

---

## AVALIAÇÃO DE METODOLOGIAS DE REGIONALIZAÇÃO DE VAZÕES MÍNIMAS DE REFERÊNCIA PARA BACIA DO RIO SÃO FRANCISCO

Demetrius David da Silva<sup>1</sup>, Felipe de Azevedo Marques<sup>2</sup> e Alysson Feliciano Lemos<sup>3</sup>

### RESUMO

No presente estudo foram avaliadas três metodologias de regionalização de vazões mínimas de referência ( $Q_{7,10}$ ,  $Q_{90}$  e  $Q_{95}$ ) aplicadas à bacia hidrográfica do rio São Francisco a montante do reservatório de Três Marias, sendo estas: a) Eletrobrás (1985), que utiliza equações de regressão regionais; b) Chaves et al. (2002), que utiliza técnicas de interpolação e extrapolação; e c) vazão específica. Os valores das vazões mínimas de referência estimados pelas três metodologias foram comparados com os valores observados em cada uma das 28 estações fluviométricas usadas na regionalização. O método que apresentou maior precisão foi o proposto pela Eletrobrás (1985), resultando em três equações de regionalização de vazões, com erro relativo médio de 26,8 %. Entre as características físicas e climáticas usadas na regionalização, a área de drenagem foi a que melhor explicou o comportamento das vazões mínimas na bacia do São Francisco. As demais metodologias não apresentaram resultados satisfatórios quando a diferença na área de drenagem do local de vazão conhecida com o local onde se deseja conhecer a vazão foi grande.

**Palavras-chave:** Regionalização de vazões, vazões mínimas de referência, outorga

### ABSTRACT

#### EVALUATION OF METHODOLOGIES OF REGIONALIZATION OF MINIMUM STREAM FLOWS OF REFERENCE FOR THE SÃO FRANCISCO RIVER WATERSHED

In the present study, was made the evaluation of three methodologies of regionalization of minimum stream flows of reference ( $Q_{7,10}$ ,  $Q_{90}$  and  $Q_{95}$ ) applied in São Francisco river watershed, upstream of the Três Marias reservoir, to know: a) Eletrobrás (1985), based on regional equations of regression; b) Chaves et al. (2002), that applies automatic interpolation and extrapolation techniques; e c) specific stream flow. The minimum stream flows of reference esteemed by the three methodologies were compared with those observed in each one of the 28 used fluvimetric stations in the study. The method that presented greater precision was the proposed by Eletrobrás (1985), resulting in three equations of flow regionalization, with average relative error of 26,8%. Amongst the used physical and climatic characteristics in the regionalization, the draining area was the one that better explained the behavior of the minimum stream flows. The other methodologies didn't present satisfactory results when the difference in the drainage area of the place of known flow and the place where the stream flow have been estimated, was large.

**Keywords:** Regionalization of stream flows, minimum reference stream flows, water grants of use

---

Recebido para publicação em 10/03/2008. Aprovado em 06/08/2009

1 Professor Adjunto do DEA/UFV, Bolsista CNPq, Universidade Federal de Viçosa, 36571-000, demetrius@funarbe.org.br

2 Doutorando, Bolsista CNPq, DEA/UFV, Universidade Federal de Viçosa, 36571-000, engmarx-gprh@ufv.br

3 Especialista em Recursos Hídricos, Ministério da Saúde, Brasília - DF, 70058-900, alyssonlemons@yahoo.com.br

## INTRODUÇÃO

Com o estabelecimento do domínio público das águas, a partir da promulgação da Constituição Federal de 1988, previsto também na lei 9.433/97 e nas legislações Estaduais que tratam da política relacionada aos recursos hídricos, a outorga de direito de uso de recursos hídricos tornou-se um dos mais importantes instrumentos por constituir um elemento disciplinador do uso da água nas bacias hidrográficas.

Atualmente, o conhecimento da disponibilidade hídrica no âmbito de uma bacia hidrográfica é parte fundamental dos estudos hidrológicos. Pode-se compreender a bacia hidrográfica como a unidade onde são modelados os processos físicos sob a perspectiva de gestão dos recursos hídricos e do planejamento urbano e regional.

Considera-se fundamental o conhecimento da fração de água disponível para utilização no interior da bacia do São Francisco, haja visto que se trata de um recurso limitado e essencial para o desenvolvimento de múltiplas atividades. A aleatoriedade dos processos hidrológicos e a extensa área que abrange a bacia do rio São Francisco evidenciam a necessidade de tratamento estatístico e a utilização de ferramentas de geoprocessamento, para traduzir o comportamento das variáveis que compõem o sistema hídrico.

Esta grande variabilidade espacial das características físicas e climáticas da bacia do rio São Francisco, aliada à escassez de informações da rede hidrométrica para os estudos de planejamento e gerenciamento de recursos hídricos, coloca em evidência os estudos de regionalização de vazões, que através de metodologias específicas, otimizam as informações fluviométricas existentes, extrapolando-as por semelhanças das dinâmicas ambientais para os locais que possuem dados insuficientes ou inexistentes.

De acordo com Tucci (2002), pode-se definir regionalização hidrológica como o processo de transferência de informações de um local para outro dentro de uma área com comportamento hidrológico semelhante. Essa transferência pode ocorrer na forma de uma variável, função ou parâmetro.

Algumas metodologias de regionalização de vazões têm sido propostas, tais como a metodologia tradicional descrita por Eletrobrás (1985), que utiliza equações de regressão regionais aplicadas a regiões hidrologicamente homogêneas; a interpolação linear, que utiliza vazões

correspondentes às áreas de drenagem das seções fluviométricas mais próximas; a metodologia de Chaves et al. (2002), que utiliza técnicas de interpolação e extrapolação de vazões, com soluções que dependem da posição relativa da seção de interesse em relação aos postos fluviométricos mais próximos; e Index Flood, baseada na utilização dos momentos-L.

Dentre os estudos sobre regionalização de vazões, podem-se destacar os trabalhos desenvolvidos por Azevedo (2004), Euclides et al. (2005) e Marques (2006).

Azevedo (2004) avaliou as metodologias: tradicional, descrita pela Eletrobrás (1985); de Chaves et al. (2002); e baseada na interpolação linear para a regionalização de vazões mínimas de referência ( $Q_{7,10}$ ,  $Q_{90}$  e  $Q_{95}$ ) para a sub-bacia do rio Paraná, verificando que a melhor metodologia de regionalização foi a tradicional, baseada na utilização de equações de regressão regionais, com erro relativo médio de 13,58% e coeficiente de eficiência de Nash e Sutcliffe médio de 0,97.

O Atlas Digital das Águas de Minas, desenvolvido por Euclides et al. (2005), constitui uma opção para o planejamento e gestão dos recursos hídricos no Estado de Minas Gerais, permitindo a obtenção das vazões observadas para diversos locais, através do processo tradicional de regionalização de vazões proposto pela Eletrobrás (1985).

Marques (2006) regionalizou vazões mínimas trimestrais para a bacia do rio Doce utilizando a metodologia tradicional de Eletrobrás (1985) e em seguida espacializou as equações regionais produzindo informações hidrológicas a cada 90m da hidrografia. Estas informações trimestrais de disponibilidade hídrica foram reunidas em um sistema multi-usuário para gestão de outorgas, denominado AQUORA. Este sistema trouxe inovações com a integração de técnicas conhecidas dos Sistemas de Informação Geográfica (SIG) e dos Sistemas Gerenciadores de Bancos de Dados Relacionais (SGBDR), possibilitando análises dos processos de outorga em tempo real e atualizações na disponibilidade hídrica a jusante com base nas outorgas concedidas. Atualmente, o AQUORA está sendo atualizado para incorporar novas funcionalidades de SIG na Internet, de modo que, temporariamente, está desligado do sítio [http:// aquora.dea.ufv.br](http://aquora.dea.ufv.br).

Nesse contexto, o estudo de regionalização de vazões mínimas na bacia do rio São Francisco teve como objetivo principal fornecer subsídios para construção de uma base de dados hidrológicos e assim auxiliar os tomadores de

decisão no processo de concessão de outorga de direito de uso dos recursos hídricos, instrumento previsto na relativamente recente Política Nacional de Recursos Hídricos – Lei 9.433/97.

Este estudo avaliou três metodologias de regionalização de vazões mínimas de referência, isto é: vazão com sete dias de duração e período de retorno de dez anos ( $Q_{7,10}$ ) e vazão com permanência de 90 e 95% ( $Q_{90}$  e  $Q_{95}$ ). As

metodologias avaliadas foram: a) proposta pela Eletrobrás (1985), que utiliza equações de regressão regionais aplicadas a regiões hidrologicamente homogêneas; b) Chaves et al. (2002), que utiliza técnicas de interpolação e extrapolação automáticas em ambiente de sistemas de informações geográficas; e c) vazão específica, aplicadas à bacia hidrográfica do rio São Francisco a montante do reservatório de Três Marias.

## MATERIAL E MÉTODOS

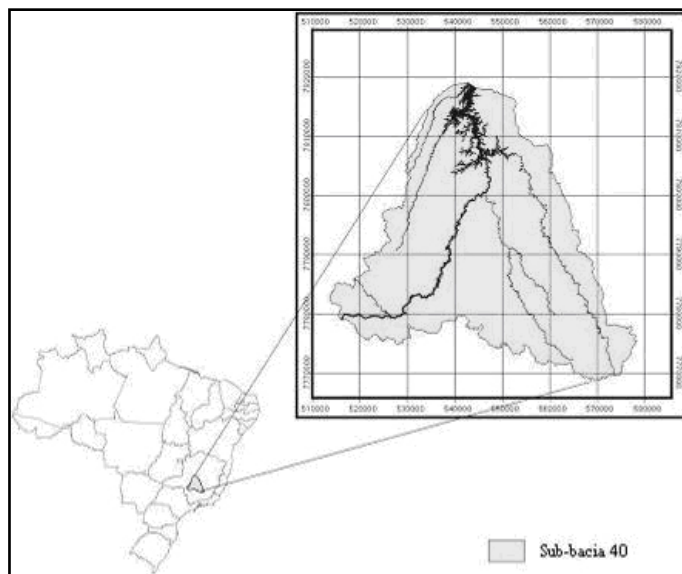


Figura 1. Localização da bacia hidrográfica do rio São Francisco a montante do reservatório de Três Marias.

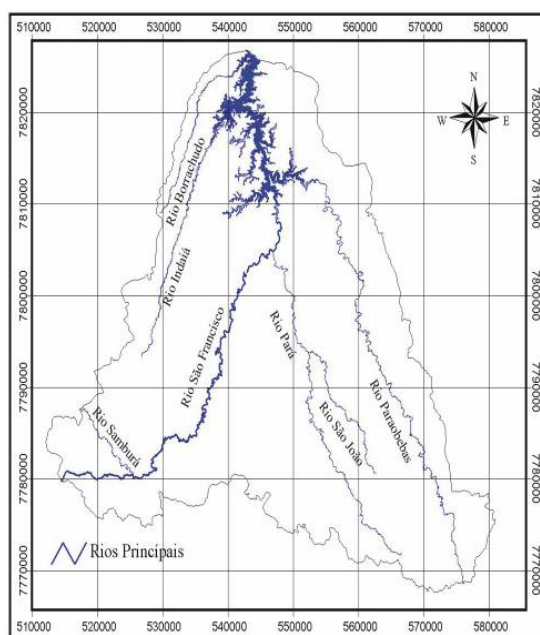


Figura 2. Principais rios da bacia do São Francisco a montante do reservatório de Três Marias.

A bacia do rio São Francisco, a montante do reservatório de Três Marias (Figura 1) constitui a sub-bacia 40 segundo a codificação da Agência Nacional de Águas e está localizada entre os paralelos 18° e 21° de latitude sul e os meridianos 43° 30' e 46° 40' de longitude oeste, na região central de Minas Gerais. A bacia possui área de drenagem de aproximadamente 50.000 km<sup>2</sup> e abrange 106 municípios. A sub-bacia 40 compreende as nascentes dos rios São Francisco, Pará, Paraopeba, Indaiá, Borrachudo e seus afluentes até o reservatório de Três Marias (Figura 2).

O MDE (Modelo Digital de Elevação) foi gerado a partir da interpolação das curvas de nível digitalizadas com a hidrografia mapeada de cartas do IBGE em escala 1:250.000, utilizando o procedimento de interpolação disponível no software ArcGIS 8.3®. Este algoritmo permite que quando houver violação das condições de altimetria favoráveis ao escoamento, o traçado da hidrografia mapeada seja respeitado. Com isso, garantiu-se a coincidência espacial da drenagem mapeada com as células de menor altitude do modelo, configurando, assim, a criação do Modelo Digital de Elevação Hidrograficamente Consistente - MDEHC.

Foram determinadas as características físicas usadas no estudo de regionalização: área da bacia (A), comprimento do rio principal (L), densidade de drenagem (Dd), declividade média da bacia (Sm) e declividade do rio principal (Srp). As características climáticas utilizadas no estudo de regionalização foram: precipitação total anual (Pa), precipitação do trimestre mais seco (Pts) e precipitação do mês mais seco (Pmês).

A delimitação das sub-bacias (no estudo de regionalização entende-se por sub-bacia a área de drenagem de cada uma das estações pluviométricas) e a obtenção das características físicas foram feitas de forma automatizada, com base no MDEHC obtido, bastando para tal a localização exata de cada uma das estações fluviométricas e a utilização de extensões específicas do software ArcView®.

No cálculo da precipitação média sobre a sub-bacia foi utilizado o método do Polígono de Thiessen. Este método atribui um fator de peso aos totais precipitados em cada pluviômetro, proporcional à área de influência de cada um. Estas áreas de influência (pesos) foram determinadas em mapas da bacia contendo as estações, unindo-se os pontos adjacentes por linhas retas e, em seguida, traçando-se suas mediatrizes formando polígonos.

A precipitação média (P<sub>m</sub>) foi calculada pela média ponderada entre a precipitação de cada estação (P<sub>i</sub>) e o

peso a ela atribuído (A<sub>i</sub>), que é a área de influência de P<sub>i</sub>.

$$P_m = \frac{\sum_{i=1}^n (P_i A_i)}{\sum_{i=1}^n A_i}$$

(1)

em que:

P<sub>i</sub> = precipitação pluviométrica de cada estação (mm);

A<sub>i</sub> = área de influência de cada estação (km<sup>2</sup>); e

n = número de estações pluviométricas consideradas na análise.

Para a realização do estudo foram utilizadas séries históricas de estações fluviométricas e pluviométricas pertencentes à rede hidrometeorológica da Agência Nacional de Águas (ANA). As séries históricas de vazões observadas foram carregadas da plataforma Hidroweb da ANA e importadas no banco de dados hidrológicos Hidro 1.09, também da Agência.

Após a obtenção dos dados elaborou-se um diagrama de barras para as estações fluviométricas e pluviométricas, objetivando a caracterização dos períodos de dados disponíveis para todas as estações, de forma a facilitar a identificação do período-base a ser adotado. Foram incluídas nos diagramas de barras apenas as estações que possuíam dados mais recentes, eliminando-se aquelas que saíram de operação antes de 1980 ou que possuíam um período inferior a oito anos de dados. Com isso, o número foi reduzido para 43 pluviométricas (Figura 3) e 28 estações fluviométricas (Figura 4).

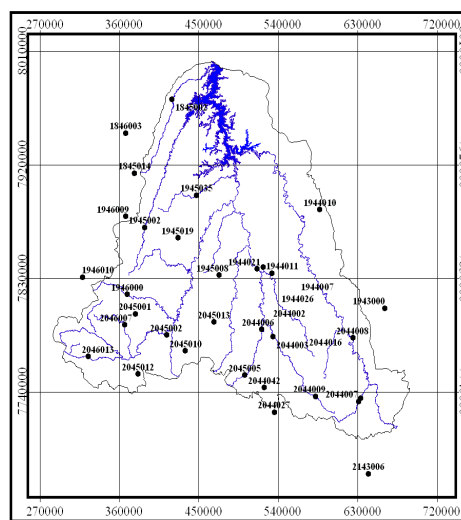
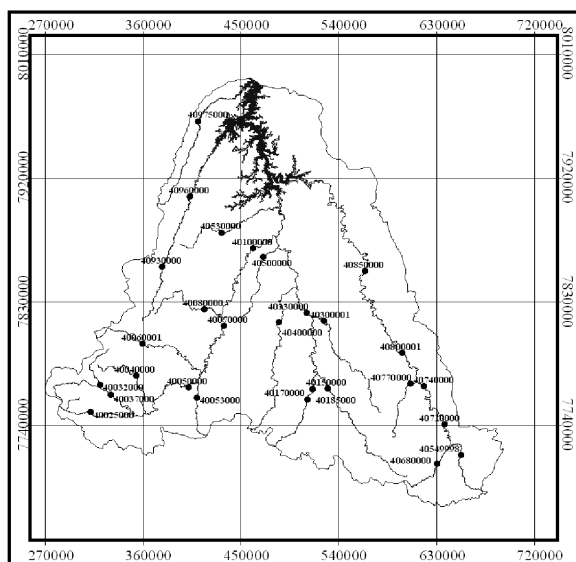


Figura 3. Mapa de localização das estações pluviométricas selecionadas para o estudo



**Figura 4.** Mapa de localização das estações fluviométricas selecionadas para o estudo

De posse do diagrama de barras e do mapa de localização das estações fluviométricas procedeu-se à análise das estações quanto ao período de operação e localização geográfica, visando a identificação do período-base a ser usado na regionalização. Foi selecionado, para o presente estudo, o período de 1978 a 2002 (25 anos).

Para o preenchimento de falhas de vazão foi utilizada a regressão linear simples e para o preenchimento de falhas em séries pluviométricas utilizou-se o método da ponderação regional com base em regressões lineares, que consiste em estabelecer regressões lineares entre o posto com dados a serem preenchidos e cada um dos postos vizinhos.

Para a realização do preenchimento tanto dos dados de vazão como de precipitação adotou-se como critério a obtenção de coeficiente de correlação superior a 0,85 e a existência de pelo menos oito pares de eventos entre as estações para a realização da regressão.

A metodologia tradicional, proposta pela Eletrobrás (1985), tem como característica principal a utilização de equações de regressão regionais aplicadas a regiões hidrologicamente homogêneas, visando à obtenção de vazões em qualquer posição da rede de drenagem da bacia em estudo.

As regiões que subdividem uma área maior foram escolhidas, com base na homogeneidade das características hidrológicas. Na prática, a homogeneidade na regionalização foi traduzida por um alto coeficiente de determinação, obtido da aplicação da regressão múltipla

das vazões com as características físicas e climáticas das bacias.

Foi utilizado o critério estatístico para identificação das regiões homogêneas, baseado na análise do ajuste do modelo de regressão múltipla.

Estabeleceram-se regressões múltiplas entre as séries de vazões mínimas e as diferentes características físicas (área de drenagem – A; comprimento do talvegue – L; densidade de drenagem – Dd; declividade média da bacia –  $S_m$  e declividade do rio principal -  $S_{rp}$ ) e climáticas (precipitação do trimestre mais seco –  $P_{ts}$ ; do mês mais seco –  $P_{mês}$  e total anual –  $P_a$ ) das bacias, com base na seguinte função:

$$Q = F(A, L, Dd, S_m, S_{rp}, P_{ts}, P_{mês}, P_a) \quad (2)$$

As regiões hidrologicamente homogêneas foram definidas em função da distribuição geográfica das estações e da combinação de estações que apresentou o melhor ajuste, avaliado por intermédio do teste da função F, do coeficiente de determinação ajustado, do desvio padrão dos erros do ajustamento, também chamado de erro padrão da estimativa, e dos erros percentuais (%dr) entre os valores das vazões observadas e estimadas pelos modelos de regressão obtidos para cada uma das regiões homogêneas.

Na identificação das regiões homogêneas, com base no critério citado anteriormente, foi utilizado o software RH 4.0 – Regionalização Hidrológica (EUCLYDES et al., 2005).

Após a seleção e análise de dados básicos, as séries anuais de vazões mínimas com sete dias de duração para cada estação foram submetidas à análise estatística, para identificação do modelo probabilístico que melhor se ajustava aos dados. Os modelos de distribuição de eventos mínimos utilizados foram: Log-Normal a dois e três parâmetros, Pearson III, Log-Pearson III e Weibull (HAAN, 1977; STEDINGER et al., 1992).

A seleção da distribuição de probabilidade ajustável a cada série histórica foi efetuada utilizando-se o teste de aderência de Kolmogorov-Smirnov, ao nível de 20% de probabilidade, e o ajuste dos parâmetros de cada distribuição realizado por intermédio do método dos momentos, que consiste em igualar os momentos populacionais da série aos momentos amostrais de uma série de eventos aleatórios, quais sejam, a média, o desvio padrão e os coeficientes de assimetria e de curtose.

Após a seleção da distribuição probabilística com melhor

ajuste aos dados de vazões foram obtidos os valores das vazões mínimas com sete dias de duração associadas ao período de retorno de 10 anos ( $Q_{7,10}$ ).

Os valores das vazões associadas às permanências de 90% ( $Q_{90}$ ) e 95% ( $Q_{95}$ ) no tempo foram obtidos das curvas de permanência de valores diários das 28 estações fluviométricas usadas na análise.

De posse dos dados de vazões mínimas e das características físicas ( $A$ ,  $L$ ,  $Dd$ ,  $S_m$  e  $S_{rp}$ ) e climáticas ( $P_{ts}$ ,  $P_{mês}$  e  $P_a$ ), correspondentes às áreas de drenagem das diferentes estações fluviométricas pertencentes a uma mesma região homogênea, foi aplicada a regressão múltipla às vazões mínimas de referência estudadas ( $Q_{7,10}$ ,  $Q_{90}$ ,  $Q_{95}$ ).

No ajuste das equações foram utilizados os seguintes modelos de regressão:

Modelo linear

$$Q = \beta_0 + \beta_1 A + \beta_2 L + \beta_3 Dd + \beta_4 S_m + \beta_5 S_{rp} + \beta_6 P \quad (3)$$

Modelo Potencial

$$Q = \beta_0 A^{\beta_1} L^{\beta_2} Dd^{\beta_3} S_m^{\beta_4} S_{rp}^{\beta_5} P^{\beta_6} \quad (4)$$

Modelo Exponencial

$$Q = e^{(\beta_0 + \beta_1 A + \beta_2 L + \beta_3 Dd + \beta_4 S_m + \beta_5 S_{rp} + \beta_6 P)} \quad (5)$$

Modelo Logarítmico

$$Q = \beta_0 + \beta_1 \ln A + \beta_2 \ln L + \beta_3 \ln Dd + \beta_4 \ln S_m + \beta_5 \ln S_{rp} + \beta_6 \ln P \quad (6)$$

Modelo Recíproco

$$Q = (\beta_0 + \beta_1 A + \beta_2 L + \beta_3 Dd + \beta_4 S_m + \beta_5 S_{rp} + \beta_6 P)^{-1} \quad (7)$$

Os melhores modelos resultantes da aplicação da regressão múltipla foram selecionados observando-se: maiores valores do coeficiente de determinação ajustado, menores valores de erro padrão fatorial, resultados significativos pelo teste F e menor número de variáveis independentes.

### Metodologia proposta por Chaves et al. (2002)

A metodologia proposta por Chaves et al. (2002) tem como princípio básico a utilização do método de razão de áreas de drenagem, sendo realizadas interpolações e extrapolações de vazões mínimas em diferentes situações da bacia, dependendo da posição relativa da seção de

interesse em relação aos postos fluviométricos mais próximos. Por se tratar de um método interpolativo, o mesmo dispensa a definição de regiões homogêneas, possibilitando sua aplicação em bacias com baixa densidade de postos fluviométricos, pois não há limitação em termos de graus de liberdade para as análises de regressão (CHAVES et al. 2002).

As vazões mínimas de referência que foram regionalizadas com base na metodologia em questão também foram a  $Q_{7,10}$ , a  $Q_{90}$  e a  $Q_{95}$ . Partindo-se da rede de drenagem da bacia e da distribuição da rede hidrométrica existente, os canais foram classificados de acordo com quatro situações distintas, detalhadas a seguir:

A vazão mínima de referência em uma seção de vazão desconhecida ( $Q_z$ ), dentro da área de influencia de um posto com vazão conhecida ( $Q_x$ ), é determinada pela razão de área de drenagem:

$$Q_z = \left( \frac{A_z}{A_x} \right) Q_x \quad (8)$$

em que

$Q_z$  = vazão mínima de referência em uma seção da bacia de vazão desconhecida;

$Q_x$  = vazão de referência em um posto fluviométrico próximo com vazão conhecida e

$A_z$  e  $A_x$  = áreas de drenagem relativas a seção de vazão desconhecida e ao posto próximo, respectivamente;

Na seção de interesse localizada entre dois postos com vazão conhecida (Caso 2), a vazão de referência desconhecida é estimada utilizando a equação:

$$Q_z = A_z \left[ \left( p_x \frac{Q_x}{A_x} \right) + \left( p_y \frac{Q_y}{A_y} \right) \right] \quad (9)$$

em que

$A_x$ ,  $A_y$  e  $A_z$  = áreas de drenagem relativas às seções X, Y e Z, respectivamente;

$Q_x$  e  $Q_y$  = vazões mínimas de referência relativas aos postos X e Y, respectivamente e

$p_x$  e  $p_y$  = pesos relativos a X e Y calculados utilizando as equações:

$$p_x = \left( \frac{d_y}{d_x + d_y} \right) \quad (10)$$

$$P_Y = \left( \frac{dx}{dx + dy} \right) \quad (11)$$

em que

dx = distancia entre X e Z medida ao longo do canal e

dy = distancia entre Y e Z medida ao longo do canal;

A seção de interesse localizada a jusante de um posto com vazão conhecida (Caso 3) ocorre geralmente em áreas próximas a foz da bacia, onde existem apenas dados a montante. Esta situação é semelhante a primeira e a vazão na seção de interesse Z foi calculada com base na equação 8.

A seção de interesse situada em um canal afluente cuja foz está entre dois postos fluviométricos de um canal de ordem superior (Caso 4) é uma combinação dos casos um e dois, ou seja, a vazão na seção de interesse é diretamente proporcional às áreas de drenagem e inversamente proporcional às distancias relativas aos postos. Para tanto, aplicou-se a equação 9 entre os postos X e Y, calculando-se a vazão na seção de confluência (Z') dos canais e posteriormente obteve-se a vazão de referência correspondente a seção de interesse Z usando a vazão calculada na confluência (Z') e aplicando-se o mesmo procedimento descrito no caso 1 (equação 8).

Com o mapa das estações fluviométricas identificaram-se seções da hidrografia cujas vazões de referência foram supostas desconhecidas para posteriores comparações entre os valores estimados pela metodologia citada e os valores observados. Utilizou-se como base os valores de  $Q_{7,10}$  obtidos por análise probabilística das séries de  $Q_7$  e também os valores de  $Q_{90}$  e  $Q_{95}$  extraídos da curva de permanência referentes às 28 estações fluviométricas.

A Metodologia baseada na vazão específica é uma alternativa em que se utiliza o cálculo das vazões tendo como base as áreas de drenagem de postos fluviométricos localizados a montante e, ou, a jusante do local onde se deseja estimar a vazão. Também não trabalha com o conceito de regiões hidrologicamente homogêneas, o que viabiliza a sua aplicação em pequenas bacias hidrográficas com número reduzido de postos hidrométricos, pois não há limitação em termos de graus de liberdade, por não utilizar equações de regressão nas estimativas de vazões.

As vazões mínimas de referência que foram regionalizadas com base na metodologia em questão

também foram a  $Q_{7,10}$ , a  $Q_{90}$  e a  $Q_{95}$ .

Partindo-se da rede de drenagem da bacia e da distribuição da rede hidrométrica existente, os canais foram também classificados de acordo com quatro situações distintas, detalhadas a seguir:

Na seção de interesse localizada a montante de um posto com vazão conhecida (Caso 1), aplicou-se diretamente o método da razão de área de drenagem para o cálculo da vazão mínima de referência em uma seção de vazão desconhecida ( $Q_z$ ), dentro da área de influência de um posto com vazão conhecida ( $Q_x$ ), utilizando a equação 8.

Na seção de interesse localizada entre dois postos com vazão conhecida (Caso 2), a vazão de referência desconhecida ( $Q_z$ ) foi estimada utilizando a equação:

$$Q_z = Q_m + \left( \frac{A_z - A_m}{A_j - A_m} \right) \times (Q_j - Q_m) \quad (12)$$

em que

$Q_z$  = vazão mínima na seção de interesse;

$Q_m$  = vazão mínima do posto a montante;

$Q_j$  = vazão mínima do posto a jusante;

$A_z$  = área de drenagem da seção de interesse;

$A_m$  = área de drenagem do posto a montante e

$A_j$  = área de drenagem do posto a jusante;

-A situação seção de interesse localizada a jusante de um posto com vazão conhecida (Caso 3) é semelhante ao caso em que a seção de interesse se localiza a montante de um posto com vazão conhecida e a vazão ( $Q_z$ ) foi calculada com base na equação 8.

A Seção de interesse situada em um canal afluente cuja foz está entre dois postos fluviométricos de um canal de ordem superior (Caso 4) é uma combinação dos casos 1 e 2, tendo sido utilizado o procedimento a seguir: aplicou-se a equação 12 entre os postos a montante e a jusante, calculando-se a vazão na seção de confluência (Z') e posteriormente obteve-se a vazão de referência correspondente a seção de interesse Z usando a vazão calculada na confluência (Z') e aplicando-se o mesmo procedimento descrito no caso 1 (equação 8).

No mapa da bacia com as estações fluviométricas plotadas identificou-se cada situação possível em relação

aos postos fluviométricos existentes, cujas vazões de referência foram supostas como desconhecidas para posteriores comparações entre os valores estimados com a aplicação da metodologia citada e os valores observados. Utilizou-se como base de dados os valores de  $Q_{7,10}$  obtidos por análise probabilística das séries de  $Q_7$  e também os valores de  $Q_{90}$  e  $Q_{95}$  extraídos da curva de permanência para cada uma das 28 estações.

Com os resultados das vazões mínimas estimadas ( $Q_{7,10}$ ,  $Q_{90}$  e  $Q_{95}$ ) com base nas três metodologias e os valores de vazões estimados por análise probabilística ( $Q_{7,10}$ ) e curva de permanência ( $Q_{90}$  e  $Q_{95}$ ) nos postos fluviométricos da bacia, foi avaliada a precisão das metodologias por meio da aplicação de dois índices: o erro relativo entre o valor observado e o estimado determinado pela equação 13 e o Coeficiente de eficiência de Nash e Sutcliffe (Nash & Sutcliffe, 1970) determinado pela equação 14.

$$ER = 100 \times Abs \left( \frac{Q_{obs} - Q_{est}}{Q_{obs}} \right) \quad (13)$$

em que

ER = erro relativo, %;

Abs = valor absoluto;

$Q_{obs}$  = vazão observada no posto fluviométrico e

$Q_{est}$  = vazão estimada com base nas metodologias de regionalização;

$$E = \frac{\sum(Q_{obs} - \bar{Q}_{obs})^2 - \sum(Q_{obs} - Q_{est})^2}{\sum(Q_{obs} - \bar{Q}_{obs})^2} \quad (14)$$

Considerou-se como a melhor metodologia de regionalização para a sub-bacia em estudo aquela que apresentou o menor valor de erro relativo e o maior valor de coeficiente de eficiência de Nash e Sutcliffe que varia de 0 a 1.

## RESULTADOS E DISCUSSÃO

A partir da comparação entre a rede de drenagem mapeada e a gerada automaticamente, bem como pela delimitação automática das bacias de drenagem, pôde-se considerar que o modelo digital de elevação da bacia em estudo é hidrograficamente consistente. Na Figura 5 verifica-se a sobreposição das redes de drenagens mapeada e numérica. O MDEHC é ilustrado na Figura 6 com um efeito de sombreamento para permitir melhor visualização das variações no relevo da bacia.

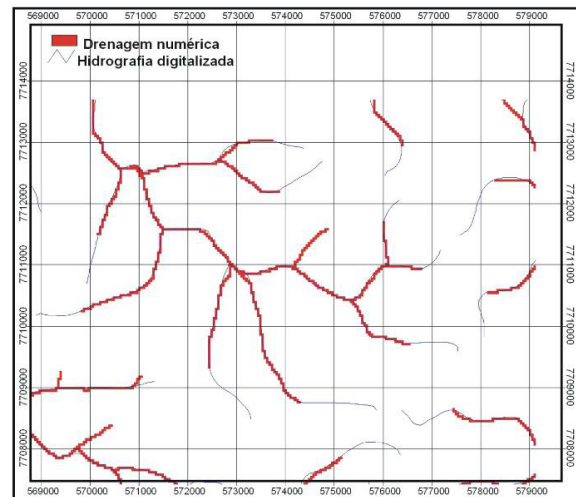


Figura 5. Sobreposição das drenagens numérica e mapeada do IBGE em escala 1:250.000.

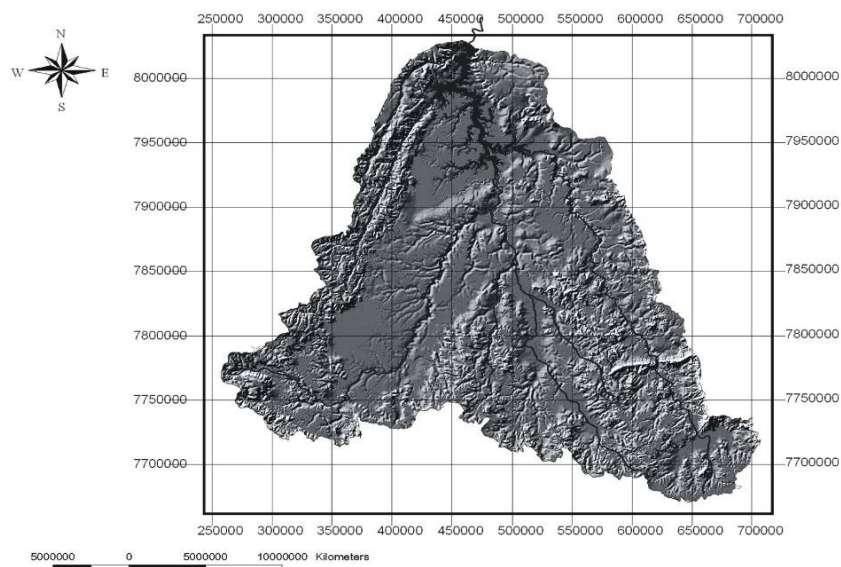


Figura 6. Modelo digital de elevação hidrograficamente consistente (MDEHC) da bacia do São Francisco, a montante do reservatório de Três Marias



**Quadro 1.** Informações pertinentes ao preenchimento de falhas de vazões mínimas com sete dias de duração

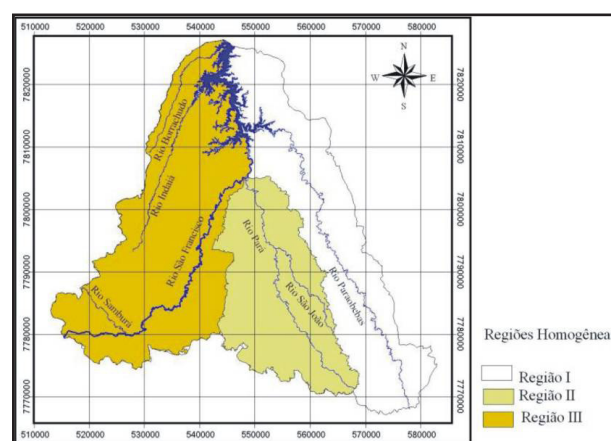
Estação com falhas	Estação Correlacionada	Equação	R <sup>2</sup>	Período Preenchido
40549998	40740000	$y = 0,12x - 0,15$	0,87	1978;1979;1980;1981;1982
40710000	40850000	$y = 0,35x + 3,01$	0,89	1991;1998
40740000	40800001	$y = 0,64x + 4,59$	0,95	1989;1990;1991;1992
40770000	40740000	$y = 0,33x - 4,15$	0,85	1985;1986;1993 a 2001
40800001	40740000	$y = 1,50x - 5,63$	0,95	1995
40850000	40810000	$y = 1,32x + 3,86$	0,93	1979;1993;1999
40170000	40185000	$y = 0,46x + 0,23$	0,91	1979
40300001	40330000	$y = 0,22x - 1,75$	0,80	1978;1985;1996;1997
40400000	40500000	$y = 2,40x + 1,32$	0,71	1982;1983;1985 a 1987; 1989;1990;1994;1996;1999
40500000	40330000	$y = 0,09x - 0,79$	0,72	1978;1979
40032000	40050000	$y = 0,15x + 2,94$	0,91	1980;1991;1992;1995 a 1999
40037000	40050000	$y = 0,15x + 0,42$	0,84	1982;1983;1984;1985
40040000	40050000	$y = 0,05x - 0,11$	0,81	1997
40053000	40060001	$y = 0,28x - 0,92$	0,76	1991;1992
40070000	40100000	$y = 0,77x + 3,55$	0,98	1990;1992;2002

No Quadro 1 são apresentadas as informações referentes às estações utilizadas no preenchimento de falhas das séries de vazões mínimas com sete dias de duração, assim como as equações de regressão obtidas, o valor do coeficiente de determinação (R<sup>2</sup>) e o período de dados preenchidos para as estações com falhas em seus registros.

Para a identificação das regiões hidrologicamente homogêneas (método tradicional), fez-se, inicialmente uma tentativa com todas as 28 estações fluviométricas em uma só região; entretanto, todos os modelos de regressão resultantes da aplicação da regressão múltipla apresentaram coeficientes de determinação ajustados (R<sup>2</sup>a) insatisfatórios, com valores inferiores a 0,7. A bacia foi então dividida, baseando-se na distribuição geográfica das estações, na homogeneidade das variáveis ambientais e na dispersão dos valores observados em relação aos estimados pelos modelos de regressão regionais.

Mesmo considerando-se todos os critérios citados, um número mínimo de estações em cada região homogênea precisou ser respeitado, pois em caso contrário, a utilização de um número maior de variáveis explicativas nos modelos de regressão múltipla testados ficaria impossibilitada. Deste modo, procurou-se não individualizar regiões com menos do que seis estações fluviométricas.

Após diversas tentativas, identificaram-se três regiões homogêneas (Figura 7) para as vazões estudadas testando-se diversos modelos de regressão, através de várias combinações de variáveis explicativas (características físicas e climáticas).



**Figura 7.** Delimitação das regiões hidrologicamente homogêneas para vazões ínicas da bacia do rio São Francisco a montante do reservatório de Três Marias.

As estações fluviométricas pertencentes a cada região homogênea, utilizadas nos modelos de regressão múltipla ajustados, estão apresentadas no Quadro 2.

**Quadro 2.** Estações fluviométricas pertencentes às três regiões hidrologicamente homogêneas

Região Homogênea	Estações Fluviométricas
I	40549998; 40680000; 40710000; 40740000; 40770000; 40800001 e 40850000
II	40150000; 40170000; 40185000; 40300001; 40330000; 40400000 e 40500000
III	40025000; 40032000; 40037000; 40040000; 40050000; 40053000; 40060001; 40070000; 40080000; 40100000; 40930000; 40960000 e 40975000

**Quadro 3.** Modelos de regressão para a estimativa da vazão específica mínima com sete dias de duração e período de retorno de 10 anos ( $q_{7,10}$ ,  $L.s^{-1} km^{-2}$ )

Regiões	Modelos	R <sup>2</sup> a
I	$q_{7,10} = 2,72 \times 10^{-11} L^{0,398247} + P_{ts}^{3,286656}$	0,84
II	$q_{7,10} = 0,001137 + 0,000015 L$	0,97
III	$q_{7,10} = 4,10 \times 10^{-10} Dd^{2,768531} P_{ts}^{4,897251}$	0,71

**Quadro 4 -** Modelos de regressão para a estimativa das vazões ( $m^3 s^{-1}$ ) associadas aos níveis de 90% ( $Q_{90}$ ) e 95% ( $Q_{95}$ ) de permanência

Regiões	Modelos	R <sup>2</sup> a
I	$Q_{90} = 0,009161 A^{0,944310}$	0,99
	$Q_{95} = 0,007456 A^{0,948294}$	0,98
II	$Q_{90} = -1,22161 + 0,005675 A + 0,570216 P_{ts}$	0,98
	$Q_{95} = 0,000976 A^{1,199696}$	0,97
III	$Q_{90} = -20,4813 + 0,005591 A + 110,7343 S_m$	0,97
	$Q_{95} = -19,4129 + 0,005125 A + 0,535686 P_{ts}$	0,97

A distribuição de Log-Normal a três parâmetros foi a que apresentou melhor ajuste aos dados de  $Q_{7,10}$  para as três regiões homogêneas identificadas no estudo de regionalização.

Os modelos de regressão recomendados para estimar a vazão específica mínima com sete dias de duração e período de retorno de dez anos ( $q_{7,10}$ ,  $L.s^{-1} km^{-2}$ ) e os parâmetros estatísticos a eles associados, para as três regiões hidrologicamente homogêneas, estão apresentados no Quadro 3.

Observando o Quadro 3, verifica-se o parâmetro físico (L) implicou os melhores ajustes nas equações de regressão nas regiões homogêneas I e II. O parâmetro climático que melhor se ajustou às equações de regressão foi a precipitação do trimestre mais seco.

De forma semelhante à regionalização da  $Q_{7,10}$  foram selecionados diversos modelos de regressão para a representação das vazões correspondentes aos níveis de permanência de 90 e 95% que apresentaram ajustes satisfatórios e, portanto, possíveis de serem aplicados nas três regiões hidrologicamente homogêneas. Posteriormente, adotando-se os mesmo critérios da regionalização da

$Q_{7,10}$ , identificou-se os modelos recomendados para a representação da  $Q_{90}$  e  $Q_{95}$ , apresentados no Quadro 4.

Observando o Quadro 4, verifica-se que o parâmetro físico que melhor se ajustou às equações de regressão para estimativa da  $Q_{90}$  e  $Q_{95}$  foi a área de drenagem (A). Ressalta-se também que a precipitação do trimestre mais seco foi o parâmetro climático que se ajustou melhor às regressões, de modo semelhante à regionalização da  $q_{7,10}$ .

Analisando-se os resultados apresentados no Quadro 5, observa-se que as metodologias proposta por Chaves et al. (2002) e Vazão específica apresentaram uma melhor estimativa da vazão (menor erro relativo) para as situações que se enquadraram no caso 2. Nesse caso, a vazão na seção sem observações foi obtida de forma direta, pela interpolação de duas vazões conhecidas. Observou-se também que em ambas metodologias as interpolações devem ser feitas com cuidado quando aplicadas em situações em que as áreas de drenagem das estações envolvidas são proporcionalmente muito diferentes. Ressalta-se que os resultados apresentados para a região I representam o comportamento médio das demais regiões.

O Quadro 6 apresenta os erros médios obtidos através da comparação entre as vazões observadas e as estimadas por cada metodologia, além dos coeficientes de Nash e Stuclyffe.

Analisando-se os resultados apresentados, verifica-se que a metodologia tradicional de regionalização de vazões, foi a que apresentou o menor erro relativo médio para as três vazões mínimas de referência:  $Q_{7,10}$  (26,78 %),  $Q_{90}$  (22,67%) e  $Q_{95}$  (26,69%). Isso comprova que mesmo com baixa densidade de postos hidrométricos verificada na bacia em estudo a metodologia tradicional foi mais

eficiente na predição das vazões mínimas regionalizadas para a bacia do rio São Francisco a montante do reservatório de Três Marias.

As demais metodologias apresentaram erros semelhantes em magnitude e mais elevados quando comparados com a metodologia tradicional proposta pela Eletrobrás (1985). Os valores de coeficientes de eficiência de Nash e Sutcliffe mostraram-se elevados para as três metodologias, não constituindo um fator de diferenciação da precisão entre as metodologias.

**Quadro 5.** Comparação entre as metodologias Chaves et al. (2002) e Vazão específica, para estimativas de  $Q_{7,10}$ ,  $Q_{90}$  e  $Q_{95}$  para a região I

Estações	Caso	E.R. (%)					
		Chaves et al			Interpolação Linear		
S. Brás do Suaçuí-Montante	1	19,00	12,31	14,34	19,00	12,31	14,34
Entre Rios de Minas	4	43,18	10,12	15,22	37,85	2,57	8,42
Belo Vale	2	14,56	12,29	13,07	12,79	13,59	13,58
Alberto Flores	2	9,04	1,80	3,73	8,31	1,24	3,12
Conceição do Itaguá	4	123,28	17,12	18,13	95,69	22,60	24,97
Ponte Nova do Páraopeba	2	27,44	13,07	17,24	17,29	20,95	11,28
Ponte da Taquara	3	5,82	1,88	4,54	5,82	1,88	4,54

**Quadro 6.** Comparação das três metodologias aplicadas para a estimativa das vazões mínimas de referência  $Q_{7,10}$ ,  $Q_{90}$  e  $Q_{95}$

Metodologia	$Q_{7,10}$		$Q_{90}$		$Q_{95}$	
	Erro (%)	Nash-Stucliff	Erro (%)	Nash-Stucliff	Erro (%)	Nash-Stucliff
Tradicional	26,78	0,81	22,67	0,97	29,69	0,97
Chaves et al.	100,67	0,94	42,96	0,96	51,29	0,96
Interpolação linear	94,29	0,93	40,99	0,96	48,55	0,95

## CONCLUSÕES

A análise dos resultados obtidos permitiu as seguintes conclusões:

- Dentre as características físicas usadas na regionalização, o comprimento do rio principal foi a que melhor explicou o comportamento da  $Q_{7,10}$ . Já para as vazões mínimas associadas às curvas de permanência ( $Q_{90}$  e  $Q_{95}$ ), a área de drenagem foi o parâmetro físico que melhor se ajustou aos modelos de regressão.
- O parâmetro climático que melhor explicou o comportamento das vazões mínimas de referência na bacia do rio São Francisco, foi a precipitação do trimestre mais seco.
- As metodologias de Chaves et al. (2002) e vazão específica foram mais eficientes na estimativa de vazões em situações onde a seção em que se deseja determinar a vazão está localizada entre dois postos de vazão conhecida e não apresentaram resultados satisfatórios nas situações em que houve grande diferença das áreas de drenagem dos locais correlacionados.

- A melhor metodologia de regionalização de vazões mínimas de referência para a bacia do São Francisco a montante do reservatório de Três Marias foi a tradicional, baseada na utilização de equações de regressão regionais com erro relativo médio de 26,8 %.

## AGRADECIMENTOS

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pelo incentivo e apoio financeiro.

À Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais (FAPEMIG) pelo apoio e financiamento do projeto de pesquisa.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ANEEL - AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA. **Inventário de estações fluviométricas**. Superintendência de Estudos e Informações Hidrológicas (Coord.). Brasília- DF, 2001a.

- \_\_\_\_\_. **Inventário de estações pluviométricas.** Superintendência de Estudos e Informações Hidrológicas (Coord.). Brasília- DF, 310p, 2001b.
- AZEVEDO, A. A. **Avaliação de metodologias de regionalização de vazões mínimas de referência para a sub-bacia do rio Paranã.** Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola), UFV, Viçosa- MG, 101 p., 2004.
- CHAVES, H. M. L.; ROSA, J. W. C.; VADAS, R. G.; OLIVEIRA, R. V. T. **Regionalização de vazões mínimas em bacias através de interpolação em sistemas de informação geográfica.** Revista Brasileira de Recursos Hídricos, v. 7(3): 43-51, 2002.
- ELETROBRÁS – Centrais Hidrelétricas Brasileiras S.A. **Metodologia pra regionalização de vazões.** Rio de Janeiro- RJ, 202 p., 1985.
- EUCLYDES, H. P.; FERREIRA, P. A.; FARIA FILHO, R. F. R. **Atlas digital das águas de Minas.** Viçosa, MG: UFV, RURALMINAS, IGAM, 2005. 78 p.
- HAAN, C. T. **Statistical methods in hidrology.** 2. ed. Ames, Iowa: The Iowa State University, Press/Ames, 1977. 378 p.
- MARQUES, F. A. **Sistema multi-usuário de gestão de recursos hídricos.** Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola), UFV, Viçosa-MG, 112f., 2006.
- NASH, J. E.; SUTCLIFFE, J. V. **River flow forecasting through conceptual models: a discussion of principles.** Journal of Hydrology, vol. 10, p.282-290, 1970.
- STEDINGER, J. R.; VOGEL, R. M.; FOUFOULA-GEORGIU, E. **Frequency analysis of extreme events.** In: MAIDMENT, D. R. Handbook of hidrology. New York: MacGraw Hill, cap. 18, p. 18. 1992.
- TUCCI, C .E. M. **Regionalização de vazões.** Ed. Universidade/UFRGS, 2002, 256 p.