

Análise de Métodos para Estimativa das Vazões da Bacia do Rio Paraopeba

Michel Castro Moreira¹, Demetrius David da Silva²

michelcm@ufba.br; demetrius@ufv.br

Recebido: 06/03/13 - revisado: 13/07/13 - aceito: 13/11/13

RESUMO

Considerando as diversas metodologias de estimativa de vazões e visando fornecer subsídios para escolha de um método para o cálculo das vazões na bacia do rio Paraopeba, o presente estudo teve por objetivo analisar métodos para 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}). Foram obtidos, a partir da análise das séries históricas de vazões, os valores da $Q_{7,10}$ e da Q_{mld} para 15 estações fluviométricas da bacia do rio Paraopeba. Para cada uma das estações foram calculados os valores da $Q_{7,10}$ e Q_{mld} considerando o estudo *Deflúvios Superficiais no Estado de Minas Gerais* e os métodos de regionalização de vazões Tradicional, Proporcionalidade de vazões e Conservação de massas. De posse dos valores observados e estimados da $Q_{7,10}$ e Q_{mld} foi avaliada a precisão das metodologias por meio da aplicação do erro relativo, erro relativo médio e coeficiente de eficiência ajustado. Na análise dos resultados verificou-se que os maiores erros nas estimativas das vazões ocorreram nas regiões de cabeceira. Observou-se, ainda, que entre os métodos de regionalização utilizados no estudo, o método Tradicional é o que permite melhor estimativa dos valores de $Q_{7,10}$ e Q_{mld} para a bacia do rio Paraopeba.

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

INTRODUÇÃO

Na análise de concessão de outorga, seja nela utilizada a vazão mínima de referência para captações em cursos d'água ou a vazão média de longa duração 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.

A fim de se obter 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) e Novaes et al. (2009).

No Estado de Minas Gerais, para a estimativa da $Q_{7,10}$ e Q_{mld} , o Instituto Mineiro de Gestão das Águas (IGAM), órgão gestor de recursos hídricos no Estado, utiliza o estudo “*Deflúvios Superficiais no Estado de Minas Gerais*” (SOUZA, 1993), o qual foi desenvolvido pela Hidrosistemas com o apoio da Companhia de Saneamento de Minas Gerais (CO-PASA).

Dadas às peculiaridades de cada bacia hidrográfica, diversos autores têm estudado a aplicação de métodos para a estimativa das vazões. 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 analisar as estimativas 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}) obtidas pelo estudo “*Deflúvios Superficiais no Estado de Minas Gerais*” e os métodos de regionalização Tradicional, Proporcionalidade de vazões e Conservação de massas.

¹ ICADS/UFBA – Universidade Federal da Bahia

² DEA/UFV – Universidade Federal de Viçosa

MATERIAIS E MÉTODOS

Área de estudo

A bacia do rio Paraopeba, com área de drenagem de aproximadamente 13.300 km², representa 2,27% 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 et al., 2007). A bacia apresenta grande diversidade nas atividades econômicas, englobando centros industriais e minerários, regiões urbanas mais densamente ocupadas e regiões pouco ocupadas, caracterizadas pelas atividades agropecuárias (SCHVARTZMAN et al., 2002).

Dados fluviométricos

Objetivando identificar o período base e as estações a serem utilizadas no estudo, foram elaborados diagramas de barras de 81 estações fluviométricas identificadas na bacia do rio Paraopeba, as quais são pertencentes à rede hidrometeorológica da Agência Nacional de Águas (ANA).

De posse dos diagramas de barras foram escolhidas 15 estações fluviométricas (Figura 1; Tabela 1) e selecionou-se o período base de 1976 a 2005 para o cálculo das vazões.

Para a determinação da $Q_{7,10}$ e da Q_{mld} para cada uma das estações fluviométricas foi utilizado o programa computacional SisCAH 1.0 (GPRH, 2008), o qual foi desenvolvido pelo Grupo de Pesquisas em Recursos hídricos (GPRH) e pode ser obtido gratuitamente no endereço eletrônico <http://www.gprh.ufv.br>.

Estimativa da $Q_{7,10}$ e Q_{mld}

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 (ELETROBRÁS, 1985a).

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^2a), 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.

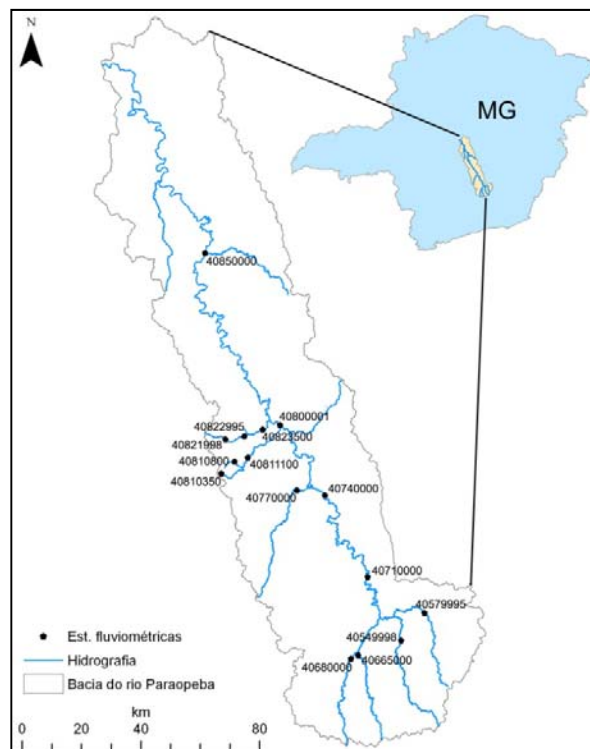


Figura 1 – Mapa de localização da bacia do rio Paraopeba com a identificação das estações fluviométricas.

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, para obtenção das equações de regressão regionais para cada região hidrologicamente homogênea.

As melhores equações de regressão múltipla foram selecionadas observando-se: maiores valores do r^2a , menores valores de e.p e resultados significativos pelo teste %F.

A partir das equações de regressão múltipla selecionadas foram estimados os valores de $Q_{7,10}$ e Q_{mld} , para cada uma das posições das estações fluviométricas listadas na Tabela 1.

Método Proporcionalidade de vazões

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 utilizadas no estudo, conforme um dos quatro casos preconizados e descritos a seguir:

Tabela 1 – Estações fluviométricas utilizadas no estudo

Código	Estação	Latitude (Sul)	Longitude (Oeste)	Área de drenagem (km²)	Curso de 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

• **Caso 1 – Local de interesse situado a montante de um posto com vazão conhecida**

Neste caso, a vazão foi estimada pela razão de área de drenagem 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

$$Q_z = \left(\frac{A_z}{A_x} Q_x \right) \quad (1)$$

em que

Q_z = vazão no local de interesse, m^3s^{-1} ;

Q_x = vazão em um posto fluviométrico a jusante da seção em análise, m^3s^{-1} ;

A_z = área de drenagem no local onde se deseja conhecer a vazão, km^2 ; e

A_x = área de drenagem do posto fluviométrico a jusante do local de interesse, km^2 .

• **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

$$Q_z = Q_m + \left(\frac{A_z - A_m}{A_j - A_m} \right) (Q_j - Q_m) \quad (2)$$

em que

Q_z = vazão em um posto fluviométrico a montante, m^3s^{-1} ;

Q_j = vazão em um posto fluviométrico a jusante, m^3s^{-1} ;

A_z = área de drenagem relativa ao posto fluviométrico a montante, km^2 ; e

A_j = área de drenagem relativa ao posto fluviométrico a jusante, km^2 .

• **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 1.

• **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 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 2) 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 1).

Método 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 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 2 são apresentados os rios para os quais foram realizados os ajustes, sendo que esses possuíam pelo menos uma estação fluviométrica.

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.

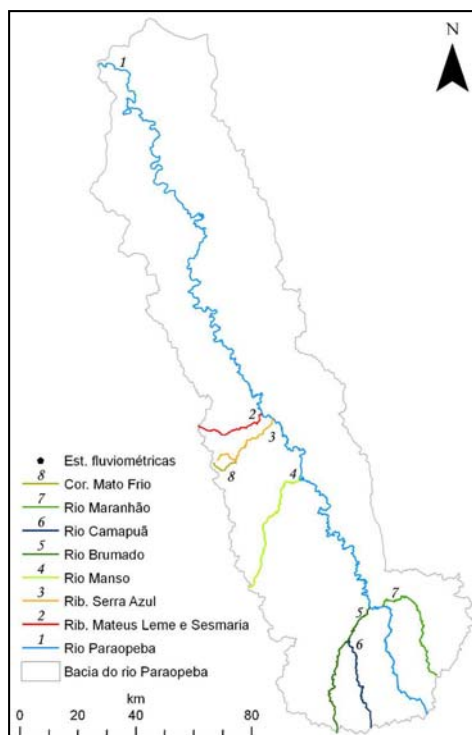


Figura 2 – Rios nos quais foram ajustadas equações pelo método Conservação de massas.

Deflúvios superficiais no Estado de Minas Gerais

Para a obtenção das estimativas das vazões utilizando o trabalho “Deflúvios superficiais no Estado de Minas Gerais” (Deflúvios), elaborado por Souza (1993), foram digitalizados os mapas temáticos das tipologias regionais homogêneas (Figura 3), 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 necessária a obtenção do rendimento característico equivalente (Rm_e) da área de contribuição de cada estação fluviométrica. Para tanto, utilizou-se 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

$$Rm_e = \left(\frac{\sum_{k=1}^n Rm_k A_k}{\sum_{k=1}^n A_k} \right) \quad (3)$$

em que

Rm_e = rendimento característico equivalente na bacia de drenagem da seção de interesse, $L/s \text{ km}^2$;

Rm_k = média aritmética dos valores das isolinhas que limitam o intervalo k , contido na bacia de interesse, $L/s \text{ km}^2$;

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

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

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

$$Q_m = 0,001 R_{mc} A \quad (4)$$

em que Q_m corresponde a vazão característica da seção de interesse, $\text{m}^3 \text{s}^{-1}$.

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

$$Q_{7,10} = F_{7,10} Q_m \quad (5)$$

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 utilizada 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 utilizada a extensão *Spatial Analyst* do programa computacional ESRI ArcGis 8.3.

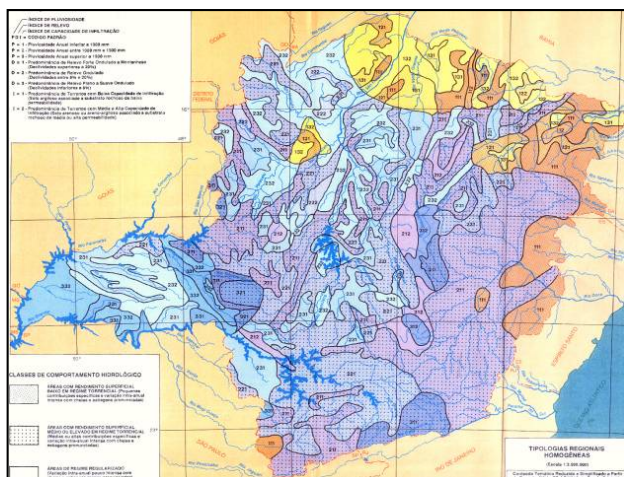


Figura 3 – Mapa das tipologias regionais homogêneas do trabalho “Deflúvios Superficiais no Estado de Minas Gerais”.

Comparação entre os procedimentos

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 ($Q_{7,10 \text{ obs}}$ e $Q_{mld \text{ obs}}$), e das vazões estimadas com base no trabalho Deflúvios e os métodos de regionalização de vazões Tradicional, Proporcionalidade de vazões e 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), e do coeficiente de eficiência ajusta-

do (E') (LEGATES e MCCABE JÚNIOR, 1999), dados respectivamente por

$$ER = 100 \times \left(\frac{Q_{\text{obs}} - Q_{\text{est}}}{Q_{\text{obs}}} \right) \quad (6)$$

em que

ER = erro relativo, %;

Q_o = vazão obtida a partir da análise da série histórica no posto fluviométrico, m^3s^{-1} ; e

Q_{est} = vazão estimada com base nas metodologias de regionalização, m^3s^{-1} .

$$ERM = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \left| \frac{Q_{\text{obs}} - Q_{\text{est}}}{Q_{\text{obs}}} \right| \quad (7)$$

em que N corresponde ao número de estações fluviométricas utilizadas no estudo.

$$E' = 1 - \frac{\sum_{i=1}^N |Q_{\text{obs}} - Q_{\text{est}}|}{\sum_{i=1}^N |Q_{\text{obs}} - \bar{Q}_{\text{obs}}|} \quad (8)$$

em que \bar{Q}_{obs} corresponde a média da vazão obtida a partir da análise da série histórica.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Equações de regionalização

Na definição das regiões hidrologicamente homogêneas referentes ao método Tradicional, foram identificadas duas regiões na bacia do rio Paraopeba (Figura 4), sendo as equações de regionalização para estimativa das vazões, em m^3s^{-1} , respectivamente

• Região I

$$Q_{7,10} = 0,00168 A^{1,101117} \quad r^2 = 0,9791 \quad (9)$$

$$Q_{mld} = 0,023266 A^{0,96386} \quad r^2 = 0,9774 \quad (10)$$

• Região II

$$Q_{7,10} = 0,002282 A^{1,020517} \quad r^2 = 0,9957 \quad (11)$$

$$Q_{mld} = 0,015398 A \quad r^2 = 0,9998 \quad (12)$$

em que, A corresponde a área de drenagem da seção em análise, em km².

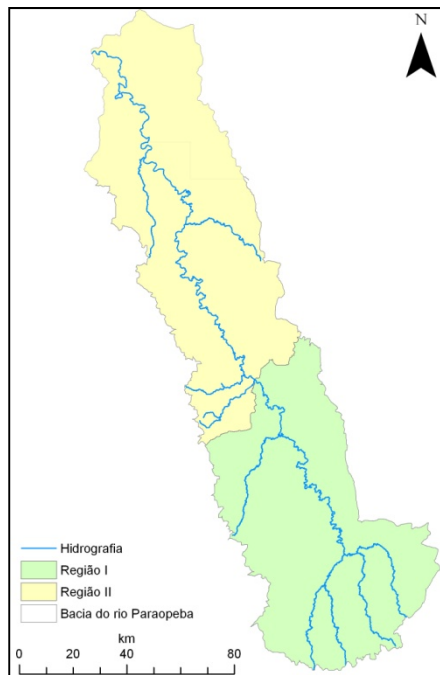


Figura 4 – Regiões hidrologicamente homogêneas da bacia do rio Paraopeba.

Observa-se que, em todas as equações, o modelo que melhor se ajustou aos dados das estações de cada região foi o potencial. Entretanto, em função dos valores dos expoentes serem próximos à unidade, os modelos apresentam um comportamento semelhante ao linear, o que é caracterizado por um aumento aproximadamente constante das vazões com o crescimento da área de drenagem (LISBOA et al., 2008).

Os valores de r^2 das equações de regionalização próximos à unidade mostram a adequação desses modelos à representação das vazões mínimas e média da bacia.

Para o método Conservação de massas, os modelos de regressão obtidos para a estimativa da $Q_{7,10}$ e Q_{mld} , foram

• Rio Paraopeba

$$Q_{7,10} = 0,0050 A^{0,9515} \quad r^2 = 0,9764 \quad (13)$$

$$Q_{mld} = 0,0268 A^{0,9424} \quad r^2 = 0,9899 \quad (14)$$

• Ribeirão Mateus Leme e Sesmaria

$$Q_{7,10} = 0,0068 e^{0,02504 A} \quad r^2 = 0,8274 \quad (15)$$

$$Q_{mld} = 0,0112 A^{1,05964} \quad r^2 = 0,9985 \quad (16)$$

• Ribeirão Serra Azul

$$Q_{7,10} = 0,0004 A^{1,36418} \quad r^2 = 0,9947 \quad (17)$$

$$Q_{mld} = 0,0112 A^{1,05552} \quad r^2 = 0,9980 \quad (18)$$

• Rio Manso

$$Q_{7,10} = 0,003162 A \quad r^2 = 0,9999 \quad (19)$$

$$Q_{mld} = 0,015547 A \quad r^2 = 0,9895 \quad (20)$$

• Rio Brumado

$$Q_{7,10} = 0,5552 e^{0,00176 A} \quad r^2 = 0,9999 \quad (21)$$

$$Q_{mld} = 0,2196 A^{0,62614} \quad r^2 = 0,9999 \quad (22)$$

• Rio Camapuã

$$Q_{7,10} = 0,003083 A \quad r^2 = 0,9996 \quad (23)$$

$$Q_{mld} = 0,012283 A \quad r^2 = 1 \quad (24)$$

• Rio Maranhão

$$Q_{7,10} = 0,0052 e^{0,00926 A} \quad r^2 = 0,9999 \quad (25)$$

$$Q_{mld} = 0,9896 e^{0,00356 A} \quad r^2 = 0,9908 \quad (26)$$

• Córrego Mato Frio

$$Q_{7,10} = 0,002721 A \quad r^2 = 0,9999 \quad (27)$$

$$Q_{mld} = 0,0276 A^{0,78204} \quad r^2 = 0,9999 \quad (28)$$

Em relação às equações de regionalização pelo método Conservação de massas, verifica-se que na maioria das equações o modelo que melhor se ajustou foi o potencial, seguido do modelo expo-

nencial. Com exceção da equação para a estimativa da $Q_{7,10}$ do Ribeirão Mateus Leme e Sesmaria, em que se obteve r^2 correspondente a 0,8274, nas demais equações obteve-se r^2 próximo à unidade.

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.

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.

Pelo método Tradicional, 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^2) e Fazenda Pasto Grande (40810800; 54,7 km^2). 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^2), Jardim (40811100; 112,4 km^2), Entre Rios de Minas (40680000; 469 km^2) e Congonhas-Linígrafo (40579995; 613 km^2).

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. 2009; 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. Dessa forma, é de se esperar maiores variações das vazões para as pequenas bacias. Assim, a aplicação do método Tradicional para pequenas áreas de drenagem remete à necessidade de uma análise criteriosa na utilização das estimativas das vazões.

No método Proporcionalidade de vazões 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 a 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 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 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 pior ajuste das equações de regressão, conforme evidenciado pelo coeficiente de determinação ($r^2 = 0,8274$).

Em relação a este método, assim como feito no método Tradicional, foram empregados para o ajuste das equações de regressão os mesmos valores de vazões ($Q_{7,10}$ obs) utilizados para o cálculo do ER. Este fato deveria conferir aos métodos Tradicional e Conservação de massas melhores resultados.

Pelo estudo Deflúvios 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. Tal magnitude pode acarretar 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 estudo Deflúvios 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

Tabela 3 – Erros relativos percentuais (ER) e valores de $Q_{7,10}$, em Ls^{-1} , obtidos a partir da análise das séries históricas e estimados por diferentes metodologias de regionalização de vazões

Código	$Q_{7,10}$ Obs	Tradicional		Proporc.		MCM		Deflúvios	
		$Q_{7,10}$ Est	ER (%)	$Q_{7,10}$ Est	ER (%)	$Q_{7,10}$ Est	ER (%)	$Q_{7,10}$ Est	ER (%)
40549998	1.470	1.388	5,5	1.953	-32,9	1,636	-11,3	3.117	-112,0
40579995	1.520	1.971	-29,7	2.684	-76,6	1,519	0,1	2.768	-82,1
40665000	900	763	15,2	916	-1,7	0,798	11,3	1.178	-30,9
40680000	1.270	1.468	-15,6	2.054	-61,7	1,244	2,1	1.801	-41,8
40710000	11.780	10.043	14,7	9.737	17,3	9,058	23,1	13.079	-11,0
40740000	14.360	15.310	-6,6	13.853	3,5	13,045	9,2	16.902	-17,7
40770000	2.290	2.099	8,4	2.066	9,8	2,052	10,4	1.819	20,6
40800001	16.720	15.477	7,4	18.008	-7,7	18,459	-10,4	21.845	-30,7
40810350	31	24	20,0	20	34,5	0,028	9,0	46	-50,5
40810800	90	136	-50,6	109	-20,7	0,093	-3,6	225	-150,4
40811100	220	283	-28,5	261	-18,4	0,249	-13,1	435	-97,7
40821998	90	98	-8,8	89	1,1	0,018	80,4	107	-19,4
40822995	200	224	-11,9	243	-21,7	0,062	68,9	259	-29,3
40823500	440	387	12,0	378	14,0	0,314	28,7	435	1,2
40850000	24.400	23.971	1,8	25.669	-5,2	27,768	-13,8	30.622	-25,5

$Q_{7,10}$ Obs – $Q_{7,10}$ obtida a partir da análise probabilística das séries históricas.

Proporc. – método Proporcionalidade de vazões.

MCM – método Conservação de massas.

o 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 estudo Deflúvios apresentou os piores resultados. Tal fato pode estar associado a alguns fatores como a utilização de base de dados fluviométricos mensais para a elaboração do método, a defasagem temporal e as ações antrópicas na bacia.

A metodologia de construção do estudo Deflúvios baseou-se na utilização de uma base de dados mensal. 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 estudo Deflúvios 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 (COPASA, 2009).

O efeito das ações antrópicas nos recursos hídricos é um aspecto que merece destaque, a ser considerado não apenas em relação ao estudo Deflúvios, 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') das metodologias de regionalização de vazões para estimativa da $Q_{7,10}$ na bacia do rio Paraopeba.

Pela análise dos valores de ERM verifica-se que o melhor desempenho foi observado no método Tradicional, que apresentou o menor valor de ERM (0,158), seguido dos métodos Conservação de massas (0,188), Proporcionalidade de vazões (0,218) e Deflúvios (0,481).

Verifica-se que todos os métodos apresentaram valores elevados de r^2 , com variação de 0,979 a 0,994. Apesar de todos os métodos terem apresentado valores de r^2 próximos à unidade, indicando que a variação das vazões pode ser explicada pelo modelo, Legates e McCabe (1999), ao analisarem 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.

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

	Tradicional	Proporc.	MCM	Deflúvios
ERM	0,158	0,218	0,197	0,481
r^2	0,994	0,989	0,980	0,994
E'	0,940	0,915	0,893	0,789

Proporc. – método Proporcionalidade de vazões.

MCM – método Conservação de massas.

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 me-

lhor estimador da $Q_{7,10}$ que o método em análise, verifica-se que o método Tradicional apresentou o maior valor de E' . O menor valor foi obtido pelo estudo Deflúvios (0,789) seguido dos métodos Conservação de massas (0,895) e Proporcionalidade de vazões (0,915).

Vazão média (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.

Analisando os erros relativos percentuais obtidos pelas diferentes metodologias de regionalização de vazões, verifica-se que de modo geral, assim como nas estimativas da $Q_{7,10}$, os maiores valores de ER ocorreram nas estações com as menores áreas de drenagem.

Verifica-se, no entanto, que os erros relativos das estimativas da Q_{mld} foram menores em relação aos erros de estimativa da $Q_{7,10}$. Tal comportamento também foi evidenciado por Novaes et al. (2007). 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.

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

Pela análise conjunta das estatísticas, verifica-se que o método Tradicional é também o que permite melhor estimativa da Q_{mld} na bacia do rio Paraopeba.

De modo geral, considerando as estimativas da $Q_{7,10}$ e Q_{mld} , evidenciaram-se, para algumas seções, diferenças expressivas na estimativa das vazões pelos métodos de regionalização estudados sendo, portanto, necessário maior critério 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 Tradicional apresentou os melhores resultados, tanto para a estimativa da $Q_{7,10}$ quanto da Q_{mld} .

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	Tradicional		Proporc.		MCM		Deflúvios	
		Q_{mld} Est	ER (%)	Q_{mld} Est	ER (%)	Q_{mld} Est	ER (%)	Q_{mld} Est	ER (%)
40549998	7.960	8.324	-4,6	9.208	-15,7	8.417	-5,7	10.395	-30,6
40579995	8.950	11.309	-26,4	12.657	-41,4	8.781	1,9	9.340	-4,4
40665000	5.360	4.930	8,0	5.528	-3,1	3.181	40,6	3.747	30,1
40680000	10.330	8.737	15,4	9.683	6,3	10.386	-0,5	7.348	28,9
40710000	55.540	47.046	15,3	43.355	21,9	45.780	17,6	45.522	18,0
40740000	63.150	68.047	-7,8	68.363	-8,3	65.676	-4,0	60.977	3,4
40770000	11.210	11.949	-6,6	10.026	10,6	10.090	10,0	9.374	16,4
40800001	86.090	87.461	-1,6	89.319	-3,8	92.599	-7,6	85.545	0,6
40810350	170	157	7,6	144	15,1	154	9,5	204	-20,0
40810800	810	842	-4,0	779	3,8	776	4,3	1.094	-35,1
40811100	1.590	1.731	-8,9	1.685	-6,0	1.652	-3,9	2.248	-41,4
40821998	530	613	-15,6	601	-13,4	556	-4,9	796	-50,2
40822995	1.350	1.377	-2,0	1.288	4,6	1.310	2,9	1.788	-32,4
40823500	2.260	2.356	-4,2	2.336	-3,4	2.316	-2,5	3.056	-35,2
40850000	135.170	134.271	0,7	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.

Proporc. – método Proporcionalidade de vazões.

MCM – método Conservação de massas.

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

	Tradicional	Proporc.	MCM	Deflúvios
ERM	0,086	0,106	0,079	0,234
r^2	0,995	0,991	0,994	0,996
E'	0,954	0,934	0,944	0,937

Proporc. – método Proporcionalidade de vazões.

MCM – método Conservação de massas.

O estudo Deflúvios 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 Proporcionalidade

de de vazões e no estudo Deflúvios, não sendo observado apenas no método Conservação de massas.

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; 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 – FAPES

MIG e ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico – CNPq, pelo apoio financeiro.

REFERÊNCIAS

- 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> 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.
- ELETOBRÁS. Centrais Elétricas Brasileiras S.A. Metodologia para regionalização de vazões. Rio de Janeiro, 1985a. 202 p.
- ELETOBRÁS. Centrais Elétricas Brasileiras S.A. Manual de minicentrals hidrelétricas. Rio de Janeiro, 1985b.
- GPRH - Grupo de Pesquisa em Recursos Hídricos. SisCAH 1.0 - Sistema Computacional para Análises Hidrológicas. Viçosa, 2008. (programa computacional)
- 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. *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. 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.; PRUSKI, F. F.; SILVA, D. D. da.; RAMOS, M. M. Estudo do comportamento hidrológico do Rio São Francisco e seus principais afluentes. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental (Agriambi)*, Campina Grande, v.11, n.6, p.615-622, 2007.
- 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
- SCHVARTZMAN, A. S.; NASCIMENTO, N. O.; VON SPERLING, M. Outorga e cobrança pelo uso de recursos hídricos: aplicação à bacia do rio Paraopeba, MG. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, v.7, n.1, p.103-122, 2002.
- 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 : HIDROSISTEMAS, 1993.

Analysis Of Methods For Estimating Flows In The Paraopeba River Basin

ABSTRACT

Taking into account the different methodologies available to estimate streamflows, and aiming at providing further information for choosing a method to estimate the outflows in the Paraopeba River basin, this work is intended to analyze flow estimation methods. The $Q_{7,10}$ and Q_{mld} values were obtained, for the 15 fluviometric stations of the Paraopeba River basin. For each of the stations, the $Q_{7,10}$ and Q_{mld} values have been estimated taking into account four flow regionalization methods. Having the observed and estimated $Q_{7,10}$ and Q_{mld} values, the precision of the methodologies has been evaluated by applying relative error, average relative error, and the adjusted efficiency coefficient.

cient. It was found that among the regionalization methods used in this study, the traditional one allows the best estimate of $Q_{7,10}$ and Q_{mld} for the Paraopeba River basin.

Key-words: *water availability, water permit, water resources management.*