

MICHEL CASTRO MOREIRA

**GESTÃO E PLANEJAMENTO DOS RECURSOS HÍDRICOS:
REGIONALIZAÇÃO DE VAZÕES E PROPOSIÇÃO DE ÍNDICES PARA
IDENTIFICAÇÃO DE CONFLITOS PELO USO DA ÁGUA**

Tese apresentada à Universidade Federal de Viçosa, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola, para obtenção do título de *Doctor Scientiae*.

**VIÇOSA
MINAS GERAIS – BRASIL
2010**

**Ficha catalográfica preparada pela Seção de Catalogação e
Classificação da Biblioteca Central da UFV**

T

M838g
2010

Moreira, Michel Castro, 1980-

Gestão e planejamento dos recursos hídricos:
regionalização de vazões e proposição de índices para
identificação de conflitos pelo uso da água / Michel Castro
Moreira – Viçosa, MG, 2010.

xiii, 85f. : il. (algumas col.) ; 29cm.

Orientador: Demetrius David da Silva.

Tese (doutorado) - Universidade Federal de Viçosa.

Inclui bibliografia.

1. Recursos hídricos. 2. Bacias hidrográficas.

I. Universidade Federal de Viçosa. II. Título.

CDD 22.ed. 551.483

MICHEL CASTRO MOREIRA


**GESTÃO E PLANEJAMENTO DOS RECURSOS HÍDRICOS: REGIONALIZAÇÃO
DE VAZÕES E PROPOSIÇÃO DE ÍNDICES PARA IDENTIFICAÇÃO DE
CONFLITOS PELO USO DA ÁGUA**

Tese apresentada à Universidade Federal de Viçosa, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola, para obtenção do título de *Doctor Scientiae*.

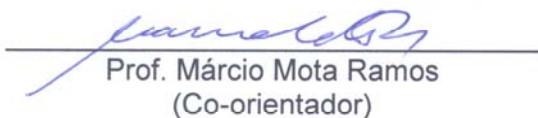
APROVADA: 05 de fevereiro de 2010.



Prof. Abelardo Antônio de Assunção
Montenegro



Dr. José Márcio Alves da Silva



Prof. Márcio Mota Ramos
(Co-orientador)



Prof. Mauro Aparecido Martinez



Prof. Demetrius David da Silva
(Orientador)

*Aos tios
Antônio e Beth
e aos primos
Tiago e Leonardo
(in memoriam).*

AGRADECIMENTOS

À minha mãe Marilda e minha irmã Monique, pelo amor que nos une e pela compreensão de minha ausência nos momentos de alegrias e de tristezas.

À minha esposa Ana Paula, pelo apoio, carinho e compreensão.

Aos meus padrinhos, Reinaldo e Maria Sônia, pelo apoio e incentivo a mim dispensados durante os longos anos de estudos.

Aos amigos de Ubá e Viçosa, William Moreira, Roselaine Cardoso, Denise Cardoso, Tiago Sudário, Valdoni, Wendy, Adriano Furlan, Max Lenine, Flávio Leal e Neydler.

Ao pessoal da república, Alisson, Augusto, Fernando, Antônio Marcos e Geraldo, pela agradável convivência; e à Dona Rita, pelo cuidado e pela dedicação para com todos nós.

Aos colegas de trabalho na UFBA/ICADS, em especial ao Flávio, Luís, Camila e Cascia, pelo excelente convívio e desafios compartilhados.

Ao professor Demetrius David da Silva, pela amizade, pelo companheirismo, exemplo de caráter e profissional e, ainda, pela valiosa ajuda e orientação na condução deste trabalho.

Aos professores Celso Bandeira de Melo Ribeiro, Fernando Falco Pruski e Márcio Mota Ramos, pelas ideias, críticas e sugestões no desenvolvimento deste trabalho.

Aos membros da banca, professores Abelardo Montenegro, Mauro Martinez e ao Dr. José Márcio, pelas importantes sugestões.

Aos colegas de curso e membros do GPRH, pelos momentos de alegria e angústia partilhados: Renata Rodriguez, Fernanda Abreu, Fernando Cunha, Fabiana Gomes, Claudinei Montebeller, Marcelo Latuf, Felipe Marques e Alípio. Em especial ao André Silva, Luana Lisboa e Marcelo Lara, bolsistas do GPRH, que abraçaram comigo vários desafios deste trabalho.

Ao Instituto Mineiro de Gestão das Águas (IGAM), em nome de seus funcionários Célia Fróes, Patrícia Gaspar e Joselaine Filgueiras, pelas discussões que alimentaram ideias para este trabalho e a presteza na cessão de dados.

À Universidade Federal de Viçosa, por intermédio do Departamento de Engenharia Agrícola, em nome de seus funcionários Chicão, Claudenilson, Edna, Eduardo, Galinari, Marcos e Renato; à Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais; e ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico, por terem-me dado condições para a realização deste trabalho.

BIOGRAFIA

Michel Castro Moreira, filho de Paulo Roberto Moreira e Marilda Reis de Castro, nasceu em Ubá, Minas Gerais, em 02 de dezembro de 1980.

Em abril de 1999, iniciou o curso de Ciência da Computação na Universidade Federal de Viçosa (UFV), em Viçosa, Minas Gerais, graduando-se em agosto de 2003.

Foi contratado, em novembro desse mesmo ano, pela empresa Cientec Consultoria e Desenvolvimento de Sistemas, onde trabalhou até março de 2004.

Em março de 2004, iniciou o Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola da UFV, em nível de Mestrado, na área de Recursos Hídricos e Ambientais, submetendo-se à defesa de dissertação em abril de 2006.

Em maio de 2006, iniciou o Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola da UFV, em nível de Doutorado. Paralelo à realização do doutorado, no mês de agosto de 2006 foi aprovado em concurso público para professor substituto no Departamento de Informática (DPI) da UFV.

Lecionou no DPI até julho de 2008, quando se retirou por ter sido aprovado em concurso público para professor assistente na Universidade Federal da Bahia, tendo assumido o cargo em agosto de 2008.

Em fevereiro de 2010, submeteu-se à defesa de tese no Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola da UFV, em nível de Doutorado, na área de Recursos Hídricos e Ambientais.

CONTEÚDO

RESUMO.....	viii
ABSTRACT	xi
INTRODUÇÃO GERAL	1

ARTIGO I

Comparação de metodologias de regionalização de vazões para estimativa da $Q_{7,10}$ e Q_{mld}

1. INTRODUÇÃO.....	6
2. MATERIAL E MÉTODOS	8
2.1. Área de estudo	8
2.2. Dados fluviométricos	8
2.3. Estimativa da $Q_{7,10}$ e Q_{mld}	11
2.3.1. Método Tradicional.....	11
2.3.2. Método baseado na proporcionalidade de vazões específicas....	13
2.3.3. Método baseado na conservação de massas.....	15
2.3.4. Trabalho <i>Deflúvios superficiais no Estado de Minas Gerais</i>	18
2.4. Comparação entre os procedimentos para estimativa da $Q_{7,10}$ e Q_{mld}	23
3. RESULTADOS E DISCUSSÃO	25
3.1. Vazão mínima ($Q_{7,10}$).....	25
3.2. Vazão média (Q_{mld}).....	32
4. CONCLUSÕES.....	37

5. REFERÊNCIAS	38
----------------------	----

ARTIGO II

***Influência da utilização de procedimentos manuais e automáticos
na estimativa do valor da $Q_{7,10}$ obtido com base no trabalho
Deflúvios Superficiais no Estado de Minas Gerais***

1. INTRODUÇÃO	43
2. MATERIAL E MÉTODOS	45
2.1. Área de estudo	45
2.2. Modelo digital de elevação	46
2.3. Dados fluviométricos	47
2.4. Estimativa da $Q_{7,10}$ com base no trabalho <i>Deflúvios superficiais no Estado de Minas Gerais</i>	48
2.4.1. Procedimento em ambiente SIG	48
2.4.2. Procedimento manual	50
2.5. Comparação entre os procedimentos para estimativa da $Q_{7,10}$	53
3. RESULTADOS E DISCUSSÃO	55
4. CONCLUSÕES.....	61
5. REFERÊNCIAS	62

ARTIGO III

***Índices para subsídio à gestão e ao planejamento dos recursos hídricos:
Proposição metodológica e estudo de caso***

1. INTRODUÇÃO.....	66
2. MATERIAL E MÉTODOS	69
2.1. Proposição dos índices.....	69
2.2. Estudo de caso: bacia do ribeirão Entre Ribeiros	72
3. RESULTADOS E DISCUSSÃO	75
4. CONCLUSÕES.....	83
5. REFERÊNCIAS	84

RESUMO

MOREIRA, Michel Castro, D. Sc., Universidade Federal de Viçosa, fevereiro de 2010. **Gestão e planejamento dos recursos hídricos: Regionalização de vazões e proposição de índices para identificação de conflitos pelo uso da água.** Orientador: Demetrius David da Silva. Co-orientadores: Celso Bandeira de Melo Ribeiro e Márcio Mota Ramos.

Objetivou-se, neste trabalho, fornecer subsídios à gestão e ao planejamento dos recursos hídricos ao comparar diferentes metodologias de regionalização de vazões para a estimativa da vazão mínima com sete dias de duração e período de retorno de 10 anos ($Q_{7,10}$) e da vazão média de longa duração (Q_{mld}); ao verificar a influência da utilização de procedimentos manuais e automáticos na estimativa do valor da $Q_{7,10}$ obtido com base no trabalho *Deflúvios Superficiais no Estado de Minas Gerais*; e ao propor índices para identificação de conflitos potenciais pelo uso da água em bacias hidrográficas. Para tanto, o trabalho foi dividido em três artigos. O primeiro, *Comparação de metodologias de regionalização de vazões para estimativa da $Q_{7,10}$ e Q_{mld}* , teve por objetivo comparar os valores da $Q_{7,10}$ e da Q_{mld} estimados utilizando-se o trabalho *Deflúvios Superficiais no Estado de Minas Gerais* (Deflúvios) e as metodologias de regionalização de vazões Tradicional, Proporcionalidade de Vazões e Conservação de Massas. Foram obtidos, a partir da análise probabilística e da média das vazões médias anuais, os valores da $Q_{7,10}$ e da Q_{mld} , respectivamente, para 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 o

trabalho Deflúvios e as metodologias de regionalização de vazões. 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 e que, dentre os métodos de regionalização utilizados, o Tradicional é o que permite melhor estimativa dos valores da $Q_{7,10}$ e Q_{mld} para a bacia do rio Paraopeba. Apesar de o trabalho Deflúvios ter apresentado bons resultados na estimativa da Q_{mld} , seu uso para a estimativa da $Q_{7,10}$ na bacia do rio Paraopeba apresenta restrições. No segundo artigo, *Influência da utilização de procedimentos manuais e automáticos na estimativa do valor da $Q_{7,10}$ obtido com base no trabalho Deflúvios Superficiais no Estado de Minas Gerais*, foram comparados os valores da $Q_{7,10}$ obtidos a partir da análise probabilística das séries históricas disponíveis para 15 estações fluviométricas da bacia do rio Paraopeba com os valores estimados utilizando-se o trabalho *Deflúvios Superficiais no Estado de Minas Gerais*, a partir de procedimentos manuais e automáticos de delimitação de áreas de drenagem e dos intervalos de rendimentos específicos em sistemas de informações geográficas. Para cada uma das estações foi estimado, considerando-se o procedimento automático, o valor do rendimento característico equivalente (R_{me}) para então convertê-lo na $Q_{7,10}$. No procedimento realizado manualmente, foram obtidos juntamente ao Instituto Mineiro de Gestão das Águas (IGAM) os valores de R_{me} e $Q_{7,10}$ para cada uma das seções do estudo. De posse dos valores do R_{me} , calculou-se o desvio relativo percentual entre os valores obtidos a partir dos dois procedimentos, enquanto o erro relativo percentual foi calculado entre os valores de $Q_{7,10}$ obtidos a partir da análise probabilística das séries históricas e das vazões estimadas a partir dos dois procedimentos. Na análise dos resultados verificaram-se diferenças expressivas na estimativa da $Q_{7,10}$ a partir dos dois procedimentos, tendo o procedimento automático apresentado melhores estimativas da $Q_{7,10}$ para as seções de estudo da bacia do rio Paraopeba. No terceiro artigo, *Índices para subsídio à gestão e ao planejamento dos recursos hídricos: Proposição metodológica e estudo de caso*, foram propostos dois índices para identificação de conflitos potenciais pelo uso da água em bacias hidrográficas. O índice de conflito pelo uso da água na gestão dos recursos hídricos (i_{cg}), obtido para cada segmento de rio pela razão entre as vazões outorgadas a montante da foz do segmento em análise (Q_{out}) e a vazão máxima

passível de outorga, visa fornecer subsídios às ações afetas à gestão de recursos hídricos. O índice de conflito pelo uso da água no planejamento dos recursos hídricos (i_{cp}), obtido para cada segmento de rio pela razão da Q_{out} pela Q_{mld} , objetiva fornecer subsídios às ações de planejamento. Para interpretação dos valores dos índices foi sugerida uma escala de faixas de valores que permite identificar diferentes situações em relação ao uso e à disponibilidade hídrica da bacia. Visando possibilitar a elaboração de mapas de i_{cg} e i_{cp} de bacias hidrográficas, foi associada às faixas de valores uma escala de cores. O estudo de caso foi realizado para a bacia do ribeirão Entre Ribeiros, sendo utilizados no cálculo dos índices a $Q_{7,10}$, a Q_{mld} , a Q_{out} , o modelo digital de elevação e a hidrografia da bacia em estudo. Concluiu-se, pela análise dos valores de i_{cg} e i_{cp} , que os índices propostos são capazes de identificar regiões com conflitos potenciais pelo uso da água em bacias hidrográficas. Pelos valores de i_{cg} dos segmentos da bacia do ribeirão Entre Ribeiros pôde-se identificar regiões com conflitos pelo uso da água, os quais pela análise do i_{cp} podem ser minimizados adotando-se de um adequado programa de planejamento dos recursos hídricos. Os resultados obtidos nos três artigos deste trabalho consistem em contribuições à área de gestão e planejamento dos recursos hídricos no país. A aplicação de forma integrada das questões abordadas visa ao controle e ao uso racional deste bem hídrico, de modo a garantir água para as atuais e futuras gerações.

ABSTRACT

MOREIRA, Michel Castro. D.Sc., Universidade Federal de Viçosa, february 2010.
Management and planning of water resources: Outflow regionalizing and proposition of indices for spotting water use conflicts. Advisor: Demetrius David da Silva. Co-advisors: Celso Bandeira de Melo Ribeiro and Márcio Mota Ramos.

This paper aims to provide a means to manage and plan water resources comparing different methodologies for outflow regionalization targeting to estimate a seven-day minimum flow and a ten-year return period ($Q_{7,10}$), as well as the long-term middle flow (Q_{mld}) while checking the influence of manual and automatic procedures for estimating the $Q_{7,10}$ value obtained based on *Deflúvios Superficiais no Estado de Minas Gerais*, and while proposing indices for identifying potential conflicts for the use of water in the water basins. For such, the research was divided into three papers. The first, *Comparison of outflow regionalization methodologies for estimating $Q_{7,10}$ and Q_{mld}* , aimed to compare $Q_{7,10}$ and Q_{mld} estimated values, based on *Deflúvios Superficiais no Estado de Minas Gerais (Deflúvios)* and the following methodologies for outflow regionalization: Traditional; Outflow Proportionality; and Conservation of Mass. $Q_{7,10}$ and Q_{mld} values were obtained from the probabilistic analysis and from the average annual outflow. These values were obtained for the 15 fluviometric stations of the Paraopeba river basin. For each of the stations, $Q_{7,10}$ and Q_{mld} were estimated considering *Deflúvios* and the methodologies for outflow regionalization. Having obtained the observed and estimated $Q_{7,10}$ and Q_{mld} values,

the precision of the methodologies was evaluated applying relative error, medium relative error and the adjusted efficiency coefficient. The analysis of the results show that the greatest errors in the estimated outflows took place in riverhead regions and that, among the regionalization methods used, the Traditional one is the one that allows the best estimative for the $Q_{7,10}$ and Q_{mld} values for the Paraopeba river basin. Although *Deflúvios* has presented good results estimating Q_{mld} , its use for estimating $Q_{7,10}$ in the Paraopeba river basin presents restrictions. The second paper, *The influence of the use of manual and automatic procedures for estimating the $Q_{7,10}$ value obtained based on Deflúvios Superficiais no Estado de Minas Gerais*, the $Q_{7,10}$ values obtained from the probabilistic analysis of historic series available for 15 fluviometric stations of the Paraopeba river basin were compared with the estimated values using *Deflúvios*, from the manual and automatic procedures of drainage area delimitation and specific yield intervals in geographic information systems. For each of the stations, the value for equivalent characteristic yield (Rm_e) was estimated, considering the automatic procedure, to be then converted to $Q_{7,10}$. In the manual procedure, the Rm_e and $Q_{7,10}$ values were obtained from *Instituto Mineiro de Gestão das Águas (IGAM)* for each of the sections of this study. Having obtained the Rm_e values, the percentage relative deviation between the values obtained from those two procedures was calculated, while a percentage relative error was calculated among the $Q_{7,10}$ values obtained from the probabilistic analysis of the historic series and estimated outflows from those two procedures. In the analysis of the results, marked differences were observed in the $Q_{7,10}$ estimation from those two procedures, the automatic procedure presenting the best $Q_{7,10}$ estimations for the study sections of the Paraopeba river basin. The third paper, *Indices for identification of conflicts for the use of water: Proposition and case study*, two indices for the identification of potential conflicts for the use of water in water basins were proposed. The index for the conflict for the use of water in water resources management (i_{cg}) obtained from each river segment from the ratio among the flows granted to mouth amount of the analyzed segment (Q_{out}) and the maximum possible flow grant aims to provide a means to the actions affecting water resources management. The index of conflict for the use of water in planning water resources (i_{cp}) obtained for each river segment by the Q_{out} and Q_{mld} ratio aims to provide a means to the actions of planning. In order to interpret the values of the indices, a scale of value bands was suggested to make it possible to identify different situations regarding the use and availability of water in

the basin. Aiming to make it possible to make i_{cg} and i_{cp} maps of water basins, a color scale was associated with the value bands. The case study was performed for the Entre RIBEIROS stream basin, using the digital elevation model and the hydrography of the water basin of this study to calculate the $Q_{7,10}$, Q_{mld} and Q_{out} indices. The analysis of the i_{cg} and i_{cp} values concluded that the proposed indices can identify regions with potential conflicts for the use of water in water basins. The regions with conflicts for the use of water could be identified by means of the i_{cg} values of the segments of the water basin of Entre RIBEIROS stream, which could be minimized by the analysis of the i_{cp} adopting an adequate water resource planning program. The results in these three papers consist of contributions to the area of management and planning of water resources in Brazil. The application of the integrated form of the questions dealt with herein aim to control and rationalize the use of water, so as to guarantee its availability for the current and future generations.

INTRODUÇÃO GERAL

A Política Nacional de Recursos Hídricos (PNRH), instituída pela Lei 9.433/97, foi um marco legal no tratamento dos recursos hídricos do país. Tendo como objetivos assegurar à atual e às futuras gerações a necessária disponibilidade de água, em padrões de qualidade adequados aos respectivos usos; a utilização racional e integrada dos recursos hídricos, incluindo o transporte aquaviário, com vistas ao desenvolvimento sustentável; e a prevenção e a defesa contra eventos hidrológicos críticos de origem natural ou decorrentes do uso inadequado dos recursos naturais, a PNRH possui como um de seus instrumentos a outorga pelo uso da água.

Por meio da outorga, o poder público concede, por um período preestabelecido, o direito de uso de determinada quantidade de água, condicionado à sua disponibilidade, de tal modo que assegure ao gestor o controle quantitativo e qualitativo do seu uso, ao mesmo tempo que garante ao usuário o direito de uso da água de forma pessoal e intransferível.

É de responsabilidade dos órgãos gestores de recursos hídricos, em níveis federal ou estaduais, a concessão da outorga. Na análise de concessão de outorga, seja nela utilizada a vazão mínima de referência para captações a fio d'água ou a vazão média de longa duração (Q_{md}) para situações de regularização de corpos hídricos, o conhecimento da disponibilidade de água é a informação básica para a tomada de decisão. 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.

Diante das diferentes opções de metodologias de regionalização de vazões e visando fornecer ao Instituto Mineiro de Gestão das Águas (IGAM), órgão gestor de recursos hídricos do Estado de Minas Gerais, subsídios para escolha de um método adequado para a estimativa das vazões na bacia do rio Paraopeba, o Artigo I deste trabalho tem por hipótese que a análise comparativa de diferentes metodologias de regionalização de vazões (Método Tradicional, Proporcionalidade de Vazões e Método de Conservação de Massas) com o trabalho *Deflúvios Superficiais no Estado de Minas Gerais* fornecerá subsídios para a escolha de um método mais adequado às condições físicas, climáticas e antrópicas da bacia do rio Paraopeba.

O IGAM, atualmente, utiliza para a estimativa dos valores da vazão mínima com sete dias de duração e período de retorno de 10 anos ($Q_{7,10}$) o trabalho *Deflúvios Superficiais no Estado de Minas Gerais*. A obtenção da $Q_{7,10}$ utilizando este trabalho é realizada a partir da sobreposição da área de drenagem da seção de interesse em relação aos mapas temáticos. Em todo processo é imperativo o conhecimento da área de drenagem da seção de interesse, bem como a área dos intervalos de rendimentos específicos, as quais podem ser facilmente obtidas a partir do modelo digital de elevação da bacia.

Dessa forma, considerando que o IGAM atualmente não utiliza o MDE da bacia do rio Paraopeba, de modo que a delimitação da área de drenagem da seção e dos intervalos de rendimentos específicos são obtidos a partir de processo manual, o Artigo II tem por hipótese que a análise comparativa dos valores observados da $Q_{7,10}$ com os valores estimados utilizando o trabalho *Deflúvios Superficiais no Estado de Minas Gerais* a partir de procedimentos manuais e automáticos de delimitação de áreas de drenagem e dos intervalos de rendimentos específicos em sistemas de informações geográficas permitirá verificar a eficiência e a confiabilidade destes procedimentos para a obtenção das vazões utilizando-se o método atualmente adotado em Minas Gerais.

Dado que a outorga, exceto em casos excepcionais, garante ao seu detentor a quantidade de água alocada, as vazões outorgadas devem ser consideradas indisponíveis na bacia quando da análise de concessão de novas outorgas. Dessa forma, a emissão de uma outorga gera impactos na disponibilidade hídrica da bacia em todo o seu período de vigência.

Em bacias em que já são evidenciados conflitos pelo uso da água, como a bacia do rio Paracatu, as outorgas vigentes tornam-se ainda mais importantes, uma vez que as vazões alocadas para estas somente se tornarão disponíveis novamente quando do encerramento do prazo de concessão.

Na literatura especializada a respeito de gestão de recursos hídricos, por diversas vezes se encontra o termo “conflito pelo uso da água” sem, entretanto, especificar o que seria conflito. Diversos autores referem-se a conflitos pelo uso da água a partir de critérios subjetivos ou evidências de escassez de água.

Para a identificação objetiva da situação de conflito em uma bacia é necessária a adoção de ferramentas que permitam a observação de diferenças regionais, bem como a variação da disponibilidade de água e da demanda em uma bacia. A maioria dos conflitos pelo uso da água decorre da falta de gestão e planejamento de recursos hídricos, a qual está intimamente ligada à inexistência de informações que associem as vazões já outorgadas com a disponibilidade hídrica.

Dada a constatação de que os índices são úteis para descrição da situação de uma bacia e a evidência da necessidade de um índice efetivo para identificação de conflitos potenciais pelo uso da água, o Artigo III deste trabalho tem por hipótese que a proposição de um índice para identificação de regiões com conflitos potenciais pelo uso da água em uma bacia fornecerá subsídios para a realização de ações de gestão e planejamento dos recursos hídricos em bacias hidrográficas.

ARTIGO I

**Comparação de metodologias de regionalização de vazões
para estimativa da $Q_{7,10}$ e Q_{mld}**

RESUMO

O conhecimento da disponibilidade hídrica é a informação básica no processo de outorga. Para superar a dificuldade encontrada na obtenção de informações hidrológicas nos 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. Considerando as diversas metodologias disponíveis para essa finalidade e visando fornecer ao órgão gestor de recursos hídricos do Estado de Minas Gerais subsídios para escolha do método mais adequado para a estimativa das vazões na bacia do rio Paraopeba, objetivou-se neste trabalho comparar os valores da vazão mínima com sete dias de duração e período de retorno de 10 anos ($Q_{7,10}$) e da vazão média de longa duração (Q_{mld}) estimados utilizando-se o trabalho *Deflúvios Superficiais no Estado de Minas Gerais* (Deflúvios) e as metodologias de regionalização de vazões Tradicional, Proporcionalidade de Vazões e Conservação de Massas. Foram obtidos, a partir da análise probabilística e da média das vazões médias anuais, os valores da $Q_{7,10}$ e da Q_{mld} , respectivamente, para 15 estações fluviométricas da bacia do rio Paraopeba. Para cada uma das seções correspondentes às estações foram estimados os valores da $Q_{7,10}$ e Q_{mld} considerando-se o trabalho Deflúvios e os métodos de regionalização de vazões. 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. Pela 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 Tradicional é o que permite melhor estimativa dos valores de $Q_{7,10}$ e Q_{mld} para a bacia do rio Paraopeba. Apesar de o trabalho Deflúvios 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.

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

ABSTRACT

Comparison of outflow regionalization methodologies for estimating $Q_{7,10}$ and Q_{mld}

The knowledge of water availability is the key information for the granting process. In order to overcome the difficulties found to get hydrologic information in all of the places that are particularly interesting due to being necessary for the appropriate management of water resources of a region, the flow regionalization technique has been used in order to transfer information spatially from available data in specific places. Taking into account the varied methodologies available to do so and aiming at providing the water resources management body with a means for choosing a method for estimating the outflows at the Paraopeba river basin, this paper aimed to compare the seven-day long minimum outflow and a ten-year return period ($Q_{7,10}$), as well as the long-term middle flow (Q_{mld}) estimated using the *Deflúvios Superficiais no Estado de Minas Gerais* work (Deflúvios) and 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 Deflúvios, as well as the following methods of flow regionalization: the Traditional one, based on flow proportionality, and the one based on mass conservation. Obtaining the observed and estimated $Q_{7,10}$ and Q_{mld} values, 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 greatest errors concerning outflow estimates have occurred in riverhead regions. Furthermore, the data indicate that, among the regionalization methods used in this study, the traditional one is the one that allowed a better estimation of the $Q_{7,10}$ at the Paraopeba River basin. Although the Deflúvios presented good results in estimating the Q_{mld} , its use for estimating $Q_{7,10}$ presents some restrictions.

Key-words: water availability, water right, water resources management.

1. INTRODUÇÃO

A disponibilidade hídrica de uma bacia pode ser avaliada pela análise das vazões mínimas, caracterizadas pela sua magnitude, duração e frequência de ocorrência, refletindo o potencial natural disponível para abastecimento humano, industrial, irrigação, navegação, geração de energia elétrica e lançamento de efluentes. Já a estimativa da vazão média permite caracterizar o potencial energético da bacia, sendo a vazão média de longa duração (Q_{mld}) a vazão máxima possível de ser regularizada (RODRIGUEZ, 2004).

No Brasil, cada unidade federativa tem adotado critérios próprios para o estabelecimento das vazões mínimas de referência para outorga sem, entretanto, apresentar justificativas para a adoção desses valores (CRUZ, 2001). 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 do processo de concessão de outorga, seja nele utilizadas a vazão mínima de referência, para captações a fio d'água, ou a Q_{mld} , para situações de regularização de corpos hídricos, o conhecimento da disponibilidade hídrica é a informação básica para tomada de decisão. As limitadas séries históricas 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 escassez de informações hidrológicas nos locais de interesse, necessárias ao adequado gerenciamento dos recursos hídricos de uma região, utiliza-se a técnica de regionalização de vazões para transferir, especialmente, 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. Apresenta, ainda, um acervo consistido de dados fluviométricos mensais, formado a partir de 252 seções de informações hidrométricas distribuídas por todo Estado.

A qualidade das vazões estimadas, utilizando-se 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, 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 do método mais adequado para a estimativa das vazões na bacia do rio Paraopeba, objetivou-se neste trabalho comparar os valores da vazão mínima com sete dias de duração e período de retorno de 10 anos ($Q_{7,10}$) e da vazão média de longa duração (Q_{mld}) estimados utilizando-se o trabalho *Deflúvios Superficiais no Estado de Minas Gerais* e as metodologias de regionalização de vazões Tradicional, Proporcionalidade de Vazões e Conservação de Massas.

2. MATERIAL E MÉTODOS

2.1. Área de estudo

A bacia do rio Paraopeba, com aproximadamente 13.300 km², 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).

Esta 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 em seu terço inferior (SCHVARTZMAN, 2000).

2.2. Dados fluviométricos

Com vistas à comparação dos valores de $Q_{7,10}$ e Q_{mld} estimados utilizando-se o trabalho *Deflúvios Superficiais no Estado de Minas Gerais* e as metodologias de regionalização de vazões Tradicional, ProBporcionalidade de Vazões e Conservação de Massas, foram elaborados diagramas de barras de 81 estações fluviométricas identificadas na bacia do rio Paraopeba, objetivando caracterizar o período de dados disponível em cada estação, permitindo-se, assim, a identificação do período base e as estações a serem utilizadas no estudo.

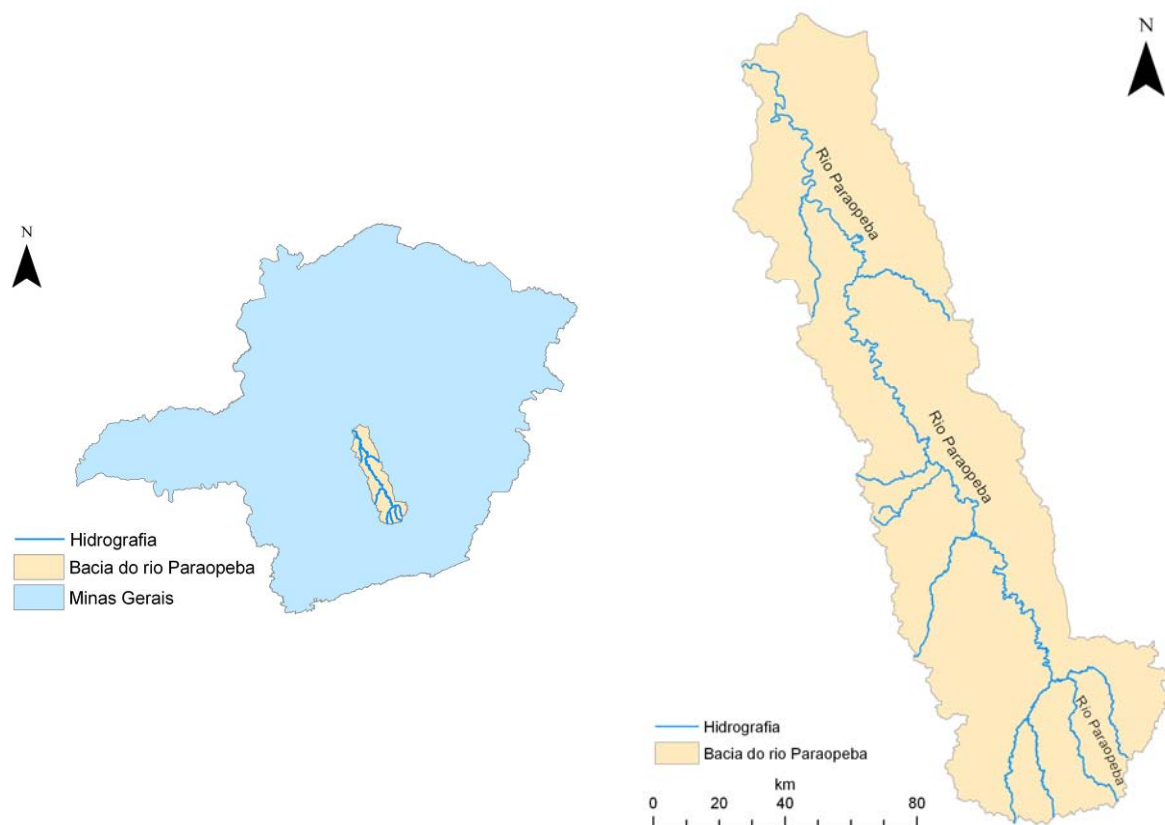


Figura 1 – Localização da bacia do rio Paraopeba.

De posse dos diagramas de barras foram escolhidas 15 estações fluviométricas pertencentes à rede hidrometeorológica da Agência Nacional de Águas – ANA (Tabela 1; Figura 2) e selecionado o período base de 1976 a 2005 para a realização dos estudos hidrológicos.

Na análise das vazões das estações fluviométricas identificaram-se falhas ou dados considerados inconsistentes e, nesses casos, fez-se o preenchimento das falhas utilizando o método da regressão linear.

Tabela 1 – Estações fluviométricas utilizadas no estudo

Código	Estação	Latitude (Sul)	Longitude (Oeste)	Área de drenagem (km ²)	Curso d'água
40549998	São Brás do Suaçuí - 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 Camapuã
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 Itaguá	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

Neste método, o preenchimento de falhas - ou a extensão das séries - foi realizado por meio da análise de correlações dos dados observados no período comum entre a seção com dados a serem preenchidos e a estação de apoio. Na escolha da estação de apoio optou-se, preferencialmente, pelas estações localizadas no mesmo rio da estação com falhas em seus registros, sendo o valor do coeficiente de correlação entre as estações a base para a tomada de decisão.



Figura 2 – Localização das estações fluviométricas utilizadas no estudo.

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 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 de 20% de probabilidade no teste de Kolmogorov-Smirnov, associada ao menor coeficiente de variação. Para obtenção da $Q_{7,10}$ utilizou-se o software RH 3.0, desenvolvido por Euclides et al. (1999).

A vazão média anual de longa duração (Q_{mld}) foi obtida em 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, descrito por Eletrobrás (1985a), consiste na identificação de regiões hidrologicamente homogêneas e no ajuste de equações de regressão regionais entre as diferentes variáveis a serem regionalizadas e às características físicas e climáticas das bacias de drenagem.

Para a definição das regiões hidrologicamente homogêneas, observou-se inicialmente a distribuição geográfica das estações e, então, foram 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.

Quando foram verificados bons resultados de r^2 , r^2a , 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 se obter as equações de regressão regionais para cada região hidrologicamente homogênea, com base nos modelos: linear; potencial; exponencial; logarítmico; e recíproco.

Para verificar o 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 (Figura 3), sendo as equações de regionalização para estimativa das vazões, em m^3s^{-1} , respectivamente

- Região I

$$Q_{7,10} = 0,00168 A^{1,101117} \quad r^2 = 0,97 \quad (1)$$

$$Q_{mld} = 0,023266 A^{0,96386} \quad r^2 = 0,97 \quad (2)$$

- Região II

$$Q_{7,10} = 0,002282 A^{1,020517} \quad r^2 = 0,99 \quad (3)$$

$$Q_{mld} = 0,015398 A \quad r^2 = 0,99 \quad (4)$$

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

Euclides et al. (2007), no trabalho *Atlas Digital das Águas de Minas*, procederam à regionalização de vazões para todo o Estado de Minas Gerais com base no método Tradicional.

No ajuste das equações de regionalização para a bacia do rio Paraopeba, os autores utilizaram dados fluviométricos de oito estações, tendo como período base os anos de 1970 a 2002. As equações de regionalização para a bacia do rio Paraopeba, apresentadas no atlas para a estimativa da $Q_{7,10}$ e Q_{mld} , em m^3s^{-1} , são

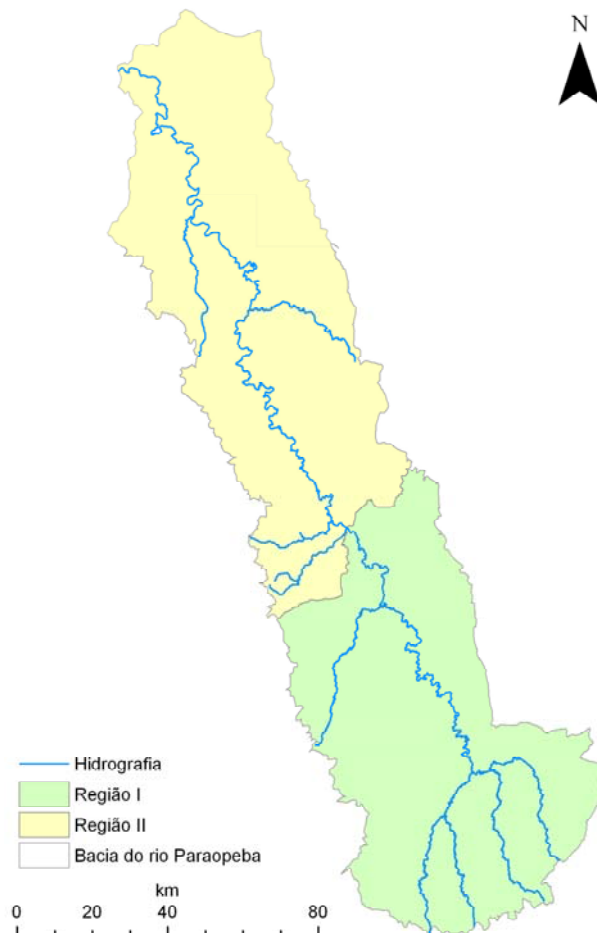


Figura 3 – Regiões hidrologicamente homogêneas da bacia do rio Paraopeba.

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

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

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

A partir das equações de regionalização ajustadas neste 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 apresentadas na Figura 2 e 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 utilizadas no estudo, conforme um dos quatro casos preconizados e descritos a seguir:

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

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

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

em que:

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

Q_x = vazão do 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

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

em que:

Q_m = vazão do posto fluviométrico a montante, m^3s^{-1} ;

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

A_m = 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 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 4) 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-se a vazão no local de confluência do canal de ordem i (z') e, posteriormente, obteve-se 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).

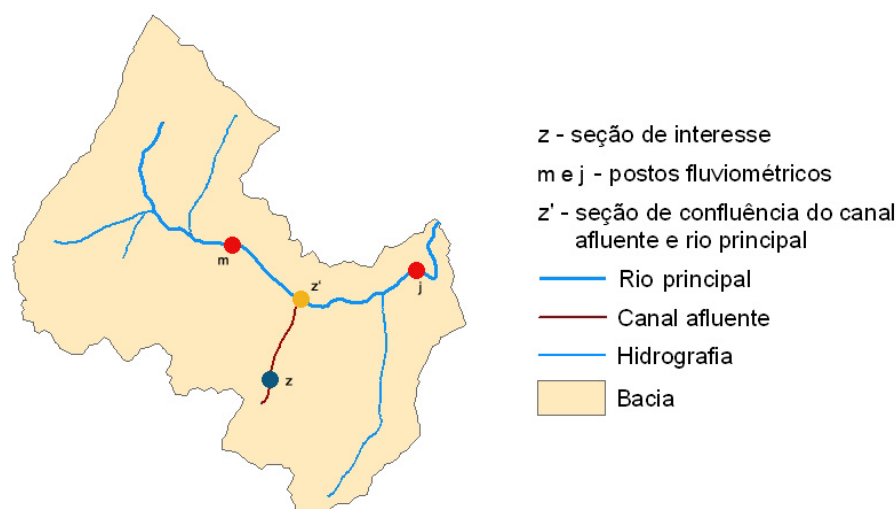


Figura 4 – Caso referente a um local de interesse situado em um canal afluente cuja foz está entre dois postos fluviométricos de um canal de ordem superior.

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 mínima 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).

A partir destes modelos, obtiveram-se as vazões na foz de cada rio afluente direto do rio principal que possuía pelo menos uma estação fluviométrica, procedendo-se então novos ajustes, em um processo recursivo, dos rios de maior ordem para os de menor (Figura 5).

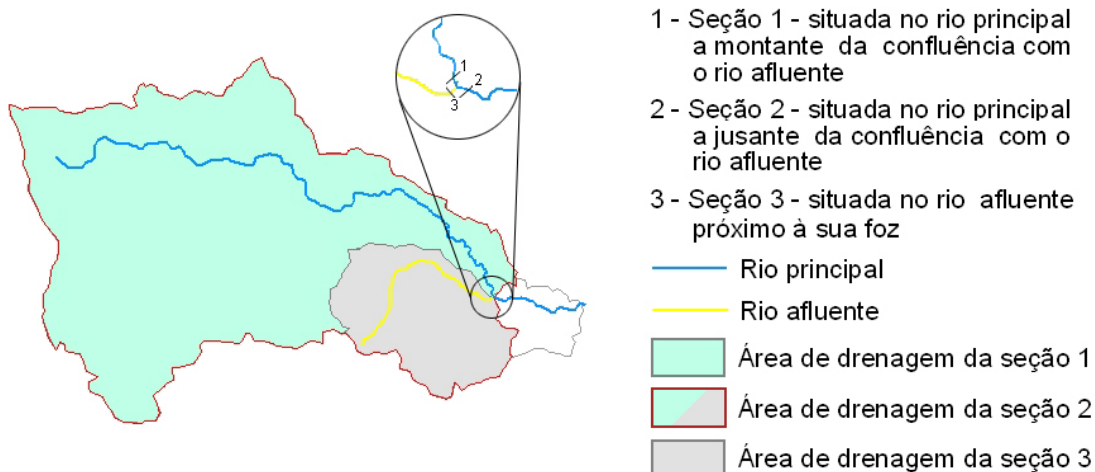


Figura 5 – Procedimento para determinação da vazão na foz de um rio afluente direto do rio principal.

Fonte: MOREIRA (2006).

Dado que não se obteve ajustes satisfatórios para representação da $Q_{7,10}$ e Q_{mld} nos afluentes diretos rio Manso e Camapuã, bem como para representação da $Q_{7,10}$ no córrego Mato Frio, conforme preconiza o método, foi necessário obter equações lineares para representar a vazão nos rios sem modelos ajustados.

Dessa forma, foram obtidos modelos de tal forma que a equação produzisse uma vazão nula quando a área de drenagem é zero e uma vazão igual à estimada na foz do rio quando a área de drenagem é aquela correspondente à área de drenagem do rio.

Na Figura 6 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} , em m^3s^{-1} , foram

- Rio Paraopeba

$$Q_{7,10} = 0,0050 A^{0,9515} \quad (9)$$

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

- Ribeirão Mateus Leme e Sesmaria

$$Q_{7,10} = 0,0068 e^{0,02504 A} \quad (11)$$

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

- Ribeirão Serra Azul

$$Q_{7,10} = 0,0004 A^{1,36418} \quad (13)$$

$$Q_{mld} = 0,0112 A^{1,05552} \quad (14)$$

- Rio Manso

$$Q_{7,10} = 0,003162 A \quad (15)$$

$$Q_{mld} = 0,015547 A \quad (16)$$

- Rio Brumado
 $Q_{7,10} = 0,5552 e^{0,00176 A}$ (17) $Q_{mld} = 0,2196 A^{0,62614}$ (18)
- Rio Camapuã
 $Q_{7,10} = 0,003083 A$ (19) $Q_{mld} = 0,012283 A$ (20)
- Rio Maranhão
 $Q_{7,10} = 0,0052 e^{0,00926 A}$ (21) $Q_{mld} = 0,9896 e^{0,00356 A}$ (22)
- Córrego Mato Frio
 $Q_{7,10} = 0,002721 A$ (23) $Q_{mld} = 0,0276 A^{0,78204}$ (24)

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

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

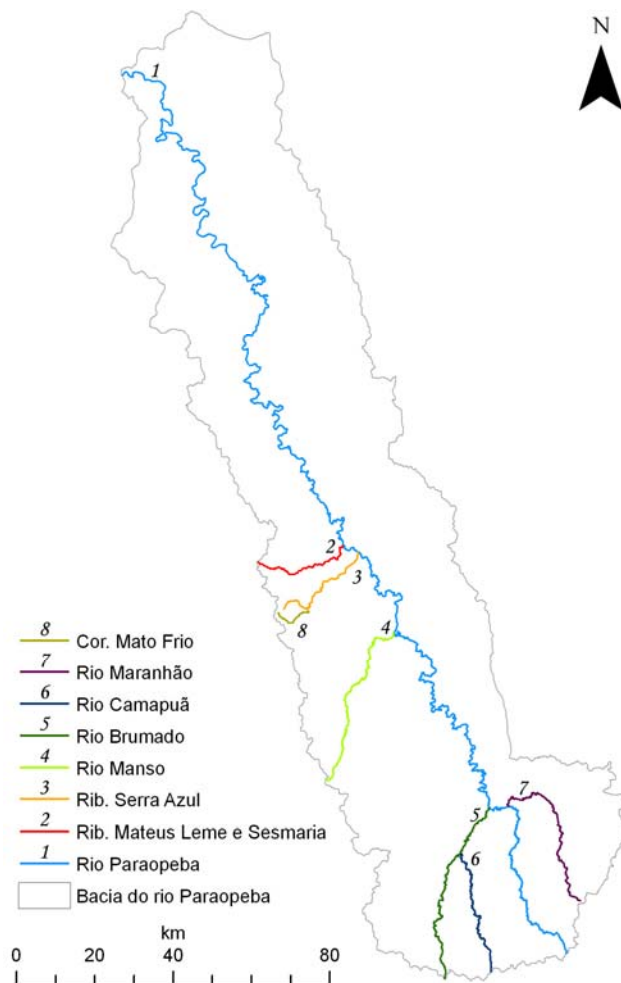


Figura 6 – Rios nos quais foram ajustadas equações pelo método baseado na conservação de massas.

2.3.4. Trabalho *Deflúvios superficiais no Estado de Minas Gerais*

Para a obtenção das estimativas das vazões, utilizando-se o trabalho *Deflúvios Superficiais no Estado de Minas Gerais*, elaborado por Souza (1993), foram digitalizados os mapas temáticos das tipologias regionais homogêneas (Figura 7), do rendimento específico médio mensal, referente às contribuições unitárias mínimas com 10 anos de recorrência (Figura 8), e do rendimento específico médio de longo termo (Figura 9).

Tendo em vista que o estudo permite a estimativa das variáveis hidrológicas sob a forma de rendimentos específicos de duração mensal e recorrência decenal, para a estimativa da vazão mínima foi necessária 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, realizou-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 (Figura 8). 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.

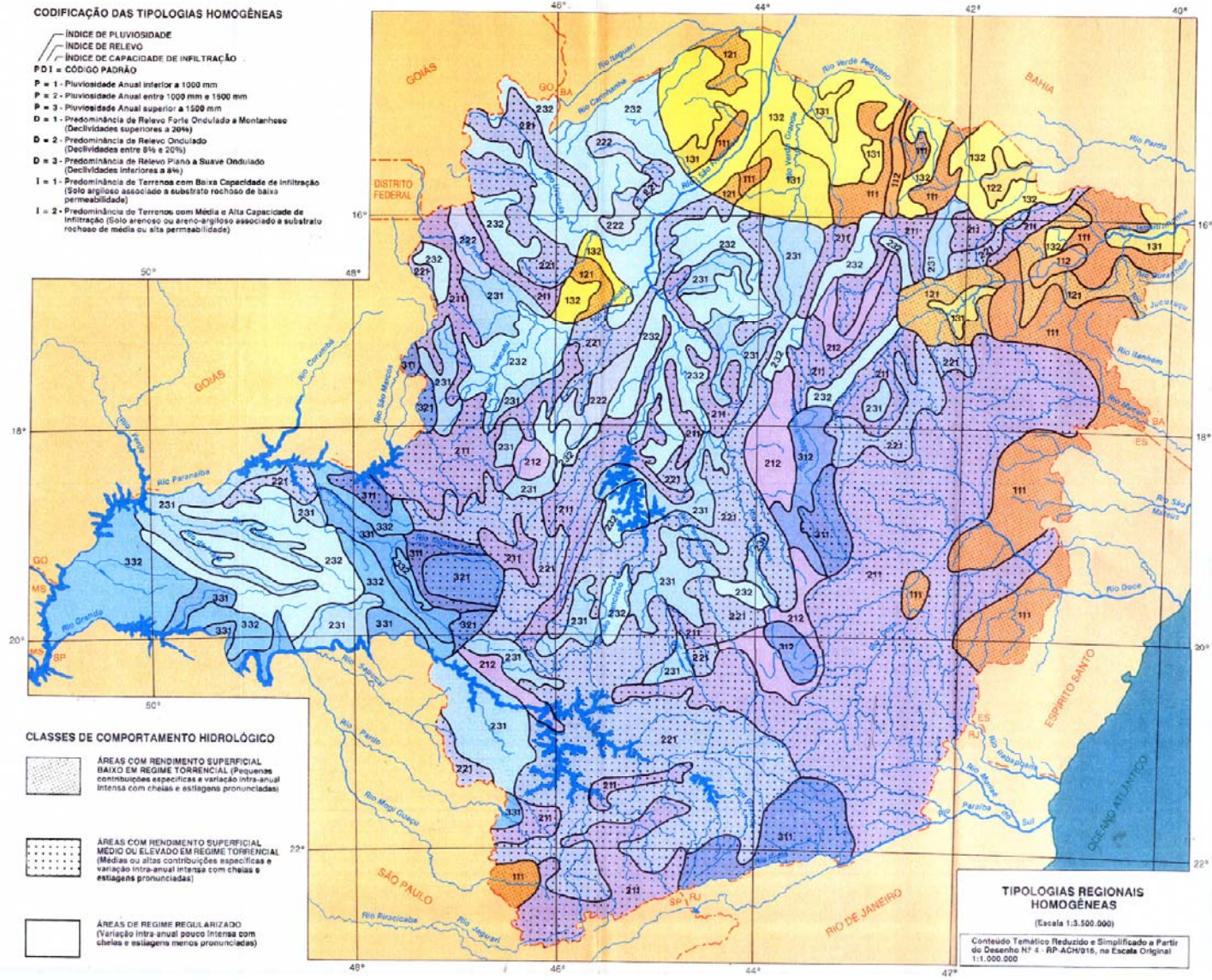


Figura 7 – Mapa das tipologias regionais homogêneas digitalizado do trabalho *Deflúvios Superficiais no Estado de Minas Gerais*.

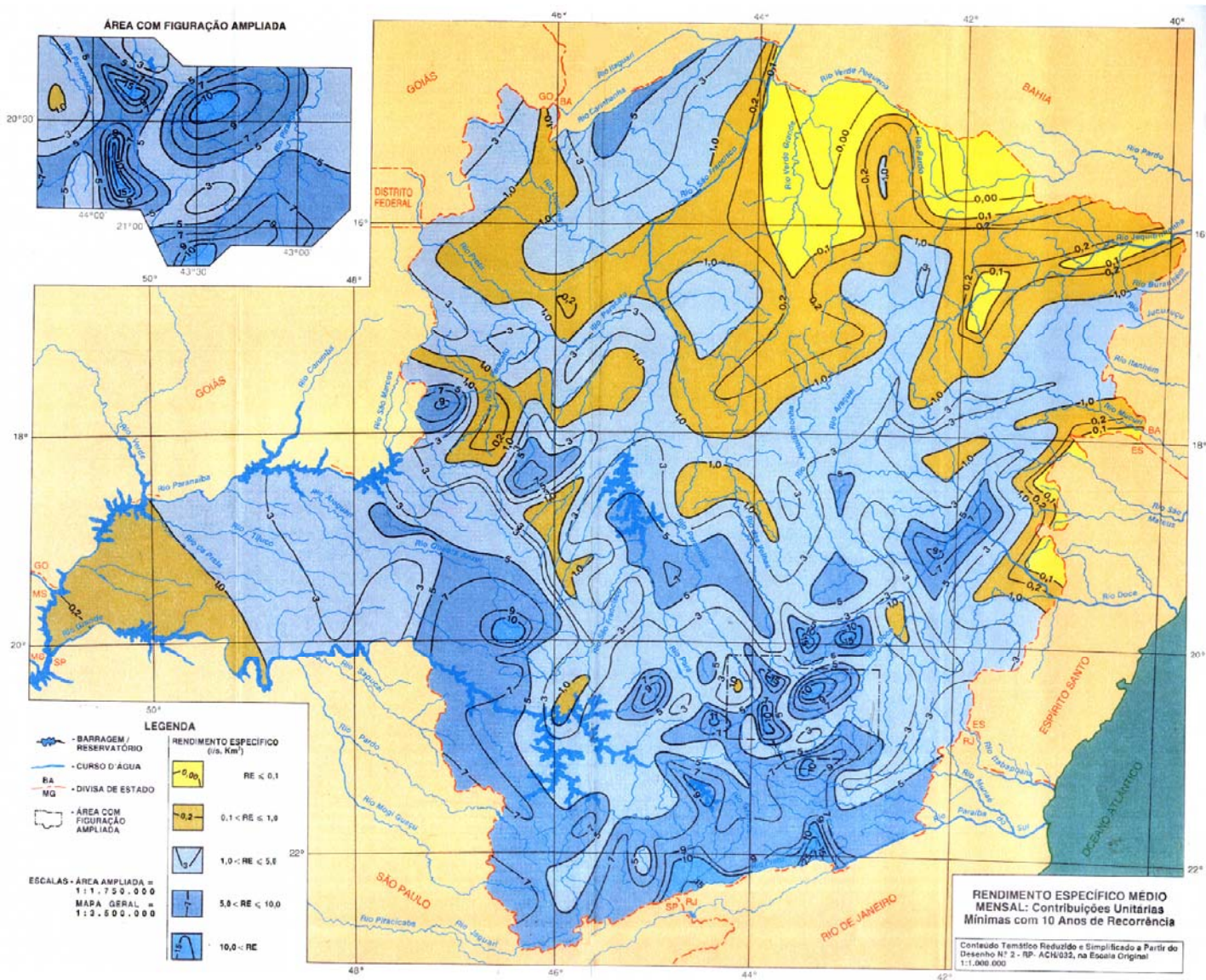


Figura 8 – Mapa do rendimento específico médio mensal, referente às contribuições unitárias mínimas com 10 anos de recorrência, digitalizado do trabalho *Deflúvios Superficiais no Estado de Minas Gerais*.

A conversão do R_{me} 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:

$$\begin{aligned} Q_m &= \text{vazão característica da seção de interesse, m}^3\text{s}^{-1}; \text{ e} \\ A &= \text{área de drenagem da seção fluvial de interesse, km}^2. \end{aligned}$$

A vazão característica corresponde a uma variável de parametrização que permite, a partir da utilização das funções de inferência, estimar eventos de outras durações e recorrências, 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 7), determinou-se a tipologia homogênea dominante da área de contribuição de cada seção, sobrepondo-se a área de drenagem da seção no 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 quanto à 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 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 trabalho *Deflúvios Superficiais no Estado de Minas Gerais* e pelas três metodologias de regionalização de vazões (Método Tradicional, Proporcionalidade de Vazões e Método Conservação de Massas), foi avaliada a precisão das metodologias aplicando-se o erro relativo (ER) entre o valor obtido a partir da análise da série histórica e o estimado, o erro relativo médio (ERM), conforme apresentado por Schaeffer (1980), e o coeficiente de eficiência ajustado (E') (LEGATES e MCCABE JÚNIOR, 1999), dados respectivamente por

$$ER = 100 \times \frac{Q_{obs} - Q_{est}}{Q_{obs}} \quad (28)$$

em que:

ER = erro relativo, %;

Q_{obs} = 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} .

$$ERM = \frac{1}{N} \left[\sum_{i=1}^N \left| \frac{Q_{obs} - Q_{est}}{Q_{obs}} \right| \right] \quad (29)$$

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

$$E' = 1 - \frac{\sum_{i=1}^N |Q_{obs} - Q_{est}|}{\sum_{i=1}^N |Q_{obs} - \bar{Q}_{obs}|} \quad (30)$$

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

Na avaliação dos resultados, utilizou-se, além do ER, ERM e coeficiente de eficiência ajustado, o coeficiente de determinação e 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_{mid} quanto ao seu índice de confiança.

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

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

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

Fonte: CAMARGO e SENTELHAS (1997).

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 estudadas, obtidos a partir da análise probabilística das séries históricas e estimados pelas diferentes metodologias de regionalização de vazões. Para fins de análise, os erros relativos percentuais negativos nesta tabela correspondem à superestimativa das vazões estimadas, enquanto os positivos, às subestimativas.

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 0,031 a 24,4 m^3s^{-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 Trad. 1 de regionalização de vazões, verifica-se que os valores de ER variaram de -50,6 a 20%, sendo estes observados, respectivamente, nas estações Fazenda Pasto Grande (40810800; 54,7 km^2) e Fazenda Laranjeiras (40810350; 10,2 km^2). Observa-se que, de modo geral, os maiores valores de ER ocorreram nas estações com menores áreas de drenagem, como as estações Jardim (40811100; 112,4 km^2), Entre Rios de Minas (40680000; 469 km^2) e Congonhas - Linígrafo (40579995; 613 km^2).

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

Código	$Q_{7,10}$ Obs	Trad. 1		Trad. 2		Proporc.		MCM		Deflúvios	
		$Q_{7,10}$ Est.	ER (%)	$Q_{7,10}$ Est.	ER (%)	$Q_{7,10}$ Est.	ER (%)	$Q_{7,10}$ Est.	ER (%)	$Q_{7,10}$ Est.	ER (%)
40549998	1,47	1,388	5,5	1,421	3,3	1,953	-32,9	1,636	-11,3	3,976	-170,5
40579995	1,52	1,971	-29,7	1,918	-26,2	2,684	-76,6	1,519	0,1	2,977	-95,8
40665000	0,9	0,763	15,2	0,851	5,4	0,916	-1,7	0,798	11,3	1,441	-60,1
40680000	1,27	1,468	-15,6	1,49	-17,3	2,054	-61,7	1,244	2,1	2,223	-75,0
40710000	11,78	10,043	14,7	7,742	34,3	9,737	17,3	9,058	23,1	15,715	-33,4
40740000	14,36	15,31	-6,6	11,11	22,6	13,853	3,5	13,045	9,2	19,43	-35,3
40770000	2,29	2,099	8,4	2,024	11,6	2,066	9,8	2,052	10,4	1,822	20,4
40800001	16,72	15,477	7,4	15,67	6,3	18,008	-7,7	18,459	-10,4	23,87	-42,8
40810350	0,031	0,024	20,0	0,04*	-32,0	0,02	34,5	0,028	9,0	0,046	-50,5
40810800	0,09	0,136	-50,6	0,196*	-118,1	0,109	-20,7	0,093	-3,6	0,225	-150,4
40811100	0,22	0,283	-28,5	0,387*	-76,0	0,261	-18,4	0,249	-13,1	0,435	-97,7
40821998	0,09	0,098	-8,8	0,145*	-61,5	0,089	1,1	0,018	80,4	0,107	-19,4
40822995	0,2	0,224	-11,9	0,312*	-56,0	0,243	-21,7	0,062	68,9	0,259	-29,3
40823500	0,44	0,387	12,0	0,518*	-17,7	0,378	14,0	0,314	28,7	0,435	1,2
40850000	24,4	23,971	1,8	23,48*	3,8	25,669	-5,2	27,768	-13,8	33,767	-38,4

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

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 série 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* - (EUCLYDES et al., 2007).

Proporc. – método baseado na proporcionalidade de vazões específicas.

MCM – método baseado na conservação de massas.

Deflúvios – trabalho *Deflúvios Superficiais no Estado de Minas Gerais* – (SOUZA, 1993).

* Vazão estimada para uma área de drenagem fora do intervalo de recomendação, que varia de 259 a 8.571 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, 2005; LISBOA et al., 2008). Cruz e Tucci (2008) explicam que este comportamento está associado à 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 hídricas. 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 maior cuidado na utilização das estimativas das vazões.

No método Trad. 2 os valores de ER variaram de -118,1 a 34,3%, sendo estes observados nas estações Fazenda Pasto Grande (40810800; 54,7 km^2) e Belo Vale (40710000; 2.690 km^2), respectivamente. Novamente, a estação Fazenda Pasto Grande apresentou, em valor absoluto, o maior erro relativo, fato que está 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 Fazenda Laranjeiras (40810350; -32%).

Euclides et al. (2007) ressaltam que as equações de regionalização obtidas no *Atlas Digital das Águas de Minas* devem ser utilizadas respeitando-se 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 e 8.571 km², fato que pode explicar as piores estimativas por este método para as estações Fazenda Laranjeiras (40810350; 10,2 km²), Fazenda Pasto Grande (40810800; 54,7 km²), Jardim (40811100; 112,4 km²), Bom Jardim (40821998; 39,8 km²) e Mateus Leme - Aldeia (40822995; 89,4 km²). Desse modo, ao utilizar o método, certa cautela é aconselhável no caso da estimativa de vazões para áreas de drenagem inferiores a 259 km².

Os métodos Trad. 1 e Trad. 2 correspondem ao método de regionalização de vazões Tradicional (ELETROBRÁS, 1985a). 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 utilizados 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 ($Q_{7,10}$ 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* (EUCLYDES 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 oito estações, ou seja, apenas oito valores de $Q_{7,10}$ foram empregados para o ajuste das equações na bacia do rio Paraopeba, motivo pelo qual o método Trad. 1 apresentou duas regiões hidrologicamente homogêneas e o método Trad. 2 apenas uma.

No método baseado na proporcionalidade de vazões específicas verificaram-se erros entre -76,6 e 34,5%, nas estações Congonhas - Linígrafo (40579995) e Fazenda Laranjeiras (40810350), respectivamente. O maior erro evidenciado na estação Congonhas - Linígrafo está associado ao fato de a vazão para esta seção ser estimada considerando-se 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 à 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 Suaçuí - 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 -13,8 a 80,4%, nas estações Jardim (40811100) e Bom Jardim (40821998), respectivamente. Além de Bom Jardim, duas outras estações localizadas no ribeirão Mateus Leme, Mateus Leme - Aldeia (40822995) e Suzana (40823500) apresentaram erros relativos elevados de 68,9 e 28,7%, respectivamente.

Rodriguez (2008), ao analisar os coeficientes de escoamento e as vazões específicas referentes à vazão mínima com 95% de permanência (Q_{95}) para a bacia hidrográfica do rio Pará, afluente do rio São Francisco, verificou que embora o método baseado na conservação de massas tenha caracterizado menor amplitude de variação dos erros, apresentou grande variação de vazões específicas, sobretudo nas cabeceiras, ocasionando, portanto, maiores imprecisões.

A autora ainda, ao comparar este método com o Tradicional, verificou que o último tendeu a apresentar menores amplitudes de variações das vazões específicas. Enquanto o método Conservação de Massas basea-se no princípio da continuidade de vazões, a ocorrência de descontinuidade de vazões é uma das grandes limitações do método Tradicional. Tais descontinuidades ocorrem tanto entre regiões homogêneas, como, até mesmo, após as confluências de uma única região homogênea quando a equação ajustada para esta região não é linear.

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 trabalho *Deflúvios Superficiais no Estado de Minas Gerais* (Deflúvios) foram observados valores de ER entre -170,5 e 20,4%. A maior superestimativa ocorreu na estação São Brás do Suaçuí - Montante (40549998), enquanto a maior subestimativa ocorreu na estação Conceição do Itaguá (40770000).

Além da estação São Brás do Suaçuí - Montante, também se verifica erro relativo superior a 100% na estação Fazenda Pasto Grande (40810800; ER = -150,4%). Em diversas outras estações também foram evidenciados erros elevados, como nas estações Jardim (40811100; ER = -97,7%), Congonhas - Linígrafo (40579995; ER = -95,8%), Entre Rios de Minas (40680000; ER = -75%), Usina João Ribeiro (40665000; ER = -60,1%) e Fazenda Laranjeiras (40810350; ER = -50,5%).

Erros dessa magnitude podem implicar graves problemas na gestão de recursos hídricos, pois, nesse caso, está se superestimando em até mais de duas vezes as vazões mínimas, acarretando a 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 trabalho 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 expressivos, a ponto de comprometer a instalação de 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 da $Q_{7,10}$ pelos diferentes métodos, verifica-se que o trabalho Deflúvios 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 da base de dados e as ações antrópicas na bacia.

A utilização de dados mensais ocorre apenas neste método, uma vez que, comparativamente aos demais, somente o trabalho Deflúvios não utiliza 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-se este método não são sensíveis às 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. Por este motivo, as estimativas das vazões por este trabalho são mais representativas das condições naturais 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 $7,6 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$, visando atender a de cerca de 2,5 milhões de pessoas (COPASA, 2009).

O efeito das ações antrópicas nos recursos hídricos é um aspecto que merece destaque, a ser considerado não apenas em relação ao trabalho 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.

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 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 de 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.

Pela análise dos valores de ERM (Tabela 4) verifica-se que o melhor desempenho foi observado utilizando o método Trad. 1, que apresentou o menor

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

	Trad. 1	Trad. 2	Proporc.	MCM	Deflúvios
ERM	0,158	0,328	0,218	0,197	0,614
r^2	0,994	0,979	0,989	0,980	0,995
E'	0,940	0,886	0,915	0,893	0,661
c	0,995	0,980	0,992	0,983	0,959

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 série 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* - (EUCLYDES et al., 2007).

Proporc. – método baseado na proporcionalidade de vazões específicas.

MCM – método baseado na conservação de massas.

Deflúvios – trabalho *Deflúvios Superficiais no Estado de Minas Gerais* – (SOUZA,1993).

valor de ERM (0,158), seguido dos métodos Conservação de Massas (0,197), Proporcionalidade de Vazões (0,218), Trad. 2 (0,328) e o trabalho Deflúvios (0,614).

Verifica-se, em relação ao r^2 , que todos os métodos apresentaram valores elevados, com variação de 0,979 a 0,995. Apesar de todos eles 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 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.

Por este motivo, ao utilizar um modelo para regionalização de vazões não basta uma análise estatística do modelo. Há necessidade de uma análise física para verificação dos valores estimados.

Em relação ao coeficiente de eficiência ajustado, o qual varia de $-\infty$ a 1, 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' (0,940), enquanto o menor valor foi obtido pelo trabalho Deflúvios (0,661) seguido dos métodos Trad. 2 (0,886), Conservação de Massas (0,893) e Proporcionalidade de Vazões (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 0,959 a 0,995, sendo novamente o trabalho Deflúvios 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 de acordo com os critérios apresentados na Tabela 2, verifica-se que todos os métodos obtiveram o desempenho “Ótimo”. Tal resultado, considerando-se os valores do ERM, r^2 e E' , mostra que o critério de desempenho proposto por Camargo e Sentelhas (1997) não foi sensível ao classificar os métodos.

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 (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. Para fins de análise, os erros relativos percentuais negativos presentes nesta tabela correspondem à superestimativa das vazões estimadas, enquanto os positivos, às subestimativas.

Verifica-se, pelos 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 0,17 a 135,170 m^3s^{-1} nas estações Fazenda Laranjeiras (40810350) e Ponte da Taquara (40850000), respectivamente as de menor e maior área de drenagem da bacia.

No método Trad. 1 os valores de ER variaram de -26,4 a 15,4%, sendo estes observados, respectivamente, nas estações Congonhas - Linígrafo (613 km^2) e Entre Rios de Minas (469 km^2). 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; 613 km^2) e Bom Jardim (40821998; 39,8 km^2).

Tabela 5 – Erros relativos percentuais (ER) e valores de Q_{mid} , em m^3s^{-1} , obtidos a partir da média das vazões médias anuais das séries históricas e estimados por diferentes metodologias de regionalização de vazões

Código	Q_{mid} Obs	Trad. 1		Trad. 2		Proporc.		MCM		Deflúvios	
		Q_{mid} Est.	ER (%)	Q_{mid} Est.	ER (%)	Q_{mid} Est.	ER (%)	Q_{mid} Est.	ER (%)	Q_{mid} Est.	ER (%)
40549998	7,96	8,324	-4,6	8,214	-3,2	9,208	-15,7	8.417	-5,7	10,395	-30,6
40579995	8,95	11,309	-26,4	11,05	-23,5	12,657	-41,4	8.781	1,9	9,34	-4,4
40665000	5,36	4,93	8,0	4,948	7,7	5,528	-3,1	3.181	40,6	3,747	30,1
40680000	10,33	8,737	15,4	8,608	16,7	9,683	6,3	10.386	-0,5	7,348	28,9
40710000	55,54	47,046	15,3	43,882	21,0	43,355	21,9	45.780	17,6	45,522	18,0
40740000	63,15	68,047	-7,8	62,713	0,7	68,363	-8,3	65.676	-4,0	60,977	3,4
40770000	11,21	11,949	-6,6	11,654	-4,0	10,026	10,6	10.090	10,0	9,374	16,4
40800001	86,09	87,461	-1,6	88,1	-2,3	89,319	-3,8	92.599	-7,6	85,545	0,6
40810350	0,17	0,157	7,6	0,242*	-42,6	0,144	15,1	154	9,5	0,204	-20,0
40810800	0,81	0,842	-4,0	1,161*	-43,3	0,779	3,8	776	4,3	1,094	-35,1
40811100	1,59	1,731	-8,9	2,272*	-42,9	1,685	-6,0	1.652	-3,9	2,248	-41,4
40821998	0,53	0,613	-15,6	0,863*	-62,8	0,601	-13,4	556	-4,9	0,796	-50,2
40822995	1,35	1,377	-2,0	1,835*	-35,9	1,288	4,6	1.310	2,9	1,788	-32,4
40823500	2,26	2,356	-4,2	3,029*	-34,0	2,336	-3,4	2.316	-2,5	3,056	-35,2
40850000	135,17	134,271	0,7	131,394*	2,8	132,166	2,2	138.698	-2,6	129,845	3,9

Q_{mid} Obs – Q_{mid} 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_{mid} 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 $Q_{7,10}$ Est. as equações obtidas no trabalho *Atlas Digital das Águas de Minas* - (EUCLYDES et al., 2007).

Proporc. – método baseado na proporcionalidade de vazões específicas.

MCM – método baseado na conservação de massas.

Deflúvios – trabalho *Deflúvios Superficiais no Estado de Minas Gerais* – (SOUZA, 1993).

* Vazão estimada para uma área de drenagem fora do intervalo de recomendação, que varia de 259 a 8.571 km^2 .

Verifica-se, no entanto, que em relação às estimativas da $Q_{7,10}$ por este método, os erros relativos das estimativas da Q_{mid} 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_{mid} , 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 -62,8 a 16,7%, sendo estes observados nas estações Bom Jardim (40821998) e Entre Rios de Minas (40680000), respectivamente. Outras estações apresentaram erros relativos superiores a 30%, como a Fazenda Laranjeiras (40810350; -42,6%; 10,2 km^2); Fazenda Pasto Grande (40810800; -43,3%; 54,7 km^2), Jardim (40811100; -42,9%; 112,4 km^2), Mateus Leme - Aldeia (40822995; -35,9%; 89,4 km^2) e Suzana (40823500; -34%; 153 km^2), todas com áreas de drenagens inferiores ao limite de utilização da equação proposta por Euclides et al. (2007), que para estimativa da Q_{mid} na bacia do rio Paraopeba é de 259 a 8.571 km^2 . 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 km² e superiores a 8.571 km².

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 -41,4 e 21,9% nas estações Congonhas - Linígrafo (40579995) e Belo Vale (40710000), 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 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 Suaçuí - 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 -7,6 e 40,6%, nas estações Ponte Nova do Paraopeba (40800001) e Usina João Ribeiro (40665000), respectivamente.

No trabalho Deflúvios foram observados valores de ER entre -50,2 e 30,1%. O menor ER ocorreu na estação Bom Jardim (40821998), enquanto o maior erro ocorreu na estação Usina João Ribeiro (40665000).

Na Tabela 6 apresentam-se o erro relativo médio (ERM), os coeficientes de determinação (r^2) e eficiência ajustado (E') e o índice de confiança (c) 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 (0,069), seguido dos métodos Trad.1 (0,086), Proporcionalidade de Vazões (0,106), Trad. 2 e o trabalho Deflúvios (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 (0,946) e baseado na conservação de massas (0,944), pelo trabalho Deflúvios (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 trabalho Deflúvios os que apresentaram os maiores valores.

No desempenho dos métodos, de acordo com a classificação do índice de confiança, todos foram considerados “Ótimos”, 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.

Verificaram-se, pela análise dos resultados, para algumas seções, diferenças expressivas na estimativa das vazões pelos métodos de regionalização estudados sendo, portanto, necessário 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.

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

	Trad. 1	Trad. 2	Proporc.	MCM	Deflúvios
ERM	0,086	0,229	0,106	0,079	0,234
r^2	0,995	0,994	0,991	0,994	0,996
E'	0,954	0,946	0,934	0,944	0,937
c	0,996	0,995	0,993	0,995	0,996

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 $Q_{7,10}$ Est. as equações obtidas no trabalho *Atlas Digital das Águas de Minas* - (EUCLYDES et al., 2007).

Proporc. – método baseado na proporcionalidade de vazões específicas.

MCM – método baseado na conservação de massas.

Deflúvios – trabalho *Deflúvios Superficiais no Estado de Minas Gerais* – (SOUZA,1993).

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} .

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 trabalho Deflúvios, não sendo observado apenas no método baseado na conservação de massas.

Cabe ressaltar que as comparações entre os métodos basearam-se em análises estatísticas. Nas regiões de cabeceiras, a escolha do método deve se basear, além de critérios estatísticos, em análises físicas, a fim de verificar hidrologicamente o comportamento das vazões estimadas.

4. CONCLUSÕES

Conclui-se, pela análise dos resultados, que:

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

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

- Apesar de o trabalho *Deflúvios Superficiais no Estado de Minas Gerais* 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.

5. REFERÊNCIAS

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> Acesso em: 13 mai. 2009.

CRUZ, J. C. **Disponibilidade hídrica para outorga: avaliação de aspectos técnicos e conceituais**. Porto Alegre, RS: UFRGS, 2001. 189 f. Tese (Doutorado em Engenharia) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.

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 Brasileiras 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

MOREIRA, M. C. **Gestão de recursos hídricos: sistema integrado para otimização da outorga de uso da água**. Viçosa, MG: UFV. 2006. 97p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa.

NOVAES, L. F. **Modelo para a quantificação da disponibilidade hídrica na bacia do Paracatu**. Viçosa, MG: UFV, 2005. 104 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa.

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. **Metodologia para estimativa das demandas e das disponibilidades hídricas na bacia do rio Paracatu**. Viçosa, MG: UFV, 2004. 94 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa.

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. **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 : HIDROSISTEMAS, 1993.

STEDINGER, J. R.; VOGEL, R. M.; FOUFOULA-GEORGIU, E. Frequency analysis of extreme events. In: MAIDMENT, D. R. **Handbook of hydrology**. New York: MacGraw Hill, Inc., 1992.

WILLMOTT, C. J. On the validation of models. **Phys. Geogr.**, v.2, p.184-194, 1981.

ARTIGO II

**Influência da utilização de procedimentos manuais e automáticos
na estimativa do valor da $Q_{7,10}$ obtido com base no trabalho
*Deflúvios Superficiais no Estado de Minas Gerais***

RESUMO

O Instituto Mineiro de Gestão das Águas (IGAM), na análise do processo de concessão de outorgas, adota o trabalho *Deflúvios Superficiais no Estado de Minas Gerais* para a estimativa da vazão mínima de referência com sete dias de duração e período de retorno de 10 anos ($Q_{7,10}$). Na estimativa, realiza-se a sobreposição da área de drenagem da seção de interesse em relação aos mapas temáticos disponibilizados neste estudo, de modo que são necessárias a obtenção da área de drenagem e a delimitação dos intervalos de rendimentos específicos ao longo da área de contribuição. Dado que o IGAM atualmente não utiliza o modelo digital de elevação (MDE) da bacia do rio Paraopeba, de modo que a delimitação da área de drenagem da seção e os intervalos de rendimentos específicos são obtidos a partir de análises visuais, objetivou-se neste trabalho comparar os valores da $Q_{7,10}$ obtidos a partir da análise probabilística das séries históricas disponíveis para 15 estações fluviométricas da bacia do rio Paraopeba com os valores estimados utilizando-se o trabalho *Deflúvios Superficiais no Estado de Minas Gerais* a partir de procedimentos manuais e automáticos de delimitação de áreas de drenagem e dos intervalos de rendimentos específicos em sistemas de informações geográficas. Para cada uma das estações foi estimado, considerando o procedimento automático, o valor do rendimento característico equivalente (R_{me}) para então convertê-lo na $Q_{7,10}$. Para o procedimento realizado manualmente foram obtidos juntamente ao IGAM os valores de R_{me} e $Q_{7,10}$ para cada uma das seções do estudo. De posse dos valores do R_{me} foram calculados o desvio relativo percentual entre os valores obtidos a partir dos dois procedimentos, enquanto o erro relativo percentual foi calculado entre os valores de $Q_{7,10}$ obtidos a partir da análise probabilística das séries históricas e das vazões estimadas a partir dos dois procedimentos. Na análise dos resultados verificaram-se diferenças expressivas na estimativa da $Q_{7,10}$ a partir dos dois procedimentos, tendo o procedimento automático apresentado melhores estimativas da $Q_{7,10}$ para as seções de estudo da bacia do rio Paraopeba.

Palavras-chave: regionalização de vazões, outorga, gestão de recursos hídricos.

ABSTRACT

The influence of the use of manual and automatic procedures for estimating the $Q_{7,10}$ value obtained based on “Deflúvios Superficiais no Estado de Minas Gerais”

The *Instituto Mineiro de Gestão das Águas* (IGAM), in the analysis of the process of conceding grants, adopts *Deflúvios Superficiais no Estado de Minas Gerais* for estimating the minimum flow reference with a seven-day duration and the return period of ten years ($Q_{7,10}$). In the estimation, the drainage area of the section of interest is superposed regarding the thematic maps made available in the present study, so that it is necessary to obtain the drainage area and the delimitation of the specific yield intervals throughout the area of contribution. Given that IGAM currently does not use the digital elevation model (DEM) of the Paraopeba river basin, so that the delimitation of the drainage area and the specific yield intervals are obtained from visual analyses, this paper aimed to compare the $Q_{7,10}$ values obtained from the probabilistic analysis of the historic series available for 15 fluviometric stations of the Paraopeba river basin with the values estimated using *Deflúvios Superficiais no Estado de Minas Gerais* from manual and automatic procedures of delimitation of drainage areas and specific yield intervals in geographic information systems. For each of the stations, the equivalent characteristic yield value (R_{me}) was estimated, considering the automatic procedure, and then converted to $Q_{7,10}$. For the manual procedure, the R_{me} and $Q_{7,10}$ values were obtained from IGAM for each of the sections in study. Having obtained the R_{me} values, the percentage relative deviation was calculated among the values obtained from those two procedures, while the percentage relative error was calculated among the $Q_{7,10}$ values obtained from the probabilistic analysis of the historic series and of the estimated outflows from those two procedures. In the analysis of the results, great differences were found in the estimation of $Q_{7,10}$ from those two procedures, having the automatic procedure shown the best $Q_{7,10}$ estimations for the study sections of the Paraopeba river basin.

Key-words: regionalization of outflows, water right, water resources management.

1. INTRODUÇÃO

A outorga é um dos instrumentos da Política Nacional de Recursos Hídricos que confere a seu detentor, por um período preestabelecido, o direito de uso de determinada quantidade de água, condicionado à sua disponibilidade, de tal modo que assegure ao gestor o controle quantitativo e qualitativo do seu uso, ao mesmo tempo que garante ao usuário o direito de uso da água de forma pessoal e intransferível.

O Instituto Mineiro de Gestão das Águas (IGAM), órgão gestor de recursos hídricos do Estado de Minas Gerais, 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 dos processos de concessão de outorga, o conhecimento da disponibilidade hídrica é a informação básica para a tomada de decisão. Para a estimativa da $Q_{7,10}$ o IGAM adota 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 Gerias (COPASA).

O estudo permite a estimativa das vazões superficiais médias e extremas para qualquer seção de um curso de água do Estado de Minas Gerais, bem como a estimativa do potencial de regularização dos cursos d'água por meio de reservatórios. Apresenta, ainda, um acervo consistido de dados fluviométricos

mensais, formado a partir de 252 seções de informações hidrométricas distribuídas por todo Estado.

A obtenção da $Q_{7,10}$ utilizando este trabalho é realizada a partir de consultas a mapas temáticos das tipologias regionais homogêneas e do rendimento específico médio mensal, referente às contribuições unitárias mínimas com 10 anos de recorrência.

Nas consultas, é necessário analisar a sobreposição da área de drenagem da seção de interesse em relação aos mapas temáticos. Neste processo de sobreposição criam-se diversos intervalos de rendimentos específicos ao longo da bacia, os quais, a partir de sua média ponderada, em que a área de cada intervalo é o fator de ponderação, permitem a obtenção do rendimento característico equivalente da bacia controlada pela seção de interesse, que então é convertido para a vazão de interesse. Em todo este processo é imperativo o conhecimento da área de drenagem da seção de interesse, bem como a área de cada intervalo de rendimento específico, as quais podem ser facilmente obtidas a partir do modelo digital de elevação da bacia.

O desenvolvimento de modelos digitais de elevação (MDE) e de técnicas mais precisas de delimitação de bacias hidrográficas propiciou o uso dos sistemas de informações geográficas (SIG) para a manipulação e obtenção automática das características físicas das bacias de drenagem (FURTADO, 1998; BAENA, 2002; CHAVES, 2002). As vantagens da automação em relação aos procedimentos manuais são a maior eficiência e confiabilidade dos processos, a reprodutibilidade dos resultados e a possibilidade de armazenamento e compartilhamento dos dados digitais (CHAVES, 2002).

Dessa forma, considerando que o IGAM atualmente não utiliza o MDE da bacia do rio Paraopeba, de modo que a delimitação da área de drenagem da seção e os intervalos de rendimentos específicos são obtidos a partir de análises visuais, objetivou-se neste trabalho comparar os valores de $Q_{7,10}$ obtidos a partir da análise probabilística das séries históricas com os valores estimados utilizando-se o trabalho *Deflúvios Superficiais no Estado de Minas Gerais* a partir de procedimentos manuais e automáticos de delimitação de áreas de drenagem e dos intervalos de rendimentos específicos em sistemas de informações geográficas.

2. MATERIAL E MÉTODOS

2.1. Área de estudo

O rio Paraopeba nasce no município de Cristiano Ottoni (MG) e percorre aproximadamente 510 km, até sua foz no lago da represa de Três Marias, no município de Felixlândia (MG) (SCHVARTZMAN et al., 2002). Com área de drenagem de aproximadamente 13.300 km², a bacia do rio Paraopeba representa 2,3% da área do Estado de Minas Gerais. Situada na região do Alto São Francisco (Figura 1), a bacia contribui com cerca de 9,1% do volume médio escoado na foz do rio São Francisco (PEREIRA, 2004).

Em relação às outorgas emitidas na bacia, no mês de setembro de 2008 o banco de dados do IGAM, vinculado ao Sistema Integrado de Informações Ambientais (SIAM), possuía 385 outorgas superficiais, sendo 255 destas vigentes, assim distribuídas de acordo com sua finalidade: 84 – irrigação; 47 – consumo agroindustrial; 31 – consumo humano e dessedentação de animais; 15 – extração mineral; 12 – outras classificações; sendo as 66 outorgas restantes sem classificação quanto à sua finalidade.

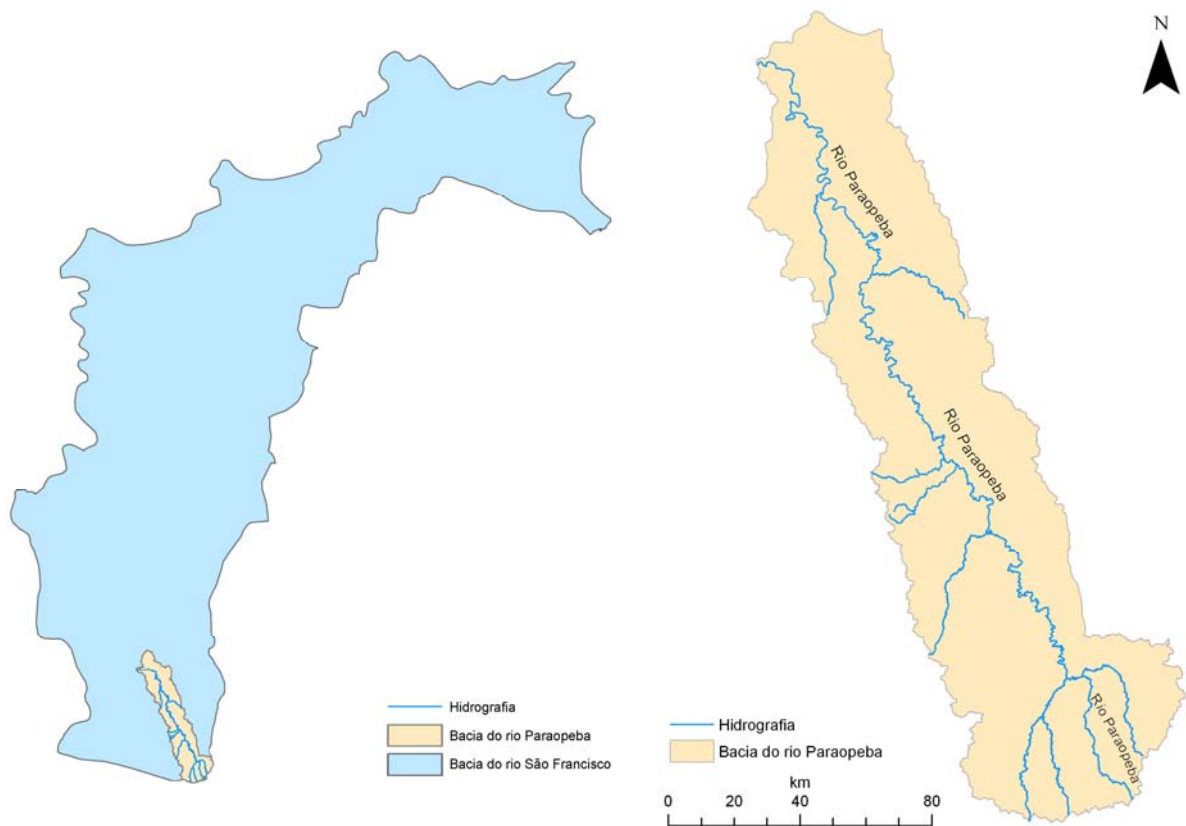


Figura 1 – Localização da bacia do rio Paraopeba.

2.2. Modelo digital de elevação

O modelo digital de elevação (MDE) da bacia do rio Paraopeba foi obtido do trabalho de Lemos (2006), a partir da determinação da foz do rio Paraopeba e posterior processamento, em ambiente de sistemas de informações geográficas, identificando sua área de contribuição (Figura 2b).

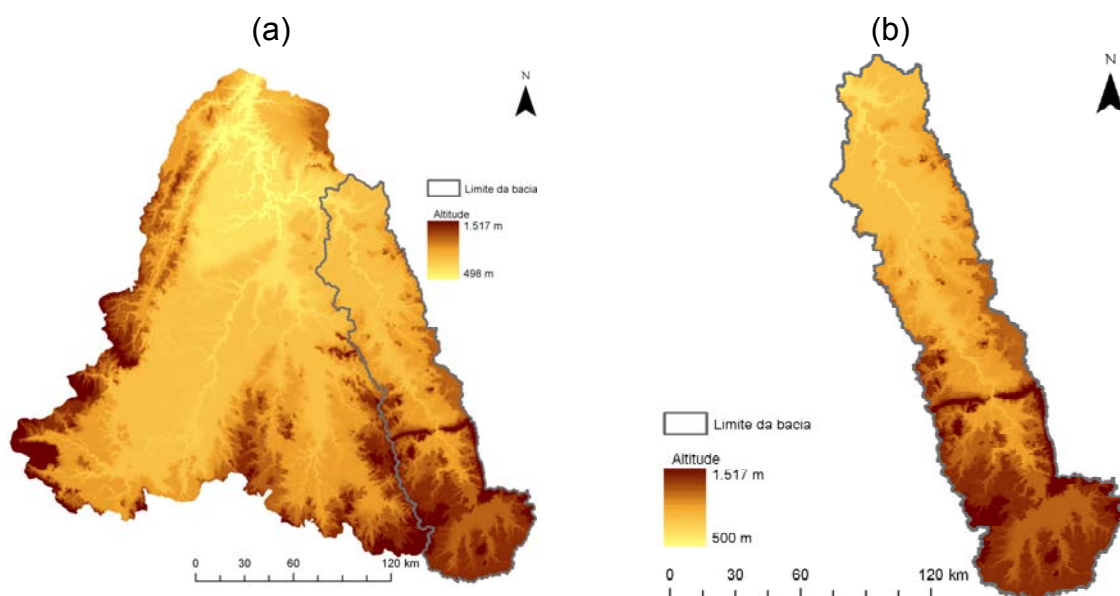


Figura 2 – Modelo digital de elevação: (a) bacia do rio São Francisco a montante do reservatório de Três Marias; e (b) bacia do rio Paraopeba.

2.3. Dados fluviométricos

Com vistas à comparação dos valores de $Q_{7,10}$, obtidos a partir da análise probabilística das séries históricas, com os estimados com base no trabalho *Deflúvios Superficiais no Estado de Minas Gerais*, utilizando-se procedimentos manuais e automáticos de delimitação de áreas de drenagem e dos intervalos de rendimentos específicos em sistemas de informações geográficas, 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.

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.

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 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.

Tabela 1 – Estações fluviométricas da bacia do rio Paraopeba utilizadas no estudo

Código	Estação	Latitude (Sul)	Longitude (Oeste)	Área de drenagem (km ²)	Curso d'água
40549998	São Brás do Suaçuí - 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 Camapuã
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 Itaguá	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

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).

2.4. Estimativa da $Q_{7,10}$ com base no trabalho *Deflúvios superficiais no Estado de Minas Gerais*

A metodologia de construção do trabalho *Deflúvios superficiais no Estado de Minas Gerais* baseou-se na utilização de uma base de dados mensal. Os dados hidrométricos do Estado foram compilados para 252 seções de informações considerando-se 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 a estimativa 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.

2.4.1. Procedimento em ambiente SIG

Para a obtenção da $Q_{7,10}$, a partir de operações em ambiente de SIG, foram digitalizados, na área correspondente à bacia hidrográfica do rio Paraopeba, os mapas temáticos das tipologias regionais homogêneas e do rendimento específico médio mensal, referente às contribuições unitárias mínimas com 10 anos de recorrência (Figura 3).

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

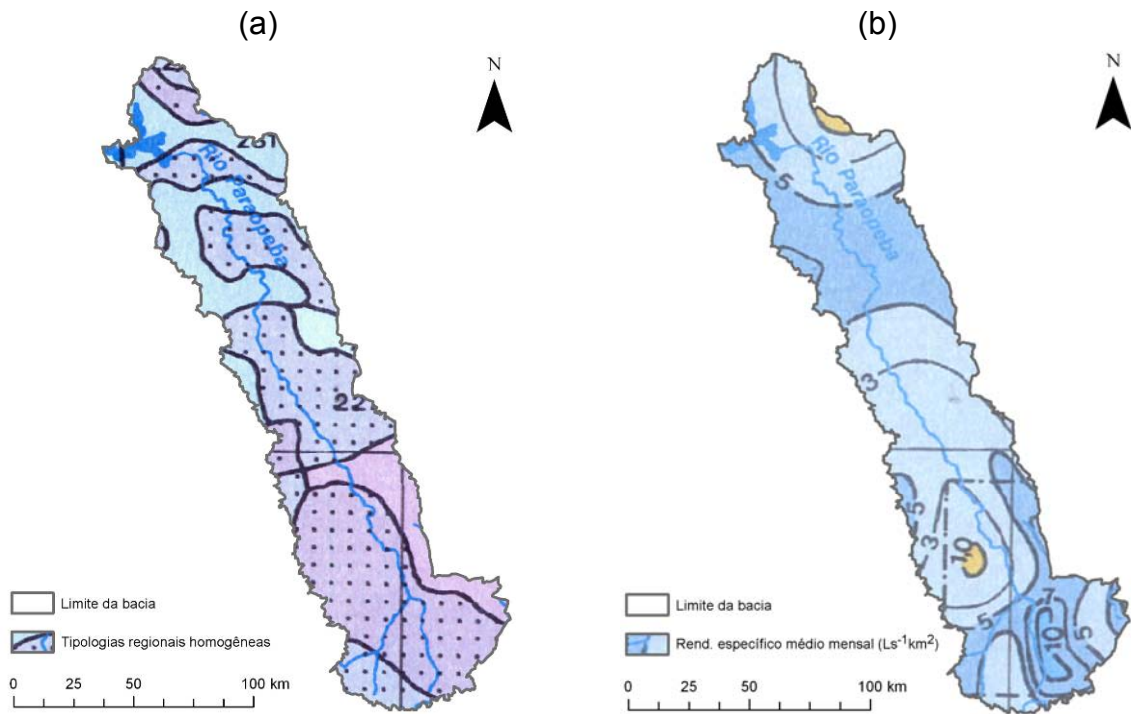


Figura 3 – Mapas temáticos digitalizados do trabalho *Deflúvios Superficiais no Estado de Minas Gerais*: (a) tipologias regionais homogêneas; e (b) rendimento específico médio mensal, referente às contribuições unitárias mínimas com 10 anos de recorrência.

Para tanto, realizou-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 (Figura 3b). Conforme apresenta Souza (1993), este método pode ser sintetizado pela equação

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

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

$$Q_m = 0,001 Rm_e A \quad (2)$$

em que:

$$\begin{aligned} Q_m &= \text{vazão característica da seção de interesse, m}^3\text{s}^{-1}; \text{ e} \\ A &= \text{área de drenagem da seção fluvial de interesse, km}^2. \end{aligned}$$

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.

Tendo em vista que as funções de inferência apresentam formas diferenciadas para cada uma das tipologias regionais homogêneas (Figura 3a), 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

$$Q_{7,10} = F_{7,10} Q_m \quad (3)$$

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

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

2.4.2. Procedimento manual

Na obtenção da $Q_{7,10}$ a partir da delimitação da área de drenagem da seção de interesse e dos intervalos de rendimentos específicos obtidos por análises visuais, conforme realizado no IGAM, utiliza-se um programa computacional de sistemas de informações geográficas para identificar o ponto de interesse sobre a hidrografia da bacia, conforme ilustrado na Figura 4.

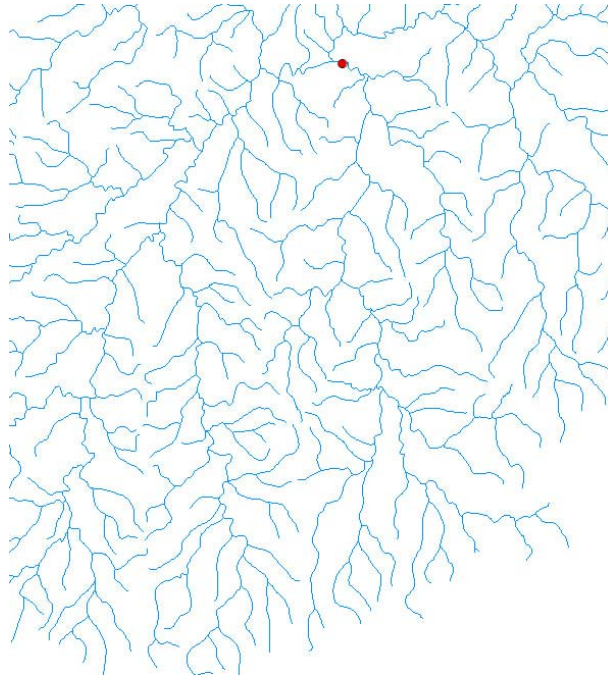


Figura 4 – Trecho da hidrografia da bacia do rio Paraopeba com a identificação de uma seção de interesse.

Identificada a seção de interesse, tendo em vista a não utilização de um modelo digital de elevação (MDE) da bacia do rio Paraopeba, que permitiria a delimitação e o cálculo automático da área de contribuição da seção, procede-se à delimitação manual da área de drenagem a partir da análise visual da direção de escoamento dos segmentos da hidrografia e da hipsometria, como apresentado na Figura 5.

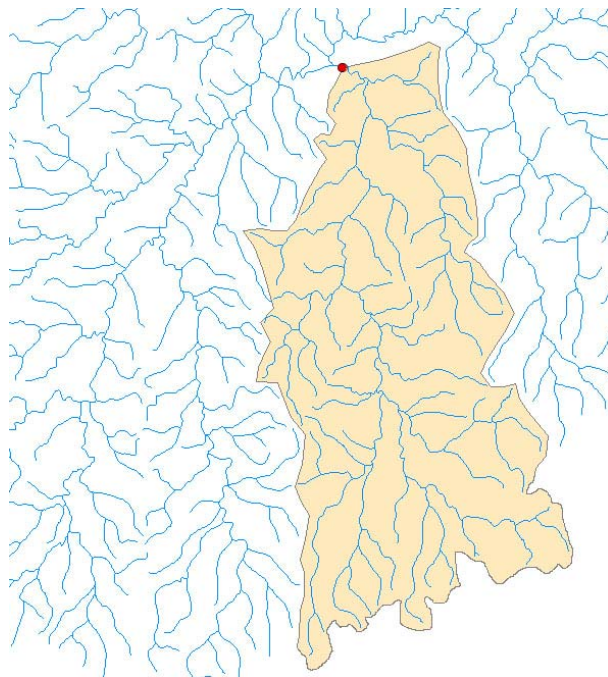


Figura 5 – Trecho da hidrografia da bacia do rio Paraopeba com a delimitação manual da área de contribuição da seção de interesse.

A partir da delimitação manual da área de contribuição da seção de interesse, adiciona-se o tema rendimento específico médio mensal, referente às contribuições unitárias mínimas com 10 anos de recorrência. Feita a sobreposição, conforme se apresenta na Figura 6, procede-se ao levantamento das isolinhas que sobrepõem a área de drenagem da seção de interesse, as quais formam diversos intervalos contidos na bacia (Figura 7).

Dada a necessidade de se conhecer o valor da área de cada intervalo para a obtenção do rendimento característico da bacia, conforme apresenta-se na Equação 1, e considerando a não utilização de um MDE que permitiria, de forma automática, a obtenção da área de cada intervalo, realiza-se uma estimativa empírica do valor do Rm_e , considerando-se a predominância dos diversos intervalos.

A conversão do Rm_e na vazão característica (Q_m) é então procedida conforme a Equação 2. Na conversão da Q_m da seção de interesse na $Q_{7,10}$ utiliza-se a Equação 3, na qual é necessário obter o fator de proporção fornecido pela função de inferência regionalizada ($F_{7,10}$). Este fator, obtido a partir de consultas ao mapa de tipologias homogêneas, pelo fato de variar de 0,88 a 0,92, tem sido adotado com o valor constante de 0,9.

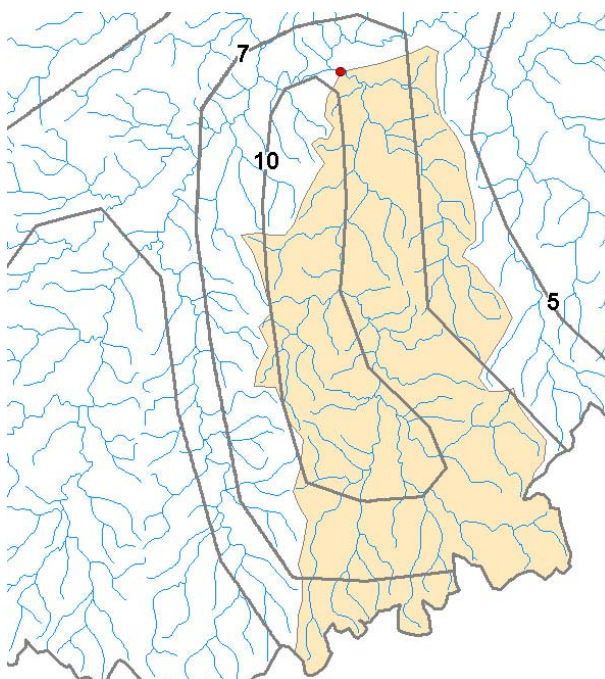


Figura 6 – Trecho da hidrografia da bacia do rio Paraopeba com sobreposição do tema rendimento específico médio mensal, referente às contribuições unitárias mínimas com 10 anos de recorrência, à área de drenagem da seção de interesse.

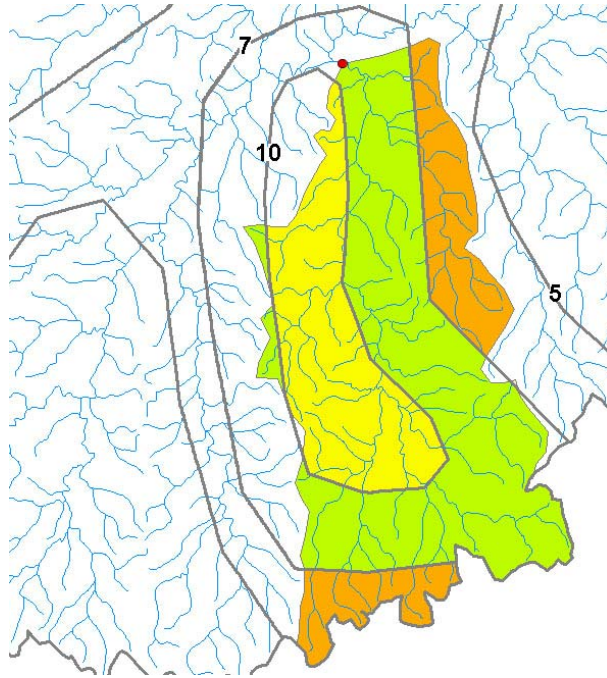


Figura 7 – Área de drenagem da seção de interesse da bacia do rio Paraopeba com os intervalos de rendimento específico médio mensal, referente às contribuições unitárias mínimas com 10 anos de recorrência.

Para a obtenção da $Q_{7,10}$ utilizando este procedimento, a fim de verificar o que atualmente se tem utilizado no Estado de Minas Gerais, solicitou-se ao IGAM a estimativa dos valores do Rm_e e da $Q_{7,10}$ para as seções correspondentes as 15 estações fluviométricas utilizadas neste estudo.

Tendo em vista que os valores obtidos pelo procedimento manual não são possíveis de ser reproduzidos, dada a subjetividade na ponderação dos intervalos de rendimentos e, conseqüentemente, na estimativa do valor do Rm_e , optou-se por trabalhar com os dados fornecidos pelo IGAM. Dessa forma, os valores apresentados nos resultados correspondem aos encaminhados pelo IGAM, em resposta a solicitação.

2.5. Comparação entre os procedimentos para estimativa da $Q_{7,10}$

Considerando que o valor de Rm_e corresponde ao dado básico para a obtenção da $Q_{7,10}$ com o trabalho *Deflúvios superficiais no Estado de Minas Gerais*, inicialmente foram comparados os valores de Rm_e obtidos a partir de procedimentos manuais e automáticos de delimitação de áreas de drenagem e dos intervalos de rendimentos específicos em sistemas de informações geográficas. Para tanto, foi utilizado o desvio relativo percentual dos valores de Rm_e , dado por

$$DP = 100 \times \frac{Rm_e \text{Aut.} - Rm_e \text{Manual}}{Rm_e \text{Aut.}} \quad (4)$$

em que:

DP = desvio relativo percentual, %;

$Rm_e \text{Aut.}$ = rendimento característico equivalente obtido a partir de procedimentos automáticos de delimitação de áreas de drenagem e dos intervalos de rendimentos específicos em sistemas de informações geográficas, $Ls^{-1}km^2$; e

$Rm_e \text{Manual}$ = rendimento característico equivalente obtido a partir de procedimentos manuais, $Ls^{-1}km^2$.

De posse dos valores de $Q_{7,10}$ obs obtidos a partir da análise probabilística das séries históricas de Q_7 de cada uma das 15 estações fluviométricas utilizadas no estudo ($Q_{7,10}$ obs), e das vazões estimadas a partir do trabalho *Deflúvios Superficiais no Estado de Minas Gerais* ($Q_{7,10}$ est) utilizando os procedimentos manuais e automáticos de delimitação de áreas de drenagem e dos intervalos de rendimentos específicos em ambiente de sistemas de informações geográficas, avaliou-se a precisão dos procedimentos por meio da aplicação do erro relativo (ER) e do erro relativo médio (ERM) entre a $Q_{7,10}$ obs e a $Q_{7,10}$ est, dados por

$$ER = 100 \times \frac{Q_{7,10 \text{ obs}} - Q_{7,10 \text{ est}}}{Q_{7,10 \text{ obs}}} \quad (5)$$

em que:

ER = erro relativo, %;

$Q_{7,10 \text{ obs}}$ = vazão obtida a partir da análise probabilística da série histórica no posto fluviométrico, m^3s^{-1} ; e

$Q_{7,10 \text{ est}}$ = vazão estimada por procedimentos manuais e automáticos, m^3s^{-1} .

$$ERM = \frac{100}{N} \times \left[\sum_{i=1}^N \left| \frac{Q_{7,10 \text{ obs}} - Q_{7,10 \text{ est}}}{Q_{7,10 \text{ obs}}} \right| \right] \quad (6)$$

em que:

ERM = erro relativo médio, %; e

N = número de seções correspondentes às estações fluviométricas utilizadas no estudo, adimensional.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Na Tabela 2 apresentam-se os desvios relativos percentuais e os rendimentos característicos equivalentes (Rm_e) das seções correspondentes as 15 estações fluviométricas da bacia do rio Paraopeba utilizadas no estudo, obtidos a partir de procedimentos manuais e automáticos em sistemas de informações geográficas.

Verifica-se que os valores dos rendimentos característicos equivalentes obtidos a partir de procedimentos automáticos em sistemas de informações geográficas ($Rm_{eAut.}$) variaram de 3 a 9,9 $Ls^{-1}km^2$ nas estações Bom Jardim (40821998) e

Tabela 2 – Desvios relativos percentuais (DP) e rendimentos característicos equivalente (Rm_e) obtidos a partir de procedimentos manuais e automáticos em sistemas de informações geográficas

Código	$Rm_{eAut.}$ ($Ls^{-1}km^2$)	$Rm_{eManual}$ ($Ls^{-1}km^2$)	DP (%)
40549998	9,9	15,0	-51,4
40579995	5,4	7,5	-39,0
40665000	6,2	4,4	28,8
40680000	5,3	4,5	14,5
40710000	6,5	3,0	53,8
40740000	5,5	2,6	52,5
40770000	3,1	2,4	23,1
40800001	4,7	4,0	14,3
40810350	5,0	5,7	-14,0
40810800	4,6	5,1	-11,4
40811100	4,3	4,8	-11,6
40821998	3,0	4,0	-33,3
40822995	3,2	4,2	-30,7
40823500	3,2	4,0	-26,8
40850000	4,3	5,1	-18,5
Média	4,9	5,1	

São Brás do Suaçuí - Montante (40549998), respectivamente, enquanto os valores de Rm_e obtidos a partir de procedimentos manuais (Rm_e Manual) variaram de 2,4 a $15 \text{ Ls}^{-1}\text{km}^2$ nas estações Conceição do Itaguá (40770000) e São Brás do Suaçuí - Montante, respectivamente. Estes valores mostram que a amplitude de variação dos valores estimados por procedimentos manuais ($12,6 \text{ Ls}^{-1}\text{km}^2$) foi superior à dos valores estimados por procedimentos automatizados em SIG ($6,9 \text{ Ls}^{-1}\text{km}^2$).

Nas estações Belo Vale (40710000) e Alberto Flores (40740000), os valores estimados de Rm_e Aut. correspondem a mais de duas vezes os valores de Rm_e Manual. Na Figura 8 apresenta-se a sobreposição da área de contribuição das estações Belo Vale e Alberto Flores em relação ao mapa temático de rendimento específico médio mensal, referente às contribuições unitárias mínimas com 10 anos de recorrência.

Verifica-se na Figura 8a, referente à estação Belo Vale, que os valores das isolinhas na área de drenagem da seção são superiores ao valor de Rm_e Manual ($3 \text{ Ls}^{-1}\text{km}^2$), de modo que o valor estimado por procedimentos manuais encontra-se fora das isolinhas da região. O mesmo pode ser observado em relação à estação Alberto Flores (Figura 8b), uma vez que para esta foi estimado, por procedimentos manuais, Rm_e de $2,6 \text{ Ls}^{-1}\text{km}^2$, enquanto as isolinhas da área de drenagem são superiores a este valor.

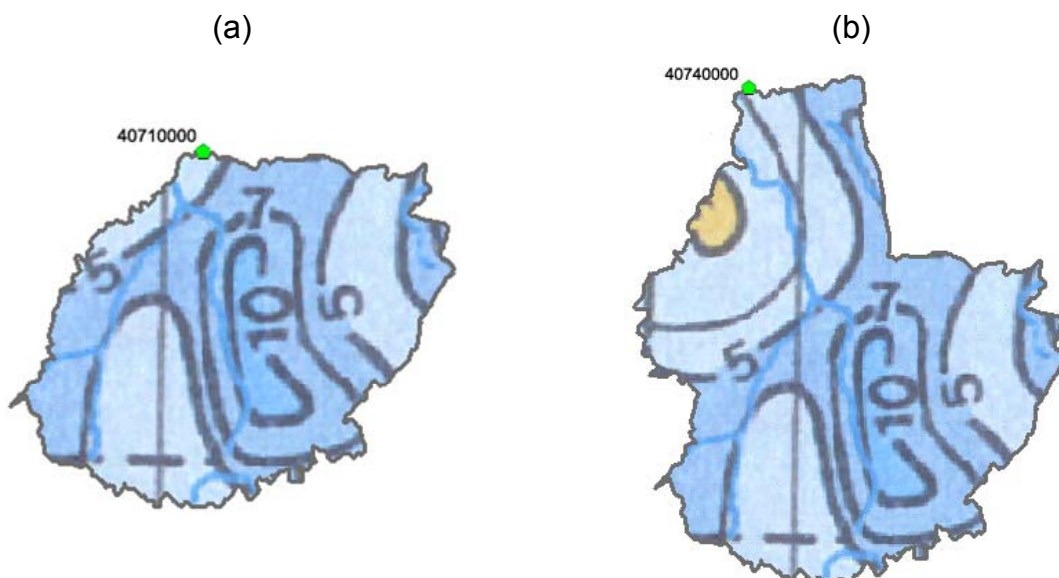


Figura 8 – Sobreposição da área de contribuição das estações Belo Vale (40710000) (a) e Alberto Flores (40740000) (b) em relação ao mapa temático de rendimento específico médio mensal, referente às contribuições unitárias mínimas com 10 anos de recorrência.

De maneira análoga às estações Belo Vale e Alberto Flores, na estação São Brás do Suaçuí - Montante (40549998) obteve-se Rm_e Manual correspondente a $15 \text{ Ls}^{-1}\text{km}^2$, enquanto as isolinhas da área de drenagem desta seção têm predominância de valores inferiores.

Observa-se nos valores dos desvios relativos percentuais que estes variaram de -51,4 a 53,8%, respectivamente nas estações São Brás do Suaçuí - Montante (40549998) e Belo Vale (40710000).

De modo geral, as estações que apresentaram menores desvios foram as que possuíam menores áreas de drenagem e que, por este motivo, possuíam menor número de isolinhas, implicando, conseqüentemente, menor número de intervalos. Dessa forma, com menor número de intervalos, a realização da ponderação para obtenção do Rm_e pelo procedimento manual torna-se menos subjetiva e imprecisa. Exceção deve ser feita à estação Ponte da Taquara, que possui área de drenagem de 8.720 km^2 , sendo a estação mais a jusante da bacia, e apresenta desvio relativo percentual baixo (-18,5%) em relação às demais.

Desvios relativos elevados na obtenção do Rm_e Manual, como verificados nas estações Belo Vale, Alberto Flores e São Brás do Suaçuí - Montante, podem estar associados a erros no posicionamento da seção de interesse na bacia, na manipulação incorreta do mapa de rendimento característico equivalente, ou, ainda, devido a falhas na ponderação da área dos intervalos em relação aos valores das isolinhas.

Tendo em vista que o Rm_e é o dado básico para a estimativa da $Q_{7,10}$, pode-se afirmar que as diferenças evidenciadas na estimativa do Rm_e podem causar imprecisões na obtenção dos valores de $Q_{7,10}$, implicando possíveis problemas na gestão dos recursos hídricos na bacia, uma vez que estes valores são utilizados na análise de processos de concessão de outorga no Estado de Minas Gerais.

Outro problema associado à estimativa do Rm_e pelo procedimento manual é a reprodutibilidade destes dados, uma vez que a obtenção das áreas de drenagem da seção de interesse e a ponderação dos rendimentos em relação aos intervalos formados com a sobreposição das isolinhas de rendimento característico equivalente são feitas de modo subjetivo.

Como aponta Chaves (2002), as vantagens da automação em relação aos procedimentos manuais são a maior eficiência e confiabilidade dos processos, a

reprodutibilidade dos resultados e a possibilidade de armazenamento e compartilhamento dos dados digitais.

A adoção de procedimentos automáticos, além de garantir a reprodutibilidade dos resultados, torna possível o processamento rápido e eficiente dos dados necessários à estimativa da $Q_{7,10}$. Deve-se ter em mente, no entanto, que a eficiência da extração das informações está diretamente relacionada com a qualidade do modelo digital de elevação da bacia. De acordo com Baena (2002), o MDE deve representar o relevo de forma fidedigna e assegurar a convergência do escoamento superficial para a rede de drenagem mapeada, garantindo, assim, a sua consistência hidrológica.

Na Tabela 3 estão apresentados os erros relativos percentuais e os valores da $Q_{7,10}$, em m^3s^{-1} , das 15 estações fluviométricas da bacia do rio Paraopeba utilizadas no estudo, obtidos a partir da análise probabilística das séries históricas e estimados a partir de procedimentos manuais e automáticos em sistemas de informações geográficas.

Pelo procedimento automático em sistemas de informações geográficas foram observados valores de ER entre -170,5 e 20,4% nas estações São Brás do Suaçuí - Montante (40549998) e Conceição do Itaguá (40770000), respectivamente.

Tabela 3 – Erros relativos percentuais (ER) e valores de $Q_{7,10}$, em m^3s^{-1} , obtidos a partir da análise probabilística das séries históricas ($Q_{7,10}$ obs) e estimados a partir de procedimentos manuais e automáticos em sistemas de informações geográficas

Código	$Q_{7,10}$ Obs	Procedimentos automáticos		Procedimentos manuais	
		$Q_{7,10}$ Est.	ER (%)	$Q_{7,10}$ Est.	ER (%)
40549998	1,47	3,976	-170,5	6,021	-309,6
40579995	1,52	2,977	-95,8	4,138	-172,2
40665000	0,9	1,441	-60,1	1,026	-14,0
40680000	1,27	2,223	-75,0	1,899	-49,6
40710000	11,78	15,715	-33,4	7,263	38,3
40740000	14,36	19,43	-35,3	9,231	35,7
40770000	2,29	1,822	20,4	1,402	38,8
40800001	16,72	23,87	-42,8	20,448	-22,3
40810350	0,031	0,046	-50,5	0,052	-71,6
40810800	0,09	0,225	-150,4	0,251	-179,0
40811100	0,22	0,435	-97,7	0,486	-120,7
40821998	0,09	0,107	-19,4	0,143	-59,2
40822995	0,2	0,259	-29,3	0,338	-69,0
40823500	0,44	0,435	1,2	0,551	-25,2
40850000	24,4	33,767	-38,4	40,025	-64,0
ERM			0,61		0,85

ERM – Erro relativo médio.

Além da estação São Brás do Suaçuí - Montante, verifica-se erro relativo superior a 100% na estação Fazenda Pasto Grande (40810800; ER = -150,4%). Em diversas outras estações também foram evidenciados erros elevados, como nas estações Jardim (40811100; ER = -97,7%), Congonhas - Linígrafo (40579995; ER = -95,8%), Entre Rios de Minas (40680000; ER = -75%), Usina João Ribeiro (40665000; ER = -60,1%) e Fazenda Laranjeiras (40810350; ER = -50,5%).

Erros dessa magnitude podem implicar graves problemas na gestão de recursos hídricos, pois nesse caso está se superestimando em até mais de duas vezes as vazões mínimas, acarretando superestimativa dos valores passíveis de ser outorgados.

Por outro lado, Santana et al. (2005) verificaram em 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.

No procedimento de estimativa da $Q_{7,10}$ realizado manualmente, verificam-se erros entre -309,6 e 38,8% nas estações fluviométricas São Brás do Suaçuí - Montante (40549998) e Conceição do Itaguá (40770000), respectivamente.

Nas demais estações também foram verificados valores elevados de ER, como na Fazenda Pasto Grande (40810800; ER = -179%), Congonhas - Linígrafo (40579995; ER = -172,2%), Jardim (40811100; ER = -120,7%), Fazenda Laranjeiras (40810350; ER = -71,6%), Mateus Leme - Aldeia (40822995; ER = -69%), Ponte da Taquara (40850000; ER = -64,0%) e Bom Jardim (40821998; ER = -59,2%).

Comparando os valores de ER obtidos por procedimentos automatizados e manuais, verifica-se que em apenas três estações o ER do procedimento manual foi menor em relação ao automatizado em SIG, sendo estes observados nas estações Usina João Ribeiro (40665000), Entre Rios de Minas (40680000) e Ponte Nova do Paraopeba (40800001), de modo que se pode afirmar que a utilização do procedimento manual, além de não garantir a reprodutibilidade da estimativa das vazões, resulta estimativas menos precisas da $Q_{7,10}$.

Evidenciam-se, em algumas seções, diferenças expressivas na estimativa das vazões pelos procedimentos manuais e automáticos. Pelos valores apresentados na Tabela 3, observa-se que melhor estimativa da $Q_{7,10}$ na bacia do rio Paraopeba é obtida pelo procedimento automático em ambiente de SIG.

Considerando os valores do erro relativo médio (ERM), verifica-se que o melhor desempenho na estimativa da $Q_{7,10}$ foi observado no procedimento automático, que apresentou o menor valor de ERM (0,61) em comparação ao procedimento manual (0,85).

Verifica-se, para a bacia do rio Paraopeba, que as vazões estimadas utilizando o trabalho *Deflúvios Superficiais no Estado de Minas Gerais*, aplicado tanto a partir de procedimentos manuais quanto automáticos em sistemas de informações geográficas, de modo geral, superestimaram-se os valores de $Q_{7,10}$. Tal fato pode conduzir a problemas na gestão de recursos hídricos na bacia, pois, nesse caso, considerando que o IGAM utiliza estes valores na análise do processo de outorga, permite-se a concessão de vazões superiores ao permissível, podendo, em alguns casos, gerar conflitos, devido ao não atendimento aos usos outorgados.

4. CONCLUSÕES

Conclui-se, pela análise dos resultados, que:

- Diferenças expressivas foram observadas nos valores do Rm_e e da $Q_{7,10}$ obtidos a partir de procedimentos manuais e automáticos de delimitação de áreas de drenagem e dos intervalos de rendimentos específicos em sistemas de informações geográficas; e

- O procedimento automático de delimitação de áreas de drenagem e dos intervalos de rendimentos específicos em sistemas de informações geográficas foi o que apresentou melhores estimativas da $Q_{7,10}$ para as seções de estudo da bacia do rio Paraopeba.

5. REFERÊNCIAS

BAENA, L. G. N. **Regionalização de vazões para a bacia do rio Paraíba do Sul, a montante de Volta Redonda, a partir de modelo digital de elevação hidrologicamente consistente**. Viçosa, MG: UFV, 2002. 135 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa.

CHAVES, M. de A. **Modelos digitais de elevação hidrologicamente consistentes para a bacia Amazônica**. Viçosa, MG: UFV, 2002. 115 f. Tese (Doutorado em Ciência Florestal) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa.

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).

FURTADO, A. M. **Metodologia para extração de informações hidrológicas a partir de um modelo digital de elevação utilizando sistemas de informações geográficas**. Belo Horizonte, MG: IGC/UFMG/CETEC, 1998. 42 f. Monografia (Especialização em Geoprocessamento) Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte.

LEMOS, A. F. **Avaliação de metodologias de regionalização de vazões mínimas de referência para bacia do rio São Francisco, a montante do reservatório de Três Marias**. 2006. 135 p. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG.

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.

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.

SOUZA, S. M. T. (Coord.) **Deflúvios superficiais no Estado de Minas Gerais**. Belo Horizonte: COPASA : HIDROSISTEMAS, 1993.

ARTIGO III

**Índices para subsídio à gestão e ao planejamento dos recursos hídricos:
Proposição metodológica e estudo de caso**

RESUMO

São propostos neste trabalho dois índices para identificação de conflitos potenciais pelo uso da água a partir da análise das vazões outorgadas e da disponibilidade hídrica. O índice de conflito pelo uso da água na gestão dos recursos hídricos (i_{cg}) visa fornecer subsídios às ações afetas à gestão dos recursos hídricos, enquanto o índice de conflito pelo uso da água no planejamento dos recursos hídricos (i_{cp}) visa fornecer subsídios às ações de planejamento. Associado aos valores dos índices, sugeriu-se uma escala de cores visando possibilitar a elaboração de mapas de i_{cg} e i_{cp} de bacias hidrográficas. O estudo de caso foi realizado para a bacia do ribeirão Entre Ribeiros, que constitui uma das principais contribuintes para a formação de vazões do rio Paracatu, além de apresentar intensa agricultura irrigada. Para tanto, foram utilizados no cálculo dos índices a vazão mínima com sete dias de duração e período de retorno de 10 anos ($Q_{7,10}$), a vazão média de longa duração (Q_{mid}), as vazões outorgadas (Q_{out}), o modelo digital de elevação e a hidrografia da bacia em estudo. Verificou-se pela análise do i_{cg} que a bacia do ribeirão Entre Ribeiros apresenta regiões com conflitos potenciais pelo uso da água, uma vez que possui vazões outorgadas superiores às permissíveis pela legislação. Pela análise do i_{cp} verificou-se que os conflitos pelo uso da água evidenciados podem ser minimizados com adoção de um adequado programa de planejamento dos recursos hídricos.

Palavras-chave: conflito pelo uso da água, outorga, disponibilidade hídrica.

ABSTRACT

Indices for identification of conflicts for the use of water: Methodological proposition and case study

In the present paper, two indices are proposed for identification of potential conflicts for the use of the water considering the granted flows and the water availability. The water resources management index (i_{cg}) seeks to help support decisions regarding water resources management. The water resources planning index (i_{cp}) seeks to support the planning actions. A color scale seeking to enable the elaboration of i_{cg} and i_{cp} maps of hydrological basins associated with the values of the indices was suggested. The case study was accomplished for the Entre Ribeiros basin, which constitutes one of the main contributors for the formation of flows of Paracatu river. Moreover, in the calculation of the indices, a seven-day minimum flow with a 10-year return period ($Q_{7,10}$) was used, as well as a middle flow of long duration (Q_{mid}), the granted flows (Q_{out}), the digital elevation model and the hydrography of the basin in study. The analysis of i_{cg} and i_{cp} made it possible to verify that the Entre Ribeiros basin has regions with water use conflict, as it has granted flows higher than the ones allowed by legislation. By analyzing the i_{cp} , it was made clear that the evidenced water use conflicts can be minimized with the adoption of an appropriate management and planning water resources program.

Key-words: water use conflict, water right, water availability.

1. INTRODUÇÃO

Quando há baixa densidade demográfica, ocupação pouco intensiva do solo e desenvolvimento industrial restrito, o controle do uso da água exige menores cuidados; entretanto, à medida que o seu uso se amplia e passam a surgir conflitos é necessária maior atenção para a proteção dos recursos hídricos visando ao seu aproveitamento racional (SETTI et al., 2001).

Na literatura especializada a respeito de gestão de recursos hídricos por diversas vezes se encontra o termo “conflito pelo uso da água” sem, entretanto, especificar o que seria conflito. Diversos autores (BRAGA e RIBEIRO, 2006; MOREIRA, 2006; RODRIGUEZ, 2004; YOFFE et al., 2003; SILVA e RAMOS, 2001) referem-se a conflitos pelo uso da água a partir de critérios subjetivos ou evidências de escassez de água.

Segundo Valls (1999), Falkenmark, em 1987, foi quem primeiro propôs um índice para descrever quantitativamente problemas relacionados à escassez de água. Este índice (Water Scarcity Index – WSI) define o número de pessoas que podem ser atendidas por unidade de vazão (uma unidade de vazão equivale a $1.000.000 \text{ m}^3 \text{ ano}^{-1}$). Países com uma unidade de vazão para atender até 100 pessoas, têm problemas restritos relacionados à água; entre 100 e 600 pessoas, possuem problemas comuns relacionados à água, notadamente relacionados à qualidade e às variações sazonais; entre 600 e 1.000 pessoas, são classificados como estresse hídrico; entre 1.000 e 2.000 pessoas, atingiram a barreira hídrica; e acima de 2.000 pessoas, além da barreira hídrica (AYOUB e ALWARD, 1996).

Falkenmark et al. (1989) descreveram a escassez de água como a relação entre a disponibilidade hídrica por pessoa em um ano, diferenciando quatro classes: disponibilidade maior que $1.700 \text{ m}^3\text{ano}^{-1}$ *per capita* implica que a falta d'água ocorre somente irregularmente e localmente; disponibilidade menor que $1.700 \text{ m}^3\text{ano}^{-1}$ *per capita* implica que a falta d'água ocorre regularmente; disponibilidade menor que $1.000 \text{ m}^3\text{ano}^{-1}$ *per capita* implica que a falta d'água é um fator limitante para o desenvolvimento econômico e humano e do bem-estar das populações; e disponibilidade menor que $500 \text{ m}^3\text{ano}^{-1}$ *per capita* significa que a disponibilidade hídrica é a maior restrição à vida.

Ohlsson (2000), a fim de associar a escassez de água a aspectos sociais, propôs o índice social de escassez de água (SWSI), o qual é obtido pela razão do WSI pelo índice de desenvolvimento humano (IDH) de um país. De acordo com o valor do índice proposto, o autor sugere quatro classificações, as quais refletem diferentes estágios de disponibilidade hídrica (menor que 5 – relativamente suficiente; 6 a 10 – estresse; 11 a 20 – escassez; e maior que 20 – além da barreira hídrica).

A Agência Europeia de Meio Ambiente utiliza o Índice de Retirada de Água (Water Exploitation Index – WEI), dado para uma região pela razão entre a retirada total anual e a vazão média de longo período (EEA, 2004), para analisar como as alterações do uso da água impactam os recursos hídricos da Europa. Dessa maneira, a Agência identifica aqueles países que possuem maiores usos de água, em relação a seus recursos hídricos e, conseqüentemente, os quais têm maior chance de sofrer com escassez desse recurso.

ANA (2005b) realizou o balanço entre disponibilidade e demanda de recursos hídricos nas 12 regiões hidrográficas brasileiras, a partir da análise de três situações: na primeira considerou a razão entre a vazão média e a população, adotando como classificação para caracterização da situação das bacias as publicações das Nações Unidas (UNESCO 2003; ALCAMO et al. 2000); na segunda utilizou a razão entre a vazão de retirada para os usos consuntivos e a vazão média, conforme utilizado pela Agência Europeia; e, finalmente, a razão entre a vazão de retirada para os usos consuntivos e a disponibilidade hídrica.

Ao apresentar as alternativas de oferta de água para as sedes municipais da região nordeste do Brasil e do norte de Minas Gerais, ANA (2006) calculou o grau de pressão exercido pelas demandas sobre os recursos hídricos superficiais pela razão

entre a demanda total (somatório das demandas para abastecimento humano, abastecimento industrial, irrigação e dessedentação animal) e a vazão média.

Índices como o WSI, SWSI, WEI ou critérios de classificação com base na disponibilidade e na demanda hídrica fornecem valores globais para toda bacia, conforme verificaram Yoffe et al. (2003) ao afirmarem que estes índices são normalmente aplicados em nível de países, não permitindo a observação de diferenças regionais, bem como a variação da disponibilidade e da demanda de água. A maioria dos conflitos pelo uso da água decorre da falta de planejamento e gestão de recursos hídricos, que estão intimamente ligados à inexistência de informações que associem as vazões já outorgadas com a disponibilidade hídrica.

Dada a constatação de que os índices são úteis para caracterizar a situação de uma bacia e a evidência da necessidade de um índice efetivo para identificar conflitos potenciais pelo uso da água, objetivou-se neste trabalho propor índices para subsidiar a gestão e o planejamento de recursos hídricos que permitam a identificação de regiões com conflitos pelo uso da água em bacias hidrográficas e realizar estudo de caso utilizando-se os índices propostos.

2. MATERIAL E MÉTODOS

A fim de fornecer subsídios às ações dos órgãos gestores de recursos hídricos, no que se refere à identificação de conflitos potenciais pelo uso da água em bacias hidrográficas, neste trabalho é adotado o segmento¹ de um rio como unidade de estudo, bem como foram considerados unicamente os recursos hídricos de superfície.

2.1. Proposição dos índices

O conhecimento da quantidade da água já comprometida pelo uso, concedido através das outorgas, é essencial para que o poder público possa efetuar a gestão entre a disponibilidade e a demanda dos recursos hídricos (SILVA e RAMOS, 2001).

Neste sentido, a fim de subsidiar as ações afetas à gestão dos recursos hídricos, nas quais se busca compatibilizar o uso, o controle e a proteção deste recurso ambiental, disciplinando as respectivas intervenções antrópicas de modo a se atingir o desenvolvimento sustentável, propõe-se, portanto, o índice de conflito pelo uso da água na gestão dos recursos hídricos (i_{cg}), dado por

$$i_{cg} = \frac{Q_{out}}{xQ_{mr}} \quad (1)$$

em que:

¹ Trecho de curso d'água entre uma foz e sua confluência, ou trecho entre confluências, ou trecho entre uma confluência e sua nascente.




- i_{cg} = índice de conflito pelo uso da água na gestão dos recursos hídricos, adimensional;
- Q_{out} = vazão outorgada a montante da foz do segmento em estudo, em m^3s^{-1} ;
- x = percentagem, expressa em decimal, da Q_{mr} passível de ser outorgada, adimensional; e
- Q_{mr} = vazão mínima de referência estimada na foz do segmento em estudo, em m^3s^{-1} .


O valor obtido pela multiplicação de x por Q_{mr} corresponde à percentagem da vazão mínima de referência passível de ser concedida de acordo com o critério de outorga adotado pelo órgão gestor de recursos hídricos da bacia, ou seja, a vazão máxima passível de ser outorgada na foz do segmento em estudo.

A Q_{out} pode assumir valores entre zero e um valor positivo correspondente à soma das vazões outorgadas a montante da foz do segmento em estudo. Considerando a variação dos valores de Q_{out} em relação a $x Q_{mr}$, tem-se a seguinte escala de variação dos valores de i_{cg}

- $0 \leq i_{cg} \leq 1$ = situação na qual as vazões outorgadas a montante da foz do segmento em estudo se encontram dentro dos limites legais; e
- $i_{cg} > 1$ = situação na qual as vazões outorgadas a montante da foz do segmento em estudo superam os limites previstos pela legislação.

Visando uma representação gráfica dos valores de i_{cg} por meio da elaboração de mapas, na situação em que as vazões outorgadas a montante da foz do segmento em estudo estão dentro dos limites legais ($0 \leq i_{cg} \leq 1$), é proposta uma estratificação para caracterização das faixas de vazão ainda permissíveis de ser outorgadas

-  ($i_{cg} = 0$), ou seja, vazão ainda permissível de ser outorgada igual à vazão máxima passível de ser outorgada na foz do segmento em estudo;
-  ($0 < i_{cg} \leq 0,7$), ou seja, vazão ainda permissível de ser outorgada superior a 30% da vazão máxima passível de outorga;
-  ($0,7 < i_{cg} \leq 0,9$), ou seja, vazão ainda permissível de ser outorgada inferior a 30% e superior a 10% da vazão máxima passível de outorga; e

 $(0,9 < i_{cg} \leq 1)$, ou seja, vazão ainda permissível de ser outorgada inferior a 10% da vazão máxima passível de outorga.


Para caracterizar a condição em que as vazões outorgadas superam os limites previstos pela legislação ($i_{cg} > 1$), propõe-se uma estratificação do intervalo em duas classes. Dado que o limite legal já foi ultrapassado, para este caso as faixas adotadas de valores de i_{cg} terão como referência a Q_{mr} em substituição a $x Q_{mr}$. Para tanto, basta multiplicar o valor de i_{cg} pelo percentual da Q_{mr} passível de ser outorgada (x). Dessa forma, o limiar para estratificação da condição em que as outorgas emitidas superam a vazão permissível de ser outorgada é dado por $x i_{cg}$.

Nesse caso, considerando-se a situação em que o valor de Q_{out} é superior a $x Q_{mr}$, a variação dos valores de i_{cg} está entre os seguintes intervalos:

$x i_{cg} \leq 1$ = vazão outorgada superior a $x Q_{mr}$ e inferior ou igual à vazão mínima de referência; e

$x i_{cg} > 1$ = vazão outorgada superior à vazão mínima de referência.

Para esta condição propõe-se o seguinte simbolismo:

 $(x i_{cg} \leq 1)$, ou seja, vazão outorgada superior a $x Q_{mr}$ e inferior ou igual à vazão mínima de referência; e

 $(x i_{cg} > 1)$, ou seja, vazão outorgada superior à vazão mínima de referência.

Considerando que no planejamento de recursos hídricos se busca prever e avaliar ações alternativas e futuras, visando à tomada de decisões mais adequadas e racionais, propõe-se o índice de conflito pelo uso da água no planejamento dos recursos hídricos (i_{cp}), dado por

$$i_{cp} = \frac{Q_{out}}{Q_{mld}} \quad (2)$$

em que:




i_{cp} = índice de conflito pelo uso da água no planejamento dos recursos hídricos, adimensional; e

Q_{mld} = vazão média de longa duração na foz do segmento em estudo, em m^3s^{-1} .

A utilização da Q_{mld} para o cálculo do i_{cp} deve-se ao fato de a vazão média corresponder à vazão máxima possível de ser regularizada, abstraindo-se a evaporação e a infiltração. Dessa maneira, a utilização da Q_{mld} visa verificar se, caso haja conflito pelo uso da água, este pode ser minimizado com a adoção de medidas estruturais como a construção de barramentos. Os valores de i_{cp} , considerando-se a variação dos valores de Q_{out} em relação à Q_{mld} , variam da seguinte forma:

- $0 < i_{cp} \leq 1$ = situação na qual existindo o conflito pelo uso da água, ainda se pode contorná-lo com a adoção de medidas estruturais; e
- $i_{cp} > 1$ = situação na qual o conflito não pode ser contornado apenas com medidas estruturais.

Para os intervalos de i_{cp} propõe-se o seguinte simbolismo

-  ($i_{cp} = 0$), ou seja, situação na qual não existem vazões outorgadas a montante da foz do segmento analisado;
-  ($0 < i_{cp} \leq 1$), ou seja, situação na qual existindo o conflito pelo uso da água, ainda se pode contorná-lo com a adoção de medidas estruturais; e
-  ($i_{cp} > 1$), ou seja, situação na qual o conflito não pode ser contornado apenas com medidas estruturais.

2.2. Estudo de caso: bacia do ribeirão Entre Ribeiros

Para verificar a adequação dos índices propostos na identificação de conflitos potenciais pelo uso da água em bacias hidrográficas, fornecendo desse modo subsídios às ações dos órgãos gestores na adoção de um adequado programa de gestão e planejamento de recursos hídricos, foi realizado estudo de caso para a bacia do ribeirão Entre Ribeiros (Figura 1).

A bacia do ribeirão Entre Ribeiros, com área de 3.973 km², é uma das principais contribuintes do rio Paracatu. Destaca-se na bacia a agricultura irrigada, sendo evidenciados diversos barramentos para fornecimento de água para a irrigação. As áreas de nascente encontram-se comprometidas, pois a região é excessivamente utilizada para o desenvolvimento das atividades agrícolas (IGAM, 2006).

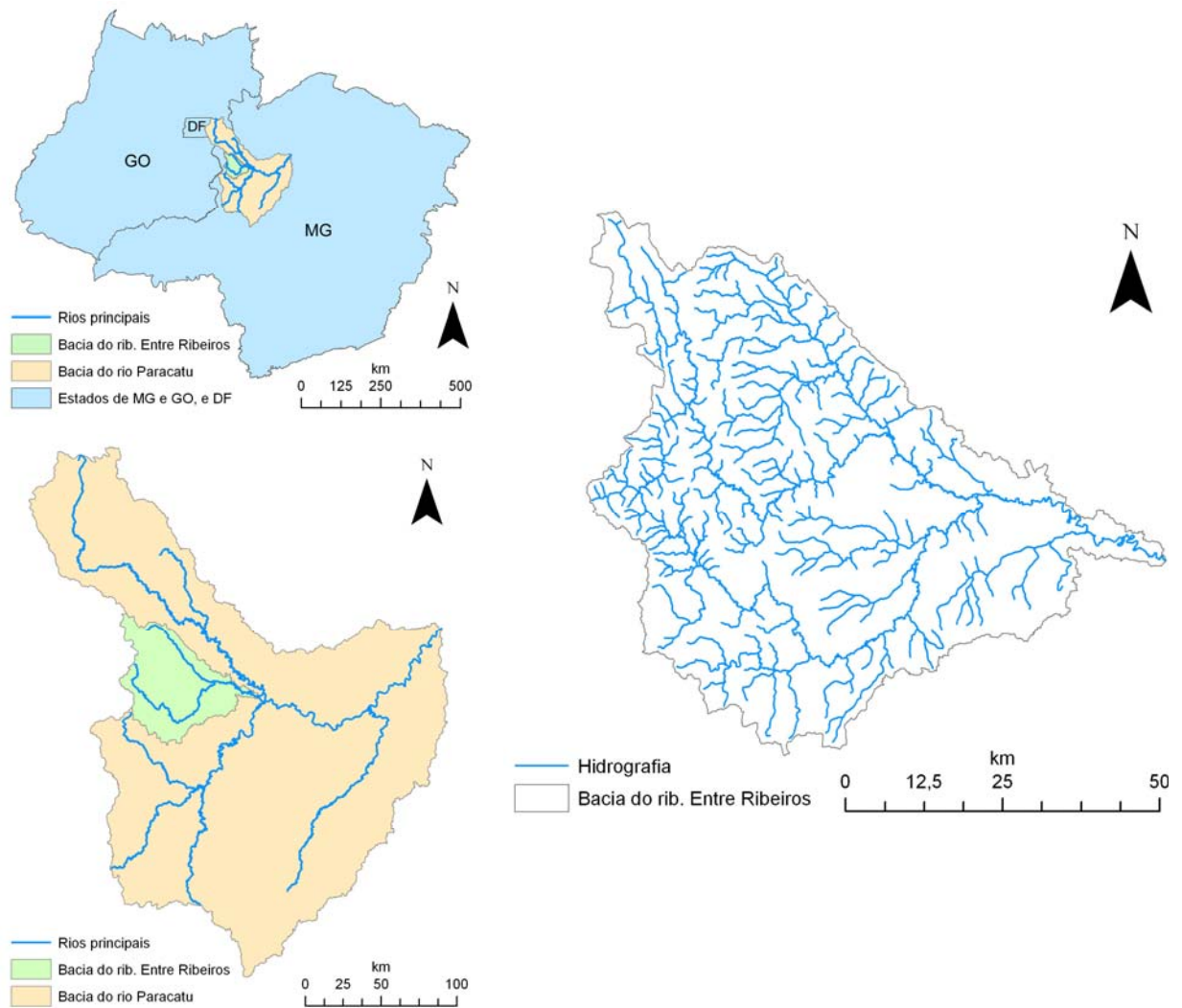


Figura 1 – Localização, área de drenagem e hidrografia da bacia do ribeirão Entre Ribeiros.

Os dados utilizados, necessários para o cálculo do i_{cg} e i_{cp} , foram: a vazão mínima com sete dias de duração e período de retorno de 10 anos ($Q_{7,10}$), uma vez que é a vazão mínima de referência adotada pelo órgão gestor da bacia (Instituto Mineiro de Gestão das Águas – IGAM), sendo a percentagem máxima passível de outorga correspondente a 30%; a vazão média de longa duração (Q_{mld}); as vazões outorgadas na bacia em estudo (Q_{out}); o modelo digital de elevação; e a hidrografia da bacia do ribeirão Entre Ribeiros.

Os valores de $Q_{7,10}$ e Q_{mld} da foz de cada segmento da hidrografia da bacia foram obtidos a partir do procedimento de regionalização de vazões, sendo utilizado o método Tradicional (ELETROBRÁS, 1985). Este método 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.

As equações de regionalização para a estimativa dos valores de $Q_{7,10}$ e Q_{mld} (em m^3s^{-1}) foram obtidas por Moreira (2006), conforme-se seguem

$$Q_{7,10} = 0,00158 Ad^{1,023069} \quad r^2 = 0,98 \quad (3)$$

$$Q_{mld} = 0,018343 Ad^{0,959935} \quad r^2 = 0,98 \quad (4)$$

em que Ad corresponde à área de drenagem da foz do segmento em análise, em km^2 , sendo este valor obtido a partir do modelo digital de elevação da bacia do ribeirão Entre Ribeiros.

Para a obtenção das vazões outorgadas a montante da foz de cada segmento utilizou-se o cadastro de usuários de água da bacia, disponibilizado em versão eletrônica pelo IGAM, no qual constam as outorgas realizadas nos rios estaduais para todo o Estado de Minas Gerais.

Entre as informações de cada outorga constam a localização, em coordenadas geográficas, o valor de vazão concedido, o período de vigência e a finalidade do uso. Um pré-processamento dos dados constantes no cadastro de usuários foi realizado, a fim de selecionar somente as outorgas da bacia em estudo.

De posse dessas informações procedeu-se ao cálculo, para cada foz de segmento da bacia, das vazões outorgadas a montante, considerando as outorgas vigentes no mês de julho de 2008. Este mês foi escolhido tendo em vista o período de estiagem na região, implicando maior demanda de água e, por conseguinte, uma situação mais crítica em relação ao uso da água.

A foz de cada segmento da bacia foi identificada a partir da hidrografia da bacia, a qual foi obtida do trabalho de Moreira (2006) na escala de 1:250.000.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Na Figura 2 apresenta-se a bacia do ribeirão Entre Ribeiros com as suas respectivas outorgas vigentes em julho de 2008. Foram identificadas, para o mês em análise, 119 outorgas a fio d'água vigentes, das quais 111 com a finalidade de irrigação, quatro para o consumo humano e dessedentação de animais e quatro destinadas ao consumo agroindustrial.

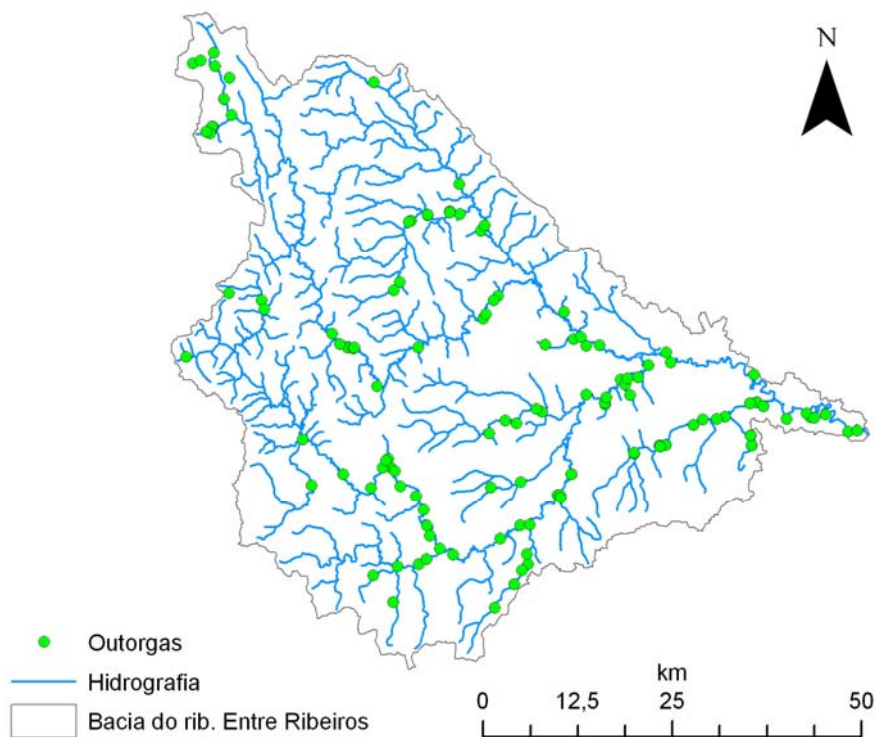


Figura 2 – Outorgas de águas superficiais vigentes na bacia do ribeirão Entre Ribeiros, em julho de 2008.

A partir da análise do número de outorgas vigentes, evidencia-se que a agricultura é a atividade preponderante na bacia, como salientam IGAM (2006) e Rodriguez (2004). Verificam-se, ainda, altas concentrações de outorgas na cabeceira do córrego Jordão, no médio e baixo curso do ribeirão São Pedro e em toda extensão do ribeirão Entre Ribeiros.

Dada a extensão da bacia e as constatações de intenso aproveitamento agropecuário na região (IGAM, 2006; RODRIGUEZ, 2006) esperava-se um número superior de outorgas vigentes. A utilização dos recursos hídricos sem o seu respectivo documento legal inviabiliza o cálculo da real demanda de água, fato que somente pode ser contornado com a realização de amplo cadastro de usuários de água da bacia.







Dessa forma, segundo IGAM (2006), é de fundamental importância o cadastramento dos usuários de água, de modo a permitir o estabelecimento dos usos e necessidades de água da bacia. Sendo assim, o IGAM instituiu, por meio da Portaria nº 30, de 22 de agosto de 2007, a "Campanha de regularização do uso dos recursos hídricos em Minas Gerais - Água: faça o uso legal", a qual tem como objetivo informar e facilitar o acesso aos meios de regularização do uso da água, além de levantar dados sobre a utilização dos recursos hídricos no Estado.

Apesar do reconhecimento da necessidade do correto levantamento dos usos de água na bacia, as bases de dados de outorgas dos órgãos gestores de recursos hídricos correspondem a toda informação passível de ser analisada no cálculo da disponibilidade hídrica remanescente para outorga, motivo pelo qual nos cálculos dos índices propostos se utilizam as vazões outorgadas vigentes.

Na Tabela 1 apresentam-se as faixas de valores para classificação do i_{cg} , o número de segmentos enquadrados em cada uma das faixas e seu valor percentual em relação ao número de segmentos da bacia do ribeirão Entre Ribeiros.

Verifica-se, pela análise dos valores apresentados na Tabela 1, que a bacia do ribeirão Entre Ribeiros possui 62,6% de seus segmentos sem outorgas pelo uso da água. As faixas de valores representadas pelas cores verde, amarelo e laranja correspondem à situação de segmentos que possuem outorgas vigentes em julho de 2008 e, ainda, têm vazões permissíveis de ser outorgadas. Observa-se que em 68,6% dos segmentos de cursos d'água da bacia as outorgas emitidas

Tabela 1 – Classificação dos segmentos da bacia do ribeirão Entre Ribeiros de acordo com o índice de conflito pelo uso da água na gestão dos recursos hídricos (i_{cg})

Faixa de valor	Cor	Número de segmentos	% em relação à bacia
$i_{cg} = 0$		265	62,6
$0 < i_{cg} \leq 0,7$		18	4,3
$0,7 < i_{cg} \leq 0,9$		5	1,2
$0,9 < i_{cg} \leq 1$		2	0,5
$x i_{cg} \leq 1$		83	19,6
$x i_{cg} > 1$		50	11,8
Total		423	

encontram-se dentro dos limites legais previstos pela legislação, a qual na bacia do ribeirão Entre Ribeiros corresponde a 30% da $Q_{7,10}$.

Observa-se também que em 83 segmentos (19,6%) a vazão outorgada representa mais de 30% da $Q_{7,10}$, enquanto em 50 segmentos da bacia (11,8%) são verificadas vazões outorgadas superiores ao valor da $Q_{7,10}$.

Dessa forma, verifica-se que em 133 segmentos (31,4%) da bacia do ribeirão Entre Ribeiros foram outorgadas vazões superiores aos limites previstos pela legislação, implicando na necessidade de adoção de maior controle no processo de concessão de novas outorgas.

Apesar de os órgãos gestores de recursos hídricos terem o comprometimento legal em respeitar os limites permissíveis de concessão de outorga, verifica-se com frequência que as vazões concedidas por esses órgãos são superiores às permissíveis, em virtude da inexistência de ferramentas adequadas para o gerenciamento das outorgas emitidas e para quantificação da real disponibilidade hídrica.

Desse modo, o i_{cg} permite apontar as regiões em que as outorgas emitidas estão dentro dos limites legais, mostrando, através de um simbolismo utilizando cores, as faixas de valores ainda permissíveis de outorga, bem como as regiões em que já se outorgaram vazões superiores às permissíveis pela legislação. Para o último caso, deve-se ter maior controle do uso da água ou até mesmo realizar uma nova análise dos processos de outorga vigentes.

Na Figura 3 é apresentada a bacia do ribeirão Entre Ribeiros com a espacialização do i_{cg} . Verifica-se na figura que em algumas regiões, notadamente nos cursos dos ribeirões da Aldeia, Barra da Água, São Pedro e Entre Ribeiros, a

existência de segmentos com vazões outorgadas superiores a 30% da $Q_{7,10}$, os quais são representados pelas colorações roxa e vermelha na figura.

A vazão outorgada superior ao valor da $Q_{7,10}$ não implica, necessariamente, eliminação total da vazão no curso d'água, uma vez que a $Q_{7,10}$ corresponde a um índice probabilístico relacionado ao risco de ocorrência de um evento a cada 10 anos. Além disso, o valor da vazão outorgada corresponde ao somatório das outorgas, o que não implica retirada simultânea dessas vazões.

Em entrevista com técnicos do IGAM, no entanto, foi afirmado que na bacia do ribeirão Entre Ribeiros existem seções em que foram observadas vazões nulas, fato que tem levado este órgão a tomar medidas para minimizar esse problema, como a adoção de outorgas coletivas e restrição de cultivo na época de seca.

Pela análise do i_{cg} nota-se que algumas partes da bacia se encontram com outorgas superiores aos limites permissíveis pela legislação (30% da $Q_{7,10}$). Este

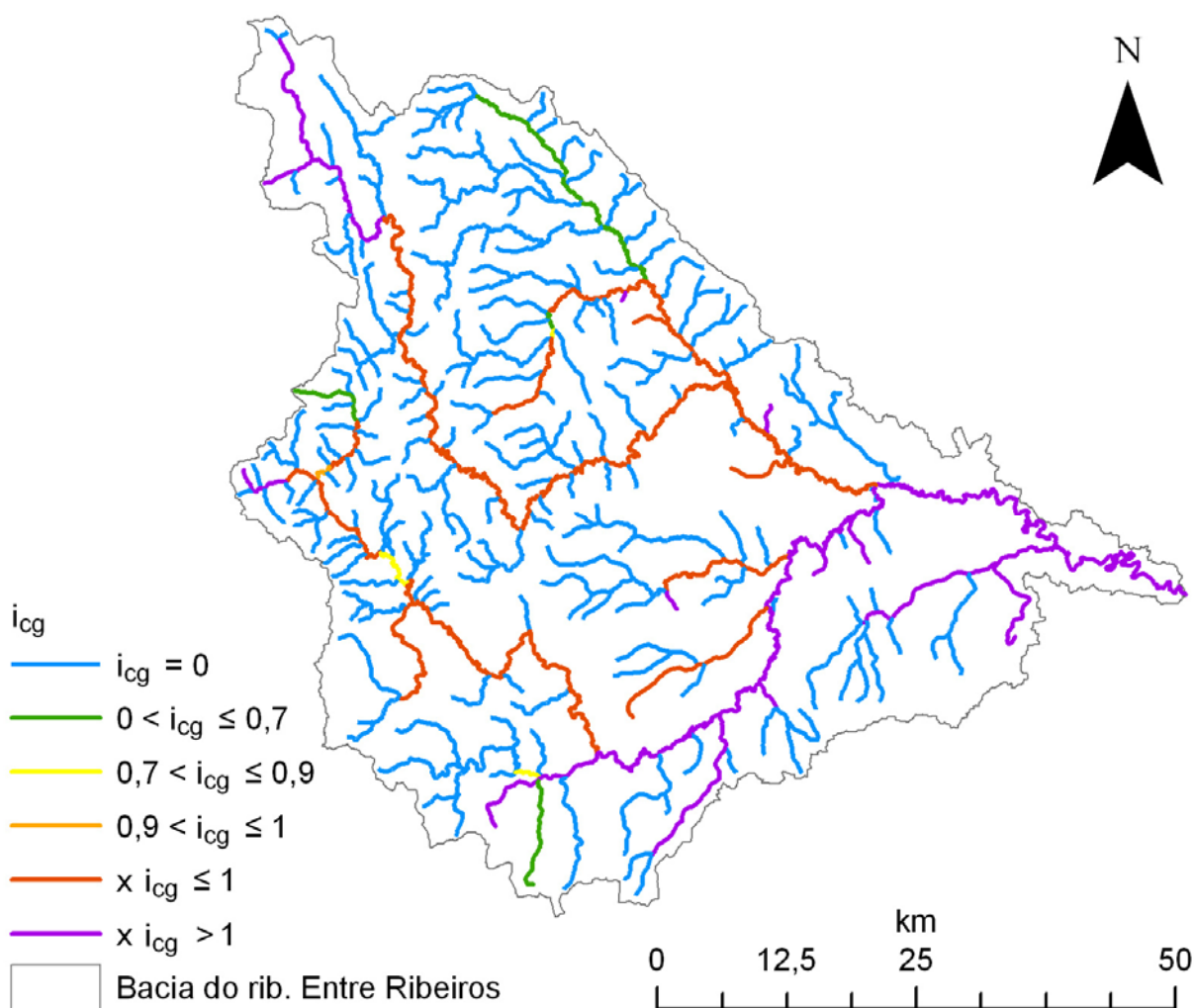


Figura 3 – Índice de conflito pelo uso da água na gestão dos recursos hídricos (i_{cg}) da bacia do ribeirão Entre Ribeiros.

fato, como evidenciado por IGAM (2006), remete à necessidade de se avaliar os usos atual, por meio de cadastro de usuários, e o futuro, por intermédio de políticas de racionamento e distribuição do uso.

A constatação de vazões outorgadas superiores ao limite legal de disponibilidade hídrica do Estado de Minas Gerais deve-se, em parte, ao fato do critério de 30% da $Q_{7,10}$ para a bacia do rio Paracatu ser muito restritivo. Segundo Johnson e Lopes (2003), este critério não representa, com exatidão, o potencial hídrico da região. O próprio IGAM, em questionário encaminhado à ANA (ANA, 2005a), salienta a necessidade de se definirem diferentes critérios de outorga conforme as particularidades de cada região do Estado.




Outra importante constatação é o fato de que as emissões de outorgas se dão a partir do estabelecimento de vazões máximas de captação, sem considerar a sua variabilidade temporal. Assim, restringe-se o uso da água a uma situação crítica que somente ocorrerá, estatisticamente, durante sete dias uma vez a cada 10 anos.

A coloração azul, apesar de indicar a não existência de outorgas a montante do segmento em análise, não é garantia de que o órgão gestor possa emitir nova outorga, tendo em vista que no processo de outorga devem-se considerar os usuários a jusante da seção de interesse. Por outro lado, a presença de segmentos com colorações roxa e vermelha indica a impossibilidade de emissão de novas outorgas em toda a bacia a montante. Desse modo, o i_{cg} permite ao órgão gestor traçar um panorama, a partir de simples análise visual, das regiões em que não se pode emitir novas outorgas, exigindo, por conseguinte, maior atenção do órgão gestor de recursos hídricos.

Apesar da crítica situação da bacia, evidenciada pelas colorações roxa e vermelha na figura, a maioria dos segmentos não apresenta outorgas pelo uso da água. Tais constatações levam à necessidade de análise do índice de conflito pelo uso da água no planejamento dos recursos hídricos (i_{cp}), a fim de verificar a possibilidade de mitigação dos conflitos evidenciados a partir da adoção de medidas estruturais e não estruturais, como a construção de barragens de regularização ou alteração das políticas públicas de uso da água.

Na Tabela 2 apresentam-se as faixas de valores para classificação do i_{cp} , o número de segmentos enquadrados em cada uma das faixas e seu valor percentual em relação ao número de segmentos da bacia do ribeirão Entre Ribeiros.

Tabela 2 – Classificação dos segmentos bacia do ribeirão Entre Ribeiros de acordo com o índice de conflito pelo uso da água no planejamento dos recursos hídricos (i_{cp})

Faixa de valor	Cor	Número de segmentos	% em relação à bacia
$i_{cp} = 0$		265	62,6
$0 < i_{cp} \leq 1$		152	35,9
$i_{cp} > 1$		6	1,4
Total		423	

Da mesma forma como evidenciado na análise do i_{cg} , verifica-se que 62,6% dos segmentos da bacia do ribeirão Entre Ribeiros não possuem outorgas pelo uso da água. Observa-se, ainda, que em 152 segmentos da bacia (35,9%) a vazão outorgada corresponde a um valor inferior à vazão média de longa duração ($0 < i_{cp} \leq 1$).

Tal constatação permite afirmar que os conflitos pelo uso da água existentes podem ser contornados com ações de planejamento, como a construção de reservatórios de regularização. IGAM (2006), no entanto, afirma que na região são evidenciados diversos barramentos, fato que dificultaria a construção de novos barramentos e implicaria na tomada de medidas alternativas, a fim de mitigar os problemas encontrados, como a adoção de um critério sazonal de concessão de outorga.

Na Figura 4 apresenta-se a bacia do ribeirão Entre Ribeiros com a espacialização do i_{cp} , na qual verifica-se que a maioria dos segmentos não possui outorgas pelo uso da água, condição esta representada pela coloração azul.

A coloração dos segmentos em marrom implica situação em que existindo o conflito pelo uso da água, ainda se pode contorná-lo com ações de planejamento, uma vez que as vazões outorgadas são menores que a vazão média de longa duração. Encontram-se nessa situação 152 segmentos correspondendo a 35,9% do total. Por sua vez, a coloração cinza indica uma situação na qual o conflito não pode ser contornado apenas com ações de planejamento, uma vez que as vazões outorgadas já superaram a vazão média de longa duração. Nesta situação se encontram seis segmentos, correspondendo a 1,4% dos segmentos da bacia.

Considerando que o instrumento de outorga concede, por um período preestabelecido, o direito de uso de determinada quantidade de água, assegurado no ato de concessão, e o fato de terem sido verificadas vazões outorgadas

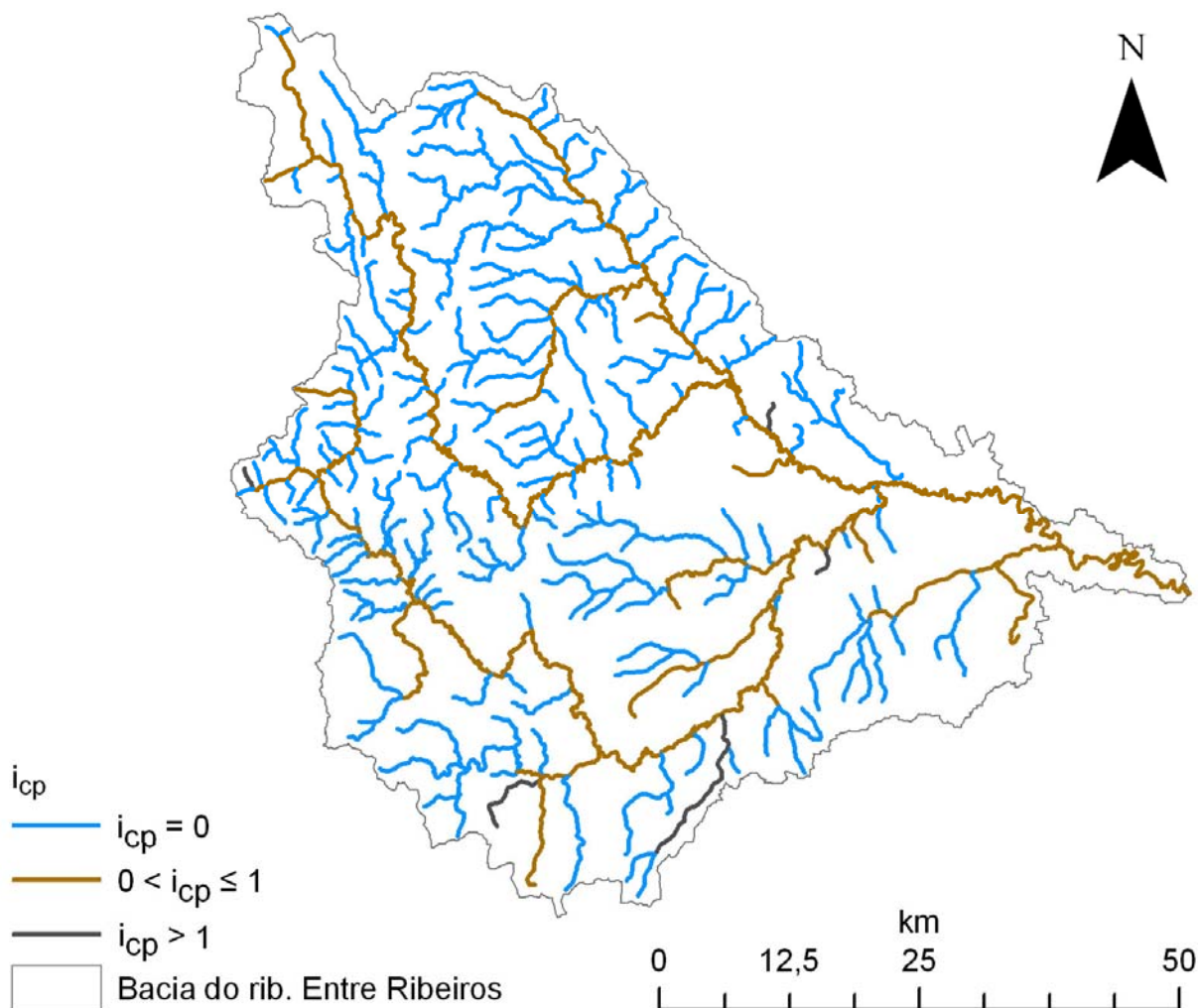


Figura 4 – Índice de conflito pelo uso da água no planejamento dos recursos hídricos da bacia do ribeirão Entre Ribeiros.

superiores à vazão média ($i_{cp} > 1$) é necessário maior controle no processo de concessão de novas outorgas, bem como uma nova análise das outorgas em alguns segmentos, principalmente no córrego Boa Esperança.

Dessa forma, assim como verificado por outros autores, observa-se em várias partes da bacia conflitos pelo uso da água, os quais remetem, dada a magnitude do problema em alguns segmentos ($i_{cp} > 1$), à necessidade de maior controle no uso da água e adoção de métodos alternativos para a concessão de outorga, como a outorga coletiva e a outorga sazonal.

Com a interpretação dos valores dos índices i_{cg} e i_{cp} pode-se inferir a respeito da necessidade de adoção de ações de gestão e planejamento, apenas para a manutenção do estado atual ou com o intuito de proteger os recursos hídricos, visando o seu aproveitamento racional. No segundo caso, pode ser necessária a adoção de medidas estruturais como a construção de reservatórios de regularização

e interligação de bacias, bem como de medidas não estruturais como alterações nas políticas públicas de concessão de outorga ou restrições de cultivo em períodos de seca.

A quantidade e qualidade dos recursos hídricos estão associadas com a maioria dos conflitos pelo uso da água. Apesar dos índices propostos fornecerem subsídios para identificação de conflitos potenciais pelo uso da água visando ao auxílio no processo de gestão e planejamento de recursos hídricos em uma bacia, eles permitem uma análise no que se refere aos aspectos quantitativos. Para uma análise de aspectos qualitativos dos recursos hídricos em uma bacia devem ser utilizados índices para este fim, como o índice de qualidade de água (IQA).

Além disso, cabe salientar que o conhecimento das vazões outorgadas é toda base de dados que o órgão gestor de recursos hídricos dispõe sobre o uso da água em uma bacia. Verifica-se, no entanto, em diversas regiões, o uso da água sem o respectivo instrumento legal, gerando dessa forma maior comprometimento dos recursos hídricos do que a quantificação realizada pelos órgãos gestores a partir das outorgas vigentes.

Assim, é imperativo maior controle sobre os usos de água sem o respectivo instrumento legal, visto que a captação de água sem a sua autorização compromete as ações do órgão gestor no que se refere ao controle quantitativo e qualitativo da água em uma bacia. Tal constatação vem sendo sanada com adoção, em escala Federal e Estadual, de cadastramentos de usuários de água.

Dessa forma, a adoção dos índices propostos vem ao encontro das necessidades dos órgãos gestores de recursos hídricos no que se refere a um diagnóstico do comprometimento da disponibilidade hídrica em relação às outorgas vigentes. A escassez desses dados inviabiliza o Poder Público na adoção de um adequado programa de gestão e planejamento de recursos hídricos, o que vem acarretar, como evidenciado em algumas bacias brasileiras, a ocorrência de conflitos pelo uso da água.

4. CONCLUSÕES

Conclui-se, pela análise dos resultados, que:

- Os índices de conflito pelo uso da água na gestão dos recursos hídricos (i_{cg}) e no planejamento dos recursos hídricos (i_{cp}) permitem a identificação de regiões com potenciais conflitos pelo uso da água em bacias hidrográficas;

- A utilização do i_{cg} identificou regiões em que as vazões outorgadas não estão dentro dos limites permissíveis pela legislação na bacia do ribeirão Entre Ribeiros, permitindo, ainda, o diagnóstico do comprometimento da disponibilidade hídrica em relação às outorgas vigentes;

- A utilização do i_{cp} identificou na bacia do ribeirão Entre Ribeiros regiões em que as vazões outorgadas superaram a vazão média de longa duração, indicando que a mitigação desta situação não pode ser realizada apenas com a adoção de medidas estruturais, cabendo ao órgão gestor da bacia adotar medidas não estruturais para compatibilizar o uso da água com o critério de outorga da bacia; e

- Pela análise conjunta do i_{cg} e do i_{cp} da bacia do ribeirão Entre Ribeiros verificou-se que os conflitos identificados, na maioria dos casos, podem ser minimizados com a adoção de ações estruturais e não estruturais.

5. REFERÊNCIAS

ALCAMO, J.; HENRICHS, T.; ROSCH, T. **World Water in 2025 – Global modeling and scenario analysis for the World commission on Water for 21^o Century**. Report A0002, Center for Environmental Systems Research, University of Kassel. 2000. 48p. Germany.

ANA – AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS. **Diagnóstico da outorga de direito de uso de recursos hídricos no país** – Diretrizes e prioridades. Brasília: Agência Nacional de Águas; Ministério do Meio Ambiente, 2005a. 143 p. Disponível em: <http://www.ana.gov.br/pnrh_novo/Tela_Apresentacao.htm>. Acesso em: 02 fev. 2006.

ANA – AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS. **Disponibilidade e demandas de recursos hídricos no Brasil**. Brasília: Agência Nacional de Águas; Ministério do Meio Ambiente, 2005b. 123 p. Disponível em: <www.ana.gov.br/pnrh_novo/Tela_Apresentacao.htm>. Acesso em: 26 fev. 2008.

ANA – AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS. **Atlas Nordeste: abastecimento urbano de água: alternativas de oferta de água para as sedes municipais da Região Nordeste do Brasil e do norte de Minas Gerais**. Brasília: Agência Nacional de Águas; Consórcio Engecorps/Projetec/Geoambiente/Riversidade Technology. 2006. 80 p.

BRAGA, C. F. C.; RIBEIRO, M. M. R. Avaliação por múltiplos critérios e decisores de alternativas de gerenciamento da demanda de água. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**. v.11 n.1. p:37-49, 2006.

BRASIL, Política Nacional de Recursos Hídricos. **Lei nº 9.433, de 8 de janeiro de 1997**. [S. l.]: MMA/ SRH, 1997.

EEA – European Environment Agency. Indicator fact sheet. Madri, Espanha: Centro de Estudos y Experimentación de Obras Públicas. 2004. 8 p.

ELETROBRÁS. Centrais Elétricas Brasileiras S.A. **Metodologia para regionalização de vazões**. Rio de Janeiro, 1985.

- FALKENMARK, M. et al. Water-related limitations to local development: Round Table discussion. **Ambio**. 16:191–200. 1987
- FALKENMARK, M.; LUNDQVIST, J.; WIDSTRAND, C. Macro-scale water scarcity requires micro-scale approaches: aspects of vulnerability in semi-arid development. **Natural Resources Forum**. v.13. p. 258-267. 1989.
- IGAM - INSTITUTO MINEIRO DE GESTÃO DAS ÁGUAS. **Plano diretor de recursos hídricos da bacia hidrográfica do rio Paracatu**. Belo Horizonte: Instituto Mineiro de Gestão das Águas; Comitê da sub-bacia hidrográfica do rio Paracatu. 2006. 384 p.
- JOHNSON, R. M. F.; LOPES, P. D. **Projeto marca d'água seguindo as mudanças na gestão das bacias hidrográficas do Brasil**: caderno 1: retratos 3 x 4 das bacias pesquisadas. Brasília: Finatec, 2003. v.1, 212 p.
- MOREIRA, M. C. **Gestão de recursos hídricos: sistema integrado para otimização da outorga de uso da água**. Viçosa, MG: UFV. 2006. 97p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa.
- OHLSSON, L. Water conflicts and social resource scarcity. **Physics and Chemistry of the Earth**. V25, n.3. p:213-220. 2000.
- RODRIGUEZ, R. del G. **Metodologia para estimativa das demandas e das disponibilidades hídricas na bacia do rio Paracatu**. Viçosa, MG: UFV, 2004. 94 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa.
- RODRIGUEZ, R. del G.; PRUSKI, F. F.; NOVAES, L. F. de; SILVA, D. D. da; RAMOS, M. M.; TEIXEIRA, A. F. Vazões consumidas pela irrigação e pelos abastecimentos animal e humano (urbano e rural) na bacia do Paracatu no período de 1970 a 1996. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**. v11. n.3. p:211-222. 2006.
- SETTI, A. A.; LIMA, J. E. F. W.; CHAVES, A. G. de M.; PEREIRA, I. de C. **Introdução ao gerenciamento de recursos hídricos**. Brasília: Agência Nacional de Energia Elétrica Agência Nacional de Águas, 2001. 328 p.
- SILVA, D. D.; RAMOS, M. M. **Planejamento e gestão integrados de recursos hídricos**. Brasília, DF: MMA/SRH/ABEAS/UFV, 2001. 89 p.
- UNESCO – United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization. **Water for people, water for life**: UN world water development report (WWDR). Paris: UNESCO Publishing, 2003.
- VALLS, J. X, **Carrying capacity in east sub-saharan Africa: a multilevel integrated assessment and sustainable development approach**. UPC, 1999. Doctoral Thesis – Universitat Politècnica de Catalunya, UPC.
- YOFFE, S.; WOLF, A. T.; GIORDANO, M. **Conflict and cooperation over international freshwater resources: indicators of basins at risk**. Journal of the American Water Resources Association. 39:1109-1126. 2003.