. Considerando-se a Equação 13, na ausência de precipitação pelo modelo, o valor do parâmetro pode ser obtido da seguinte forma:

$$Q_2 = Q_1 \cdot e^{-\Delta t / K_{1b}} \therefore Q_3 = Q_2 \cdot e^{-\Delta t / K_{2b}} \quad (16)$$

Logo, o valor de K estimado pelas equações são:

$$K_{1b} = \Delta t \cdot \ln \frac{Q_1}{Q_2} \therefore K_{2b} = \Delta t \cdot \ln \frac{Q_2}{Q_3} \quad (17)$$

$$\hat{K}_b = \frac{K_{1b} + K_{2b}}{\Delta t} \quad (18)$$

onde Δt é o intervalo de tempo entre as medições locais em dias; \hat{K}_b , a estimativa inicial para o parâmetro K_b .

A estrutura do modelo pelo equacionamento proposto define, então, dois parâmetros de ajuste para o desenvolvimento do balanço hídrico:

1. o primeiro relaciona-se à quantidade de água que infiltra e chega ao reservatório hipotético de escoamento subterrâneo e é definido por um coeficiente de infiltração C_{inf} ;
2. o segundo relaciona-se ao decaimento das vazões ao longo do tempo, liberadas pelo reservatório de escoamento subterrâneo, sendo definido pelo parâmetro K_b do modelo do reservatório linear simples.

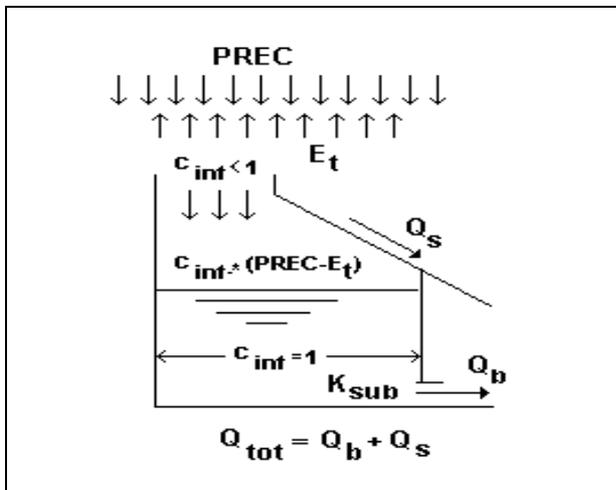


Figura 3. Modelo simplificado de balanço hídrico.

Metodologia de ajuste

O ajuste do modelo pode ser realizado por tentativa e erro, ou por otimização. Considerando-se a existência de apenas três valores de vazões observadas, o ajuste manual tende a ser rápido (Figura 4). Além disso, é desejável que o usuário adquira uma sensibilidade hidrológica no processo de ajuste dos parâmetros para melhor interpretar os resultados.

As principais incertezas são consequência do seguinte:

- se o registro de precipitação do período com vazões contiver erros, os mesmos são transferidos aos parâmetros e aos resultados. Evidentemente, quanto maior forem os registros de vazões, menores serão as incertezas,
- conjunto de três vazões ajusta principalmente o parâmetro K_b e o C_{inf} é obtido indiretamente e depende muito do evento ocorrido,
- coeficiente K_b pode variar entre o período chuvoso e a estiagem, a medida que diferentes partes do aquífero contribuam para a vazão de saída e,
- modelo despreza a evapotranspiração do solo. Quando a camada superior do solo retém muita umidade, e perde por evapotranspiração, esta limitação pode comprometer o balanço.

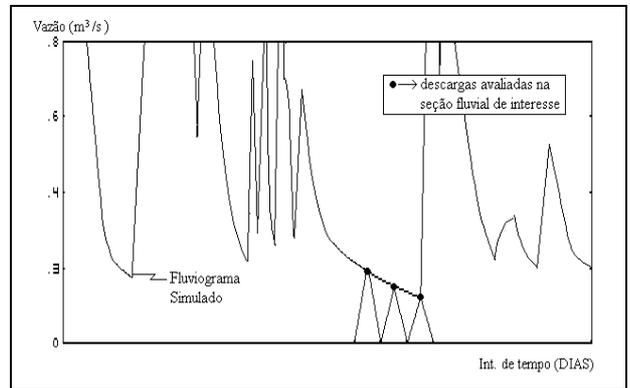


Figura 4. Esquema de estiagem simulada.

Para minimizar o erro da estimativa, principalmente do C_{inf} , deve-se verificar para o período de avaliação se a vazão específica média gerada é da mesma ordem de grandeza das observadas na região. Desta forma, o modelo não estaria gerando valores acima ou abaixo em termos médios.

RESULTADOS

Para a verificação da metodologia foram utilizados os dados de uma rede experimental de seis pequenas bacias monitoradas por três anos continuados, com áreas de drenagem situadas entre 1 e 11 km², segundo descrição apresentadas por Silveira e Tucci (1998) na região da encosta do planalto do Rio Grande do Sul.

A etapa inicial de avaliação da metodologia parte da seleção de eventos de estiagem junto ao fluviograma monitorado para a bacia.

A seleção dos períodos de estiagem para cada pequena bacia foi baseado no seguinte:

1. a ocorrência de um período de ausência de chuvas na região;
2. a ocorrência real de estiagens no manancial estudado.

A identificação da estiagem pode ser realizada através da análise visual direta do fluviograma observado em conjunto com os dados de chuva disponíveis de um ou mais postos pluviométricos tomados como referência para a bacia. Entretanto, para diminuir a subjetividade da escolha e melhor caracterizar o processo, foi estabelecido inicialmente como critério que os períodos de estiagem fossem selecionados a partir de um número mínimo de 7 dias antecedentes e consecutivos sem chuva.

A condição mínima para aplicação da metodologia foi definida como sendo o conhecimento de três medições locais, avaliadas a cada dois dias. A justificativa para o estabelecimento deste intervalo de tempo pequeno entre as medições, de dois dias, refere-se a caracterização de um intervalo inicial para a aplicação do procedimento. Na simulação do caso real de aplicação pelo usuário, estas medições poderiam ser desenvolvidas no período de uma semana, como por exemplo, nos dias úteis de segunda-feira, quarta-feira e sexta-feira. No entanto, intervalos maiores entre as medições locais (5 dias, por exemplo) seriam melhores para a caracterização do deplecionamento fluvial na estiagem, em função da melhor estabilização do processo. A restrição ao aumento do intervalo de tempo entre as medições locais, refere-se a possibilidade de ocorrência de uma precipitação que descaracterize a estiagem, provocando as perdas das medições anteriores e, da mobilização de ida ao local.

A disponibilidade de uma série histórica de 3 anos de dados fluviométricos para a avaliação do procedimento, possibilitou a identificação de algumas dificuldades acerca das condições práticas de aplicação pelo usuário. Observou-se que a ausência de chuva na região é um indicador satisfatório da ocorrência real de uma estiagem na pequena bacia, mesmo que os dados de chuva tomados como referência para aplicação da metodologia não estivessem inseridos nos domínios da bacia. Entretanto, o critério adotado de ausência total de chuvas no período da estiagem, acabou por isolar poucos eventos, em média apenas dois por ano para cada pequena bacia. A aplicação prática do método não pode se restringir a raras ocasiões no ano e além disso, este pequeno número de even-

tos de estiagens selecionadas, seriam insuficientes para uma melhor avaliação dos resultados encontrados. Para sanar tal dificuldade o critério de seleção, inicialmente estabelecido, foi modificado.

O critério modificado, que proporcionou a seleção de um número razoável de eventos de estiagens, foi o que permitiu a ocorrência de até 15 mm de chuva durante o período de tempo da estiagem selecionada. O período total de tempo da estiagem, seria constituído então pelos 7 dias antecedentes à medição de descargas mais os 5 dias nos quais as três medições seriam efetuadas, totalizando 12 dias consecutivos. Entretanto, como os eventos potenciais de ocorrência de estiagens são selecionados através da precipitação regional e não local, na etapa seguinte da seleção de estiagens, muitos eventos são descartados pela falta de representatividade das chuvas na pequena bacia. A partir do momento que se admitiu a ocorrência de pequenas chuvas na região, já não é garantida regionalmente a ausência de chuvas em toda a área de influência assumida para os postos pluviométricos de referência. Isto implica na ocorrência de chuvas isoladas, especialmente e temporalmente localizadas na região, que podem ocorrer na bacia e não na região dos postos pluviométricos ou, o contrário, de chuvas que podem ocorrer junto à região dos postos pluviométricos e não na bacia. Os eventos abandonados foram aqueles nos quais se observou o seguinte: (i) quando não existia resposta na bacia à estímulos de chuva dos postos pluviométricos de referência ou; (ii) quando existia elevação de vazões na pequena bacia com ausência de estímulo de precipitação no posto de referência.

No caso real de aplicação da metodologia, estas dificuldades poderão ser minimizadas, já que o hidrólogo responsável pela avaliação inspecionará *in loco* a caracterização da estiagem, através de consultas a moradores locais sobre a ocorrência de chuvas localizadas na área, nos dias anteriores aos trabalhos de campo, assim como pela avaliação direta da magnitude da vazão encontrada no manancial fluvial.

Ajuste dos eventos

Na simulação das pequenas bacias utilizou-se os dados mais próximos, postos de Sapucaia e Taquari, respectivamente, para precipitações diárias e evaporação do tanque classe A. Os dados de evaporação deste tanque podem ser considerados como uma boa representação da evapotranspiração potencial em bacias rurais da região (Dorfman, 1977).

Para iniciar o ajuste do balanço hídrico estabeleceu-se como valor inicial o parâmetro $C_{inf} = 0,5$ representando que a metade da precipitação, descontada das perdas por evaporação, produz escoamento de base na bacia e que a outra metade produz o escoamento superficial. Entretanto, os primeiros ajustes do balanço hídrico para a bacia de Schneider I conduziram a um coeficiente de infiltração médio com valor próximo de 0,35. Embora isso não tenha sido uma questão substancial do ajuste, passou-se a adotar, para o início das simulações, este valor para o coeficiente de infiltração. Com relação ao valor do parâmetro K_b , para início da simulação, adotou-se o valor calculado pela Equação 18 que pode ser obtido a partir das medições locais, definidas pelo método proposto.

Na Figura 5 são apresentadas as curvas de permanência geradas com base nas simulações de vazão de todas as amostras em duas bacias (as demais tem resultados similares). Junto, é apresentado a curva de permanência, obtida com base nos dados observados. Observa-se que a dispersão das curvas ajustadas contém a curva de permanência observada.

Ressalte-se que cada curva de permanência ajustada a cada evento de estiagem, foi construída com a reprodução das vazões no mesmo período para o qual se dispõe de observações fluviométricas, a fim de que esta curva possa ser comparada à curva de permanência construída com essas observações (a curva de permanência observada).

Nas Tabelas 1 e 2 identificam-se as datas de início dos períodos de estiagem selecionados, assim como os parâmetros encontrados pelo ajuste do modelo. Esses resultados não consideram ainda a análise de incertezas, apenas explicam preliminarmente a variabilidade do teste de curvas calculadas. Por isso elas foram chamadas de curvas de permanência amostrais, para indicar claramente que elas são resultados dos jogos de parâmetros ajustados à amostra das estiagens. Os valores de K_b e C_{inf} nas Tabelas 1 e 2 representam na linguagem estatística, amostras dos respectivos estimadores.

Estimativas das incertezas

As incertezas dos modelos hidrológicos decorrem (Haan, 1989): (a) dos dados de entrada e saída; (b) da estrutura do modelo; e (c) dos parâmetros.

Os dados de entrada englobam variáveis meteorológicas de escoamento e de características

das bacias. A incerteza da estrutura do modelo é causada pela limitação da representação dos processos, enquanto a incerteza dos parâmetros é resultado de inadequadas técnicas de estimativa, dos dados utilizados e da variabilidade temporal e espacial dos parâmetros.

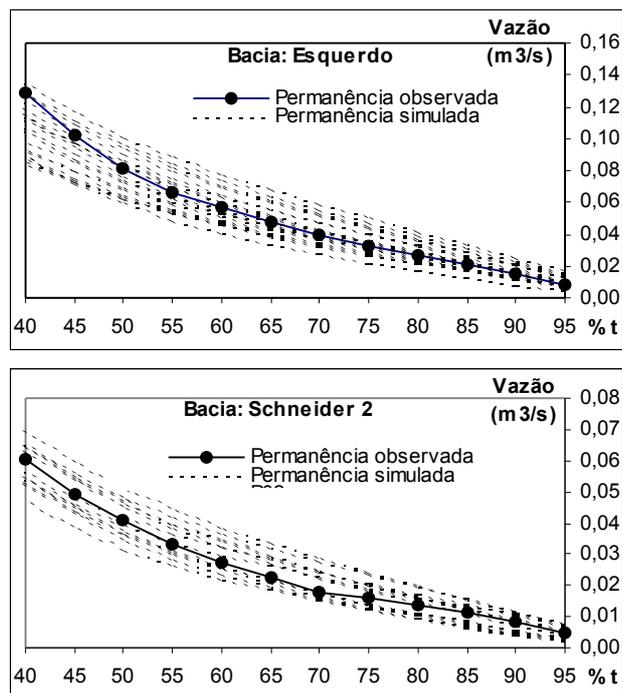


Figura 5. Curvas de permanência simuladas com parâmetros amostrais das bacias de Vale Esquerdo e Schneider 2.

A estimativa dos parâmetros pode ser puramente matemática ou estatística. A abordagem matemática enfoca o ajuste dos parâmetros com método determinístico, através do ajuste matemático de função objetivo. A abordagem estatística considera o modelo hidrológico assemelhado à uma regressão estatística com as variáveis hidrológicas envolvidas, podendo ser consideradas, em grande parte, de natureza aleatória. Isto autoriza o uso de técnicas estatísticas para a estimativa dos parâmetros e avaliação de suas incertezas.

Sendo os erros devidos aos parâmetros, a análise estatística considera que os mesmos são: a) independentes da magnitude das vazões; b) independentes entre si; c) com valor esperado nulo e variância finita e; d) com distribuição normal. A primeira e a terceira hipótese são frequentemente violadas no uso de modelos hidrológicos.

Estimada a distribuição estatística dos parâmetros é possível, para uma dada entrada, gerar respostas de bacia relacionadas com a probabili-

Tabela 1. Eventos selecionados e parâmetros de ajuste obtidos nas Bacias de Saporanga.

Bacia de São Jacó				Bacia de Schneider 1				Bacia de Schneider 2			
N	DATA	K_{sub}	C_{inf}	N	DATA	K_{sub}	C_{inf}	N	DATA	K_{sub}	C_{inf}
1	23/02/93	10	0,35	1	24/02/93	6,00	0,35	1	22/02/93	8	0,35
2	15/05/93	9	0,38	2	24/04/93	7,00	0,25	2	15/05/93	7	0,35
3	06/06/93	8	0,30	3	15/05/93	6,00	0,33	3	06/06/93	5	0,30
4	04/08/93	11	0,42	4	06/06/93	6,00	0,25	4	31/07/93	7	0,30
5	19/08/93	11	0,43	5	03/08/93	7,00	0,32	5	02/08/93	6	0,35
6	09/09/93	14	0,40	6	11/01/94	7,00	0,20	6	09/09/93	6	0,35
7	02/11/93	9	0,41	7	26/02/94	8,00	0,34	7	11/01/94	5	0,26
8	11/01/94	9	0,25	8	22/08/94	7,00	0,32	8	06/03/95	6	0,35
9	25/02/94	9	0,45	9	17/09/94	7,00	0,32	9	23/08/95	7	0,38
10	17/08/94	8	0,50	10	02/03/95	6,00	0,34	10	23/10/95	4	0,30
11	14/09/94	9	0,50	11	24/05/95	8,00	0,34	11	24/10/95	5	0,30
12	06/03/95	9	0,43	12	30/08/95	8,00	0,34	12	29/11/95	6	0,35
13	18/05/95	9	0,48	13	10/10/95	7,00	0,34		MÉDIA	6,00	0,33
14	24/05/95	9	0,48	14	23/10/95	6,00	0,28		Desvio padrão	1,13	0,04
15	23/08/95	9	0,39		MÉDIA	6,86	0,31				
16	25/10/95	8	0,46		Desvio padrão	0,77	0,05				
17	28/11/95	9	0,25								
	MÉDIA	9,41	0,40								
	Desvio padrão	1,46	0,08								

dade de ocorrência devido às incertezas dos parâmetros através do método de Monte Carlo.

A variação das vazões ocorrem devido às características da bacia hidrográfica e, também, devido à variabilidade temporal e espacial da precipitação precedente à estiagem. Portanto, seriam necessários vários eventos de estiagem para avaliar o erro estimado em cada estimativa isolada (ajuste do modelo). Do conjunto de erros encontrados são obtidas as incertezas das estimativas de vazões.

Para tanto, foram selecionados do fluvio-grama monitorado em cada uma das seis bacias estudadas, diferentes conjuntos de três vazões, em período de estiagem. O conjunto de três vazões define um evento a ser ajustado e produz, como resultado, um jogo de parâmetros. As incertezas associadas à simulação chuva-vazão podem ser inferidas a partir das incertezas dos parâmetros (Haan, 1989). Isto é, a incerteza das vazões calculadas pelo modelo dependem do comportamento probabilístico dos parâmetros.

Os parâmetros C_{inf} e K_b estão vinculados, basicamente, ao processo de geração do escoamento de base e suas estimativas procuram ajustar o modelo preferencialmente na representação das depleções. As vazões na depleção decrescem continuamente, constituindo uma situação estável não sujeita à perturbações significativas que caracterizam os períodos de cheia, governados pela precipitação. Logo, é razoável supor que os erros

nas vazões calculadas nos períodos de estiagem, sejam independentes da magnitude das vazões e tenham média nula e variância finita, as duas condições mais violadas pelos modelos hidrológicos das quatro necessárias para existência de parâmetros reais.

A metodologia de avaliação das incertezas consistiu do seguinte:

1. avaliação da independência dos parâmetros;
2. ajuste de uma distribuição estatística para cada parâmetro em cada bacia;
3. geração pelo Método de Monte Carlo de N séries de vazões, onde cada parâmetro tem seu valor determinado pela geração de números aleatórios com distribuição estatística, que no caso foi a Normal. O valor de N foi inicialmente estimado em 1000 e ajustado de acordo com a variabilidade das estatísticas resultantes;
4. determinação da curva de permanência para cada série;
5. para uma probabilidade P da curva de permanência existem N valores de Q_p . Ajustando a este conjunto de Q_p uma distribuição Normal, é possível obter o valor

Tabela 2. Eventos selecionados e parâmetros de ajuste obtidos nas Bacias de Dois Irmãos.

Bacia de Vale Direito				Bacia de Vale Esquerdo				Bacia de Carpintaria			
N	DATA	K _{sub}	C _{inf}	N	DATA	K _{sub}	C _{inf}	N	DATA	K _{sub}	C _{inf}
1	22/02/93	7,50	0,35	1	22/02/93	6,00	0,30	1	22/02/93	11,00	0,35
2	15/05/93	8,50	0,40	2	15/05/93	6,00	0,34	2	16/05/93	7,00	0,40
3	06/06/93	7,70	0,30	3	06/06/93	7,00	0,25	3	17/07/93	9,00	0,33
4	14/07/93	7,00	0,50	4	15/07/93	6,50	0,33	4	02/08/93	11,50	0,36
5	02/08/93	8,00	0,50	5	11/08/93	6,40	0,34	5	06/09/93	12,00	0,40
6	15/08/93	10,00	0,43	6	01/09/93	7,50	0,38	6	02/11/93	7,50	0,40
7	04/09/93	10,00	0,40	7	02/11/93	7,00	0,35	7	27/03/94	9,00	0,44
8	02/11/93	8,80	0,40	8	11/01/94	5,00	0,25	8	04/11/94	12,00	0,40
9	12/01/94	7,00	0,30	9	25/02/94	8,00	0,38	9	15/01/95	7,00	0,30
10	27/03/94	7,50	0,50	10	12/07/94	8,00	0,38	10	12/03/95	12,00	0,40
11	15/01/95	7,50	0,30	11	17/08/94	7,50	0,36	11	21/04/95	12,00	0,40
12	09/03/95	8,90	0,48	12	13/09/94	7,50	0,36	12	03/05/95	12,00	0,40
13	03/05/95	9,00	0,45	13	15/01/95	8,00	0,25	13	28/05/95	12,00	0,40
14	05/05/95	9,00	0,45	14	10/03/95	8,00	0,33	14	28/08/95	10,50	0,32
15	24/05/95	9,00	0,45	15	20/04/95	11,00	0,34	15	28/10/95	10,00	0,30
16	23/08/95	10,00	0,29	16	03/05/95	5,50	0,32	16	21/11/95	9,00	0,33
17	23/10/95	10,20	0,27	17	10/05/95	8,00	0,27	17	10/12/95	9,00	0,33
18	22/11/95	11,00	0,27	18	26/05/95	7,50	0,29		MÉDIA	10,14	0,37
19	03/12/95	11,00	0,27	19	23/08/95	7,50	0,27		Desvio padrão	1,86	0,04
	MÉDIA	8,82	0,39	20	05/10/95	8,50	0,40				
	Desvio padrão	1,28	0,09	21	23/10/95	6,50	0,25				
				22	24/11/95	6,70	0,25				
					MÉDIA	7,25	0,32				
					Desvio padrão	1,23	0,05				

esperado de Qp e seu intervalo de confiança para um nível de significância de α .

Avaliação da independência entre parâmetros

- Na Figura 6 são apresentados os valores obtidos para os parâmetros de todas as bacias, mostrando uma nuvem de pontos que induz a não existência de correlação. O coeficiente de correlação obtido foi $r=0,06$.

Ajuste de distribuição estatística aos parâmetros

- A distribuição Normal não apresentou um ajuste ideal devido às características do ajuste do modelo através de tentativa e erro, já que o usuário tende a se fixar em alguns valores de parâmetros, gerando alguns degraus na distribuição empírica. Na Figura 7 pode-se observar estes resultados para duas bacias.

Um total de 250 pares de valores $C_{inf}-K_b$ foram gerados, para cada uma das seis bacias estudadas, com base nas suas médias e desvios-padrão amostrais que constam das Tabelas 1 e 2.

Este número de amostras geradas por Monte-Carlo foi fixado em função da estabilização da média e do desvio padrão que lhe deram origem.

Em seguida, o modelo chuva-vazão foi utilizado para obter as séries de vazões e as curvas de permanência correspondentes. Os percentis considerados foram as vazões com permanência de 40 a 95%, de 5 em 5%.

Os intervalos de confiança de 95% de cada percentil foram calculados primeiramente com o erro padrão da estimativa, centralizado no percentil observado.

Na Figura 8 são apresentadas intervalos de confiança de 95% obtidos, centralizados com base na curva observada. De forma geral pode-se dizer que estes intervalos, para todas bacias estudadas, situam-se a $\pm 50\%$ do valor observado nas permanências mais elevadas. Para efeito comparativo são apresentadas também as curvas médias das curvas estimadas pelo modelo, para duas bacias.

Na Figura 9 são apresentados os intervalos de confiança, centralizados com base na média das curvas calculadas pelo modelo. Nota-se que as bandas de confiança, no entorno da curva média,

são de magnitude semelhante às anteriores e abrangem com folga as curvas de permanência observadas.

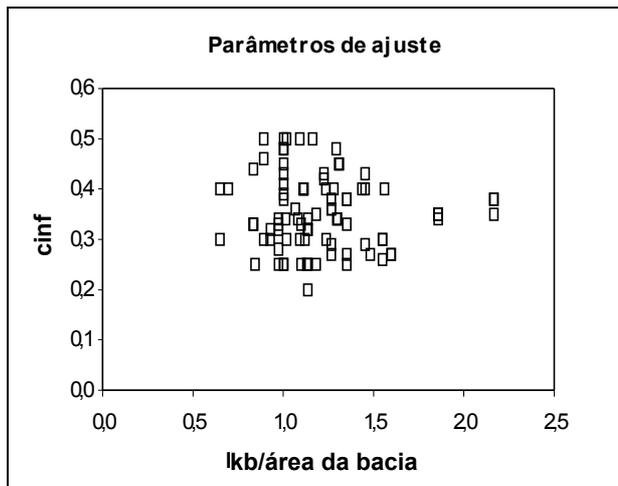


Figura 6. Espectro de variabilidade dos parâmetros.

A diferença na forma de calcular os intervalos de confiança é a seguinte: enquanto a Figura 8 indica a incerteza do ponto de vista da curva de permanência observada, a Figura 9 avalia a incerteza a partir da tendência central das 250 curvas simuladas.

Assim, conhecendo-se um evento de estiagem e valores indicativos da banda de confiança de 95% para os dois modos de cálculo abordados, é possível interpretar o significado da curva de permanência gerada com a ajuda do modelo:

- i. A banda de confiança 95% no entorno da curva de permanência observada, significa que há 95% de chance de que a curva de permanência calculada se distancie da curva de permanência observada em, no máximo, meio intervalo para cima ou para baixo;
- ii. A banda de confiança 95% no entorno da curva de permanência média do feixe gerado com o modelo, abrangendo a curva de permanência observada, significa que há 95% de chance de que a curva de permanência calculada se distancie em, no máximo, meio intervalo para cima ou para baixo da tendência média que o modelo estima para a curva de permanência.

Evidentemente, se uma visão puramente estatística predominar na análise, isto é, se a curva de permanência observada for tomada como mera

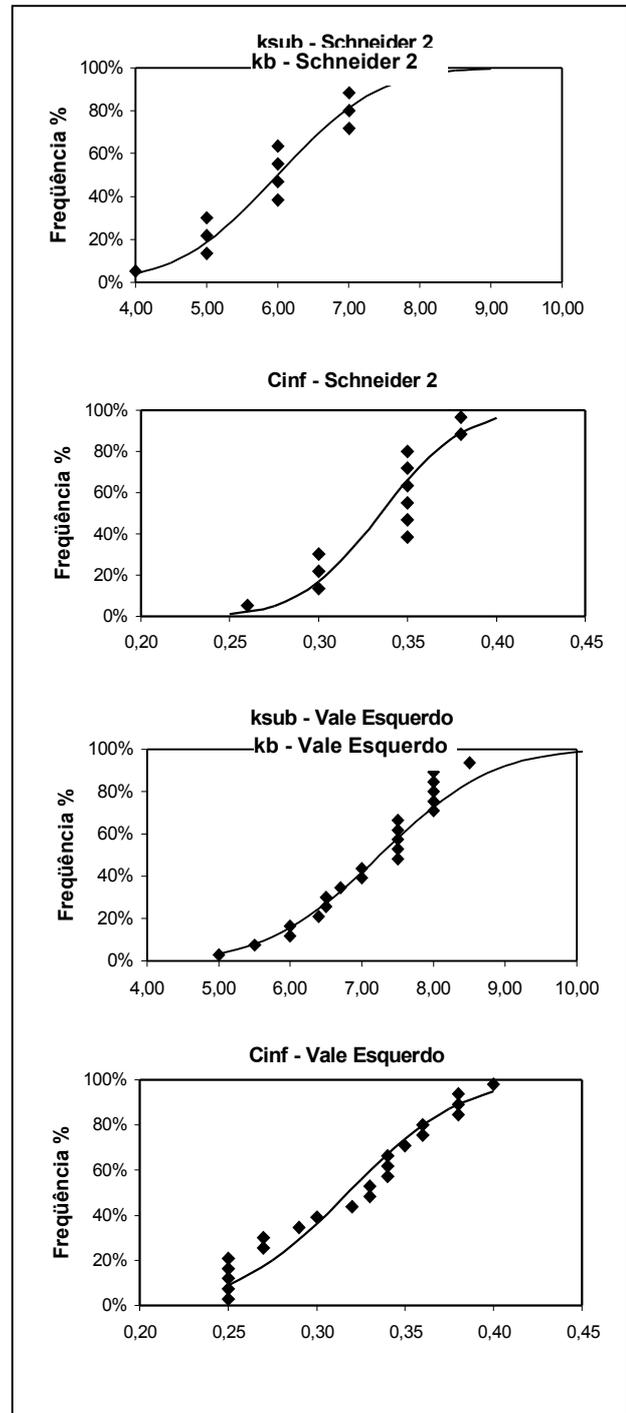


Figura 7. Distribuição de frequências dos parâmetros para as bacias Vale Esquerdo e Schneider 2.

realização do universo possível das curvas de permanência, a interpretação ii) deve ser utilizada. Se, por outro lado, houvesse uma certeza determinística de que a curva de permanência observada equivale a curva de permanência média real da

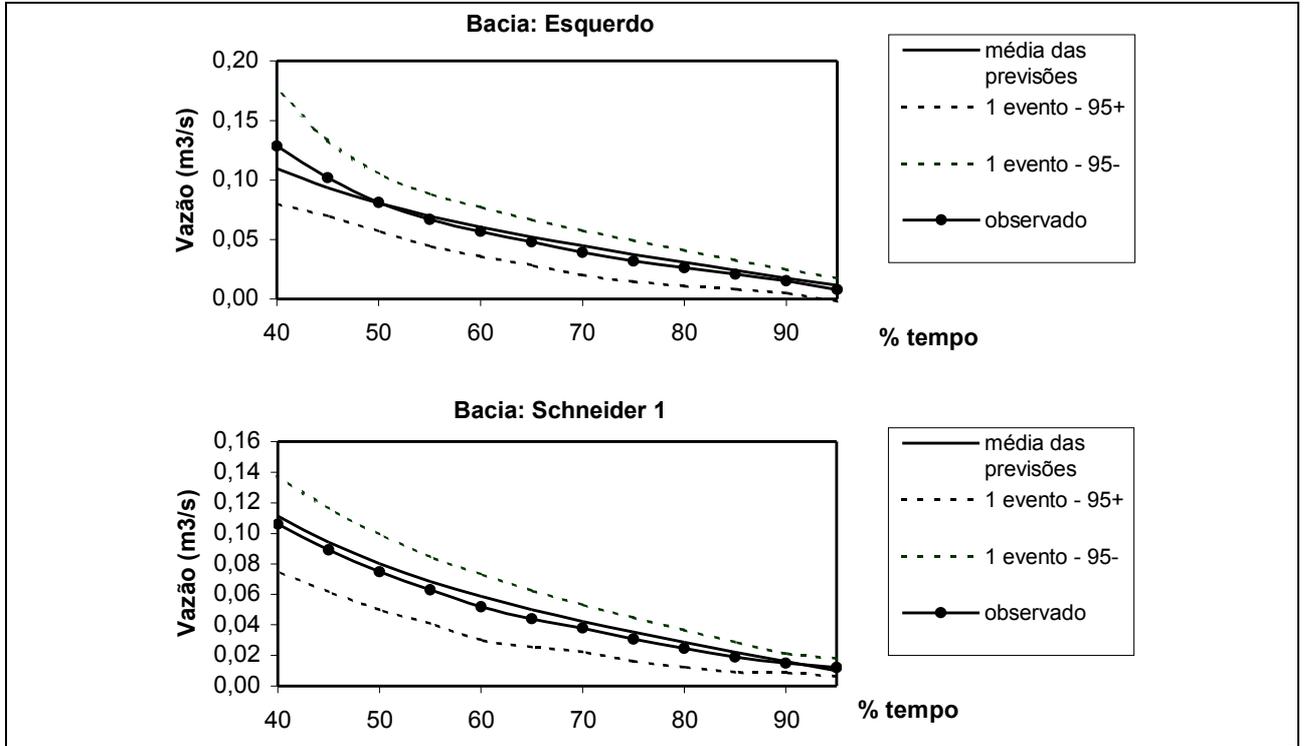


Figura 8. Curvas de permanência e intervalos de confiança de 95% centralizadas na curva média observada das bacias de Schneider 1 e Vale Esquerdo.

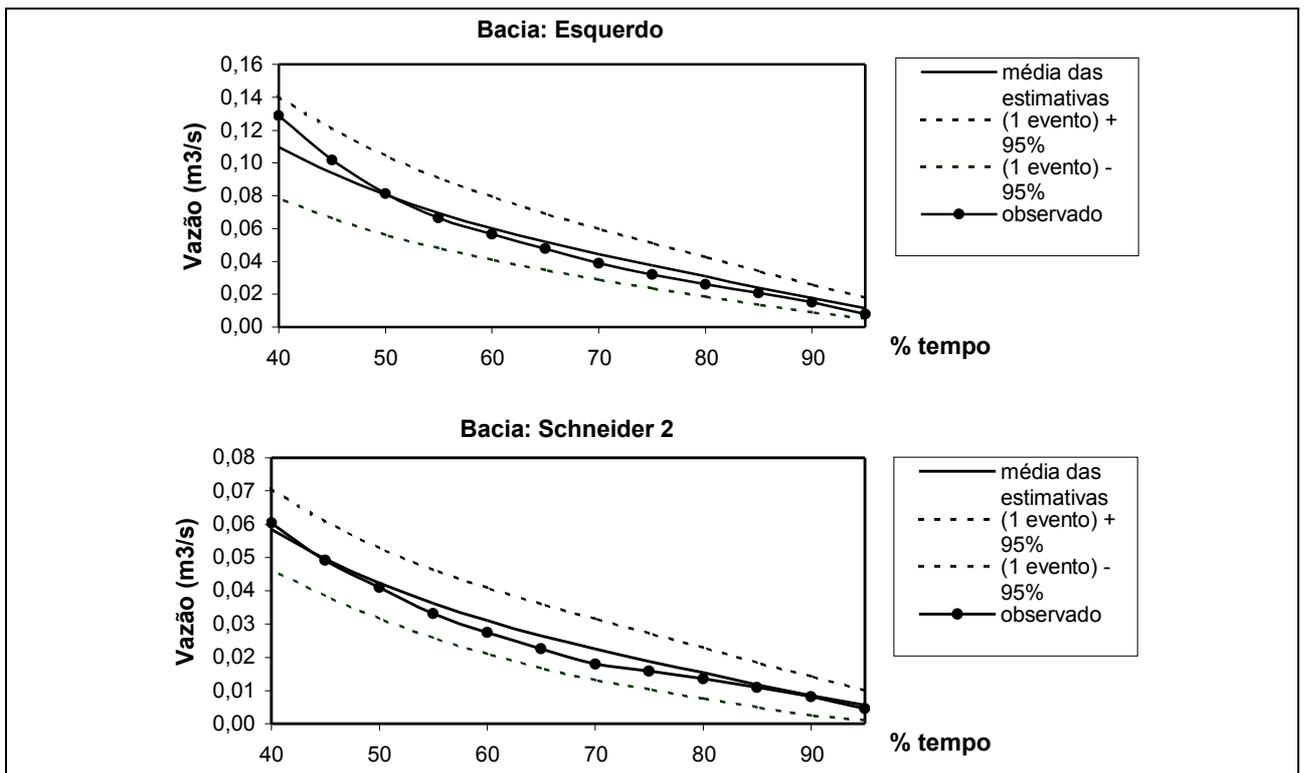


Figura 9. Curvas de permanência e intervalos de confiança de 95% centralizadas na curva média das estimativas das bacias Schneider 2 e Esquerdo.

bacia, a interpretação i) seria mais aconselhável. O enfoque estatístico não obriga que a curva de permanência observada seja a tendência central. Entretanto, não há garantia que a média do feixe de curvas de permanência geradas pelo modelo, seja a tendência central.

Independente de sua interpretação, os intervalos de confiança das Figuras 8 e 9 são indissociáveis das condições de análise estipuladas: eles correspondem à situação em que o usuário tem acesso a apenas 1 evento de estiagem (ou seja, 3 vazões em depleção) para ajustar o modelo em função do histórico disponível de precipitações e evaporações.

Isto leva a pensar que esta medida da incerteza pode variar, isto é, ela pode diminuir, quando houver possibilidade de obter-se mais de um evento de estiagem, por medição direta na bacia.

De fato, uma análise da incerteza do método que está sendo avaliado não estaria completa sem supor situações mais favoráveis de obtenção de dados locais, como é feito no item seguinte.

Variabilidade da incerteza em função do número de estiagens medidas

Até aqui, considerou-se apenas uma estiagem para analisar as estimativas com o método proposto. Para avaliar o ganho de informação considerando-se mais de um evento de estiagem, utilizou-se o critério descrito a seguir: define-se como evento de duas estiagens ou duas depleções, a consideração de dois eventos de estiagem quaisquer (cada qual definido por três vazões medidas), intercalados por, no mínimo, uma cheia ou uma elevação de vazões. Generalizando, teríamos evento de 3, 4 até "n" estiagens. Entretanto o ajuste permanece individual, por estiagem. Assim, os parâmetros do evento múltiplo de estiagem é a média aritmética dos valores obtidos individualmente para cada estiagem.

O conhecimento de um evento múltiplo de estiagens significa ter-se, na realidade, vários conjuntos esporádicos de vazões avaliadas em campo, sem que isso constitua um verdadeiro conhecimento do fluviograma, espelho da produção hídrica da bacia.

Para verificar a diminuição da incerteza com um certo evento de n estiagens, à medida que n aumenta, foram geradas por Monte Carlo conjuntos adicionais de pares de parâmetros $C_{inf}-K_b$. Consideraram-se as situações com n=2, n=3 e n=10, para cada bacia. Para n=2 foram gerados 500 pares de $C_{inf}-K_b$, tomando-se a média de cada

2 gerações. Para n=3, foram gerados 750 $C_{inf}-K_b$ e calculadas as médias para cada trinca de gerações. E, finalmente, para n=10, foram gerados 2500 $C_{inf}-K_b$, com média a cada 10. Assim, a exemplo do item anterior, trabalhou-se com 250 pares de $C_{inf}-K_b$ para cada n e para cada bacia.

Contando as simulações do item anterior o modelo chuva-vazão definido foi rodado 6000 vezes (6 bacias, 4 conjuntos de estiagens, 250 jogos de parâmetros), para traçar um panorama das incertezas envolvidas na aplicação do método-hora em análise.

Foram consideradas, também, as duas maneiras de calcular o intervalo de confiança de 95% das Figuras 8 e 9.

Na Tabela 3 são apresentados os valores do desvio padrão (média gerada), em função da probabilidade P da curva de permanência e do número de amostras para duas bacias. Observa-se que, após 3 eventos, o desvio-padrão está próximo ao da série de três amostras de 10 eventos.

Em termos absolutos, o erro padrão das estimativas representa, em média, de 15% a 30% dos valores esperados para n=1.

A consideração de mais de uma estiagem para aplicação do método proposto proporcionou melhora dos resultados, mas isto pode estar relacionado ao fato de que a consideração de apenas um evento de estiagem pode coincidir com uma eventual falta de representatividade da precipitação regional, pois, normalmente, não se dispõe de posto ou informações pluviométricas na localização específica da pequena bacia. Esta falta de representatividade das chuvas pode provocar ajustes do modelo de balanço hídrico, que induzam à afirmação de parâmetros muito exagerados na associação com os macro-processos envolvidos, segundo a definição do modelo, podendo levar o analista a solicitar a agregação de novos eventos de estiagem para a verificação dos resultados (parâmetros) encontrados. Em segundo lugar, para reforçar a idéia de se dispor preferencialmente de dois eventos para a aplicação do método, pode-se afirmar que o ajuste de mais estiagens ($n > 1$) evita que alguma tendenciosidade, que tenha passado despercebida do usuário, afete significativamente uma avaliação realista da disponibilidade hídrica.

Neste sentido, pode ser recomendável a instalação de um pluviômetro simplificado em lugar conveniente, junto aos domínios da pequena bacia e da residência de um morador local. Desta forma, poder-se-ia desenvolver uma avaliação mais parcimoniosa dos parâmetros do modelo, diminuindo os riscos de falta de representatividade da precipitação regional para o caso especial daquela estiagem avaliada. No passo seguinte, para a ge-

Tabela 3. Erro padrão das estimativas em percentuais do valor médio esperado.

BACIA (calha)	A (km ²)	Nº de de- pleções por evento	r* 50%	r* 60%	r* 70%	r* 80%	r* 90%	r* 95%
SÃO JACÓ	8,98	1	19,40	19,88	20,26	21,17	24,10	26,04
		2	13,95	14,49	14,77	15,22	17,22	18,62
		3	12,12	12,46	12,79	13,07	14,80	16,21
		10	6,73	6,98	7,21	7,42	8,61	8,97
SCHNEIDER II	3,23	1	12,77	16,45	20,89	25,49	35,29	41,07
		2	8,64	11,11	14,41	18,06	25,58	29,82
		3	6,74	8,83	11,26	14,01	20,69	25,00
		10	3,94	4,70	5,58	6,92	9,09	14,29
SCHNEIDER I	6,13	1	14,07	14,48	15,33	16,32	19,25	22,55
		2	9,95	10,20	10,80	11,42	13,04	15,69
		3	7,83	8,15	8,69	9,34	10,56	12,75
		10	3,86	4,08	4,22	4,50	5,00	7,77
CARPINTARIA	10,78	1	12,59	13,35	14,31	15,99	20,68	23,71
		2	9,23	9,77	10,32	11,59	14,94	17,28
		3	7,68	8,07	8,51	9,48	12,30	13,84
		10	4,00	4,17	4,41	4,78	6,32	7,02
V. DIREITO	6,88	1	21,38	22,16	22,84	23,69	26,69	28,71
		2	15,11	15,61	16,02	16,46	18,52	20,20
		3	12,05	12,54	12,89	13,31	15,10	16,75
		10	4,11	6,64	6,94	7,25	8,36	9,31
V.ESQUERDO	5,92	1	15,28	16,25	17,75	19,81	24,29	28,45
		2	11,39	12,05	13,17	14,52	17,88	21,37
		3	9,27	9,88	10,69	11,90	15,08	18,10
		10	5,30	5,58	6,22	7,05	8,33	10,26
MÉDIAS		1	15,91	14,69	18,56	20,41	25,05	28,42
		2	12,02	12,20	13,24	14,54	17,86	20,04
		3	11,92	9,98	10,80	11,85	14,75	17,10
		10	4,65	5,35	5,76	6,32	7,61	9,60

Onde r* é o erro padrão das estimativas em percentuais do valor médio esperado.

ração da série histórica de vazões para a pequena bacia, poder-se-ia utilizar a precipitação regional do longo período disponível de dados, utilizando os parâmetros avaliados em função da chuva local.

COMPARAÇÃO DAS SÉRIES GERADAS E A REGIONALIZAÇÃO

Inicialmente, deve-se considerar que não existe um estudo de regionalização da curva de permanência para pequenas bacias do Rio Grande do Sul. O estudo disponível abrange médias e grandes bacias e não deve ser aplicado em pequenas bacias,

conforme recomendação da própria publicação (Tucci, 1991). Entretanto, na ausência de metodologia concorrente, muitas vezes o método é aplicado indevidamente. Pretende-se, neste item, comparar os resultados de uma aplicação como esta, com os obtidos neste trabalho.

A comparação das curvas de permanência do estudo regional com as curvas obtidas com o monitoramento das calhas produziria, a princípio, uma análise tendenciosa, visto que as curvas regionais foram elaboradas a partir de séries mais extensas (20 anos em média), e as curvas observadas foram construídas com os dados de vazão de uma série curta (1993-1995).

Para analisar esta possível tendenciosidade, foram comparadas as curvas de permanência geradas com dados de precipitação de um período mais longo (1975-1995), e as geradas com as precipitações do curto período acima referido. O período curto, de monitoramento das calhas, apresenta precipitações em torno de 7% mais elevadas.

O modelo chuva-vazão foi aplicado para avaliar a repercussão na curva de permanência desses 7% a mais. Para cada bacia, e para ambos os períodos considerou-se, evidentemente, um mesmo jogo de parâmetros, K_b e C_{inf} . O jogo de parâmetros considerado para cada bacia (cada jogo simulando ambos os períodos) correspondeu aos parâmetros médios de todos os ajustes do modelo aos eventos individuais (Figuras 1 e 2). Na Figura 11 são apresentadas, para duas das bacias estudadas, as curvas de permanência calculadas e a curva observada. Observa-se que os 7% a mais da precipitação do curto período produziu uma elevação dos escoamentos, avaliada em média em 5% para as seis bacias. Esta diferença pode ser considerada pequena, significando na prática, que é possível realizar a comparação direta da curva de permanência gerada pelos estudos regionais, com a curva de permanência observada nas calhas. Por outro lado, a curva de permanência gerada pelo modelo com chuvas de 1975 a 1995 tem boa aderência à curva de permanência do período de monitoramento (1993 a 1995), o que reforça mais a possibilidade dessa comparação.

Na Figura 12 apresenta-se, para duas bacias, a curva de permanência observada, a curva estimada com base numa amostra ($n=1$), o intervalo de confiança e a curva obtida pela regionalização. Pode-se observar que neste caso, a regionalização subestima os resultados.

A diferença média porcentual, para todas as bacias, foi avaliada em pouco menos de 80% no trecho inferior da curva de permanência. Isto é, houve uma subestimação das vazões dessa ordem pela regionalização. Este resultado poderia indicar uma evidente inaplicabilidade do estudo regional disponível. Entretanto, é preciso verificar se a curva de regionalização obtida com dados de bacias médias e grandes, pode comportar-se como realização estatística possível da estimativa do método proposto, visto as suas incertezas. Via de regra, constata-se que a estimativa da regionalização cai fora dessas bandas de confiança (Figura 12), o que, na prática, é um indicativo consistente de que a extrapolação forçada para pequenas bacias do estudo regional não produz bons resultados. Entretanto, as equações de regressão para a região do Estado das bacias estudadas são precárias (Tucci, 1991), o que coloca mais incerteza nesta comparação.

Para outras regiões do Rio Grande do Sul, nada pode ser afirmado. As comparações realizadas não autorizam a dizer que o mesmo se reproduziria em outras regiões do Estado. Pode haver casos em que a extrapolação da regionalização estime curvas de permanência em pequenas bacias mais próximas da realidade, assim como o contrário pode se verificar. Somente será possível chegar a alguma conclusão mais firme quando houver dados de vazão suficientes para pequenas bacias em todo o Estado. A título ilustrativo, entretanto, pode-se fazer uma projeção de retorno econômico no projeto de PCHs, considerando-se que as estimativas encontradas possam ser extrapoladas para todo o Estado. Para potencial hidrelétrico remanescente de 6000 MW (Rio Grande do Sul, 1986) em pequenas e micro-centrais, considerando-se um aproveitamento de 50% da potência e uma tarifa média de energia de R\$ 40, uma subestimação sistemática das vazões em 75% pode deixar sem aproveitamento uma riqueza anual da ordem de 800 milhões de reais ($6000 \text{ MW} \times 8760 \text{ h} \times 50\% \times 40 \text{ R\$/MW} \times 0,75$).

A incerteza que cerca a aplicação do estudo de regionalização disponível (Tucci, 1991), de forma extrapolada para pequenas bacias, não deve ser entendida como uma deficiência da técnica da regionalização. Provavelmente, no caso de existência de dados suficientes de pequenas bacias, a regionalização e o método proposto neste estudo seriam métodos concorrentes de estimativa da curva de permanência.

CONCLUSÕES

Este estudo apresenta:

- uma alternativa à ausência de metodologia para a quantificação de vazões medianas e mínimas de pequenas bacias em regiões, cujos pequenos mananciais estão desprovidos de dados fluviométricos - uma realidade quase constante no território brasileiro;
- a estratégia de algumas medições locais em períodos de estiagem associada ao modelo precipitação-vazão, permite a estimativa da curva de permanência em bacias pequenas com erro aceitável.

A estimativa obtida pela metodologia proposta não depende de parâmetros, equações regionais ou coeficientes de regiões definidas como hidrologicamente homogêneas. Como o procedimento depende da avaliação específica de

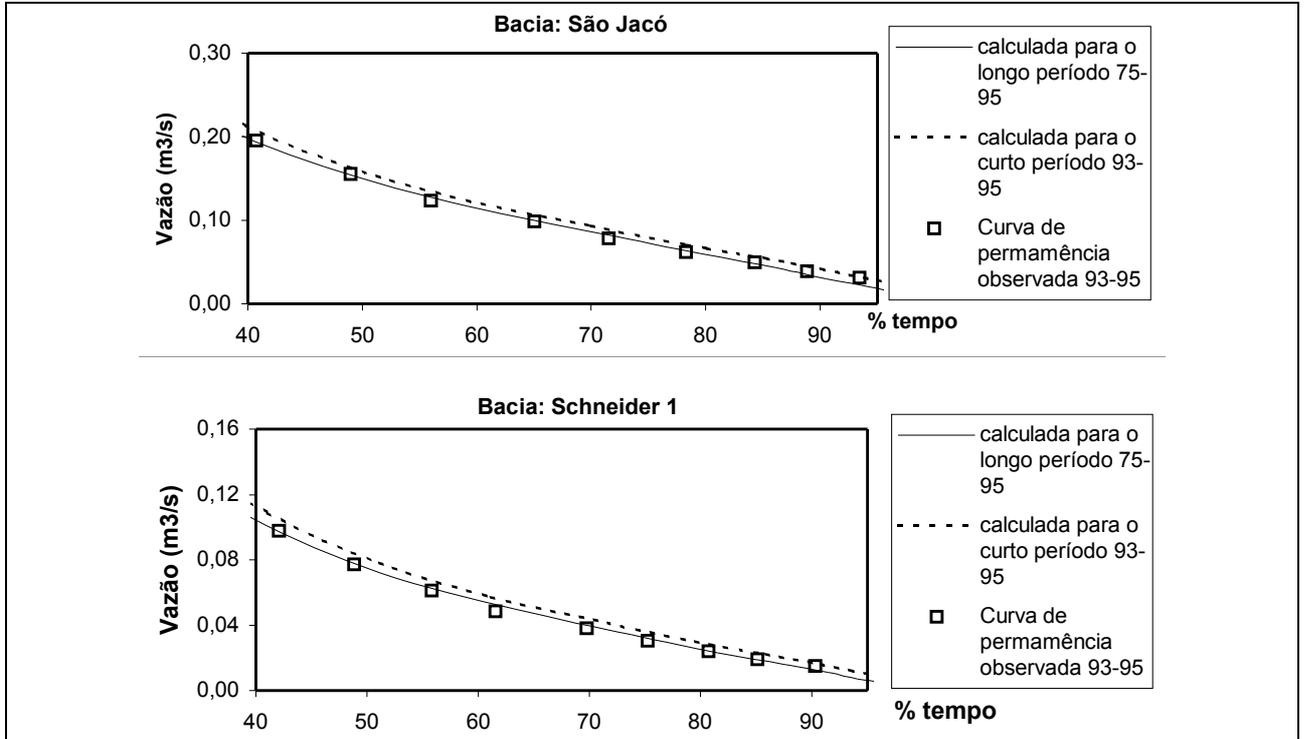


Figura 11. Curvas de permanência sintetizadas pelo modelo para o longo e o curto período de precipitação considerado, com o mesmo jogo de parâmetros Cinf e Ksub – Bacias de Schneider 1 e Vale Esquerdo.

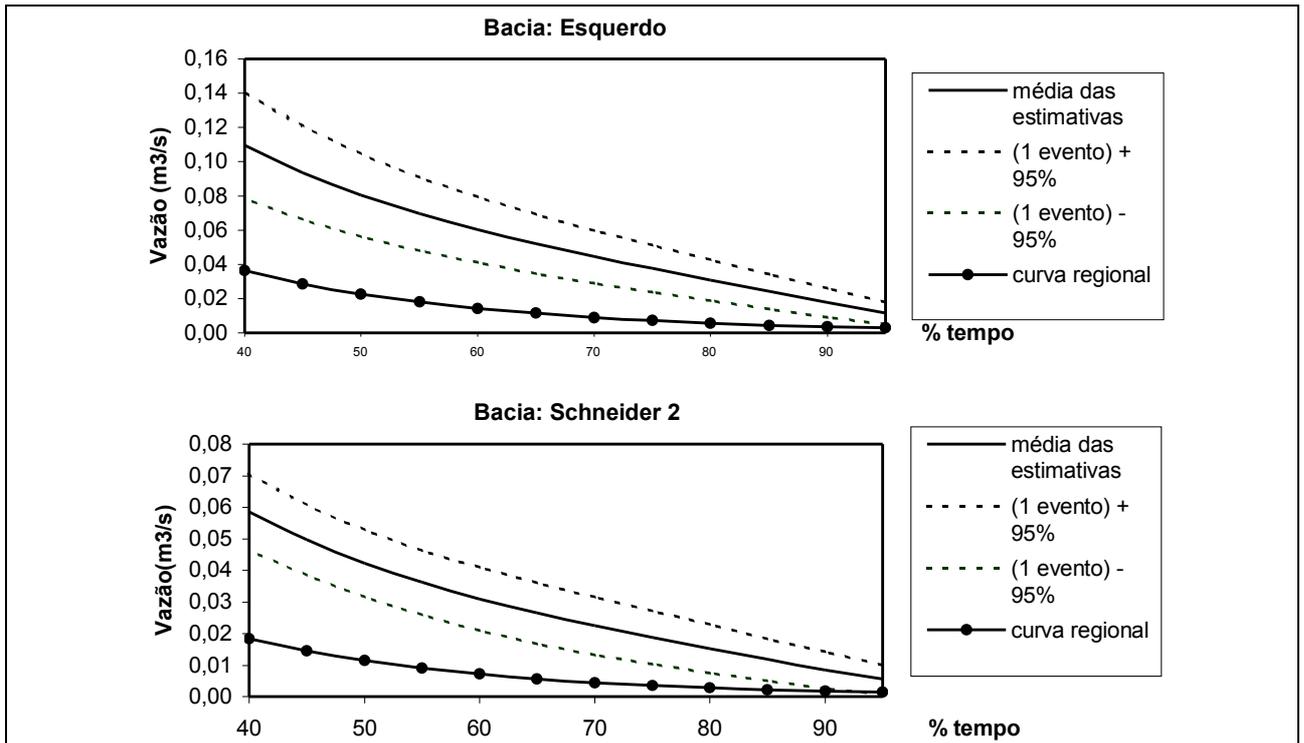


Figura 12. Limites de confiança do método proposto e a estimativa da regionalização. Bacias de Vale Esquerdo e Schneider 2.

medições de vazões na seção fluvial de interesse, o resultado de sua aplicação para outras bacias teria as mesmas dificuldades encontradas nas estimativas desenvolvidas para as bacias monitoradas produzindo, conseqüentemente, resultados semelhantes. O procedimento não depende de ajustes prévios, mas de uma interação direta com o manancial a ser avaliado. Em resumo, a metodologia proposta reduz-se a um balanço hídrico desenvolvido especificamente para a seção fluvial de interesse e incorre nos erros usuais e inerentes a este tipo de avaliação, dependendo da qualidade dos ajustes desenvolvidos e da qualidade dos dados disponíveis.

A vazão, em determinada seção fluvial, é uma variável integradora da resposta da bacia hidrográfica aos impulsos de precipitações e evapotranspirações locais, ao longo do tempo. Em períodos de estiagem, as vazões são a resposta do sistema aos impulsos de precipitação, ou melhor explicitando, à ausência de impulsos de precipitação no sistema. Desta forma, a avaliação de vazões em período de estiagem, caracteriza a oferta hídrica do sistema não produzida como conseqüência do escoamento superficial na bacia.

As estimativas pelo método devem ocorrer nas vizinhanças dos valores verdadeiros procurados, conseqüência do balanço hídrico desenvolvido, conforme visualiza-se na nuvem de previsões para as seis pequenas bacias estudadas. O erro padrão médio das estimativas avaliado para as bacias estudadas, pode ser considerado satisfatório, variando, em função do número de eventos conhecidos, em até 30% dos valores observados.

Assim, a metodologia proposta caracteriza uma solução alternativa para a avaliação de disponibilidades hídricas quando a regionalização não produz bons resultados, ou precisa ser extrapolada quando não há tempo para o monitoramento contínuo com registradores automáticos por um período determinado de tempo (2 a 5 anos). Mesmo quando a regionalização produz bons resultados por coeficientes de outras bacias de magnitude semelhante, deve-se avaliar que o método proposto produz resultados a partir de coeficientes definidos para a própria bacia alvo do estudo.

A robustez do método reside na vinculação local proporcionada pelas vazões reais, medidas *in loco*. Também o funcionamento mais estável das depleções, facilmente identificáveis com esvaziamento de aquíferos, permite uma estimativa mais confiável dos parâmetros do modelo de balanço hídrico. Sendo apenas dois os parâmetros sugeridos ao modelo de balanço hídrico, o cotejo entre o histórico das precipitações e evaporações, com a depleção medida, propicia, por sua vez, a geração

de uma série cronológica de vazões com um nível de informação mais realista que outros métodos sem vinculação local poderiam fornecer.

REFERÊNCIAS

- BRASIL 1997, *Lei nº 9433 de 8 de janeiro de*. Institui a Política Nacional de Recursos Hídricos, cria o Sistema Nacional de Gerenciamento de Recursos Hídricos, regulamenta o inciso XIX do artigo 21 da Constituição Federal e altera o artigo 1 da lei 801 de 13 mar. 1990, que modifica a lei nº 7990 de 28 dez. 1989.
- ELETROBRÁS 1983. *Manual de Pequenas Centrais Hidrelétricas*. Ministério das Minas e Energia.
- DINGMAN, S. L. 1978. Sintesis of flow-duration curves for unregulated streams in New Hampshire. In: *Water Resour. Bull.*, 14 (6), 1481-1502.
- DNAEE 1991. *Boletim das Estações Fluviométricas*. Ministério das Minas e Energia.
- DORFMAN, R. 1977. *Crterios para avaliação de alguns métodos de cálculo da Evapotranspiração Potencial*. Porto Alegre, UFRGS. v.138f. Dissertação (Mestrado). Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Programa de pós-graduação em Hidrologia Aplicada.
- FENNESSEY, N. E. & VOGEL, R. M. 1990. Regional flow duration curves for ungages sites in Massachussets. *J. Water Resources Planing and Management*, 116 (4).530-549.
- FOREMA. 1996. Fórum de Energia e Meio Ambiente do Rio Grande do Sul. *Anais do Encontro*. Universidade Federal de Santa Maria.
- HAAN. C. T. 1989. Parametric Uncertain in Hydrologic Modeling. *American Society of Agricultural Enginers*, Vol. 32 (1). p.137-145.
- KAVISKY, E. & FIOR, M. T. A. B. 1985. Regionalização de Curvas de Permanência de Vazões Médias Diárias em Pequenas Bacias Hidrográficas do Estado do Paraná. In: *Simpósio Brasileiro de Hidrologia e Recursos Hídricos*, 6 e *Simpósio Internacional de Recursos Hídricos em Regiões Metropolitanas*. *Anais*, ABRH Vol. 3, p.188-200.
- KLEMES, V. 1986. Operacional testing of hidrological simulation models. *Hidrological Science Journal*, 31 (1), p.13-24.

- MURDOCK, R. S. & GULLIVER, J. S. 1993. Prediction of river discharge at ungaged sites with analysis of uncertainty. *J. Water Resour. Plng. and Mgmt.*, 119 (4), 473-487.
- MIMIKOU, M., & KAEMAKI, S. 1985. Regionalization of flow duration characteristics. *J. Hydrol.*, 82, 77-91
- QUIMPO, R. G., ALEJANDRINO, A. A. & MCNALLY, T. A. 1983. Regionalized flow duration curves for Philippines. *J. Water Resour. Plng. and Mgmt.* 109 (4), 320-330.
- REFSGAARD & KNUDSEN. 1996. Operacional validation and intercomparison of different types of hydrological models. *Water Resour. Res.*, 32 (7). p 2189-2202.
- RIO GRANDE DO SUL 1986. Companhia Estadual de Energia Elétrica. *Reavaliação do potencial hidrelétrico brasileiro estado do Rio Grande do Sul: relatório*. Relatório. Não paginado.
- RIO GRANDE DO SUL 1994. Lei nº 10350 de 30 de dezembro de 1994. Institui o Sistema Estadual de Recursos Hídricos e regulamenta o artigo 171 da Constituição do Estado do Rio Grande do Sul. *Diário oficial do Estado do Rio Grande do Sul*. Porto Alegre. 31des.
- ROCHE, M. 1963. *Hydrologie de Surface*. Paris: Gautier-Vilars.
- SILVEIRA, G. L.; TUCCI, C. E. M. 1998. Monitoramento em Pequenas Bacias para a Estimativa de Disponibilidade Hídrica. Artigo submetido a *RBRH* de forma associada a este.
- TUCCI, C. E. 1991. *Regionalização de Vazões no Rio Grande do Sul*. Porto Alegre: IPH/UFRGS. 2v. em 4.
- TUCCI, C. E. 1993. (organizador). *Hidrologia, Ciência e Aplicação*. Porto Alegre: Ed da Universidade: EDUSP: ABRH, 943p.
- VOGEL, R. M. e FENNESSEY N. M. 1994. Flow Duration Curves. I: New Interpretation and Confidence Intervals. *J. Water Resources Planning and Management*, V 120, n.4. p 485-504.

Quantifying Flow in Small Basins Without Records

ABSTRACT

Water resource management is hampered by uncertainties caused by a lack of data from small basins. At present, no reliable method exists for estimating water availability in the absence of data; this limits the extent to which small streams can be exploited for hydropower production, irrigation or urban water supply, and also limits the usefulness of both water quality assessment and the data-base needed to inform planners granting licenses for water use. This paper proposes a method based on the combination of a simplified rainfall-runoff model and an incomplete sampling of flow, to obtain a chronologically-complete discharge sequence (hydrograph), thereby synthesizing information otherwise obtained only by conventional discharge monitoring. Supplemented by rapid visits to the field to collect local measurements, the procedure yielded a good assessment of water availability using a rainfall-runoff model with just two parameters. Results from six basins in the Brazilian State of Rio Grande do Sul showed a standard error of the order of 20% in estimates of the flow duration curve.