

# COMPARAÇÃO DA METODOLOGIA ADOTADA PELO INSTITUTO MINEIRO DE GESTÃO DAS ÁGUAS (IGAM) PARA A ESTIMATIVA DA $Q_{7,10}$ E $Q_{MLD}$ COM TRÊS METODOLOGIAS DE REGIONALIZAÇÃO DE VAZÕES

*Michel Castro Moreira<sup>1</sup> & Demetrius David da Silva<sup>2</sup>*

**RESUMO** --- O presente trabalho teve por objetivo comparar a metodologia adotada pelo Instituto Mineiro de Gestão das Águas (IGAM) para a estimativa da vazão mínima com sete dias de duração e período de retorno de dez anos ( $Q_{7,10}$ ) e da vazão média de longa duração ( $Q_{mld}$ ) com outras três metodologias de regionalização de vazões. Foram obtidos, a partir da análise das séries históricas, os valores da  $Q_{7,10}$  e da  $Q_{mld}$  das 15 estações fluviométricas da bacia do rio Paraopeba. Para cada uma das estações foram estimados os valores da  $Q_{7,10}$  e  $Q_{mld}$  considerando a metodologia adotada pelo IGAM e os seguintes métodos de regionalização de vazões: Tradicional, Proporcionalidade de vazões e Conservação de Massas. A precisão das metodologias foi avaliada por meio da aplicação do erro relativo, erro relativo médio e coeficiente de eficiência ajustado. Na análise dos resultados verificou-se que método Tradicional é o que permite melhor estimativa dos valores de  $Q_{7,10}$  e  $Q_{mld}$  para a bacia do rio Paraopeba. Apesar do método adotado pelo IGAM ter apresentado bons resultados na estimativa da  $Q_{mld}$ , sua utilização para a estimativa da  $Q_{7,10}$  na bacia do rio Paraopeba apresenta restrições.

**ABSTRACT** --- The present work is intended to compare the methodology adopted by the Minas Gerais State Government's Water Management Institute (IGAM) for estimating the seven-day long minimum outflow and a ten-year return period ( $Q_{7,10}$ ), as well as the long-term medium flow ( $Q_{mld}$ ) to three other methodologies of outflow regionalization. The  $Q_{7,10}$  and  $Q_{mld}$  values, for the 15 fluviometric stations of the Paraopeba River basin, have been obtained. For each one of the stations, the  $Q_{7,10}$  and  $Q_{mld}$  values have been estimated taking into account the IGAM methodology, as well as the following methods of flow regionalization: the traditional one, the one based on flow proportionality and the one based on mass conservation. The precision of the methodologies has been evaluated by means of the application of the relative error, average relative error, and the adjusted efficiency coefficient. During the analysis of the results, it has been verified that the traditional method is the one that allow a better estimation of the  $Q_{7,10}$  at the Paraopeba River basin. Although the method adopted by IGAM presented good results in estimating the  $Q_{mld}$ , its use for estimating  $Q_{7,10}$  presents some restrictions.

**Palavras-chave:** disponibilidade hídrica, outorga, gestão de recursos hídricos.

---

<sup>1</sup> Doutorando em Eng. Agrícola, DEA, UFV, Viçosa (MG), 36570-000. Bolsista do CNPq. [mmoreira@gprh.ufv.br](mailto:mmoreira@gprh.ufv.br).

<sup>2</sup> Professor Associado, DEA, UFV, Viçosa (MG), 36570-000. Bolsista do CNPq.

## 1 – INTRODUÇÃO

O Instituto Mineiro de Gestão das Águas (IGAM), órgão gestor de recursos hídricos no Estado de Minas Gerais, por meio da Portaria nº 10/98 instituiu como critério para concessão da outorga a vazão mínima de referência com sete dias de duração e período de retorno de 10 anos ( $Q_{7,10}$ ), sendo a vazão máxima passível de ser outorgada, para captações a fio d'água, correspondente a 30% da  $Q_{7,10}$ .

Na análise de concessão de outorga, seja nela utilizado a vazão mínima de referência para captações a fio d'água ou a vazão média de longa duração ( $Q_{mld}$ ) para situações de regularização de corpos hídricos, o conhecimento da disponibilidade de água é a informação básica para a tomada de decisão. As limitadas séries de dados fluviométricos disponíveis e a necessidade de se conhecer a vazão ao longo da rede hidrográfica dificultam ou, muitas vezes, impedem a realização de uma adequada gestão de recursos hídricos.

Para superar a dificuldade encontrada na obtenção de informações hidrológicas para todos os locais de interesse necessários ao adequado gerenciamento dos recursos hídricos de uma região, utiliza-se a técnica de regionalização de vazões para transferir espacialmente as informações, a partir dos dados disponíveis em determinadas localidades. Diversas metodologias para essa finalidade encontram-se disponíveis, como as descritas por Eletrobrás (1985a), Eletrobrás (1985b), Chaves et al. (2002) e Novaes et al. (2009).

No Estado de Minas Gerais, para a estimativa da  $Q_{7,10}$  e  $Q_{mld}$ , o IGAM utiliza o trabalho “*Deflúvios Superficiais no Estado de Minas Gerais*” (Souza, 1993), o qual foi desenvolvido pela Hidrosistemas – Engenharia de Recursos Hídricos Ltda. com o apoio da Companhia de Saneamento de Minas Gerais (COPASA). O estudo permite a estimativa das vazões superficiais médias e extremas para qualquer ponto do Estado de Minas Gerais, bem como a estimativa do potencial de regularização dos cursos d'água por meio de reservatórios.

A qualidade das vazões estimadas utilizando os métodos de regionalização depende do número de estações fluviométricas consideradas e de sua distribuição. É importante que se tenha consciência de que nenhum dado pode ser criado; o que se deve é buscar, da melhor maneira possível, extrair o máximo de informações dos dados existentes (IPH, citado por Silva Júnior et al., 2003). Sendo assim, é imperativo o estudo comparativo de metodologias de regionalização de vazões a fim de se determinar qual melhor se ajusta às características regionais da bacia.

Diante das diferentes opções de metodologias de regionalização de vazões e visando fornecer ao órgão gestor de recursos hídricos do Estado de Minas Gerais subsídios para escolha de um método para a estimativa das vazões na bacia do rio Paraopeba, o presente trabalho teve por objetivo comparar a metodologia adotada pelo Instituto Mineiro de Gestão das Águas – IGAM para

a estimativa dos valores da vazão mínima com sete dias de duração e período de retorno de dez anos ( $Q_{7,10}$ ) e da vazão média de longa duração ( $Q_{mld}$ ) com outras três metodologias de regionalização de vazões (Método Tradicional, Proporcionalidade de vazões e Método de Conservação de Massas).

## 2 – MATERIAL E MÉTODOS

### 2.1. Área de estudo

A bacia do rio Paraopeba, com área de drenagem de aproximadamente 13.300 km<sup>2</sup>, representa 2,3% da área do Estado de Minas Gerais (Figura 1). Está situada na região do Alto São Francisco, contribuindo com cerca de 9,1% do volume médio escoado na foz do rio São Francisco (Pereira, 2004).

A bacia apresenta grande diversidade nas atividades econômicas, englobando centros industriais e minerários, regiões urbanas mais densamente ocupadas, principalmente no alto curso, e regiões pouco ocupadas e destinadas às atividades agropecuárias no terço inferior do seu curso (Schvartzman, 2000).

### 2.2. Dados fluviométricos

Com vistas à comparação dos valores de  $Q_{7,10}$  e  $Q_{mld}$  estimados com base na metodologia adotada pelo IGAM e por outras três metodologias de regionalização de vazões (Método Tradicional, Proporcionalidade de vazões e Método de Conservação de Massas), foram elaborados diagramas de barras de 81 estações fluviométricas identificadas na bacia do rio Paraopeba, objetivando a caracterização do período de dados disponível em cada estação, de forma a permitir a identificação do período base e as estações a serem utilizadas no estudo.

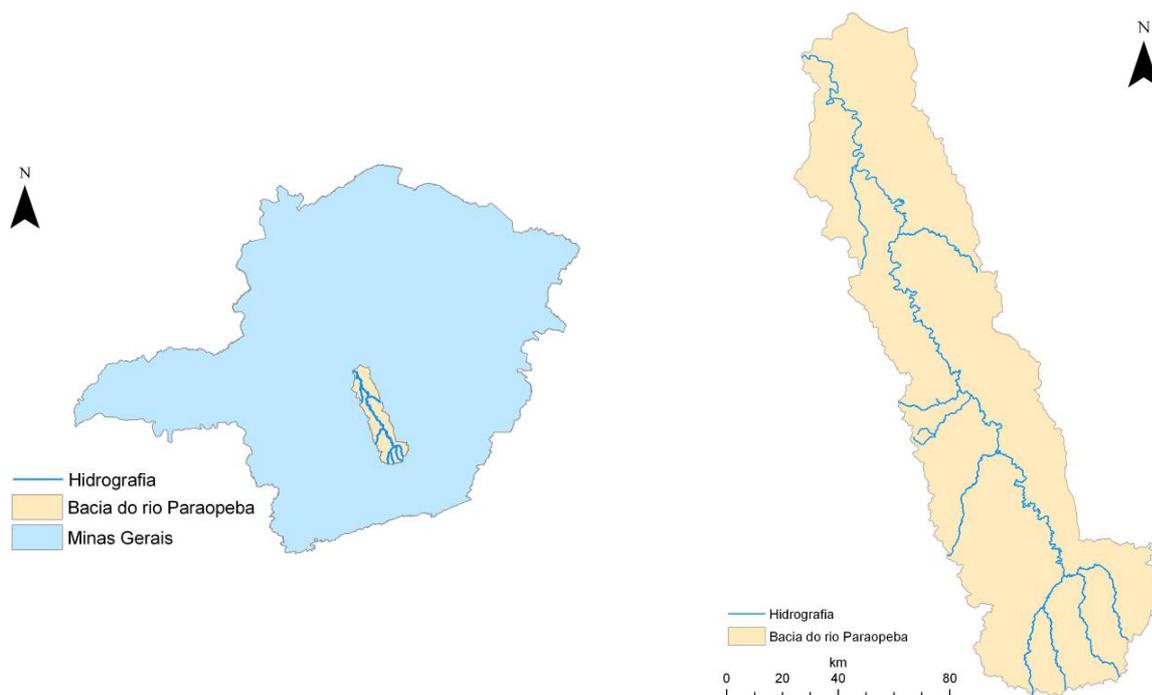


Figura 1 – Mapa de localização da bacia do rio Paraopeba.

De posse dos diagramas de barras foram escolhidas 15 estações fluviométricas pertencentes à rede hidrometeorológica da Agência Nacional de Águas – ANA (Tabela 1) e selecionado o período base de 1976 a 2005 para a realização dos estudos hidrológicos.

Tabela 1 – Estações fluviométricas utilizadas no estudo

Código	Estação	Latitude (Sul)	Longitude (Oeste)	Área de drenagem (km <sup>2</sup> )	Curso d'Água
40549998	São Brás do Suaçui - Montante	20°36'14''	43°54'31''	446	Rio Paraopeba
40579995	Congonhas - Linígrafo	20°31'07''	43°50'08''	613	Rio Maranhão
40665000	Usina João Ribeiro	20°39'00''	44°02'00''	259	Rio Camapua
40680000	Entre Rios de Minas	20°39'37''	44°04'19''	469	Rio Brumado
40710000	Belo vale	20°24'29''	44°01'16''	2.690	Rio Paraopeba
40740000	Alberto Flores	20°09'25''	44°10'00''	3.945	Rio Paraopeba
40770000	Conceição do Itagua	20°09'00''	44°15'00''	649	Rio Manso / Cor. Urubu
40800001	Ponte Nova do Paraopeba	19°56'56''	44°18'19''	5.680	Rio Paraopeba
40810350	Fazenda Laranjeiras	20°05'39''	44°29'37''	10,2	Córrego Mato Frio
40810800	Fazenda Pasto Grande	20°03'38''	44°27'08''	54,7	Ribeirão Serra Azul
40811100	Jardim	20°02'51''	44°24'32''	112,4	Ribeirão Serra Azul
40821998	Bom Jardim	19°59'43''	44°31'50''	39,8	Ribeirão Sesmaria
40822995	Mateus Leme - Aldeia	19°58'10''	44°25'19''	89,4	Ribeirão Mateus Leme
40823500	Suzana	19°57'41''	44°21'58''	153	Ribeirão Mateus Leme
40850000	Ponte da Taquara	19°25'23''	44°32'52''	8.720	Rio Paraopeba

Para a determinação da  $Q_{7,10}$  foi identificado, para cada ano considerado no estudo e para cada estação fluviométrica, o valor da vazão mínima pertinente à duração de sete dias ( $Q_7$ ), para então estabelecer o modelo probabilístico com melhor ajuste às séries de  $Q_7$ . Os modelos probabilísticos que foram analisados para representar a vazão mínima foram: Log-Normal a dois parâmetros, Log-Normal a três parâmetros, Pearson tipo III, Log-Pearson tipo III e Weibull.

A seleção da distribuição de probabilidade que melhor se ajustou aos dados da série histórica de  $Q_7$  foi realizada com base no teste de aderência de Kolmogorov-Smirnov, em diferentes níveis de probabilidade, e no coeficiente de variação. Foi escolhida a distribuição de probabilidade que apresentou significância em nível de 20% de probabilidade no teste de Kolmogorov-Smirnov, associada ao menor coeficiente de variação. Para obtenção da  $Q_{7,10}$  foi utilizado o software RH 3.0, desenvolvido por Euclides et al. (1999).

A vazão média anual de longa duração ( $Q_{mld}$ ) foi obtida para cada estação fluviométrica, pela média das vazões médias anuais, tendo sido utilizado na obtenção deste valor o software Hidro, desenvolvido por ANA (2003).

### 2.3. Estimativa da $Q_{7,10}$ e $Q_{mld}$

#### 2.3.1. Método Tradicional

O método Tradicional consiste na identificação de regiões hidrologicamente homogêneas e no ajuste de equações de regressão regionais entre as diferentes variáveis a serem regionalizadas e as características físicas e climáticas das bacias de drenagem para cada região homogênea.

Para a definição das regiões hidrologicamente homogêneas foi inicialmente observada a distribuição geográfica das estações e, então, analisados os coeficientes de determinação da regressão ( $r^2$  e  $r^2_a$ ), o erro padrão (e.p), o coeficiente de variação (c.v%), a significância do modelo pelo teste F (%F), a classificação dos resíduos padronizados (r.p) e o erro percentual (%d.r) entre os valores das vazões observadas e as estimadas pelo modelo de regionalização obtido.

Quando foram verificados bons resultados de  $r^2$ ,  $r^2_a$ , e.p, c.v%, %F, r.p e %d.r, a região foi definida como hidrologicamente homogênea para as vazões estudadas; entretanto, nos casos em que isso não ocorreu, houve necessidade de subdividir a região ou reorganizar as estações dentro das regiões e reiniciar o processo.

De posse dos valores de  $Q_{7,10}$ ,  $Q_{mld}$  e da área de drenagem correspondente às diferentes estações fluviométricas pertencentes a uma mesma região homogênea, foi aplicada a regressão múltipla entre as vazões e a área de drenagem, para obtenção das equações de regressão regionais para cada região hidrologicamente homogênea, com base nos modelos: linear, potencial, exponencial, logarítmico e recíproco.

Para fins de verificação do ajuste de determinado modelo aos dados, foram adotados o coeficiente de determinação ajustado, o erro-padrão da estimativa e o teste da função F. 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 e resultados significativos pelo teste F.

Foram identificadas duas regiões hidrologicamente homogêneas na bacia do rio Paraopeba, sendo as equações de regionalização para estimativa das vazões, em  $m^3s^{-1}$ , respectivamente

- Região I

$$Q_{7,10} = 0,00168 A^{1,101117} \quad r^2 = 0,9791 \quad (1)$$

$$Q_{mld} = 0,023266 A^{0,96386} \quad r^2 = 0,9774 \quad (2)$$

- Região II

$$Q_{7,10} = 0,002282 A^{1,020517} \quad r^2 = 0,9957 \quad (3)$$

$$Q_{mld} = 0,015398 A \quad r^2 = 0,9998 \quad (4)$$

em que, A corresponde a área de drenagem da seção em análise, em  $km^2$ .

Euclides et al. (2007), no trabalho “Atlas Digital das Águas de Minas”, procederam a regionalização de vazões para todo o Estado de Minas Gerais. As equações de regionalização para a bacia do rio Paraopeba, apresentadas no atlas para a  $Q_{7,10}$  e  $Q_{mld}$ , são

$$Q_{7,10} = 0,0045 A^{0,9434} \quad r^2 = 0,99 \quad (5)$$

$$Q_{mld} = 0,0278 A^{0,9325} \quad r^2 = 0,99 \quad (6)$$

A partir das equações de regionalização ajustadas no presente trabalho com base na metodologia proposta por Eletrobrás (1985a) (método Trad. 1) e das equações obtidas no trabalho de Euclides et al. (2007) (método Trad. 2), foram estimados os valores de  $Q_{7,10}$  e  $Q_{mld}$ , para cada uma das posições das estações fluviométricas listadas na Tabela 1.

### 2.3.2. Método baseado na proporcionalidade de vazões específicas

Para estimativa dos valores de  $Q_{7,10}$  e  $Q_{mld}$ , com base na metodologia descrita em Eletrobrás (1985b), foi necessário proceder ao enquadramento do local de interesse em relação às estações fluviométricas do estudo, conforme um dos quatro casos preconizados e descritos a seguir:

#### - Caso 1 – Local de interesse situado à montante de um posto com vazão conhecida

Neste caso, a vazão foi estimada pela razão de área de drenagem, conforme utilizado por Stedinger et al. (1992), para o cálculo da vazão em local de vazão desconhecida ( $Q_z$ ), dentro da área de influência de um posto com vazão conhecida ( $Q_x$ ), utilizando a equação

$$Q_z = \frac{A_z}{A_x} Q_x \quad (7)$$

em que

$$\begin{aligned} Q_z &= \text{vazão no local de interesse, m}^3\text{s}^{-1}; \\ Q_x &= \text{vazão em um posto fluviométrico à jusante da seção em análise, m}^3\text{s}^{-1}; \\ A_z &= \text{área de drenagem no local onde se deseja conhecer a vazão, km}^2; \text{ e} \\ A_x &= \text{área de drenagem do posto fluviométrico à jusante do local de interesse, km}^2. \end{aligned}$$

#### - Caso 2 – Local de interesse situado entre dois postos com vazão conhecida

No caso de um local de interesse z situado num trecho de canal entre dois postos fluviométricos de vazão conhecida,  $Q_m$  e  $Q_j$ , a vazão desconhecida,  $Q_z$ , foi estimada utilizando a equação

$$Q_z = Q_m + \frac{A_z - A_m}{A_j - A_m} (Q_j - Q_m) \quad (8)$$

em que

$$\begin{aligned} Q_m &= \text{vazão em um posto fluviométrico à montante, m}^3\text{s}^{-1}; \\ Q_j &= \text{vazão em um posto fluviométrico à jusante, m}^3\text{s}^{-1}; \\ A_m &= \text{área de drenagem relativa ao posto fluviométrico à montante, km}^2; \text{ e} \\ A_j &= \text{área de drenagem relativa ao posto fluviométrico à jusante, km}^2. \end{aligned}$$

#### - Caso 3 – Local de interesse situado a jusante de um posto com vazão conhecida

Esta situação é semelhante à descrita no caso 1, tendo sido a vazão no local de interesse z também calculada com base na equação 7.

#### - Caso 4 – Local de interesse situado em um canal afluente, cuja foz está entre dois postos fluviométricos de um canal de ordem superior

Esta situação (Figura 3) é uma combinação das situações descritas nos casos 1 e 2. Para a estimativa das vazões para este caso, aplicou-se o procedimento descrito no caso 2 (equação 8) entre os postos a montante e a jusante, calculando a vazão no local de confluência do canal de ordem  $i$  ( $z'$ ), e posteriormente foi obtida a vazão de referência correspondente ao local de interesse  $z$ , usando a vazão calculada previamente em  $z'$  e aplicando o mesmo procedimento descrito no caso 1 (equação 7).

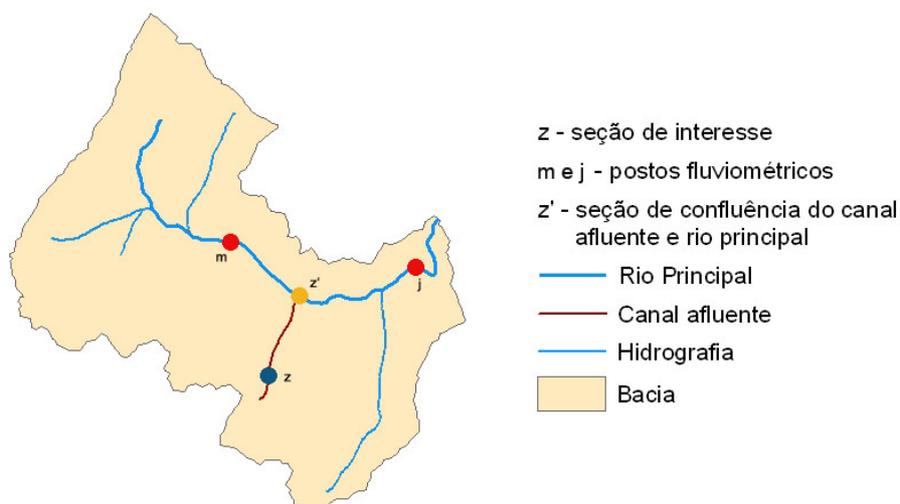


Figura 3 – Situação de um local de interesse situado em um canal afluente cuja foz está entre dois postos fluviométricos de um canal de ordem superior.

#### 2.3.3. Método baseado na conservação de massas

Para a estimativa das vazões por este método foi necessário ajustar modelos de regressão para representação das vazões mínimas e média em função da área de drenagem das estações fluviométricas localizadas no rio principal, como proposto por Pereira (2004) e aperfeiçoado por Novaes et al., (2009), e, a partir desses modelos, obter as vazões na foz de cada rio afluente direto do rio principal, procedendo-se então novos ajustes, em um processo recursivo, dos rios de maior ordem para os de menor.

Na Figura 4 são apresentados os rios para os quais foram realizados os ajustes, sendo que esses possuíam pelo menos uma estação fluviométrica. Os modelos de regressão obtidos por este método, para a estimativa da  $Q_{7,10}$  e  $Q_{mld}$ , foram

- Rio Paraopeba  
$$Q_{7,10} = 0,0050 A^{0,9515} \quad r^2 = 0,9764 \quad (9)$$

$$Q_{mld} = 0,0268 A^{0,9424} \quad r^2 = 0,9899 \quad (10)$$

- Ribeirão Mateus Leme e Sesmaria  
$$Q_{7,10} = 0,0068 e^{0,02504 A} \quad r^2 = 0,8274 \quad (11)$$

$$Q_{mld} = 0,0112 A^{1,05964} \quad r^2 = 0,9985 \quad (12)$$

- Ribeirão Serra Azul
 
$$Q_{7,10} = 0,0004 A^{1,36418} \quad r^2 = 0,9947 \quad (13)$$

$$Q_{mld} = 0,0112 A^{1,05552} \quad r^2 = 0,9980 \quad (14)$$
- Rio Manso
 
$$Q_{7,10} = 0,8360 A^{0,15622} \quad r^2 = 0,9999 \quad (15)$$

$$Q_{mld} = 1,9988 A^{0,26594} \quad r^2 = 0,9895 \quad (16)$$
- Rio Brumado
 
$$Q_{7,10} = 0,5552 e^{0,00176 A} \quad r^2 = 0,9999 \quad (17)$$

$$Q_{mld} = 0,2196 A^{0,62614} \quad r^2 = 0,9999 \quad (18)$$
- Rio Camapuã
 
$$Q_{7,10} = 0,4156 A^{0,00814} \quad r^2 = 0,9996 \quad (19)$$

$$Q_{mld} = 0,0123 A^{+7E-16} \quad r^2 = 1 \quad (20)$$
- Rio Maranhão
 
$$Q_{7,10} = 0,0052 e^{0,00926 A} \quad r^2 = 0,9999 \quad (21)$$

$$Q_{mld} = 0,9896 e^{0,00356 A} \quad r^2 = 0,9908 \quad (22)$$
- Córrego Mato Frio
 
$$Q_{7,10} = 0,0168 A^{0,31116} \quad r^2 = 0,9999 \quad (23)$$

$$Q_{mld} = 0,0276 A^{0,78204} \quad r^2 = 0,9999 \quad (24)$$

A partir dos modelos de regressão ajustados para cada um dos rios da bacia do rio Paraopeba que possuíam pelo menos uma estação fluviométrica, foram estimados os valores de  $Q_{7,10}$  e  $Q_{mld}$ , para cada uma das posições das estações fluviométricas listadas na Tabela 1.

#### 2.3.4. Método adotado pelo Instituto Mineiro de Gestão das Águas (IGAM)

Para a obtenção das estimativas das vazões utilizando o trabalho “*Deflúvios superficiais no Estado de Minas Gerais*”, elaborado por Souza (1993), foram digitalizados os mapas temáticos das tipologias regionais homogêneas, do rendimento específico médio mensal – referente às contribuições unitárias mínimas com 10 anos de recorrência, e do rendimento específico médio de longo termo.

Para a estimativa da vazão mínima foi necessário a obtenção do rendimento característico equivalente ( $Rm_e$ ) da área de contribuição de cada estação fluviométrica. O  $Rm_e$  da área de contribuição de cada seção foi obtido pela média ponderada dos diversos intervalos entre as isolinhas contidas na bacia, onde os fatores de ponderação foram as áreas de cada intervalo.

Para tanto, se utilizou a sobreposição da área de drenagem de cada seção ao mapa de rendimento específico médio mensal – referente às contribuições unitárias mínimas com 10 anos de

recorrência. Este método pode ser sintetizado pela equação

$$Rm_e = \left( \frac{\sum_{k=1}^n Rm_k A_k}{\sum_{k=1}^n A_k} \right) \quad (25)$$

em que

$Rm_e$  = rendimento característico equivalente na bacia de drenagem da seção de interesse,  $Ls^{-1}km^2$ ;

$Rm_k$  = média aritmética dos valores das isolinhas que limitam o intervalo k, contido na bacia de interesse,  $Ls^{-1}km^2$ ;

$A_k$  = área do intervalo k, contido na bacia de interesse,  $km^2$ ; e

n = número total de intervalos, contidos na bacia de interesse, adm.

A conversão do  $Rm_e$  na respectiva vazão característica, relativa à seção fluvial de interesse, foi efetuada de acordo com a equação

$$Q_m = 0,001 R_{me} A \quad (26)$$

em que

$Q_m$  = vazão característica da seção de interesse,  $m^3s^{-1}$ ; e

A = Área de drenagem da seção fluvial de interesse,  $km^2$ .

A vazão característica corresponde a uma variável de parametrização que permite, a partir da utilização das funções de inferência, estimar outras vazões, uma vez que a  $Q_m$  corresponde a uma vazão mínima de duração mensal e recorrência decendial.

Tendo em vista que as funções de inferência apresentam formas diferenciadas para cada uma das tipologias regionais homogêneas (Figura 5c), determinou-se a tipologia homogênea dominante da área de contribuição de cada seção, efetuando-se a sobreposição da área de drenagem da seção ao mapa de tipologias homogêneas.

Desse modo, a  $Q_{7,10}$  para cada seção de interesse foi obtida pela equação

$$Q_{7,10} = F_{7,10} Q_m \quad (27)$$

em que,  $F_{7,10}$  é o fator de proporção fornecido pela função de inferência regionalizada, a qual é obtida pela tipologia homogênea.

Para o cálculo da  $Q_{mld}$  foi adotado procedimento similar em relação a obtenção do rendimento característico equivalente na bacia, sendo utilizado a sobreposição da área de drenagem de cada seção ao mapa de rendimento específico médio de longo termo.

Uma vez que o rendimento característico corresponde ao rendimento específico médio de longo termo, foi considerada a vazão característica ( $Q_m$ ) como a própria  $Q_{mld}$ .

Os cálculos necessários para as estimativas dos valores de  $Q_{7,10}$  e da  $Q_{mld}$  foram realizados em ambiente de sistemas de informações geográficas, tendo sido utilizado o programa computacional ESRI ArcGis 8.3 com a extensão *Spatial Analyst*.

## 2.4. Comparação entre os procedimentos para estimativa da $Q_{7,10}$ e $Q_{mld}$

De posse dos valores da  $Q_{7,10}$  e  $Q_{mld}$ , obtidos a partir da análise da série histórica de cada uma das 15 estações fluviométricas utilizadas no estudo ( $Q_{7,10}$  obs e  $Q_{mld}$  obs), e das vazões estimadas com base no método adotado pelo IGAM e pelas outras três metodologias de regionalização de vazões (Método Tradicional, Proporcionalidade de vazões e Método de Conservação de Massas), foi avaliada a precisão das metodologias por meio da aplicação do erro relativo (ER) entre o valor obtido a partir da análise da série histórica e o estimado, do Erro Relativo Médio (ERM), conforme apresentado por Schaeffer (1980), e do coeficiente de eficiência ajustado ( $E'$ ) (Legates e McCabe Júnior, 1999)

Na avaliação dos resultados, utilizou-se, além do ER, ERM e coeficiente de eficiência ajustado, o índice de confiança (c), proposto por Camargo e Sentelhas (1997) e que, segundo Baena (2004), permite analisar conjuntamente a precisão e a exatidão dos resultados obtidos, sendo calculado pelo produto do coeficiente de correlação (r) e do índice de concordância (d), proposto por Willmott (1981). Na Tabela 2 são apresentados os critérios de avaliação do desempenho dos procedimentos para estimativa da  $Q_{7,10}$  e  $Q_{mld}$  quanto ao seu índice de confiança.

A determinação da melhor metodologia de regionalização para a bacia do rio Paraopeba foi feita a partir da consideração conjunta do menor valor de erro relativo médio, do maior valor de coeficiente de eficiência ajustado e do maior valor do índice de confiança.

Tabela 2 – Análise do desempenho do modelo com base no índice de confiança

Valor de c	> 0,85	0,76 a 0,85	0,66 a 0,75	0,61 a 0,65	0,51 a 0,60	0,41 a 0,50	≤ 0,40
Desempenho	Ótimo	Muito bom	Bom	Mediano	Sofrível	Mau	Péssimo

## 3 – RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 3.1. Vazão mínima ( $Q_{7,10}$ )

Na Tabela 3 estão apresentados os erros relativos percentuais e os valores da  $Q_{7,10}$  das 15 estações fluviométricas da bacia do rio Paraopeba utilizadas no estudo, obtidos a partir da análise probabilística das séries históricas e estimados pelas diferentes metodologias de regionalização de vazões.

Pela análise dos valores apresentados na Tabela 3, verifica-se que as vazões estimadas a partir da análise probabilística das séries históricas ( $Q_{7,10}$  Obs), variaram de 31 a 24.400  $LS^{-1}$  nas estações Fazenda Laranjeiras (40810350) e Ponte da Taquara (40850000), respectivamente as de menor e maior área de drenagem da bacia do rio Paraopeba.

Dado que Ponte da Taquara, com área de drenagem de 8.720 km<sup>2</sup>, é a estação mais a jusante da bacia e considerando o método de regionalização baseado na proporcionalidade de vazões específicas, pode-se calcular a vazão na foz da bacia (13.300 km<sup>2</sup>; Pereira, 2004) como sendo de 37.216 Ls<sup>-1</sup>. Tal vazão permitiria a outorga na bacia, considerando o critério adotado no Estado de Minas Gerais (30% da Q<sub>7,10</sub>) de até 11.164 Ls<sup>-1</sup>.

Pelo método Trad. 1 de regionalização de vazões, verifica-se que os valores de ER variaram de 1,8 a -50,6%, sendo estes valores observados, respectivamente, nas estações Ponte da Taquara (40850000; 8.720 km<sup>2</sup>) e Fazenda Pasto Grande (40810800; 54,7 km<sup>2</sup>). Observa-se que de modo geral, os maiores valores de ER ocorreram nas estações com menores áreas de drenagem, como as estações Fazenda Laranjeiras (40810350; 10,2 km<sup>2</sup>), Jardim (40811100; 112,4 km<sup>2</sup>), Entre Rios de Minas (40680000; 469 km<sup>2</sup>) e Congonhas-Linígrafo (40579995; 613 km<sup>2</sup>).

Em relação à ocorrência de maiores erros na estimativa das vazões nas regiões próximas às cabeceiras, outros autores também observaram tal comportamento (Silva Júnior et al., 2003; Novaes et al., 2007; Lisboa et al., 2008). Cruz e Tucci (2008) explicam que este comportamento está associado a maior regularização natural das bacias de maior área de drenagem. Quanto menores forem as áreas contribuintes das bacias, maiores serão as diferenças entre as disponibilidades. Dessa forma, é de se esperar maior sensibilidade no sistema para as pequenas bacias. Assim, a aplicação do método Tradicional para pequenas áreas de drenagem remete à necessidade de um maior cuidado na utilização das estimativas das vazões.

Tabela 3 – Erros relativos percentuais (ER) e valores de Q<sub>7,10</sub>, em Ls<sup>-1</sup>, obtidos a partir da análise das séries históricas e estimados por diferentes metodologias de regionalização de vazões

Código	Q <sub>7,10</sub> Obs	Trad. 1		Trad. 2		Proporc.		MCM		IGAM	
		Q <sub>7,10</sub> Est	ER (%)								
40549998	1.470	1.388	5,5	1.421	3,3	1.953	-32,9	1.636	-11,3	3.117	-112,0
40579995	1.520	1.971	-29,7	1.918	-26,2	2.684	-76,6	1.519	0,1	2.768	-82,1
40665000	900	763	15,2	851	5,4	916	-1,7	795	11,7	1.178	-30,9
40680000	1.270	1.468	-15,6	1.490	-17,3	2.054	-61,7	1.244	2,1	1.801	-41,8
40710000	11.780	10.043	14,7	7.742	34,3	9.737	17,3	9.058	23,1	13.079	-11,0
40740000	14.360	15.310	-6,6	11.110	22,6	13.853	3,5	13.045	9,2	16.902	-17,7
40770000	2.290	2.099	8,4	2.024	11,6	2.066	9,8	2.235	2,4	1.819	20,6
40800001	16.720	15.477	7,4	15.670	6,3	18.008	-7,7	18.459	-10,4	21.845	-30,7
40810350	31	24	20,0	40	-32,0	20	34,5	30	3,0	46	-50,5
40810800	90	136	-50,6	196	-118,1	109	-20,7	93	-3,6	225	-150,4
40811100	220	283	-28,5	387	-76,0	261	-18,4	249	-13,1	435	-97,7
40821998	90	98	-8,8	145	-61,5	89	1,1	18	80,4	107	-19,4
40822995	200	224	-11,9	312	-56,0	243	-21,7	62	68,9	259	-29,3
40823500	440	387	12,0	518	-17,7	378	14,0	314	28,7	435	1,2
40850000	24.400	23.971	1,8	23.480	3,8	25.669	-5,2	27.768	-13,8	30.622	-25,5

**Q<sub>7,10</sub> Obs** – Q<sub>7,10</sub> obtida a partir da análise probabilística das séries históricas.

**Trad. 1** – método Tradicional de regionalização, tendo sido utilizadas para o cálculo da Q<sub>7,10</sub> Est as equações ajustadas a partir das vazões obtidas pela análise da série histórica.

**Trad. 2** – método Tradicional de regionalização, tendo sido utilizadas para o cálculo da Q<sub>7,10</sub> Est as equações obtidas no trabalho “Atlas Digital das Águas de Minas” (Euclides et al., 2007).

**Proporc.** – método baseado na proporcionalidade de vazões específicas.

**MCM** – método baseado na conservação de massas (continuidade de vazões).

**IGAM** – método adotado pelo Instituto Mineiro de Gestão das Águas (IGAM).

Pelo método Trad. 2 os valores de ER variaram de 3,3 a -118,1%, sendo estes valores observados nas estações São Brás do Suaçui-Montante (40549998) e Fazenda Pasto Grande (40810800), respectivamente. Novamente, a estação Fazenda Pasto Grande apresentou o maior erro relativo, fato que esta associado à pequena área de drenagem da estação.

Também apresentaram erros expressivos as estações Jardim (40811100; -76%), Bom Jardim (40821998; -61,5%), Mateus Leme-Aldeia (40822995; -56%) e Belo Vale (40710000; 34,3%), sendo que esta última, diferentemente das anteriores, apresenta maior área de drenagem (2.690 km<sup>2</sup>).

Euclides et al. (2007) ressaltam que as equações de regionalização obtidas no “*Atlas Digital das Águas de Minas*” devem ser utilizadas respeitando as restrições relativas às áreas de drenagem. Para a bacia do rio Paraopeba, as equações devem ser utilizadas para áreas de drenagem compreendidas entre 259 a 8.571 km<sup>2</sup>, fato que pode explicar as piores estimativas por este método para as estações Fazenda Laranjeiras (40810350; 10,2 km<sup>2</sup>), Fazenda Pasto Grande (40810800; 54,7 km<sup>2</sup>), Jardim (40811100; 112,km<sup>2</sup>), Bom Jardim (40821998; 39,8 km<sup>2</sup>) e Mateus Leme-Aldeia (40822995; 89,4 km<sup>2</sup>). Desse modo, ao utilizar o método, certa cautela é aconselhável no caso da estimativa de vazões para áreas de drenagem inferiores a 259 km<sup>2</sup>.

Os métodos Trad. 1 e Trad. 2 correspondem ao método de regionalização de vazões Tradicional (Eletrobrás, 1985a), o qual consiste na identificação de regiões hidrologicamente homogêneas e no ajuste de equações de regressão entre as diferentes variáveis a serem regionalizadas e as características físicas e climáticas das bacias de drenagem para cada região homogênea.

Verifica-se, apesar de se tratar do mesmo método, que o método Trad. 1 apresentou melhor estimativa das vazões em relação ao método Trad. 2. Tal fato pode ser explicado pelas diferentes bases de dados utilizadas no ajuste das equações para a estimativa das vazões.

No método Trad.1 foram utilizadas para o ajuste das equações de regionalização os dados das vazões obtidas pela análise da série histórica, ou seja, as mesmas vazões utilizadas para o cálculo do ER (Q<sub>7,10</sub> Obs), os quais tiveram como período base os anos de 1976 a 2005. No método Trad. 2, as equações foram obtidas do trabalho “*Atlas Digital das Águas de Minas*” (Euclides et al., 2007), tendo como período de dados os anos de 1970 a 2002.

Vale ainda destacar que no método Trad. 1 foram utilizadas 15 estações fluviométricas, enquanto no método Trad. 2 foram utilizadas apenas 8 estações, ou seja, apenas 8 valores de Q<sub>7,10</sub> foram utilizados para o ajuste das equações na bacia do rio Paraopeba.

No método baseado na proporcionalidade de vazões específicas verificaram-se erros entre 1,1 a -76,6%, nas estações Bom Jardim (40821998) e Congonhas-Linígrafo (40579995), respectivamente. O maior erro evidenciado na estação Congonhas-Linígrafo está associado ao fato de que a vazão para esta seção foi estimada considerando o caso 1 do método, no qual a seção em análise está localizada à montante de um posto com vazão conhecida. Neste caso, foi utilizada a vazão da estação Belo Vale (40710000) com área de drenagem 4,4 vezes superior a da seção em análise.

Eletrobrás (1985b) ressalta que não se deve aplicar este método quando a relação entre a área de drenagem do posto fluviométrico em análise e a seção de interesse for superior a três. Tal fato também ocorreu na estimativa das vazões de outras seções, como nas estações São Brás do Suaçui-Montante (40549998) e Entre Rios de Minas (40680000), as quais tiveram, respectivamente, erros relativos de -32,9 e -61,7%.

O método baseado na conservação de massas apresentou erros relativos entre 0,1 e 80,4% nas estações Congonhas-Linígrafo (40579995) e Bom Jardim (40821998), respectivamente. Além de Bom Jardim, duas outras estações localizadas no ribeirão Mateus Leme e Sesmaria, Mateus Leme-Aldeia (40822995) e Suzana (40823500), apresentaram erros relativos elevados de 68,9 e 28,7%, respectivamente.

Verifica-se que os maiores erros nas estimativas por este método foram encontrados no ribeirão Mateus Leme e Sesmaria, fato que pode estar associado ao menor coeficiente de determinação ( $r^2 = 0,8274$ ) das equações ajustadas.

Em relação a este método, assim como feito no método Trad. 1, foram utilizados para o ajuste das equações para a estimativa das vazões os mesmos dados utilizados para o cálculo do ER, fato que deveria conferir a estes dois métodos melhores resultados.

Pelo método adotado no IGAM foram observados valores de ER entre 1,2 a -150,4%. O menor ER ocorreu na estação Suzana (40823500), enquanto o maior ocorreu na estação Fazenda Pasto Grande (40810800).

Para as estações São Brás do Suaçui-Montante (40549998; -112%) e Fazenda Pasto Grande (40810800; -150,4%), erros dessa magnitude podem implicar em graves problemas na gestão de recursos hídricos, pois neste caso está se superestimando em mais de duas vezes as vazões, acarretando na superestimativa dos valores passíveis de serem outorgados.

Por outro lado, Santana et al. (2005) verificaram para seções do ribeirão Tronqueira, situado no Triângulo Mineiro, que a estimativa da  $Q_{7,10}$  pelo método adotado pelo IGAM subestimou as vazões em 7,8 vezes para uma seção, enquanto na outra a subestimativa foi de 6,5 vezes.

Tais autores salientam que isto demonstra que os níveis de incertezas e erros envolvidos no referido estudo são elevados, a ponto de inviabilizar empreendimentos que poderiam incrementar o desenvolvimento econômico do Estado de Minas Gerais, visto que o mesmo é usado como fonte para o planejamento de ações de desenvolvimento do Estado (Plano Diretor de Irrigação dos Municípios do Baixo Rio Grande) e gerenciamento de recursos hídricos (outorgas no IGAM).

De modo geral, em relação aos valores de ER das estimativas das  $Q_{7,10}$  pelos diferentes métodos, verifica-se que o método adotado pelo IGAM apresentou os piores resultados. Tal fato pode estar associado a alguns fatores como a utilização de base de dados fluviométricos mensais para o estabelecimento do método, a defasagem temporal e as ações antrópicas na bacia.

A metodologia de construção do método adotado pelo IGAM baseou-se na utilização de uma base de dados mensal. Os dados hidrométricos do Estado foram compilados para 252 pontos de informação

considerando o período mensal, dada a necessidade de minimizar o uso de séries hidrométricas diárias, cuja consolidação, homogeneização e análise estatística, em larga escala, exigiriam esforços incompatíveis com a natureza dos estudos programados (Souza, 1993).

Assim, o estudo permite à estimativa dos estados característicos das variáveis hidrológicas sob a forma de rendimentos específicos de duração mensal e recorrência decendial. É necessária a utilização de funções de inferência sobre os rendimentos característicos para transformação destes em eventos de outras durações e recorrências. Tal procedimento ocorre apenas neste método, uma vez que, comparativamente aos demais métodos, apenas o método adotado pelo IGAM não utiliza uma base de dados diária.

Em relação à defasagem temporal, os mapas das tipologias homogêneas e do rendimento específico médio mensal, utilizados para a estimativa das vazões, foram desenvolvidos a partir de informações hidrológicas mensais, referentes ao período de 1930 a 1989.

Dessa forma, os valores estimados utilizando este método não são sensíveis as mudanças ocorridas ao longo dos últimos 20 anos na bacia, notadamente, a alteração do uso e ocupação do solo, o aumento dos empreendimentos minerários e a expansão das indústrias e da irrigação, as quais afetam diretamente o regime hidrológico da bacia.

Outro fato que afeta diretamente o regime hidrológico e aumenta a pressão pelo uso dos recursos hídricos na bacia são as barragens da Companhia de Saneamento de Minas Gerais (COPASA-MG), as quais formam o Sistema Integrado do rio Paraopeba. Constituído pelas barragens Serra Azul, Vargem das Flores e Rio Manso, o Sistema Paraopeba tem por objetivo a produção de água para a Região Metropolitana de Belo Horizonte, localizada na bacia do rio das Velhas, produzindo uma vazão média de  $7.600 \text{ L s}^{-1}$ , visando atender cerca de cerca de 2,5 milhões de pessoas (COPASA, 2008).

O efeito das ações antrópicas nos recursos hídricos é um aspecto que merece destaque, a ser considerado não apenas em relação ao método adotado pelo IGAM, mas sim em relação a todos os métodos para obtenção da disponibilidade hídrica ao longo da hidrografia de uma bacia, uma vez que os usos consuntivos e não consuntivos, como a construção de barragens, tendem a modificar o escoamento natural dos cursos d'água.

Neste sentido, segundo o ONS (2003), o uso da vazão natural para representar a disponibilidade hídrica é fundamental para o planejamento de recursos hídricos, por permitir representar as condições naturais existentes na bacia e sua evolução ao longo dos anos, entretanto, por ser este um assunto de preocupação recente, pouco se conhece sobre o impacto do uso dessas vazões em estudos hidrológicos (Rodriguez, 2008).

Na Tabela 4 apresentam-se o erro relativo médio (ERM), os coeficientes de determinação ( $r^2$ ) e eficiência ajustado ( $E^*$ ), o índice de confiança (c) e o desempenho das metodologias de regionalização de vazões para estimativa da  $Q_{7,10}$  na bacia do rio Paraopeba.

Tabela 4 – Erro relativo médio (ERM), coeficientes de determinação ( $r^2$ ) e eficiência ajustado ( $E'$ ), índice de confiança (c) e desempenho das metodologias de regionalização de vazões para estimativa da  $Q_{7,10}$  na bacia do rio Paraopeba

	<b>Trad. 1</b>	<b>Trad. 2</b>	<b>Proporc.</b>	<b>MCM</b>	<b>IGAM</b>
<b>ERM</b>	0,158	0,328	0,218	0,188	0,481
<b><math>r^2</math></b>	0,994	0,979	0,989	0,980	0,994
<b><math>E'</math></b>	0,940	0,886	0,915	0,895	0,789
<b>c</b>	0,995	0,980	0,992	0,984	0,979
<b>Desempenho</b>	Ótimo	Ótimo	Ótimo	Ótimo	Ótimo

**Trad. 1** – método Tradicional de regionalização, tendo sido utilizadas para o cálculo da  $Q_{7,10}$  Est as equações ajustadas a partir das vazões obtidas pela análise da serie histórica.

**Trad. 2** – método Tradicional de regionalização, tendo sido utilizadas para o cálculo da  $Q_{7,10}$  Est as equações obtidas no trabalho “Atlas Digital das Águas de Minas” (Euclides et al., 2007).

**Proporc.** – método baseado na proporcionalidade de vazões específicas.

**MCM** – método baseado na conservação de massas (continuidade de vazões).

**IGAM** – método adotado pelo Instituto Mineiro de Gestão das Águas (IGAM).

Pela análise dos valores de ERM (Tabela 4) verifica-se que o melhor desempenho foi observado no método Trad. 1, que apresentou o menor valor de ERM (0,158), seguido dos métodos conservação de massas (0,188), proporcionalidade de vazões específicas (0,218), Trad. 2 (0,328) e utilizado no IGAM (0,481).

Verifica-se, em relação ao  $r^2$ , que todos os métodos apresentaram valores elevados, com variação de 0,979 a 0,994. Apesar de todos os métodos terem apresentado valores de  $r^2$  próximos a unidade, indicando que a variação das vazões pode ser explicada pelo modelo, Legates e McCabe (1999), ao analisar métodos estatísticos para a avaliação de modelos, afirmam que o coeficiente de determinação não deve ser usado unicamente para avaliação de modelos, uma vez que altos valores de correlações podem ser obtidos por modelos medianos.

Em relação ao coeficiente de eficiência, o qual varia de  $-\infty$  a 1, sendo que os maiores valores indicam melhor desempenho e valores negativos indicam que a média dos valores observados é melhor estimador da  $Q_{7,10}$  que o método em análise, verifica-se que o método Trad. 1 apresentou o maior valor de  $E'$ . O menor valor foi obtido pelo método IGAM (0,789) seguido dos métodos Trad. 2 (0,886), conservação de massas (0,895) e proporcionalidade de vazões específicas (0,915). Dessa forma, pela ausência de valores negativos para este coeficiente, verifica-se que os métodos de regionalização são melhores estimadores das vazões na bacia do rio Paraopeba que a adoção da média dos valores observados.

Os valores do índice de confiança (c) obtidos pelas metodologias de regionalização variaram de 0,979 a 0,995, sendo novamente o método IGAM o que apresentou o menor valor e o método Trad. 1 o maior valor. Verifica-se que os valores de c corroboraram os valores de  $E'$ , uma vez que a ordem de classificação dos métodos em relação aos valores do  $E'$  foi a mesma do c, ou seja, o método com maior valor de  $E'$  também apresentou o maior valor de c, enquanto o método com o menor valor de  $E'$  também foi o que apresentou o menor valor de c. Tal fato mostra a concordância entre os dois critérios de avaliação.

Em relação ao desempenho dos métodos, obtido pela classificação do índice de confiança, verifica-se que todos os métodos obtiveram o desempenho “Ótimo”.

Pelos valores apresentados na Tabela 4, os quais corroboram as observações realizadas na análise dos erros relativos nas estimativas da  $Q_{7,10}$ , pode-se reiterar que uma melhor estimativa da  $Q_{7,10}$  na bacia do rio Paraopeba é obtida com o uso do método Trad. 1.

### 3.2. Vazão média de longa duração ( $Q_{mld}$ )

Na Tabela 5 estão apresentados os erros relativos percentuais e os valores da  $Q_{mld}$  das 15 estações fluviométricas da bacia do rio Paraopeba utilizadas no estudo, obtidos a partir da média das vazões médias anuais das séries históricas e estimados pelas diferentes metodologias de regionalização de vazões.

Verifica-se nos valores apresentados na Tabela 5, que as vazões estimadas a partir da média das vazões médias anuais da série histórica ( $Q_{mld}$  Obs) variaram de 170 a 135.170  $Ls^{-1}$  nas estações Fazenda Laranjeiras (40810350) e Ponte da Taquara (40850000), respectivamente as de menor e maior área de drenagem da bacia.

Dado que a estação Ponte da Taquara (8.720  $km^2$ ) é a mais a jusante da bacia do rio Paraopeba e considerando o método de regionalização baseado na proporcionalidade de vazões específicas, pode-se calcular a vazão média de longa duração na foz da bacia como sendo de 206.165  $Ls^{-1}$ .

Tabela 5 – Erros relativos percentuais (ER) e valores de  $Q_{mld}$ , em  $Ls^{-1}$ , obtidos a partir da média das vazões médias anuais das séries históricas e estimados por diferentes metodologias de regionalização de vazões

Código	$Q_{mld}$ Obs	Trad. 1		Trad. 2		Proporc.		MCM		IGAM	
		$Q_{mld}$ Est	ER (%)								
40549998	7.960	8.324	-4,6	8.214	-3,2	9.208	-15,7	8.417	-5,7	10.395	-30,6
40579995	8.950	11.309	-26,4	11.050	-23,5	12.657	-41,4	8.781	1,9	9.340	-4,4
40665000	5.360	4.930	8,0	4.948	7,7	5.528	-3,1	3.212	40,1	3.747	30,1
40680000	10.330	8.737	15,4	8.608	16,7	9.683	6,3	10.386	-0,5	7.348	28,9
40710000	55.540	47.046	15,3	43.882	21,0	43.355	21,9	45.780	17,6	45.522	18,0
40740000	63.150	68.047	-7,8	62.713	0,7	68.363	-8,3	65.676	-4,0	60.977	3,4
40770000	11.210	11.949	-6,6	11.654	-4,0	10.026	10,6	11.197	0,1	9.374	16,4
40800001	86.090	87.461	-1,6	88.100	-2,3	89.319	-3,8	92.599	-7,6	85.545	0,6
40810350	170	157	7,6	242	-42,6	144	15,1	154	9,5	204	-20,0
40810800	810	842	-4,0	1.161	-43,3	779	3,8	776	4,3	1.094	-35,1
40811100	1.590	1.731	-8,9	2.272	-42,9	1.685	-6,0	1.652	-3,9	2.248	-41,4
40821998	530	613	-15,6	863	-62,8	601	-13,4	556	-4,9	796	-50,2
40822995	1.350	1.377	-2,0	1.835	-35,9	1.288	4,6	1.310	2,9	1.788	-32,4
40823500	2.260	2.356	-4,2	3.029	-34,0	2.336	-3,4	2.316	-2,5	3.056	-35,2
40850000	135.170	134.271	0,7	131.394	2,8	132.166	2,2	138.698	-2,6	129.845	3,9

$Q_{mld}$  Obs –  $Q_{mld}$  obtida a partir da média das vazões médias anuais das séries históricas.

**Trad. 1** – método Tradicional de regionalização, tendo sido utilizadas para o cálculo da  $Q_{mld}$  Est as equações ajustadas a partir das vazões obtidas pela análise da série histórica.

**Trad. 2** – método Tradicional de regionalização, tendo sido utilizadas para o cálculo da  $Q_{mld}$  Est as equações obtidas no trabalho “Atlas Digital das Águas de Minas” (Euclides et al., 2007).

**Proporc.** – método baseado na proporcionalidade de vazões específicas.

**MCM** – método baseado na conservação de massas (continuidade de vazões).

**IGAM** – método adotado pelo Instituto Mineiro de Gestão das Águas (IGAM).

No método Trad. 1 os valores de ER variaram de 0,7 a -26,4%, sendo estes valores observados, respectivamente, nas estações Ponte da Taquara (8.720 km<sup>2</sup>) e Congonhas-Linígrafo (613 km<sup>2</sup>). De modo geral, assim como nas estimativas da  $Q_{7,10}$  por este método, os maiores valores de ER ocorreram nas estações com as menores áreas de drenagem, como as estações Congonhas-Linígrafo (40579995), Entre Rios de Minas (40680000; 469 km<sup>2</sup>) e Bom Jardim (40821998; 39,8 km<sup>2</sup>).

Verifica-se, no entanto, que em relação as estimativas da  $Q_{7,10}$  por este método, os erros relativos das estimativas da  $Q_{mld}$  foram menores. Tal comportamento também foi evidenciado por Novaes et al. (2007), ao avaliar o desempenho de metodologias de regionalização de vazões para a bacia do rio Paracatu. Estes autores explicam que este comportamento está associado ao fato de que os valores da  $Q_{mld}$ , por se tratar de vazões médias e não extremas, apresentam magnitude de variação menor em relação às vazões mínimas.

No método Trad. 2 os valores de ER variaram de 0,7 a -62,8%, sendo estes valores observados nas estações Alberto Flores (40740000) e Bom Jardim (40821998), respectivamente. Outras estações apresentaram erros relativos superiores a 30%, como a Fazenda Laranjeiras (40810350; -42,6%; 10,2 km<sup>2</sup>); Fazenda Pasto Grande (40810800; -43,3%; 54,7 km<sup>2</sup>), Jardim (40811100; -42,9%; 112,4 km<sup>2</sup>), Mateus Leme-Aldeia (40822995; -35,9%; 89,4 km<sup>2</sup>) e Suzana (40823500; -34%; 153 km<sup>2</sup>), todas com áreas de drenagens inferiores ao limite de utilização das equações proposta por Euclides et al. (2007), que para estimativa da  $Q_{mld}$  na bacia do rio Paraopeba é de 259 a 8.571 km<sup>2</sup>. Tal fato pode explicar, assim como ocorrido na estimativa da  $Q_{7,10}$  por este método, as piores estimativas para estas estações. Deste modo, certa cautela é aconselhável no uso de estimativas de vazões para sub-bacias com áreas de drenagem inferiores a 259 km<sup>2</sup>.

As piores estimativas do método Trad. 2 em relação ao Trad. 1 advêm, assim como ocorreu na estimativa da  $Q_{7,10}$ , das diferenças nas bases de dados utilizadas para o ajuste das equações de regressão, conforme discutido anteriormente na análise da  $Q_{7,10}$ .

No método baseado na proporcionalidade de vazões específicas verificaram-se erros relativos entre 2,2 a -41,4%, nas estações Ponte da Taquara (40850000) e Congonhas-Linígrafo (40579995), respectivamente. O maior erro evidenciado na estação Congonhas-Linígrafo está associado ao fato de que a vazão para esta seção foi estimada considerado o caso 1 do método, no qual a seção em análise está localizada à montante de um posto com vazão conhecida. Neste caso foi utilizada a vazão da estação Belo Vale (40710000) com área de drenagem 4,4 vezes maior que da seção em análise.

Verifica-se, no entanto, que outras estações na mesma situação em relação à área de drenagem da estação Congonhas-Linígrafo não apresentaram erros relativos elevados, como São Brás do Suaçui-montante (40549998; -15,7%), Usina João Ribeiro (40665000; -3,1%) e Entre Rios de Minas (40680000; 6,3%). Tal constatação demonstra que a restrição de uso desta metodologia imposta por Eletrobrás (1985), segundo a qual não se deve aplicar este método quando a relação entre a área de drenagem do posto fluviométrico em análise e a seção de interesse for superior a três, em alguns casos torna a utilização do método muito restritiva.

As estimativas da  $Q_{mld}$  pelo método baseado na conservação de massas apresentaram erros relativos entre 0,1 a 40,1%, nas estações Conceição do Itagua (40770000) e Congonhas-Linígrafo (40579995), respectivamente.

No método utilizado pelo IGAM foram observados valores de ER entre 0,6 a -50,2%. O menor ER ocorreu na estação Ponte Nova do Paraopeba (40800001), enquanto o maior erro ocorreu na estação Bom Jardim (40821998).

Na Tabela 6 apresentam-se o erro relativo médio (ERM), os coeficientes de determinação ( $r^2$ ) e eficiência ajustado ( $E'$ ), o índice de confiança (c) e o desempenho das metodologias de regionalização de vazões para estimativa da  $Q_{mld}$  na bacia do rio Paraopeba.

Pela análise dos valores de ERM (Tabela 6), verifica-se que o método conservação de massas apresentou o menor valor (0,072), seguido dos métodos Trad.1 (0,086), proporcionalidade de vazões específicas (0,106), Trad. 2 e método utilizado pelo IGAM (0,234). Em relação aos valores de  $r^2$ , verifica-se que todos os métodos apresentaram valores superiores a 0,99.

Em relação ao coeficiente de eficiência, verifica-se que o método Trad. 1 apresentou o maior valor de  $E'$  (0,954), seguido pelos métodos Trad. 2 e baseado na conservação de massas, novamente ambos com o mesmo valor (0,946), pelo método utilizado no IGAM (0,937) e pelo método baseado na proporcionalidade de vazões específicas (0,934).

Os valores dos índices de confiança obtidos pelas metodologias de regionalização variaram de 0,993 a 0,996, sendo o método Trad.1 e o utilizado pelo IGAM os que apresentaram os melhores valores.

No desempenho dos métodos, de acordo com a classificação do índice de confiança, todos foram tidos como “Ótimo”, indicando que os métodos são eficientes na estimativa da  $Q_{mld}$  na bacia do rio Paraopeba, no entanto, pela análise conjunta das outras estatísticas, verifica-se que o método Trad. 1 é também o que permite melhor estimativa da  $Q_{mld}$  na bacia do rio Paraopeba.

Tabela 6 – Erro relativo médio (ERM), coeficientes de determinação ( $r^2$ ) e eficiência ajustado ( $E'$ ), índice de confiança (c) e desempenho das metodologias de regionalização de vazões para estimativa da  $Q_{mld}$  na bacia do rio Paraopeba

	Trad. 1	Trad. 2	Proporc.	MCM	IGAM
<b>ERM</b>	0,086	0,229	0,106	0,072	0,234
<b><math>r^2</math></b>	0,995	0,994	0,991	0,994	0,996
<b><math>E'</math></b>	0,954	0,946	0,934	0,946	0,937
<b>c</b>	0,996	0,995	0,993	0,995	0,996
<b>Desempenho</b>	Ótimo	Ótimo	Ótimo	Ótimo	Ótimo

**Trad. 1** – método Tradicional de regionalização, tendo sido utilizadas para o cálculo da  $Q_{mld}$  Est as equações ajustadas a partir das vazões obtidas pela análise da serie histórica.

**Trad. 2** – método Tradicional de regionalização, tendo sido utilizadas para o cálculo da  $Q_{mld}$  Est as equações obtidas no trabalho “Atlas Digital das Águas de Minas” (Euclides et al., 2007).

**Proporc.** – método baseado na proporcionalidade de vazões específicas.

**MCM** – método baseado na conservação de massas (continuidade de vazões).

**IGAM** – método adotado pelo Instituto Mineiro de Gestão das Águas (IGAM).

Evidenciaram-se, para algumas seções, diferenças expressivas na estimativa das vazões pelos métodos de regionalização estudados sendo, portanto, necessário um maior cuidado na escolha do método para a estimativa das vazões, uma vez que os resultados obtidos podem comprometer o processo de tomada de decisão no gerenciamento dos recursos hídricos, vindo a gerar conflitos.

Pela análise dos erros relativos das estimativas da  $Q_{7,10}$  e  $Q_{mld}$  na bacia do rio Paraopeba obtidos nos diferentes métodos de regionalização de vazões, evidenciou-se que o método Trad. 1 apresentou os melhores resultados, tanto para a estimativa da  $Q_{7,10}$  quanto da  $Q_{mld}$ .

O método adotado pelo IGAM apresentou os piores resultados, sendo que a sua utilização, como verificado em algumas seções, compromete a gestão e planejamento de recursos hídricos da bacia do rio Paraopeba, devendo, por este motivo, ser avaliada a substituição pelo método de regionalização de vazões Tradicional.

Apesar de alguns autores (Rodriguez, 2008; Novaes et al., 2009) destacarem que neste método existe a possibilidade de descontinuidade das vazões na região de transição de uma região hidrologicamente homogênea para outra, este fato também é evidenciado no método baseado na proporcionalidade de vazões específicas e no método adotado pelo IGAM, não sendo observado apenas no método baseado na conservação de massas.

#### **4 – CONCLUSÕES**

A análise dos resultados permite concluir que:

- Os maiores erros nas estimativas das vazões ( $Q_{7,10}$  e  $Q_{mld}$ ) ocorreram nas regiões de cabeceiras da bacia;

- Na estimativa da  $Q_{mld}$  não foram observadas diferenças expressivas entre os métodos de regionalização de vazões;

- Apesar do método adotado pelo Instituto Mineiro de Gestão das Águas (IGAM) ter apresentado bons resultados na estimativa da  $Q_{mld}$ , a sua utilização para a estimativa da  $Q_{7,10}$  na bacia do rio Paraopeba apresenta restrições, pois os erros evidenciados podem comprometer o processo de tomada de decisão no gerenciamento dos recursos hídricos, vindo a gerar conflitos; e

- Dentre os métodos de regionalização utilizados no estudo, o método Tradicional permite melhor estimativa dos valores de  $Q_{7,10}$  e  $Q_{mld}$  para a bacia do rio Paraopeba.

#### **AGRADECIMENTOS**

Os autores agradecem à Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais – FAPEMIG e ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico – CNPq, pelo apoio financeiro.

#### **BIBLIOGRAFIA**

ANA (2003). Hidro – Sistema de informações hidrológicas. V. 1.0.9 (Programa Computacional)

- BAENA, L.G.N. **Modelo para geração de séries sintéticas de dados climáticos**. Viçosa, Universidade Federal de Viçosa, 2004. 154p. (Tese de Doutorado)
- CAMARGO, A.P.; SENTELHAS, P.C. Avaliação do desempenho de diferentes métodos de estimativa da evapotranspiração potencial no Estado de São Paulo. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, v.5, p.89-97, 1997.
- 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 informações geográfica. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, Porto Alegre, v. 7, n. 3, p. 43-51, 2002.
- COPASA - Companhia de Saneamento de Minas Gerais. **Produção de água para a região metropolitana de Belo Horizonte**. Disponível em <[http://www.copasa.com.br/Producao\\_de\\_agua/PAGINA/Principal\\_prodagua.htm](http://www.copasa.com.br/Producao_de_agua/PAGINA/Principal_prodagua.htm)> Acesso em: 13 mai. 2009.
- CRUZ, J. C.; TUCCI, C. E. M. Estimativa da disponibilidade hídrica através da curva de permanência. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, Porto Alegre, v. 13, n. 1, p. 111-124, 2008.
- ELETROBRÁS. Centrais Elétricas Bras. S.A. **Metodologia para regionalização de vazões**. Rio de Janeiro, 1985a.
- ELETROBRÁS. Centrais Elétricas Brasileiras S.A. **Manual de minicentrals hidrelétricas**. Rio de Janeiro, 1985b.
- EUCLYDES, H. P.; FERREIRA, P. A.; FARIA FILHO, R. F. **Atlas digital das águas de Minas**. Viçosa: UFV, RURALMINAS, IGAM, 78 p., 2007
- EUCLYDES, H. P.; SOUSA, E. F.; FERREIRA, P. A. **RH 3.0** – Regionalização hidrológica. Viçosa, MG: UFV, DEA; Brasília, DF: MMA; Belo Horizonte, MG: RURALMINAS, 1999. 149 p. (Manual do programa).
- LEGATES, D. R.; MCCABE JR., G. J. Evaluating the use of “goodness-of-fit” measures in hydrologic and hydroclimatic model validation. **Water resources research**, v. 35, p.233-241, 1999.
- LISBOA, L.; MOREIRA, M. C.; SILVA, D. D. da.; PRUSKI, F. F. Estimativa e regionalização das vazões mínimas e média na bacia do rio Paracatu. *Revista Engenharia na Agricultura*. Viçosa, v.16, n.4, p. 471-479, 2008
- NOVAES, L. F. de; PRUSKI, F. F.; PEREIRA, S. B.; QUEIROZ, D. O.; RODRIGUEZ, R. Del G. Gestão de recursos hídricos: uma nova metodologia para a estimativa das vazões mínimas. **Engenharia na Agricultura**, Viçosa, MG, v. 17, n. 1, p. 62-74, 2009.
- NOVAES, L. F. de.; PRUSKI, F. F.; QUEIROZ, D. O. de.; RODRIGUEZ, R. del G.; SILVA, D. D. da.; RAMOS, M. M. Avaliação do desempenho de cinco metodologias de regionalização de vazões. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, Porto Alegre, v. 12, n. 2, p. 51-61, 2007.
- ONS - Operador Nacional do Sistema Elétrico; FAH-MADREER **Estimativa das vazões para atividades de uso consuntivo da água nas principais bacias do sistema interligado nacional - Metodologia e resultados consolidados**. Brasília: Brasília: Operador Nacional do Sistema Elétrico-Consórcio FAHMA/DREER, 2003. v. 1. 209 p
- PEREIRA, S. B. **Evaporação no lago de sobradinho e disponibilidade hídrica no rio São Francisco**. 2004. 103 p. Tese (Doutorado) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG.
- RODRIGUEZ, R. del G. **Proposta conceitual para a regionalização de vazões**. Viçosa, MG: UFV, 2008. 254 p. Tese (Doutorado em Engenharia Agrícola) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa.
- SANTANA, A. G. de; BARROS, L. M. de; SILVA, F. F. da. Avaliação de métodos para determinação da disponibilidade hídrica para fins de outorga no Triângulo Mineiro – Iturama: Estudo de caso do ribeirão Tronqueira. In: Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos. 2005. João Pessoa. **Anais...** ABRH, 2005. Cd-Rom
- SCHAEFFER, D.L. A model evaluation methodology applicable to environmental assessment models. **Ecol. Model.**, 8:275-295, 1980.
- SCHVARTZMAN, A. S.; NASCIMENTO, N. O.; VON SPERLING, M. **Outorga e cobrança pelo uso de recursos hídricos na bacia do rio Paraopeba em Minas Gerais**. Belo Horizonte, MG: UFMG. 2000. 144p. Dissertação (Mestrado em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos) – Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte.
- SILVA JÚNIOR, O. B. da.; BUENO, E. de O.; TUCCI, C. E. M.; CASTRO, N. M. R. Extrapolação espacial na regionalização da vazão. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, Porto Alegre, v. 8, n. 1, p. 21-37, 2003.
- SOUZA, S.M. T. (Coord.) **Deflúvios superficiais no Estado de Minas Gerais**. Belo Horizonte: COPASA : HIDRO SISTEMAS, 1993.
- STEDINGER, J. R.; VOGEL, R. M.; FOUFOULA-GEORGIOU, E. Frequency analysis of extreme events. In: MAIDMENT, D. R. **Handbook of hidrology**. New York: MacGraw Hill, Inc., 1992.
- WILLMOTT, C.J. On the validation of models. **Phys. Geogr.**, v.2, p.184-194, 1981.