

MICHEL CASTRO MOREIRA

**GESTÃO DE RECURSOS HÍDRICOS: SISTEMA INTEGRADO PARA
OTIMIZAÇÃO DA OUTORGA DE USO DA ÁGUA**

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

**VIÇOSA
MINAS GERAIS – BRASIL
2006**

MICHEL CASTRO MOREIRA

**GESTÃO DE RECURSOS HÍDRICOS: SISTEMA INTEGRADO PARA
OTIMIZAÇÃO DA OUTORGA DE USO DA ÁGUA**

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

Aprovada: 07 de abril de 2006.

Prof. Antônio Sérgio Ferreira Mendonça

Prof. Demetrius David da Silva
(Co-orientador)

Pesq. Lineu Neiva Rodrigues

Prof^a. Maria Lúcia Calijuri

Prof. Fernando Falco Pruski
(Orientador)

Às
mulheres
de minha vida:
Marilda, Monique e
Ana Paula.

AGRADECIMENTOS

Ao finalizar um projeto, surge a necessidade de agradecer e pedir desculpas. Assim, antes de agradecer, peço desculpas à minha família e aos meus amigos, pela minha fortuita ausência. Ausência essa que, no entanto, não diminuiu nossos sorrisos, nem tão menos esfriou o calor de nossos abraços.

Obrigado, antes de tudo, às mulheres de minha vida – minha mãe Marilda, minha irmã Monique e minha vida Ana Paula – sem as quais em tudo, para mim, haveria menor brilho.

Minha incontida gratidão aos meus padrinhos Reinaldo e Maria Sônia, pela eterna confiança.

Aos meus amigos com os quais cresci e aqueles que conheci durante esse tempo em Viçosa – Paulo Henrique, William Moreira, Roselaine Cardoso, Denise Cardoso, Tiago Sudário, Adelson Barbosa, Fernando Silva, Marcelo Gomes, Sérgio Caixeta, Adriano Furlan, Tobias Francisco, Flávio Leal, Marlúcia, Alessandra, Márcia Elivane, Valdoni, Wendy, Flávio Gonçalves e Ângelo Marcos – destes certamente alguns nem imaginam que aqui figuram e entre eles seguramente caberiam vários outros.

Ao pessoal de minha república – Alisson, Augusto, Fernando e Marcos – pela mútua confiança e fraterno convívio. Em especial, a Dona Rita, pelo cuidado e preocupação com os quais me acolhe.

Ao Professor Fernando Pruski, pela orientação, pela oportunidade de realização deste trabalho e, acima de tudo, por me conduzir ao pensamento científico.

Aos Professores Demetrius da Silva, Francisco de Carvalho e Márcio Mota, pelo irrestrito apoio e exemplo de profissional.

Aos meus colegas de curso e membros do GPRH pela sadia convivência que ameniza a pressão do dia-a-dia – Luciano Novaes, Renata Rodriguez, Roberto Cecílio, Sidney Zanetti, Luís Amaral, Wallison Freitas, Luiz Baena – e em especial ao José Márcio, André Luis, Luana Lisboa e Micheli Gonçalves, pessoas que não foram menos importantes do que eu, na realização deste trabalho.

À família Cientec em nome do Paulo Márcio e Alessandro Freitas, pelo harmonioso convívio e pelas saudáveis discussões.

À Universidade Federal de Viçosa, por intermédio do Departamento de Engenharia Agrícola, em nome de seus funcionários Marcos, Edna, Renato e Galinari; 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.

Em novembro desse mesmo ano, foi contratado 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.

CONTEÚDO

RESUMO.....	ix
ABSTRACT	xi
1. INTRODUÇÃO.....	1
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	3
2.1. Disponibilidade de água	3
2.2. Gestão de recursos hídricos.....	5
2.3. Modelos hidrológicos e sistemas de informações para a adequada gestão dos recursos hídricos.....	7
2.4. Vazões mínimas de referência e critérios para o processo de outorga	10
2.5. Regionalização de vazões.....	11
2.5.1. Método tradicional	11
2.5.2. Método baseado na proporcionalidade de vazões específicas	13
2.5.3. Método baseado na conservação de massas/continuidade de vazões	14
2.6. Modelo digital de elevação	14
2.7. A bacia do rio Paracatu	15
3. MATERIAL E MÉTODOS	19
3.1. Desenvolvimento do software.....	19
3.1.1. Identificação da seção de interesse.....	20
3.1.2. Obtenção dos dados afetos à seção de interesse	22

3.1.3.	Estimativa das vazões mínimas e média	23
3.1.3.1.	Método tradicional.....	23
3.1.3.2.	Método baseado na proporcionalidade de vazões específicas	25
3.1.3.3.	Método baseado na conservação de massas/continuidade de vazões	27
3.1.4.	Cálculo das vazões passíveis de outorga.....	28
3.1.5.	Elaboração de relatórios	30
3.2.	Aplicação do software – Estudo de caso para a bacia do rio Paracatu	30
3.2.1.	Modelo digital de elevação	32
3.2.1.1.	Amostragem.....	32
3.2.1.2.	Pré-processamento dos dados de drenagem e elevação.....	33
3.2.1.3.	Geração do MDE	34
3.2.1.4.	Pós-processamento do MDE	34
3.2.1.5.	Validação do MDE	35
3.2.2.	Vazões mínimas e média.....	36
3.2.2.1.	Dados fluviométricos.....	36
3.2.2.2.	Estimativa das vazões mínimas e média das estações fluviométricas	36
3.2.2.3.	Equações de regionalização	38
3.2.2.3.1.	Método tradicional.....	38
3.2.2.3.2.	Método baseado na proporcionalidade de vazões específicas	39
3.2.2.3.3.	Método baseado na conservação de massas/continuidade de vazões	39
3.2.3.	Cadastro de usuários de água da bacia	40
4.	RESULTADOS E DISCUSSÃO	42
4.1.	Software desenvolvido.....	42
4.1.1.	Localização.....	43
4.1.2.	Vazão.....	47
4.1.3.	Outorga.....	49
4.1.4.	Relatórios.....	50
4.1.5.	Atualização	54

4.1.6. Ajuda.....	56
4.2. Aplicação do software – Estudo de caso para a bacia do rio Paracatu	57
4.2.1. Obtenção das vazões mínimas e média.....	57
4.2.2. Análise do processo de outorga para a sub-bacia do ribeirão Entre Ribeiros.....	65
5. CONCLUSÕES.....	70
6. RECOMENDAÇÕES	71
7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	72
APÊNDICES.....	79
APÊNDICE A	80
APÊNDICE B	81
APÊNDICE C	84
APÊNDICE D.....	85
APÊNDICE E	87
APÊNDICE F	89

RESUMO

MOREIRA, Michel Castro, M. S., Universidade Federal de Viçosa, abril de 2006.
Gestão de recursos hídricos: sistema integrado para otimização da outorga de uso da água. Orientador: Fernando Falco Pruski. Co-orientadores: Demetrius David da Silva e José Márcio Alves da Silva.

O conhecimento da disponibilidade hídrica é a informação básica para a tomada de decisão no processo de outorga, sendo que a necessidade de conhecer a vazão ao longo da rede hidrográfica requer a utilização de técnicas de regionalização de vazões. A aplicação dos modelos de regionalização constitui, entretanto, uma dificuldade para a quantificação da disponibilidade de água, uma vez que para a aplicação destes é necessário o conhecimento de informações físicas da bacia. O desenvolvimento de técnicas para a geração de modelos digitais de elevação propiciou o uso dos sistemas de informações geográficas para obtenção automática das características físicas das bacias, agilizando e dando maior confiabilidade à aplicação dos modelos de regionalização. Sendo assim, o presente trabalho teve como objetivos: desenvolver um sistema integrado que possibilite otimizar o processo de gestão dos recursos hídricos, visando ao melhor uso da água e à redução dos conflitos entre os usuários; e realizar estudo de caso para a bacia do rio Paracatu utilizando o sistema desenvolvido. O software foi desenvolvido utilizando a ferramenta de programação Borland Delphi 7.0, enquanto que as rotinas vinculadas a Sistemas

de Informações Geográficas foram implementadas com a utilização do componente ESRI MapObjects 2.3. As rotinas implementadas foram elaboradas a fim de permitir a localização de uma seção de interesse ao longo da hidrografia da bacia e, a partir daí, realizar a obtenção dos dados relativos à seção de interesse para a estimativa das vazões mínimas e média por diferentes métodos de regionalização de vazões, sendo estes: tradicional; baseado na proporcionalidade de vazões específicas; e baseado na conservação de massas/continuidade de vazões. Após a estimativa das vazões, o software procede ao cálculo da disponibilidade hídrica na seção de interesse, levando em conta a vazão máxima passível de outorga e as outorgas estaduais e federais emitidas a montante, considerando, dessa forma, os principais elementos afetos a um processo de outorga. O software desenvolvido foi denominado SINGERH, tendo sido aplicado à bacia do rio Paracatu a fim de verificar as suas funcionalidades e potencialidades. O SINGERH permitiu a obtenção das vazões mínimas e média ao longo da hidrografia da bacia, além de ter fornecido subsídios para a tomada de decisão no processo de outorga ao estimar a disponibilidade hídrica em qualquer seção da hidrografia. O estudo de caso realizado permitiu verificar que na bacia do ribeirão Entre Ribeiros as outorgas emitidas superam o limite máximo outorgável do Estado de Minas Gerais. Dessa forma, o SINGERH constitui uma ferramenta para a gestão integrada dos recursos hídricos, permitindo o uso compartilhado e eficiente da água, minimizando, conseqüentemente, os conflitos entre seus usuários.

ABSTRACT

MOREIRA, Michel Castro. M.S., Universidade Federal de Viçosa, April 2006.
Management of water resources: integrated system for optimization of the water use granting. Adviser: Fernando Falco Pruski. Co-advisers: Demetrius David da Silva and José Márcio Alves da Silva.

The knowledge about water availability is a basic information for making a decision in the granting process. So, the knowledge on the discharge along the hydrographic network requires the use of discharge regionalization techniques. However, the application of the regionalization models constitutes a difficulty to the quantification of water availability, since their application requires the knowledge of the basin physical information. The development of techniques for the generation of digital elevation models propitiated the use of the Geographical Information Systems for automatic obtainment of the basin physical characteristics, as providing more quickness and higher reliability to the application of the regionalization models. So, this work was carried out to develop an integrated system that would make possible the optimization of the water resource management process, as aiming at the best use of the water and the reduction of the conflicts among users, as well as to accomplish a case-study for the river Paracatu basin, by using the developed system. The programming tool Borland Delphi 7.0 was used to develop the software, whereas the routines linked to the Geographical Information System were implemented, by using the component

ESRI MapObjects 2.3. Those routines were elaborated in order to allow for the localization of an interesting section along the hydrography of the basin and from which to obtain the data relative to the interesting section for estimating the minimum and average discharges by different regionalization methods as follows: traditional; based on the proportionality of specific discharges; and based on the conservation of masses/discharge continuities. After estimating the discharges, the software proceeds to the calculation of the water availability in the interesting section, taking into account the maximum discharge possible to be granted and both state and federal grantings emitted upstream, so taking into account the main elements in a granting process. The developed software was called as SINGERH, and was applied to the basin of the Paracatu river in order to verify its functionalities and potentialities. The SINGERH turned possible the obtainment of the minimum and average discharges along the hydrography of the basin, besides to supplying subsidies for making decision in the granting process when estimating the water availability in any section of the hydrography. The case-study turned possible to verify that the grantings emitted in the basin of the Entre Riberios creek rather overcome the maximum grantable limit in Minas Gerais State. Thus, SINGERH constitutes a tool for the integrated management of the water resources, as allowing for a shared and efficient use of the water, therefore minimizing the conflicts among its users.

1. INTRODUÇÃO

A água é um elemento essencial para a garantia da qualidade de vida, sendo fator restritivo ao desenvolvimento econômico e social em muitas regiões. Apesar de o Brasil possuir uma situação privilegiada no que diz respeito à disponibilidade de água, sua variação geográfica e temporal tem gerado conflitos pelo seu uso em diversas bacias.

Em estudo técnico elaborado pela Agência Nacional de Águas (ANA, 2005b) foi constatado que diversas bacias brasileiras apresentam uma combinação de baixa disponibilidade e grande utilização de recursos hídricos. Na bacia do rio Paracatu, principal contribuinte para a formação das vazões do rio São Francisco, já são evidenciadas vazões de retirada superiores à máxima permissível para outorga, forçando, inclusive, a adoção de um sistema de rodízio do uso da água em alguns locais.

Problemas advindos dos conflitos pelo uso da água, como os já evidenciados na bacia do rio Paracatu e em diversas outras bacias brasileiras, remetem à necessidade de um adequado programa de gestão de recursos hídricos. Nesse sentido, um grande avanço foi a promulgação da Lei 9.433/97, que instituiu a Política Nacional de Recursos Hídricos e criou o Sistema Nacional de Gerenciamento de Recursos Hídricos, o qual possui como um de seus instrumentos de gestão a outorga de direito de uso da água.

No Brasil, embora os instrumentos de gerenciamento de recursos hídricos tenham sido criados pela Lei 9.433/97 para lidar com conflitos de uso da água e promover a recuperação ambiental das bacias, até o presente momento ainda poucos avanços têm sido evidenciados, a fim de integrar os diversos fatores requeridos em um processo de outorga e facilitar a ação dos órgãos gestores e comitês de bacias.

O conhecimento da disponibilidade de água e das vazões já outorgadas a montante da seção de interesse é de fundamental importância para a quantificação das vazões ainda passíveis de serem outorgadas. A complexidade da integração dessas informações, entretanto, exige o desenvolvimento de sistemas capazes de coletar, armazenar e processar essas informações, fornecendo subsídios mais confiáveis para a análise do processo de outorga.

Considerando que a disponibilização de um sistema integrado, que alie o conhecimento das vazões observadas e das demandas relativas aos diferentes tipos de uso da água, constituiria uma ferramenta de grande importância para um adequado programa de gestão de recursos hídricos, o presente trabalho teve como objetivos: desenvolver um sistema integrado que possibilite otimizar a gestão de recursos hídricos; e realizar um estudo de caso para a bacia do rio Paracatu utilizando o sistema desenvolvido.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1. Disponibilidade de água

A água é um elemento essencial para a garantia da qualidade de vida humana. No relatório elaborado pela Organização das Nações Unidas para a Educação, a Ciência e a Cultura (UNESCO), intitulado “Water for people, water for life” (UNESCO, 2003), é apresentada uma ampla análise da disponibilidade atual dos recursos hídricos, sendo mencionado que 1,1 bilhão de habitantes não têm água em quantidade suficiente nem mesmo para garantir as suas necessidades básicas. Considerando as projeções apresentadas nesse mesmo relatório, dois diferentes cenários de crescimento da oferta e da demanda de uso da água indicam que aproximadamente 7 bilhões de pessoas em 60 países (projeções pessimistas) ou 2 bilhões em 48 países (projeções otimistas) sofrerão com a falta de água até a metade do século XXI.

Dos 182 países e territórios mencionados no relatório, o Brasil aparece na 25ª posição em relação à disponibilidade de recursos hídricos, com um volume *per capita* disponível de $48.314 \text{ m}^3 \text{ ano}^{-1} \text{ hab}^{-1}$, valor 28 vezes superior ao volume *per capita* de água considerado pela UNESCO como o mínimo necessário para a garantia de uma qualidade de vida saudável, correspondente a $1.700 \text{ m}^3 \text{ ano}^{-1} \text{ hab}^{-1}$.

Embora o Brasil possua uma situação privilegiada no que diz respeito à disponibilidade de água, sua distribuição não é uniforme no território nacional,

pois, enquanto a Região Norte dispõe de 68,5% dos recursos hídricos e uma população de apenas 7% da população nacional, o Sudeste, onde moram 42,6% dos habitantes, tem apenas 6% dos recursos hídricos disponíveis (EUCLYDES et al., 2005).

A bacia do rio São Francisco, com uma área de aproximadamente 640.000 km², apresenta uma disponibilidade hídrica de 64,4 bilhões de m³ ano⁻¹, respondendo por 69% das águas superficiais do Nordeste brasileiro (ALMANAQUE..., 2001). As precipitações médias anuais na bacia variam de 400 mm, na região do Sub-médio, a 1.600 mm na região do Alto São Francisco (RAMOS e PRUSKI, 2003), indicando que o regime pluviométrico irregular e deficitário em algumas áreas torna o uso da irrigação indispensável para a agricultura e conduz à necessidade de maior atenção governamental quanto ao problema da seca.

A disponibilidade hídrica *per capita* na bacia do rio São Francisco é de 7.024 m³ ano⁻¹ hab⁻¹. A maior disponibilidade hídrica se encontra no Médio São Francisco, com 15.167 m³ ano⁻¹ hab⁻¹, seguida do Alto (6.003 m³ ano⁻¹ hab⁻¹), do Baixo (1.172 m³ ano⁻¹ hab⁻¹) e do Sub-médio (899 m³ ano⁻¹ hab⁻¹) (ANA, 2004a). Apesar de o Médio possuir a maior disponibilidade hídrica *per capita*, em algumas áreas são verificados volumes *per capita* inferiores ao considerado pela UNESCO como o mínimo necessário para a garantia de uma qualidade de vida saudável.

No que diz respeito aos usos consuntivos, a demanda de água na bacia do rio São Francisco é de 166 m³ s⁻¹, sendo o principal usuário a irrigação, responsável por 69% dessa demanda (ANA, 2004b). Em diversas partes da bacia já são evidenciados conflitos pelo uso da água, como nas sub-bacias dos rios Verde Grande, Carinhanha e Paracatu. Conforme aponta ANA (2004c), esses conflitos tendem a se acirrar em razão de uma série de fatores, como a ampliação da área de agricultura irrigada, a necessidade de maior produção de energia elétrica para atender ao crescimento da demanda e à eventual concretização de planos de transposição de parte das águas do rio São Francisco para outras bacias.

A bacia do rio Paracatu, com uma área de drenagem de aproximadamente 45.600 km², é o principal contribuinte para a formação das vazões do rio São Francisco, com cerca de 19,5% do volume médio escoado na sua foz (PEREIRA,

2004), já apresentando conflitos pelo uso da água. Rodriguez (2004) evidenciou, dentre as 21 seções com informações fluviométricas da bacia do rio Paracatu analisadas, que em três as vazões de retirada pela irrigação são superiores às permissíveis no Estado de Minas Gerais (30% da $Q_{7,10}$), sendo essas localizadas no rio Escuro (34,3% da $Q_{7,10}$), no ribeirão Roncador (38,3% da $Q_{7,10}$) e no ribeirão Entre Ribeiros (85% da $Q_{7,10}$). Na estação mais a jusante da bacia do rio Paracatu (Porto Alegre) foi observada uma vazão de retirada de 19% da $Q_{7,10}$, caracterizando, portanto, que, segundo o critério de outorga do Estado de Minas Gerais, no qual está inserido o rio Paracatu, a bacia desse rio tem 2/3 dos recursos hídricos superficiais outorgáveis já efetivamente utilizados.

2.2. Gestão de recursos hídricos

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 necessário maior atenção para a proteção dos recursos hídricos visando ao seu aproveitamento racional (SETTI et al., 2001).

Problemas advindos dos conflitos pelo uso da água, como os já evidenciados em diversas bacias brasileiras, remetem à necessidade de um adequado programa de gestão de recursos hídricos. Segundo Setti et al. (2001), gestão de recursos hídricos, em sentido lato, é a forma pela qual se pretende equacionar e resolver as questões de escassez relativa dos recursos hídricos, bem como fazer o seu uso adequado, visando a otimização dos recursos em benefício da sociedade.

Nesse sentido, a Política Nacional de Recursos Hídricos (PNRH) constitui um grande avanço na gestão dos recursos hídricos no Brasil, tendo como preceitos básicos: a adoção da bacia hidrográfica como unidade de planejamento, a consideração dos múltiplos usos da água, o reconhecimento da água como um bem finito, vulnerável e dotado de valor econômico e a necessidade da consideração da gestão descentralizada e participativa desse recurso (BRASIL, 1997).

Um dos instrumentos da PNRH para a gestão dos recursos hídricos é a outorga de direito de uso da água. O instrumento de outorga 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.

A outorga depende da análise, no tempo e no espaço, da disponibilidade e da necessidade hídrica para a conservação do meio biótico (CRUZ e TUCCI, 2005). Assim, o conhecimento da disponibilidade de água é a informação básica para a tomada de decisão no processo de outorga, sendo que as limitadas séries de dados fluviométricos disponíveis e a necessidade de se conhecer a vazão, ao longo da rede hidrográfica, dificultam ou, muitas vezes, impedem a realização de uma adequada gestão de recursos hídricos. Apesar dos esforços da Agência Nacional de Águas, através da Superintendência de Informações Hidrológicas, em ampliar a rede hidrometeorológica do país, Tucci (2002) afirma que uma rede hidrométrica não cobre todos os locais de interesse necessários ao gerenciamento dos recursos hídricos de uma região, de forma que sempre existirão lacunas temporais e espaciais que necessitem ser preenchidas com base em metodologias que busquem uma melhor estimativa dos dados de interesse em seções que não possuem medições.

Outro problema afeto ao conhecimento da disponibilidade hídrica é a quantificação das vazões consumidas pelos diversos usuários. Essa quantificação permite uma melhor compreensão do comportamento hidrológico, propiciando a obtenção da real disponibilidade hídrica da bacia. Nesse sentido, as vazões naturais, obtidas pela soma da vazão observada com as vazões de retirada, podem auxiliar a busca de um índice mais efetivo em substituição aos utilizados hoje para concessão de outorga, que são, como citam Johnson e Lopes (2003), muito restritivos para a bacia do rio Paracatu, por não representarem, com exatidão, o potencial hídrico da região.

Tendo em vista essa preocupação, o Operador Nacional do Sistema Elétrico (ONS) tem desenvolvido um trabalho de levantamento das informações dos usos consuntivos da água nas principais bacias do sistema interligado nacional, a fim de obter as séries de vazões naturais, bem como fundamentar cenários evolutivos do uso e disponibilidade dos recursos hídricos.

Para superar a dificuldade encontrada para cobrir todos os locais de interesse necessários ao adequado gerenciamento dos recursos hídricos de uma região, utiliza-se a técnica de regionalização de vazões para transferir

especialmente as informações, a partir dos dados disponíveis em determinadas localidades. Diversas metodologias para essa finalidade encontram-se disponíveis, como as descritas por Eletrobras (1985a), Eletrobras (1985b) e Chaves et al. (2002). Além dessas metodologias, outras têm sido propostas, como a de Novaes (2005), que desenvolveu um procedimento de ajuste das vazões mínimas e média ao longo da hidrografia da bacia do rio Paracatu, visando otimizar o processo de gestão de recursos hídricos nessa bacia.

A aplicação desses modelos de regionalização constitui outra dificuldade na quantificação da disponibilidade de água, pelo fato de eles, na maioria dos casos, necessitarem do conhecimento de informações físicas da bacia.

2.3. Modelos hidrológicos e sistemas de informações para a adequada gestão dos recursos hídricos

Os modelos hidrológicos são ferramentas utilizadas para melhor entender e representar o comportamento hidrológico de uma bacia hidrográfica. A aplicação desses modelos é limitada pela heterogeneidade física da bacia e dos processos envolvidos no ciclo hidrológico, o que tem propiciado o desenvolvimento de um grande número de modelos (TUCCI et al., 2002).

Diversos modelos hidrológicos têm sido desenvolvidos no exterior para caracterizar a disponibilidade hídrica, bem como para avaliar o impacto na disponibilidade de água em condições de mudanças no clima ou no uso do solo (FERRAZ et al., 1998; SILVEIRA et al., 1998; CIRILO et al., 1997; CATALUNHA, 2004). Dentre os mais conhecidos, pode-se citar o Topographic Based Hydrological Model (TOPMODEL), o Soil and Water Assessment Tool (SWAT), o Areal Non-point Source Watershed Response Simulation (ANSWERS-2000), o MIKESHE e o MODSIM.

A aplicação e o ajuste dos parâmetros desses modelos à realidade brasileira, no entanto, têm sido um desafio para os profissionais e pesquisadores da área, devido às grandes diferenças entre as condições edafoclimáticas para as quais os modelos foram desenvolvidos e aquelas existentes nas condições brasileiras. Soma-se a esse fato a dificuldade de implantação desses modelos para o gerenciamento de recursos hídricos, devido à complexidade dos usos da água e à dinâmica ambiental, no tempo e no espaço, da bacia hidrográfica.

Uma sensível evolução no desenvolvimento dos modelos hidrológicos foi o surgimento dos sistemas de informações geográficas (SIGs), os quais estimularam a construção de diversos sistemas integrados, conectando os modelos hidrológicos às bases de dados espaciais (CHAVES, 2002). A complexidade dos usos da água em uma bacia hidrográfica demanda, entretanto, o desenvolvimento de sistemas capazes de coletar, armazenar e processar os fatos associados a eventos (dados) sobre o ambiente que o cerca, transformando-os em informação útil para o processo de gestão de recursos hídricos.

Fistarol et al. (2004) afirmam que o surgimento dos sistemas de informações de recursos hídricos ocorreu por força da necessidade de dinamizar o processo de gestão participativa, uma vez que permitem contemplar a crescente complexidade dos múltiplos usos da água, forçando a melhoria da dinâmica gerencial e a oferta de serviços gerada pelo desenvolvimento tecnológico. Esses mesmos autores, analisando diferentes sistemas de informações de recursos hídricos, observaram que existem diferenças expressivas entre eles, advindas principalmente do fato de que cada sistema possui características determinadas pelo objetivo para o qual foi desenvolvido.

No Brasil, embora os instrumentos de gerenciamento de recursos hídricos tenham sido criados pela Lei 9.433/97 para lidar com conflitos de uso da água e promover a recuperação ambiental das bacias, até o presente momento registram-se avanços ainda incipientes na implementação desses sistemas, dificultando a ação dos órgãos gestores e comitês de bacias.

Dentre os sistemas de informações de recursos hídricos existentes, o PROPAGAR 2000, desenvolvido por Viegas Filho e Lanna (2003), é um modelo orientado para a simulação da propagação de vazões ao longo de uma bacia hidrográfica, visando ao atendimento de demandas hídricas submetidas a decisões gerenciais e a regras de operação de reservatórios.

Castro Junior et al. (2000) desenvolveram, para a bacia hidrográfica do rio Itapemirim (ES), uma ferramenta para cadastro, gerenciamento e análise de dados relativos à captação de água e lançamento de efluentes. A ferramenta, que está baseada em tecnologias de geoprocessamento, faz parte de um sistema de informações hidrológicas associado aos elementos condicionantes e caracterizadores da disponibilidade dos recursos hídricos.

Catalunha (2004) desenvolveu um sistema computacional visando fornecer subsídios para o processo de concessão de outorga do uso da água por órgãos gestores de recursos hídricos. Esse sistema, denominado Sistema para Gestão e Estudo em micro-bacias (SGEB), foi aplicado à bacia do rio Paraíba do Sul, a montante de Volta Redonda (RJ), tendo apresentado as seguintes vantagens: permitir maior facilidade de obtenção das informações hidrológicas da bacia; facilitar a manipulação do cadastro de usuários de água da bacia; dispensar a necessidade de recursos humanos especializados para operação do sistema; e oferecer uma ferramenta para balanço entre ofertas e demandas futuras do uso da água, em quantidade e qualidade, com identificação de conflitos potenciais, atendendo, assim, a uma necessidade embasada pelo artigo 7º, inciso III da Lei 9.433/97. Esse autor ressalta que o SGEB apresenta, entretanto, algumas limitações, como: elevado tempo computacional para manipulação dos dados; necessidade de reestruturação dos procedimentos administrativos de outorga do órgão gestor para o proposto no SGEB; e desconsideração do fator qualidade da água na análise da outorga.

O Sistema Integrado de Gerenciamento de Recursos Hídricos no Estado de São Paulo (SIGRH), desenvolvido pelo Departamento de Águas e Energia Elétrica (DAEE), pelo Fundo Estadual de Recursos Hídricos (FEHIDRO) e pela Secretaria de Energia, Recursos Hídricos e Saneamento, constitui o sistema oficial para análise, planejamento e gestão dos recursos hídricos no Estado de São Paulo, sendo um sistema informatizado para comunicação de dados, troca de informações e armazenamento de todo o conteúdo técnico e legal afeto à gestão de recursos hídricos (SIGRH, 2004). O sistema permite consultas espaciais e exibe informações de diversas variáveis hidrológicas a partir da identificação de uma seção de interesse em coordenadas geográficas e do fornecimento de sua área de drenagem.

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

Além dos sistemas citados, outros modelos que se caracterizam por exigirem computadores com maior capacidade de processamento e pessoal

especializado em sistemas de informações geográficas têm sido desenvolvidos. Um desses modelos é o Sistema de Apoio ao Gerenciamento de Recursos Hídricos (SIAGER), desenvolvido por Ferreira (1999), o qual considera a base de dados digitais de hidrografia e o modelo digital de elevação da área em estudo. O sistema avalia os usuários a montante e a jusante da seção de interesse e, com base na vazão solicitada e na vazão disponível, apresenta um relatório dos cálculos efetuados, permitindo ou não a outorga do usuário.

Apesar dos sistemas disponíveis constituírem importantes contribuições para a compreensão do comportamento hidrológico da bacia, sua aplicação, a fim de fornecer subsídios para o processo de gestão dos recursos hídricos, possui, em geral, restrições, como limitações advindas da escala da rede hidrográfica, o que não permite a locação de pontos específicos na hidrografia; procedimentos de regionalização de vazões que não permitem a obtenção das vazões para áreas de drenagem inferiores ou superiores a um limite preestabelecido; a não-incorporação de um modelo digital de elevação, a fim de obter automaticamente as características físicas da seção de interesse; a não-consideração de possíveis descontinuidades nas vazões ao longo da hidrografia; e a impossibilidade de inclusão de outorgas realizadas no cálculo das vazões ainda disponíveis para a concessão de outorgas.

2.4. Vazões mínimas de referência e critérios para o processo de outorga

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

Inúmeros fatores de natureza hídrica, biológica, geológica, física, ambiental, social ou econômica devem ser considerados na análise do processo de outorga. O regime dos rios de uma bacia também deve ser considerado, sendo que para rios perenes a outorga geralmente é feita com base na vazão mínima com sete dias de duração e período de retorno de 10 anos ($Q_{7,10}$) ou nas vazões

mínimas associadas às permanências de 90% (Q_{90}) ou 95% (Q_{95}). Somente certo percentual dessas vazões deve ser utilizado, sendo o restante considerado como vazão necessária para a manutenção do meio biótico (vazão ecológica). Em rios de regime temporário ou intermitente o processo de outorga torna-se mais complexo, pois na época seca o rio deixa de apresentar vazão (SILVA e RAMOS, 2001).

No Brasil, cada estado tem adotado critérios específicos para o estabelecimento das vazões mínimas de referência para outorga sem, entretanto, apresentar justificativas para a adoção desses valores (CRUZ, 2001). Para captações superficiais os critérios adotados para outorga são aqueles apresentados na Tabela 1. A maior parte dos órgãos gestores de recursos hídricos que emitem outorgas possui esses critérios aprovados em legislação ou em discussão para aprovação. Analisando os critérios para análise dos pedidos de outorga utilizados pelos órgãos gestores de recursos hídricos, pode-se verificar uma grande diversidade de vazões de referência adotadas, bem como dos percentuais considerados outorgáveis (ANA, 2005b).

2.5. Regionalização de vazões

O termo regionalização tem sido utilizado em hidrologia para denominar a transferência de informações de um local para outro dentro de uma área com comportamento hidrológico semelhante.

A qualidade dos dados hidrológicos é essencial para o processo de regionalização, pois nenhum estudo gera novas informações, apenas explora as informações existentes. Dessa forma, se os dados não possuem qualidade ou não foram identificados e sanados os seus erros, a regionalização será tendenciosa, com resultados inadequados (TUCCI, 2002).

2.5.1. Método tradicional

Um dos métodos mais difundidos para a regionalização de vazões é o método tradicional, o qual é descrito por Eletrobras (1985a), e baseia-se na identificação de regiões hidrológicamente 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 (NOVAES, 2005).

Tabela 1 – Critérios adotados para outorga de captação de águas superficiais pelos órgãos gestores de recursos hídricos

Órgão gestor	Vazão máxima outorgável	Legislação referente à vazão máxima outorgável	Limites máximos de vazões consideradas insignificantes	Legislação referente à definição das vazões insignificantes
ANA	70% da Q_{95} podendo variar em função das peculiaridades de cada região. 20% para cada usuário individual.	Não existe, em função das peculiaridades do país, podendo variar o critério.	1,0 L/s	Resolução ANA nº 42/2004
SRH-BA	80% da Q_{90} 20% para cada usuário individual.	Decreto Estadual nº 6.296/97	0,5 L/s	Decreto Estadual nº 6.296/97
SRH-CE	90% da Q_{90reg}	Decreto Estadual nº 23.067/94	$2,0 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$ (0,56 L/s – para águas superficiais e subterrâneas)	Decreto Estadual nº 23.067/94
SEMARH-GO	70% da Q_{95}	Não possui legislação específica.	Não estão ainda definidos	-
IGAM-MG	30% da $Q_{7,10}$ para captações a fio d'água. Para captações em reservatórios podem ser liberadas vazões superiores, mantendo o mínimo residual de 70% da $Q_{7,10}$ durante todo o tempo.	Portarias do IGAM nº 010/98 e 007/99	1,0 L/s para maior parte do Estado e 0,5 L/s para as regiões de escassez (águas superficiais) $10,0 \text{ m}^3 \text{ dia}^{-1}$ (águas subterrâneas)	Deliberação CERH-MG nº 09/2004
AAGISA-PB	90% da Q_{90reg} . Em lagos territoriais, o limite outorgável é reduzido em 1/3.	Decreto Estadual nº 19.260/1997	$2,0 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$ (0,56 L/s – para águas superficiais e subterrâneas)	Decreto Estadual nº 19.260/1997
SUDERHSA-PR	50% da Q_{95}	Decreto Estadual nº 4.646/2001	$1,0 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$ (0,3 L/s)	-
SECTMA-PE	Depende do risco que o requerente pode assumir.	Não existe legislação específica.	0,5 L/s ou $43 \text{ m}^3 \text{ dia}^{-1}$ (águas superficiais) $5,0 \text{ m}^3 \text{ dia}^{-1}$ (águas subterrâneas para abastecimento humano)	Decreto Estadual nº 20.423/98
SEMAR-PI	80% da Q_{95} (Rios) e 80% da Q_{90reg} (Açudes)	Não existe legislação específica.	Não estão ainda definidos	-
SERHID-RN	90% da Q_{90reg}	Decreto Estadual nº 13.283/97	$1,0 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$ (0,3 L/s)	Decreto Estadual nº 13.283/97
SEMA-RS	Não está definido.	-	Média mensal até $2,0 \text{ m}^3 \text{ dia}^{-1}$ (águas subterrâneas)	Decreto Estadual nº 42.047/2002
DAEE-SP	50% da $Q_{7,10}$ por bacia. Individualmente nunca ultrapassar 20% da $Q_{7,10}$.	Não existe legislação específica.	$5,0 \text{ m}^3 \text{ dia}^{-1}$ (águas subterrâneas)	Decreto Estadual nº 32.955/91
SEPLANTEC-SE	100% da Q_{90} 30% da Q_{90} para cada usuário individual.	Não existe legislação específica.	$2,5 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$ (0,69 L/s)	Resolução nº 01/2001
NATURATINS-TO	75% da Q_{90} por bacia. Individualmente o máximo é 25% da mesma Q_{90} . Para barragens de regularização, 75% da vazão de referência adotada.	Decreto Estadual já aprovado pela Câmara de outorga do Conselho Estadual de Recursos Hídricos.	0,25 L/s ou $21,60 \text{ m}^3 \text{ dia}^{-1}$. A minuta de regulamentação aprovada deve alterar para 1,0 L/s ou $21,60 \text{ m}^3 \text{ dia}^{-1}$	Portaria NATURATINS nº 118/2002

Fonte: ANA (2005b).

Um dos pontos cruciais num estudo de regionalização é a delimitação das regiões hidrológicas ou estatisticamente homogêneas, ou seja, regiões com várias estações que tenham séries oriundas de populações regidas pela mesma distribuição de probabilidades, com os parâmetros variando entre as estações (BAENA, 2002).

De acordo com Hosking e Wallis (1997), a identificação de regiões homogêneas deve ser feita em duas etapas consecutivas: a primeira consistindo de uma delimitação preliminar baseada unicamente nas características locais, e a segunda de um teste estatístico construído com base somente nas estatísticas locais, cujo objetivo é verificar os resultados preliminares.

O ajuste de equações de regressão, segundo Euclides et al. (1999), é estabelecido através de regressão múltipla entre a vazão de interesse e as características físicas e climáticas das sub-bacias.

Dentre os modelos de regressão comumente utilizados estão o linear, potencial, exponencial, logarítmico e recíproco. Uma série de avaliações objetivas pode ser realizada para verificar a adequação do ajustamento de determinado modelo aos dados. Entre essas avaliações, as mais adotadas são o teste da função F, o valor do coeficiente de determinação e do desvio-padrão dos erros do ajustamento, também chamado de erro-padrão da estimativa (EUCLYDES et al., 1999).

Baena (2002) apresenta como características físicas comumente utilizadas no processo de regionalização hidrológica a área de drenagem (A_d), o comprimento do rio principal (L), a densidade de drenagem (D_d), a declividade média da bacia (S_m) e a declividade do rio principal (S_{rp}) e como característica climática a precipitação média na área de drenagem.

2.5.2. Método baseado na proporcionalidade de vazões específicas

Por este método, descrito em Eletrobras (1985b), obtêm-se as vazões relativas à seção de interesse utilizando as vazões correspondentes às seções fluviométricas mais próximas e realizando uma ponderação no cálculo das vazões, tendo como base as áreas de drenagem de postos fluviométricos localizados a montante e, ou, a jusante do local onde se deseja estimar a vazão. Assim, quando a seção de interesse se encontra entre dois postos fluviométricos a vazão na seção de interesse é igual à vazão na seção de montante mais um

incremento da vazão proporcional ao aumento da área de drenagem entre a estação de montante e a de jusante. Quando isso não acontece, ou seja, a seção de interesse está a montante ou a jusante de apenas um posto fluviométrico, considera-se que a vazão específica das duas seções é igual. Para o caso em que a seção de interesse está situada em um canal afluente, cuja foz está entre dois postos fluviométricos de um canal superior, aplica-se uma ponderação das vazões das seções fluviométricas proporcional à área de drenagem para a confluência do canal afluente com o canal superior, e, posteriormente, obtém-se a vazão na seção de interesse considerando a vazão específica da confluência e a da seção de interesse como sendo iguais.

Pelo fato de esse método não trabalhar com o conceito de regiões hidrologicamente homogêneas, é possível efetuar a sua aplicação em pequenas bacias hidrográficas, com número reduzido de postos hidrométricos.

2.5.3. Método baseado na conservação de massas/continuidade de vazões

Este método, proposto por Novaes (2005), está baseado no princípio da conservação de massa, assegurando, assim, a continuidade das vazões ao longo da hidrografia da bacia. Para tanto é proposto o ajuste de uma equação de regressão para o rio principal e, na seqüência, é feito o ajuste de equações para seus afluentes diretos. No intuito de garantir a continuidade das vazões entre os afluentes diretos e o rio principal, as equações ajustadas para os afluentes diretos consideram que a vazão na foz é igual à diferença entre as vazões imediatamente a jusante e a montante da confluência com o rio principal.

Os ajustes de equações são realizados para os afluentes diretos que possuem estações fluviométricas, e para as situações em que o rio afluente não possui nenhum posto fluviométrico é utilizada uma equação linear para representar a vazão, de tal forma que a equação produza 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.

2.6. Modelo digital de elevação

As características físicas de uma bacia hidrográfica eram, até meados da década de 1980, obtidas através de processo demorado e trabalhoso, em que o

especialista examinava as curvas de nível e a rede de drenagem em bases cartográficas e, manualmente, interpretava e delimitava os seus limites.

O desenvolvimento de modelos digitais de elevação (MDE) e de técnicas mais precisas de extração de drenagem numérica e delimitação de bacias hidrográficas propiciou o uso dos sistemas de informações geográficas para 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.

Um MDE pode ser considerado como qualquer representação digital de uma variação contínua do relevo no espaço, sendo que em seu processo de geração são executadas cinco fases: a amostragem dos dados digitais altimétricos e da rede de drenagem; o pré-processamento dos dados; a geração do MDE com o uso de um interpolador; o pós-processamento do MDE gerado; e a validação do MDE gerado (CHAVES, 2002; BAENA, 2002; PIRES et al., 2005).

A análise da precisão do MDE, segundo Cuartero et al., citados por Pires et al. (2005), pode ser realizada por simples reconhecimento visual, por validações cruzadas baseadas em relações de vizinhança, por superposição de curvas de nível ou por comparação estatística com pontos de controle.

A eficiência da extração das informações hidrológicas, medida em termos de precisão e de exatidão, está diretamente relacionada com a qualidade do modelo digital de elevação e do algoritmo de interpolação utilizado. 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 (BAENA, 2002).

2.7. A bacia do rio Paracatu

A bacia do rio Paracatu está situada no Médio São Francisco e drena uma área de aproximadamente 45.600 km², sendo a segunda maior sub-bacia do rio São Francisco (BRASIL, 1996). Está localizada quase que integralmente no Estado de Minas Gerais (92%), incluindo apenas 5% de sua área no Estado de Goiás e 3% no Distrito Federal (DINO, 2003). Os principais afluentes do rio Paracatu são, pela margem direita, o rio da Prata, com área de drenagem de

3.750 km², e o rio do Sono, com 5.969 km²; e, pela margem esquerda, o rio Escuro, com 4.347 km², o ribeirão Entre Ribeiros, com 3.973 km², e o rio Preto, com 10.459 km² (ANA, citado por Rodriguez, 2004).

O clima da bacia é predominantemente tropical chuvoso, havendo concentração das chuvas no período de outubro a abril, com destaque para o trimestre novembro, dezembro e janeiro como o mais chuvoso. A precipitação média anual na bacia é de 1.338 mm, enquanto a evapotranspiração média anual é de 1.140 mm (BRASIL, 1996). O clima é quente e úmido, com temperaturas médias anuais que oscilam entre 22 e 24 °C, variando pouco de uma estação para outra e sofrendo maior influência da orografia do que da variação latitudinal, e umidade média anual de aproximadamente 72% (BRASIL, 1996).

O processo de ocupação da bacia foi intensificado a partir da década de 1970, com a adoção de políticas governamentais como o PLANOROESTE, que objetivou implantar na região uma infra-estrutura de transporte e energia elétrica, incentivando o desenvolvimento econômico e demográfico. Houve também, entre as décadas de 1960 e 1970, um processo de colonização privada através da Companhia de Promoção Agrícola (CAMPO), que se utilizou do cooperativismo para a implantação de grandes projetos de colonização, destacando-se, nesses projetos, a participação de agricultores originários de outras regiões do país, o que introduziu na área produtiva uma mentalidade empreendedora e moderna. Atualmente, a região oeste da bacia apresenta índices de desenvolvimento e densidade demográfica mais elevados que a região leste (o que acaba por acarretar maior pressão sobre os recursos hídricos), sendo esses índices decorrentes do fato de a região oeste apresentar melhores condições climáticas e de fertilidade do solo e, conseqüentemente, maior ocupação da área pela agricultura irrigada. A metade oriental da bacia é caracterizada por uma ocupação menos intensiva, por um índice de desenvolvimento menor e por uma menor pressão sobre o uso dos recursos hídricos, uma vez que os solos são mais pobres (DINO, 2002).

A agropecuária é a atividade econômica principal da região, sendo ainda conduzida por sistemas de manejo do solo que não propiciam a sua conservação. São utilizadas de forma intensa as técnicas de aração, gradagem, queimadas, pecuária extensiva e, ainda, a supressão da cobertura vegetal nativa. Essas práticas geram o aumento da erosão na região (DINO, 2002), sendo que cerca de

0,2% da área da bacia (9.000 ha) apresenta processos erosivos avançados (BRASIL, 1996).

O principal uso da água na bacia do rio Paracatu é a irrigação, que ocupa uma área de 37.150 ha e cuja vazão consumida representa 86,6% do total demandado na bacia, seguida pelos abastecimentos animal com 10,7%, urbano com 1,5%, e rural com 1,2% (RODRIGUEZ, 2004). O sistema de irrigação predominante é o pivô central (88%), sendo que em 42% da área sob esse sistema de irrigação (13.730 ha) já ocorrem limitações para o uso da água (BRASIL, 1996).

Dada a importância da bacia do rio Paracatu para o Estado de Minas Gerais e para a bacia do rio São Francisco e a constatação do intenso desenvolvimento econômico e dos conflitos pelo uso da água já existentes, o Grupo de Pesquisas em Recursos Hídricos (GPRH) do Departamento de Engenharia Agrícola (DEA) da Universidade Federal de Viçosa (UFV) vem desenvolvendo estudos no sentido de quantificar a disponibilidade hídrica da bacia e fornecer ferramentas para a adequada gestão dos recursos hídricos.

Dessa forma, Rodriguez (2004) desenvolveu um estudo a fim de analisar o comportamento hidrológico do rio Paracatu e seus afluentes no período de 1970 a 2000, além de ter estimado as vazões de retirada e consumida pela irrigação e pelos abastecimentos animal e humano (urbano e rural), avaliando o impacto dos usos consuntivos da água nas vazões da bacia do rio Paracatu. Neste estudo foi constatado que as vazões de retirada pela irrigação na bacia do rio Paracatu, estimadas para os meses de maior demanda, variaram de 4,3 a 85,1% da $Q_{7,10}$, sendo o valor de 85,1% (evidenciado no ribeirão Entre Ribeiros) bastante superior ao valor máximo permitido para outorga em Minas Gerais (onde se situa o ribeirão), o qual é de 30% da $Q_{7,10}$.

No mesmo trabalho foi verificado que o consumo de água na bacia do rio Paracatu aumentou cerca de 11 vezes no período de 1970 a 1996, com uma taxa de crescimento do consumo de água de $0,20 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1} \text{ ano}^{-1}$, sendo $0,19 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1} \text{ ano}^{-1}$ correspondente ao aumento do consumo pela irrigação. Esse fato indica a necessidade de adoção de uma gestão adequada dos recursos hídricos que considere a alta taxa de crescimento da demanda, em virtude do intenso desenvolvimento econômico existente na bacia.

Dando continuidade aos trabalhos do GPRH, Novaes (2005) desenvolveu um modelo para a estimativa das vazões mínimas a partir de dados pluviométricos. O modelo apresentou um bom desempenho, sendo que ao analisar os resultados obtidos o autor propôs o conceito de inércia hídrica, a qual se refere à lâmina precipitada necessária para produzir escoamento subterrâneo, garantindo, conseqüentemente, o escoamento no leito dos rios no período de estiagem.

Novaes (2005) também propôs um procedimento de ajuste de equações para a estimativa das vazões mínimas e média. As vazões mínimas e média, calculadas a partir das equações obtidas pelo procedimento de ajuste proposto, apresentaram continuidade ao longo da rede hidrográfica da bacia do rio Paracatu, ao contrário do constatado quando foram aplicados demais métodos de regionalização de vazão estudados.

3. MATERIAL E MÉTODOS

Visando otimizar o processo de gestão dos recursos hídricos, desenvolveu-se um software que permite obter a disponibilidade hídrica para qualquer seção de interesse ao longo da rede hidrográfica de uma bacia e quantificar o impacto da concessão de uma nova outorga nessa disponibilidade. No software desenvolvido foram considerados unicamente os recursos hídricos de superfície e a inexistência de reservatórios de acumulação na bacia, ou seja, foram observadas as condições de outorga a fio d'água.

Para verificação das funcionalidades e potencialidades do software desenvolvido foi realizado estudo de caso para a bacia do rio Paracatu.

3.1. Desenvolvimento do software

O software foi desenvolvido utilizando a ferramenta de programação Borland Delphi 7.0, enquanto que as rotinas afetas a Sistemas de Informações Geográficas (SIGs) foram implementadas com a utilização do componente ESRI MapObjects 2.3 (MapObjects), o qual é composto por um conjunto de funções para mapeamento, sendo este de uso freqüente por programadores no desenvolvimento de aplicativos que envolvem o uso de mapas.

O software foi projetado para ser executado no sistema operacional Microsoft Windows 2000 ou superior, possuindo uma interface de fácil utilização e auto-explicativa. Desenvolveu-se, ainda, um sistema de ajuda com informações

pertinentes aos dados de saída e informações para auxiliar o entendimento da parte técnica.

Na seqüência, apresenta-se o procedimento metodológico utilizado para o desenvolvimento do software, conforme as sub-rotinas apresentadas na Figura 1.

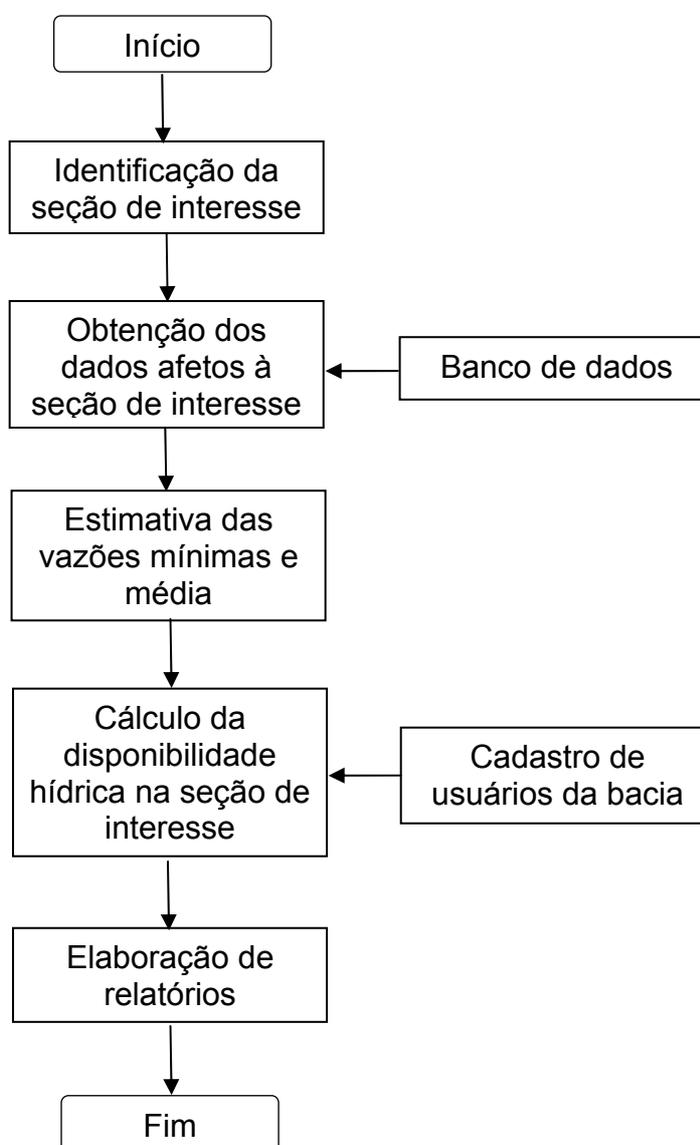


Figura 1 – Fluxograma representando as sub-rotinas executadas pelo software.

3.1.1. Identificação da seção de interesse

No processo de identificação da seção de interesse foram considerados dois casos. O primeiro se refere à definição de uma seção a partir do clique do *mouse* sobre um mapa georreferenciado e o segundo é afeto à entrada manual das coordenadas geográficas da seção de interesse.

Para permitir o clique do *mouse* sobre a seção de interesse foi desenvolvido, com a utilização do MapObjects, um mapa georreferenciado no sistema de projeção Universal Transversa de Mercator (UTM), *datum* Córrego Alegre e elipsóide Hayford 1909.

Para possibilitar a identificação da seção de interesse de forma mais ágil foram incorporadas ao mapa, de forma que podem ser adicionadas e, ou, excluídas, além do limite e hidrografia da bacia, as feições dos estados, dos municípios e das estradas, as estações fluviométricas e pluviométricas, bem como as outorgas estaduais e federais emitidas na bacia. Também visando facilitar a manipulação do mapa disponibilizado no software, foram incluídas ferramentas de manipulação de mapas comumente utilizadas em softwares de sistemas de informações geográficas, que permitem o *zoom*, a movimentação do mapa na tela do computador e a obtenção dos nomes das feições de interesse.

A fim de possibilitar a localização de qual região da bacia está sendo visualizada quando o mapa está em maior escala, foi adicionado ao software um segundo mapa com o limite e hidrografia da bacia, no qual é procedida a delimitação da região visualizada no primeiro mapa.

A segunda forma de identificação da seção de interesse foi implementada de forma que, ao serem fornecidas as coordenadas geográficas da seção de um curso d'água, fosse procedida a identificação da seção de interesse no mapa georreferenciado. Nesse caso, os valores das coordenadas geográficas foram considerados no sistema de coordenadas geográficas, *datum* Córrego Alegre e elipsóide Hayford 1909.

Pelo fato de o software contemplar condições de outorga a fio d'água, implementou-se uma rotina que emite uma mensagem de alerta caso o usuário escolha um ponto fora da hidrografia. Nessa situação, o software identifica no mapa com um ponto amarelo o local escolhido, devendo o usuário proceder, utilizando as ferramentas descritas no primeiro procedimento disponível para a identificação da seção de interesse, ao ajuste do local escolhido para uma posição sobre a hidrografia.

Procedida a identificação da seção de interesse, um ponto branco é inserido no mapa, possibilitando ao usuário a visualização de sua escolha.

3.1.2. Obtenção dos dados afetos à seção de interesse

Uma vez feita a identificação da seção de interesse foi desenvolvida uma rotina que pesquisa automaticamente os dados necessários à aplicação das demais sub-rotinas apresentadas na Figura 1, referentes à bacia e à seção de interesse. Os dados requeridos pelo software foram armazenados em um banco de dados e em arquivos georreferenciados nos formatos *shape* e *raster*. A importância da compatibilidade do software com esses formatos de arquivos está na facilidade de manipulação e no fato de esses serem formatos largamente difundidos e compatíveis com diferentes aplicações.

O banco de dados, contendo apenas dados não georreferenciados, foi desenvolvido no formato compatível com o software Microsoft Access. Na Figura 2 apresenta-se a estrutura lógica do banco de dados, no qual as informações armazenadas foram:

- vazão mínima com sete dias de duração e período de retorno de 10 anos ($Q_{7,10}$) e vazões mínimas associadas às permanências de 90% (Q_{90}) e 95% (Q_{95});
- vazão média de longa duração (Q_{mid});
- equações de regionalização do método tradicional; e
- equações de ajuste das vazões pelo método baseado na conservação de massas/continuidade de vazões.

Os dados georreferenciados como nomes dos rios, municípios, estados, rodovias, estações fluviométricas e pluviométricas, regiões hidrológicas, direção de escoamento e fluxo acumulado foram armazenados em arquivos nos formatos *shape* e *raster*.

As pesquisas realizadas no banco de dados foram implementadas através de comandos da *Structured Query Language* (SQL), enquanto as pesquisas nos arquivos *shape* e *raster* foram procedidas a partir de consultas espaciais implementadas com a utilização de ferramentas disponíveis no MapObjects, as quais foram baseadas em distância e interseção de temas.

A fim de permitir a atualização dos dados armazenados no banco de dados foi desenvolvido um módulo no software que permite atualizar os valores dos registros do banco de dados. As instruções de atualização desse módulo foram implementadas através de comandos da SQL.

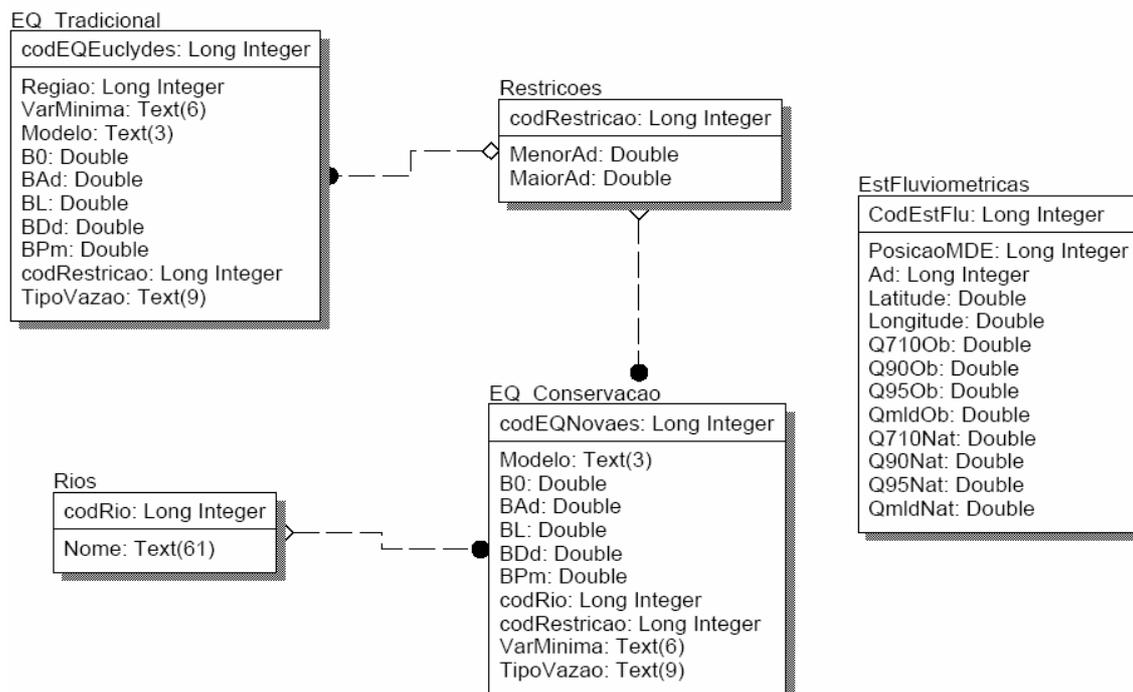


Figura 2 – Estrutura lógica do banco de dados.

No Apêndice A constam a estrutura do banco de dados no formato compatível com o Microsoft Access e os arquivos no formato *shape* e *raster*, os quais armazenam os dados georreferenciados utilizados pelo software.

3.1.3. Estimativa das vazões mínimas e média

Para permitir a estimativa das vazões mínimas e média ao longo da rede hidrográfica da bacia foram implementados os seguintes procedimentos de regionalização de vazões: método tradicional, método baseado na proporcionalidade de vazões específicas e método baseado na conservação de massas/continuidade de vazões.

3.1.3.1. Método tradicional

Os dados requeridos para a estimativa das vazões mínimas e média pelo método tradicional foram: o número de identificação da região hidrologicamente homogênea na qual está inserida a seção de interesse e as equações para a estimativa da vazão, ajustadas com base nos seguintes modelos:

- Modelo linear

$$Q = \beta_0 + \beta_1 A \quad (1)$$

- Modelo potencial

$$Q = \beta_0 A^{\beta_1} \quad (2)$$

- Modelo exponencial

$$Q = e^{(\beta_0 + \beta_1 A)} \quad (3)$$

- Modelo logarítmico

$$Q = \beta_0 + \beta_1 \ln A \quad (4)$$

- Modelo recíproco

$$Q = (\beta_0 + \beta_1 A)^{-1} \quad (5)$$

em que

- β_0 = coeficiente de ajuste da regressão, adimensional;
- β_1 = coeficiente de ajuste da regressão, adimensional; e
- A = área de drenagem, km².

Para a aplicação do método tradicional é necessário que estejam armazenadas no banco de dados as seguintes informações: região hidrologicamente homogênea, modelo a ser utilizado e coeficientes correspondentes a esse modelo.

É necessário que na obtenção das equações a serem empregadas neste método sejam selecionadas aquelas que utilizam a área de drenagem como única característica física da bacia, tendo em vista o fato de ser esta variável obtida automaticamente pelo software.

De posse das equações e da área de drenagem, o software procede ao cálculo das vazões mínimas e média da seção de interesse.

3.1.3.2. Método baseado na proporcionalidade de vazões específicas

Para a aplicação deste método de regionalização de vazões não é necessário o ajuste de equações de regressões regionais, tendo sido todo o procedimento de regionalização inserido no próprio software.

Neste método, as variáveis que devem estar armazenadas no banco de dados são as vazões (mínimas e média) correspondentes às seções fluviométricas existentes na bacia.

Para a estimativa das vazões mínimas e média por este método, o usuário deve identificar a seção de interesse e, dependendo de sua posição em relação às seções fluviométricas mais próximas, o software procede a análise e o enquadramento em um dos quatro casos:

- Caso 1 – Ponto de interesse localizado a montante de um posto com vazão conhecida

Neste caso, o software aplica diretamente o método da razão de área de drenagem, conforme utilizado por Stedinger et al. (1992), para o cálculo da vazão mínima de referência em um ponto de vazão desconhecida (Q_z), dentro da área de influência de um posto com vazão conhecida (Q_x), utilizando a equação

$$Q_z = \left(\frac{A_z}{A_x} \right) Q_x \quad (6)$$

em que

Q_z = vazão na seção de interesse, m^3s^{-1} ;

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

A_z = área de drenagem na seção de interesse, km^2 ; e

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

- Caso 2 – Ponto de interesse localizado entre dois postos com vazão conhecida

No caso de um ponto 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 , é estimada utilizando a equação:

$$Q_z = Q_m + \left(\frac{A_z - A_m}{A_j - A_m} \right) (Q_j - Q_m) \quad (7)$$

em que

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

Q_j = vazão em um 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 – Ponto de interesse localizado a jusante de um posto com vazão conhecida

Esta situação é semelhante à descrita no caso 1, sendo a vazão no ponto de interesse Z também calculada com base na equação 6.

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

Esta situação (Figura 3) é uma combinação das situações descritas nos casos 1 e 2, tendo sido implementado o seguinte procedimento para a estimativa da vazão no ponto de interesse: aplica-se o procedimento descrito no caso 2 (equação 7) entre os postos a montante e a jusante, calculando a vazão no ponto de confluência do canal de ordem i (Z'), e posteriormente se obtém a vazão de referência correspondente ao ponto de interesse Z, usando a vazão calculada previamente em Z' e aplicando o mesmo procedimento descrito no caso 1 (equação 6).



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

3.1.3.3. Método baseado na conservação de massas/continuidade de vazões

Neste método, as variáveis que devem estar armazenadas no banco de dados são as equações de regionalização para os rios em que existem informações de pelo menos uma estação fluviométrica. Para a estimativa da vazão na seção de interesse foi implementada uma rotina em que se realiza uma pesquisa no banco de dados, a fim de verificar a existência ou não de uma equação ajustada para o rio onde se encontra a seção de interesse. Caso exista a equação, é feita automaticamente a obtenção da área de drenagem e o cálculo da vazão.

Para o caso de não existir uma equação ajustada, foi necessário o desenvolvimento de um procedimento computacional que possibilitasse percorrer a hidrografia a jusante do ponto de interesse até encontrar um rio para o qual existe uma equação ajustada. Encontrado o rio com a equação ajustada, procede-se à determinação das vazões nas seções imediatamente a montante e a jusante da confluência com o rio de interesse (Figura 4). A diferença entre essas vazões corresponde à vazão da foz do rio de interesse. De posse dessa vazão, procede-se ao ajuste de uma equação linear em função da área de drenagem, sendo esse ajuste realizado de tal forma que a equação resultante produza uma vazão nula

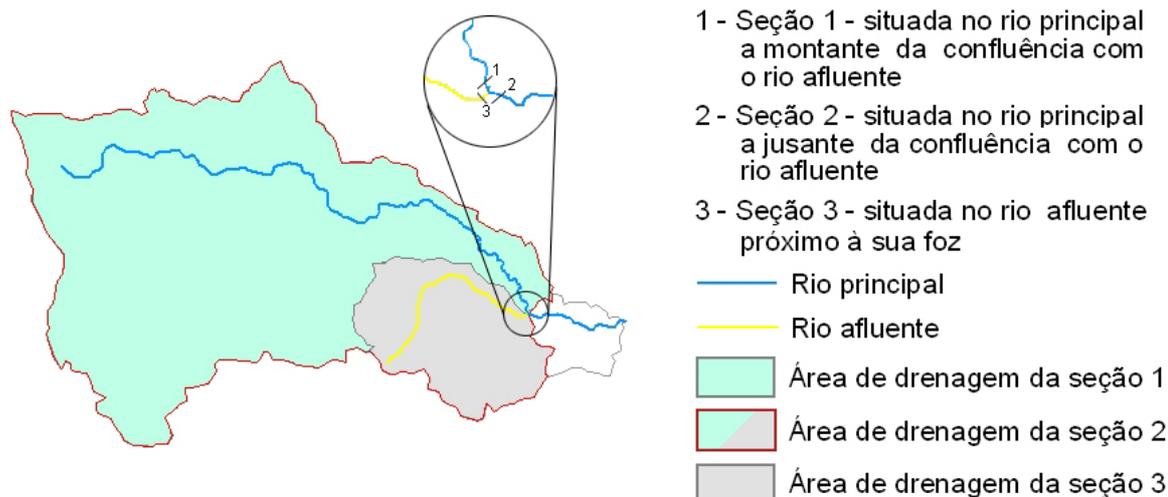


Figura 4 – Procedimento para a determinação das vazões a montante e a jusante da confluência do rio com equação ajustada e um afluente direto.

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.

3.1.4. Cálculo das vazões passíveis de outorga

A estimativa da vazão ainda passível de ser outorgada na seção de interesse após a concessão de uma nova outorga foi feita pela equação

$$Q_{disp} = xQ_{mr} - \sum Q_{mt} - Q_{sol} \quad (8)$$

em que

Q_{disp} = vazão disponível para ser outorgada, m^3s^{-1} ;

x = percentual da Q_{mr} passível de ser outorgada, adimensional;

Q_{mr} = vazão mínima de referência estimada na seção de interesse, m^3s^{-1} ;

Q_{mt} = vazão concedida a montante da seção de interesse, m^3s^{-1} ; e

Q_{sol} = vazão solicitada, m^3s^{-1} .

Conforme se evidencia pela equação 8, no cálculo da vazão disponível para ser outorgada (Q_{disp}) já foi considerada a abstração advinda da outorga solicitada, expressando, portanto, a vazão remanescente para futuras outorgas.

A obtenção da vazão mínima de referência (Q_{mr}) é feita conforme o procedimento descrito no item 3.1.3., devendo o usuário proceder apenas à identificação da vazão a ser utilizada ($Q_{7,10}$, Q_{90} , Q_{95} ou Q_{mid}) e do método de regionalização de vazões.

O percentual da Q_{mr} passível de ser outorgada (x) é definido pelo órgão gestor da bacia, conforme é apresentado na Tabela 1, para diferentes estados do país. O valor obtido por xQ_{mr} corresponde à vazão máxima passível de ser outorgada, ou seja, o limite de vazão passível de ser utilizado no curso d'água.

Considerando que o procedimento de outorga em condições ideais deve ser realizado em uma base mensal, o software permite que a vazão solicitada (Q_{sol}) seja fixa ou variável ao longo do período de concessão da outorga. Para isso foi disponibilizado um quadro, em que constam os anos e os meses, o qual é ajustado de acordo com o período escolhido.

Para o cálculo das vazões outorgadas a montante (Q_{mt}) da seção em análise, o software consulta os cadastros de usuários de água da bacia, disponibilizados pelos órgãos gestores estadual e federal da bacia, e a partir desse banco de dados é verificado para cada outorga se ela está localizada a montante ou a jusante da seção de interesse. Para isso foi implementada uma rotina que, através do *grid* de direção de escoamento, percorre da posição da outorga até a foz da bacia, sendo então examinado se nesse caminho está contida a seção de interesse. Para as outorgas a montante, o software armazena o período e os valores das vazões concedidas.

Pelo grande volume de dados disponíveis nos dois cadastros, já que estes possuem as outorgas de todo o Estado, para o caso das outorgas estaduais, e para todo o país, para o caso das outorgas emitidas pela ANA, foi gerada uma rotina que verifica se uma outorga se encontra na bacia em estudo e, em caso negativo, esta é descartada. Essa rotina também foi desenvolvida de forma a possibilitar a atualização dos cadastros de usuários de água.

Para facilitar a visualização das vazões ainda permissíveis de serem outorgadas, foi adicionado ao software um quadro de base mensal, no qual constam os anos e meses ajustados de acordo com o período de vigência da outorga a ser efetuada, sendo suas células preenchidas de acordo com os critérios apresentados na Tabela 2.

Tabela 2 – Escala de cores para a caracterização das faixas de vazões permissíveis de serem outorgadas

Cor		Critério
Verde		Vazão ainda permissível para ser outorgada superior a 30% da vazão máxima passível de outorga
Amarelo		Vazão ainda permissível para ser outorgada inferior a 30% e superior a 10% da vazão máxima passível de outorga
Laranja		Vazão ainda permissível para ser outorgada inferior a 10% da vazão máxima passível de outorga
Vermelho		Condição em que as vazões outorgadas superaram a vazão máxima passível de outorga

3.1.5. Elaboração de relatórios

A fim de permitir o agrupamento das informações relativas à seção de interesse e a impressão dessas informações para documentação e posterior análise dos aspectos envolvidos no processo de outorga, desenvolveu-se um módulo para geração de relatórios.

Para a geração dos relatórios foram consideradas duas necessidades do órgão gestor para a análise do processo de outorga: a primeira é afeta ao conhecimento das outorgas realizadas a montante da seção de interesse (primeiro relatório), e a segunda é pertinente ao conhecimento das vazões da seção de interesse e do impacto da concessão da nova outorga nas vazões remanescentes (segundo relatório).

Os relatórios foram desenvolvidos de modo a apresentar as informações relativas à localização (latitude, longitude), aos nomes do rio e estado e à área de drenagem da seção de interesse.

3.2. Aplicação do software – Estudo de caso para a bacia do rio Paracatu

Para verificação das funcionalidades e potencialidades do software desenvolvido, foi realizado estudo de caso para a bacia do rio Paracatu (Figura 5). A escolha dessa bacia deu-se, principalmente, em função das constatações do intenso desenvolvimento econômico, dos conflitos pelo uso da água já existentes e da base de dados já disponível, a qual advém dos trabalhos já desenvolvidos pelo Grupo de Pesquisas em Recursos Hídricos (GPRH).

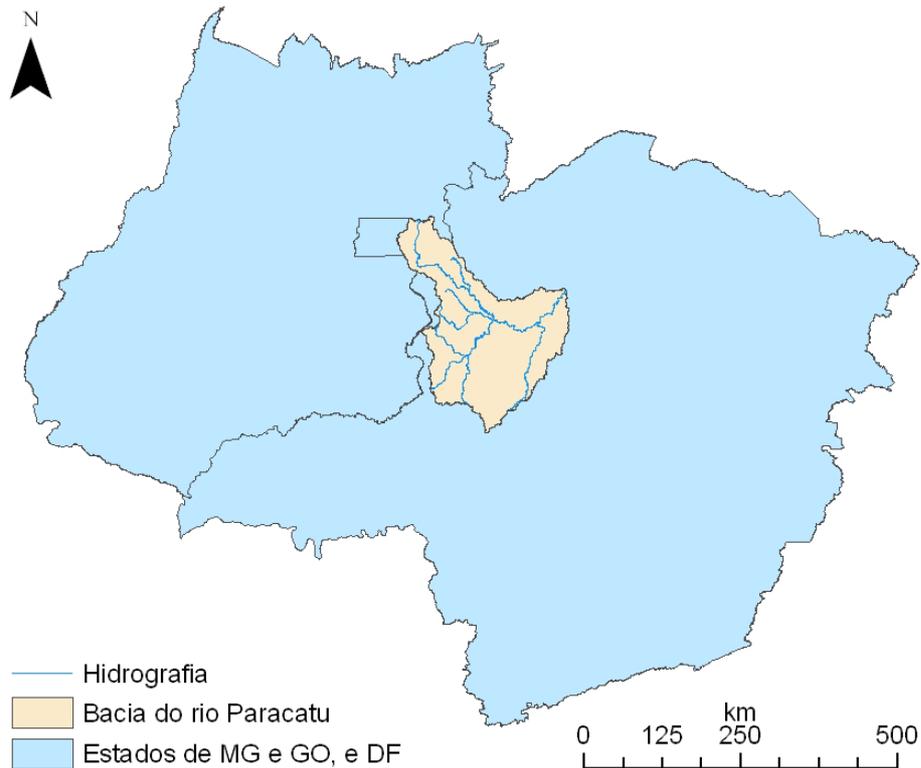


Figura 5 – Mapa de localização da bacia do rio Paracatu.

Inicialmente foi analisado o comportamento das vazões mínimas e média, em função da área de drenagem, em diferentes seções da bacia do rio Paracatu. A fim de quantificar os erros relativos percentuais (E_p) entre as estimativas das vazões mínimas e média obtidas pelos diferentes métodos de regionalização de vazões foi utilizada a equação

$$E_p = \frac{|Q_{in} - Q_{im}|}{\overline{Q_{inm}}} 100 \quad (9)$$

em que

- Q_{in} = vazão estimada para a seção i pelo método n , m^3s^{-1} ;
- Q_{im} = vazão estimada para a seção i pelo método m , m^3s^{-1} ; e
- $\overline{Q_{inm}}$ = média das vazões estimadas para a seção i pelos métodos n e m , m^3s^{-1} .

Visando verificar a potencialidade do software no diagnóstico da situação atual da bacia e sua capacidade em auxiliar a análise de um processo de outorga foi realizado um estudo de caso para a sub-bacia do ribeirão Entre Ribeiros.

Os dados utilizados, necessários para a construção do banco de dados e para aplicação do software desenvolvido, foram: MDE, vazões mínimas e média, equações de regionalização de vazões dos métodos tradicional e baseado na conservação de massas/continuidade de vazões e cadastro de usuários de água da bacia, os quais são descritos na seqüência.

3.2.1. Modelo digital de elevação

Os *grids* de direção de escoamento e fluxo acumulado são dados essenciais para a execução do software, sendo estes gerados a partir do MDE utilizando rotinas comumente encontradas em softwares de Sistemas de Informações Geográficas (SIGs).

A metodologia utilizada para a geração e validação do MDE foi concebida para ser executada em cinco etapas, conforme descritas por Chaves (2002), Baena (2002) e Pires et al. (2005).

3.2.1.1. Amostragem

Os dados utilizados para geração do MDE consistiram da hidrografia e altimetria da bacia do rio Paracatu, tendo a hidrografia sido obtida a partir de digitalização de cartas topográficas na escala de 1:250.000 (Tabela 3). Utilizaram-se nesse processo uma mesa digitalizadora e o software CartaLinx, tendo sido a hidrografia digitalizada de montante para jusante, sempre acompanhando o sentido do escoamento dos cursos d'água.

Após a digitalização de todas as cartas, os arquivos individuais obtidos para a hidrografia foram unidos em um único arquivo e, então, exportado para o formato *shape*.

Os dados de altimetria foram obtidos do Projeto SRTM¹, sendo constituídos por um *grid* de células com resolução horizontal de 90 m, tendo sido desenvolvido em escala mundial pelo United States Geological Survey (USGS).

¹ <<http://srtm.usgs.gov>>.

Tabela 3 – Cartas topográficas na escala 1:250.000 utilizadas no processo de digitalização da hidrografia da bacia do rio Paracatu

Mapa índice	Carta	Editora	UF
SD-23-Y-C	Brasília	IBGE	DF/GO/MG
SE-23-V-D	João Pinheiro	IBGE	MG
SE-23-V-C	Paracatu	IBGE	GO/MG
SE-23-Y-A	Patos de Minas	IBGE	MG
SE-23-V-B	São Romão	DSG	MG
SE-23-Y-B	Três Marias	IBGE	MG
SE-23-V-A	Unaí	IBGE	MG

Apesar de os dados de altimetria obtidos do Projeto SRTM representarem o relevo da região, esses dados consistem em dados brutos, apresentando falhas advindas do processo de obtenção. Pelo fato de essas falhas comprometerem a obtenção de informações fisiográficas da bacia e a necessidade de se trabalhar com maior resolução, foi necessário reinterpoliar os dados altimétricos. Para tanto o *grid* de altimetria foi exportado para o formato *shape*.

3.2.1.2. Pré-processamento dos dados de drenagem e elevação

A grande maioria dos softwares que geram modelos digitais de elevação necessita de que os dados digitais de entrada estejam consistidos e com qualidade e estrutura mínimas aceitáveis. O Topogrid, interpolador utilizado para geração do MDE, requer, para a utilização de toda a sua potencialidade, a geração de arquivos individuais contendo os limites da área de trabalho, os pontos de identificação dos sumidouros naturais da drenagem, a hidrografia digital conectada, simplificada e orientada no sentido do escoamento superficial, o contorno dos lagos e os dados de altimetria em curvas de nível e pontos cotados (CHAVES, 2002). Dessa forma, os procedimentos adotados nessa etapa visaram à preparação dos arquivos digitais da hidrografia e da altimetria, que na estrutura do software ESRI ArcInfo Workstation (ArcInfo) são denominados *coverages*. Para isso, foram realizadas operações manuais e automáticas, sendo estas últimas executadas com a utilização de rotinas implementadas no módulo *Spatial Analyst* do software ESRI ArcGis (ArcGis).

Pelo fato de a hidrografia ter sido digitalizada utilizando um sistema de projeção diferente dos dados altimétricos obtidos do projeto SRTM, procedeu-se à compatibilização das feições para o mesmo sistema de projeção, sendo utilizado

o Universal Transversa de Mercator (UTM), *datum* Córrego Alegre e elipsóide Hayford 1909.

Por fim, a rede hidrográfica e os pontos cotados foram visualmente analisados de forma integrada, a fim de verificar a existência de erros grosseiros da representação da drenagem ou a incoerência de valores altimétricos.

3.2.1.3. Geração do MDE

Uma vez verificadas as consistências dos dados da hidrografia e altimetria, procedeu-se à espacialização da altimetria na área em torno da bacia utilizando o interpolador Topogrid, o qual se encontra disponível no ArcInfo.

Esse método utiliza uma técnica de interpolação baseada em diferenças finitas iterativas e é otimizado para ter a eficiência computacional dos interpoladores locais sem perder a continuidade da superfície proporcionada pelos interpoladores globais (ESRI, 2002), gerando uma grade regular a partir de pontos, isolinhas e linhas de drenagem (CHAVES, 2002). A garantia da consistência do MDE é fornecida pelo processo de imposição de drenagem, que tenta remover todas as depressões no terreno geradas pelo modelo e que não foram previamente identificadas pelo usuário (BAENA, 2002).

Dentre os principais parâmetros técnicos utilizados pelo Topogrid para geração do MDE, a resolução é um dos que garante a qualidade do MDE (GARBRECHT e MARTZ, 1999), sendo, então, considerada para a sua definição a exatidão cartográfica de 0,2 mm. Assim, para determinar a menor dimensão no terreno representada no mapa, ou seja, a resolução espacial das células do MDE, multiplicou-se a exatidão cartográfica pelo fator de escala (1:250.000), que correspondeu a 50 m (NASCIMENTO et al., 2005).

3.2.1.4. Pós-processamento do MDE

Essa etapa visou eliminar as depressões espúrias remanescentes no MDE gerado na etapa anterior, garantindo a consistência do escoamento superficial para e ao longo da drenagem numérica. Buscou-se também garantir a coincidência espacial da drenagem numérica do modelo com a drenagem vetorial digital, compiladas das bases cartográficas. Para isso, foram utilizados diversos comandos implementados no ArcInfo, além de técnicas de refinamento de superfícies e de *stream burning*.

A primeira fase dessa etapa consistiu na aplicação da técnica de *stream burning*, de forma a garantir a coincidência espacial da drenagem numérica com a drenagem vetorial. Para isso, a drenagem mapeada foi transformada para o formato *raster*, com resolução de 50 m. Posteriormente, promoveu-se um rebaixamento constante de 1.000 m nos valores da altimetria das células que compõem a hidrografia rasterizada e a sua incorporação ao MDE, através da substituição dos valores originais. Os comandos do módulo *Spatial Analyst* do ArcGis, utilizados para execução dessa etapa, podem ser encontrados em Ribeiro (2003).

A segunda etapa consistiu na eliminação das depressões espúrias que não foram removidas durante a geração do MDE e daquelas introduzidas durante o processo de imposição da drenagem mapeada. Para isso, utilizou-se o comando *FILL* e, em seguida, restauraram-se os valores originais da altimetria ao longo da drenagem aprofundada.

A aplicação isolada da técnica de *stream burning* e as técnicas realizadas na segunda fase do pós-processamento não garantem a caracterização de um talvegue ao longo da hidrografia, ocorrendo em determinados trechos inconsistências, pelo fato de a hidrografia poder estar situada ao longo de encostas. Em geral, tal fato ocorre nos casos em que a drenagem vetorial diverge consideravelmente da drenagem numérica. Isso faz com que a direção de escoamento das células adjacentes ao traçado da hidrografia seja divergente do fluxo natural, o que manteria a inconsistência hidrológica do MDE (CHAVES, 2002).

Para solução desse tipo de problema, utilizou-se, em uma terceira etapa do pós-processamento, a técnica de refinamento de superfície apresentada por Chaves (2002) e Ribeiro (2003), a qual consiste na criação de um talude linear entre a margem e a hidrografia.

3.2.1.5. Validação do MDE

Um MDE, além da representação realística da paisagem, deve descrever, com exatidão, o caminho do escoamento superficial (CHAVES, 2002). A forma adotada para verificar tal fato foi a análise de cruzamento, comparando a hidrografia numérica derivada do MDE e a hidrografia mapeada. A hidrografia numérica foi gerada a partir dos pontos mapeados das nascentes dos rios, para

os quais se gerou o caminho percorrido até a foz da bacia. A seguir, converteu-se a hidrografia mapeada para o formato *raster*, e efetuou-se uma comparação entre ela e a numérica, para identificar a sobreposição das células.

No Apêndice B constam os dados obtidos a partir da execução dos passos para a geração e validação do MDE, bem como os *grids* de direção de escoamento e de fluxo acumulado da bacia do rio Paracatu.

3.2.2. Vazões mínimas e média

3.2.2.1. Dados fluviométricos

Com vistas à espacialização das vazões mínimas e média na bacia do rio Paracatu, através do procedimento de regionalização de vazões, foram analisados os dados consistidos, correspondentes ao período de 1970 a 2000, de 21 estações fluviométricas (Tabela 4) pertencentes à rede hidrometeorológica da Agência Nacional de Águas (ANA), disponibilizados no Sistema de Informações Hidrológicas (HidroWeb). As áreas de drenagem das estações fluviométricas apresentadas na Tabela 4 foram calculadas utilizando o modelo digital de elevação da bacia (item 3.2.1.), após o posicionamento das mesmas a partir das respectivas fichas descritivas, fornecidas pela ANA, não sendo, portanto, obtidas no HidroWeb. A localização das estações fluviométricas é apresentada na Figura 6.

Os dados de vazões inexistentes ou considerados inconsistentes a partir da análise da continuidade das vazões entre os postos fluviométricos foram atribuídos como falhas e preenchidos utilizando o método da regressão linear.

3.2.2.2. Estimativa das vazões mínimas e média das estações fluviométricas

As vazões mínimas utilizadas no estudo foram aquelas associadas às permanências de 90% (Q_{90}) e 95% (Q_{95}) e a mínima de sete dias de duração e período de retorno de 10 anos ($Q_{7,10}$). Os valores de Q_{90} e Q_{95} foram obtidos das curvas de permanência de cada estação fluviométrica, com base em dados diários, retratando a parcela de tempo que determinada vazão é igualada ou superada durante o período analisado.

Tabela 4 – Estações fluviométricas utilizadas no estudo

Código	Estação	Latitude (Sul)	Longitude (Oeste)	Área de drenagem (km ²)	Curso d'água
42250000	Fazenda Limoeiro	17° 54' 56"	47° 00' 38"	464	Rio Claro
42251000	Fazenda Córrego do Ouro	17° 36' 48"	46° 51' 31"	1.836	Rio Escuro
42255000	Fazenda Nolasco	17° 13' 48"	47° 01' 20"	249	Ribeirão Santa Isabel
42257000	Barra do Escurinho	17° 30' 45"	46° 38' 46"	1.997	Ribeirão Escurinho
42290000	Ponte da BR-040 (Paracatu)	17° 30' 10"	46° 34' 18"	7.744	Rio Paracatu
42395000	Santa Rosa	17° 15' 19"	46° 28' 26"	12.791	Rio Paracatu
42435000	Fazenda Barra da Égua	16° 52' 28"	46° 35' 12"	1.591	Ribeirão Barra da Égua
42440000	Fazenda Poções	17° 02' 31"	46° 49' 04"	550	Ribeirão São Pedro
42460000	Fazenda Limeira	16° 12' 35"	47° 13' 58"	4.164	Rio Preto
42490000	Unai	16° 20' 58"	46° 52' 48"	5.413	Rio Preto
42540000	Santo Antônio do Boqueirão	16° 31' 47"	46° 43' 16"	5.963	Rio Preto
42545500	Fazenda o Resfriado	16° 30' 10"	46° 39' 46"	679	Ribeirão Roncador
42546000	Fazenda Santa Cruz	16° 08' 06"	46° 44' 52"	550	Rio Salobro
42600000	Porto dos Poções	16° 50' 23"	46° 21' 26"	9.459	Rio Preto
42690001	Porto da Extrema	17° 01' 49"	46° 00' 49"	30.181	Rio Paracatu
42750000	Caatinga	17° 08' 45"	45° 52' 49"	31.362	Rio Paracatu
42840000	Veredas	18° 08' 19"	45° 45' 32"	215	Rio Santo Antônio
42850000	Cachoeira das Almas	17° 21' 02"	45° 31' 57"	4.391	Rio do Sono
42860000	Cachoeira do Paredão	17° 07' 16"	45° 26' 08"	5.701	Rio do Sono
42930000	Porto do Cavalo	17° 01' 50"	45° 32' 22"	40.818	Rio Paracatu
42980000	Porto Alegre	16° 46' 29"	45° 22' 55"	41.481	Rio Paracatu

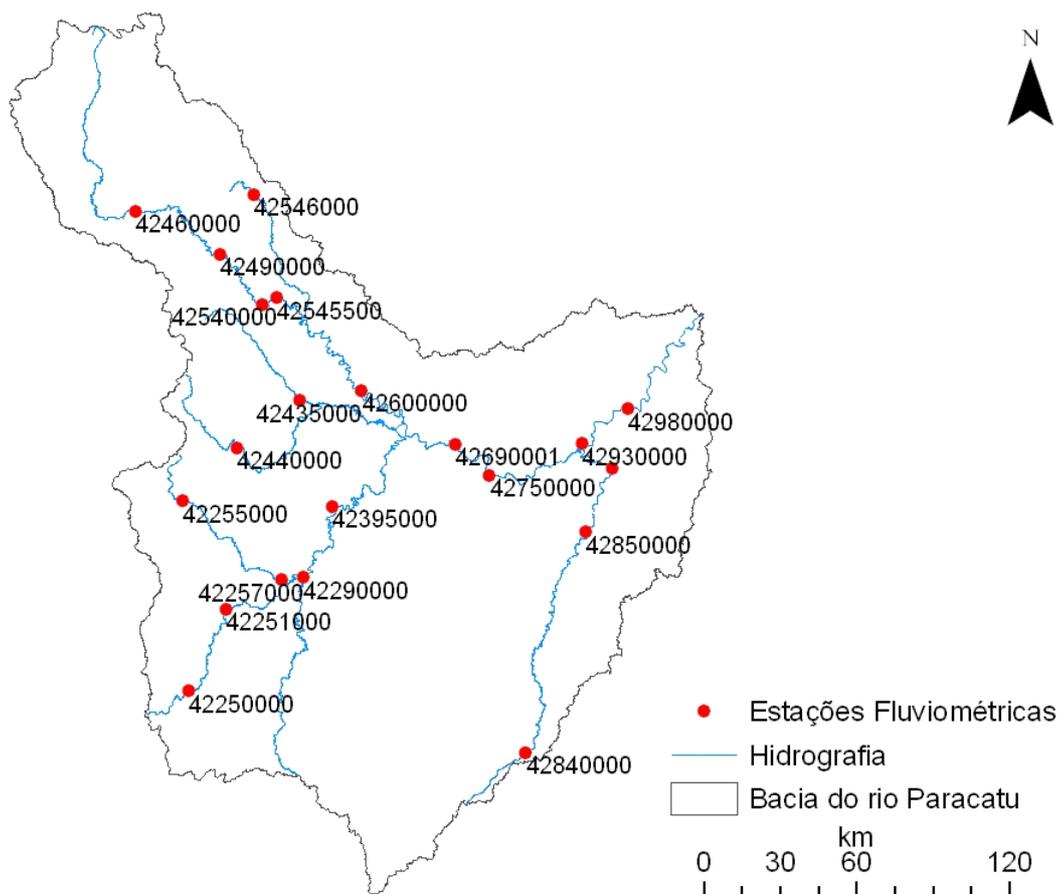


Figura 6 – Localização das estações fluviométricas utilizadas no estudo.

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 da Q_7 . Os modelos probabilísticos que foram analisados para representar a vazão mínima foram: Log-Normal a dois parâmetros, Log-Normal a três parâmetros, Pearson tipo III, Log-Pearson tipo III e Weibull.

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

A vazão média anual de longa duração (Q_{mld}) foi obtida para cada estação fluviométrica, pela média das vazões médias anuais.

No Apêndice C são apresentados os valores de $Q_{7,10}$, Q_{90} , Q_{95} e Q_{mld} das 21 estações fluviométricas analisadas.

3.2.2.3. Equações de regionalização

3.2.2.3.1. Método tradicional

A obtenção das equações de regionalização de vazões pelo método tradicional, para a bacia do rio Paracatu, foi realizada em duas etapas, que envolveram a identificação das regiões hidrologicamente homogêneas e o ajuste de regressões múltiplas entre as vazões mínimas e média e a área de drenagem da bacia.

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

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

De posse dos valores de $Q_{7,10}$, Q_{90} , Q_{95} , Q_{mld} e da área de drenagem correspondentes às diferentes estações fluviométricas pertencentes a uma mesma região homogênea, foi aplicada a regressão múltipla entre as vazões e a área de drenagem, para obtenção das equações de regressão regionais para cada região hidrologicamente homogênea, com base nos modelos apresentados no item 3.1.3.1.

Para fins de verificação do ajuste de determinado modelo aos dados, foram adotados o r^2_a , e.p e a %F. Os melhores modelos resultantes da aplicação da regressão múltipla foram selecionados, observando-se: maiores valores do r^2_a , menores valores de e.p, resultados significativos do %F e menor número de variáveis independentes.

Na identificação das regiões hidrologicamente homogêneas e no ajuste dos modelos de regressão múltipla foi utilizado o software RH 3.0 (EUCLYDES et al., 1999).

As informações correspondentes às regiões hidrologicamente homogêneas e às equações para a estimativa das vazões mínimas e média em cada uma destas constam no Apêndice D e constituem a parte do banco de dados necessária para a aplicação deste procedimento de regionalização de vazões.

3.2.2.3.2. Método baseado na proporcionalidade de vazões específicas

Este método não necessita de definição de regiões hidrologicamente homogêneas, sendo, portanto, utilizadas as mesmas equações ao longo de toda a bacia hidrográfica, conforme descrito no item 3.1.3.2.

3.2.2.3.3. Método baseado na conservação de massas/continuidade de vazões

Para a obtenção das equações de regionalização por esse método procedeu-se ao ajuste dos modelos de regressão para representação das vazões mínimas e média em função da área de drenagem das estações fluviométricas

localizadas no rio principal. A partir desses modelos, obtiveram-se as vazões na foz de cada rio afluente direto do rio principal, procedendo-se, então, a novos ajustes, em um processo recursivo, dos rios de maior ordem para os de menor.

Na Figura 7 são apresentados os rios para os quais foram realizados os ajustes, sendo que esses possuíam pelo menos uma estação fluviométrica. Nas situações em que o rio não possuía nenhum posto fluviométrico não foi necessário proceder ajuste, já que o software automaticamente obtém uma equação linear, de tal forma que a equação resultante produza 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.

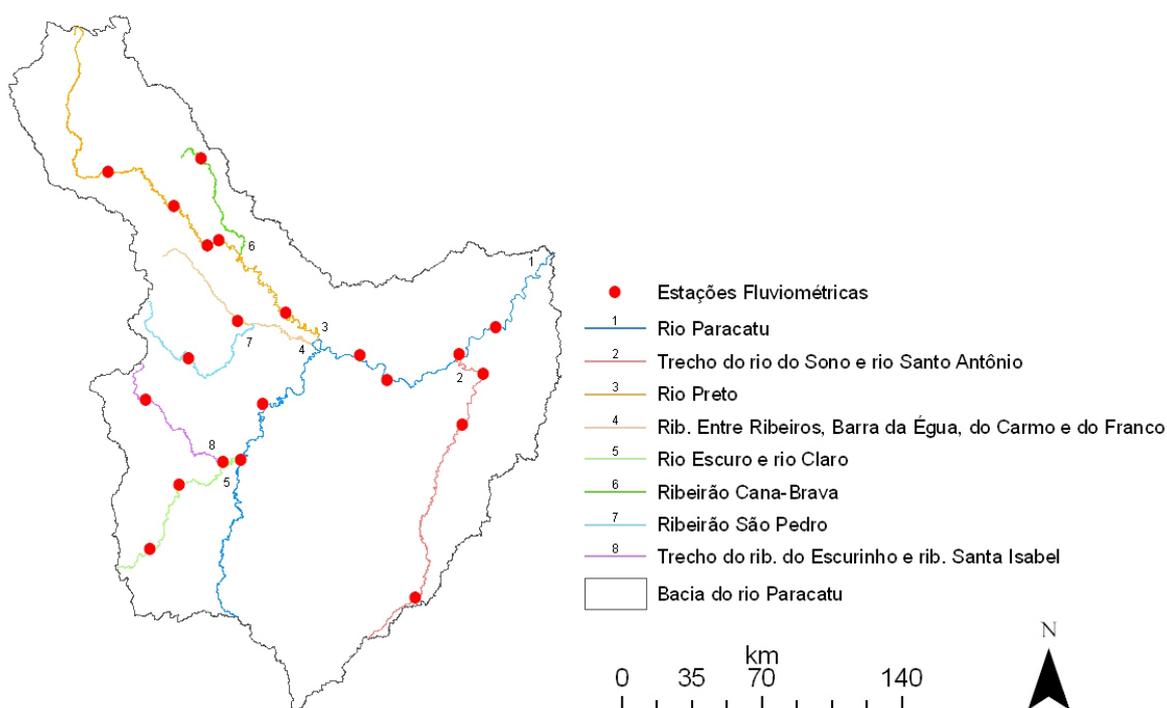


Figura 7 – Rios nos quais foram ajustadas equações pelo método baseado na conservação de massas/continuidade de vazões.

As equações para a estimativa das vazões mínimas e média constam no Apêndice E e, semelhantemente às equações do método tradicional, constituem a parte do banco de dados necessária para a aplicação deste procedimento de regionalização de vazões.

3.2.3. Cadastro de usuários de água da bacia

O software acessa as informações dos cadastros de usuários de água da bacia, em que constam as outorgas concedidas pelo órgão gestor estadual, sendo

no presente estudo o Instituto Mineiro de Gestão das Águas (IGAM), e pelo órgão gestor federal, que é a Agência Nacional de Águas (ANA).

O cadastro estadual foi disponibilizado pelo IGAM em uma versão eletrônica, no qual constam as outorgas realizadas nos rios estaduais para todo o Estado de Minas Gerais, sendo este atualizado até a data de 22 de janeiro de 2006. O cadastro federal foi disponibilizado pela ANA também em uma versão eletrônica, no qual constam as outorgas realizadas nos rios federais de todo o país, sendo este atualizado até a data de 24 de janeiro de 2006.

Entre as informações de cada outorga constam a localização, em coordenadas geográficas, o valor de vazão concedido e o período de vigência. De posse dessas informações, o software é capaz de calcular a disponibilidade hídrica e a vazão ainda permissível de ser outorgada considerando os usuários a montante da seção de interesse.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1. Software desenvolvido

O software desenvolvido para obter a disponibilidade hídrica para qualquer seção de interesse ao longo da rede hidrográfica de uma bacia e quantificar o impacto da concessão de uma nova outorga nesta disponibilidade foi denominado Sistema Integrado para a Gestão de Recursos Hídricos (SINGERH). A Figura 8 é ilustrativa de sua tela de apresentação, constando nessa o seu nome, sua finalidade, as instituições envolvidas e o grupo responsável pelo seu desenvolvimento. Nesta tela também estão apresentadas as funcionalidades contempladas no software, as quais são descritas na seqüência.



Figura 8 – Tela de apresentação do SINGERH.

4.1.1. Localização

Na Figura 9 apresenta-se a tela “Localização”, sendo esta utilizada para a identificação, por parte do usuário, da seção de interesse para a análise da disponibilidade de água e concessão de outorga. Nesta tela, o usuário escolhe a seção de interesse, podendo tal procedimento ser realizado de duas formas (campo 1): a primeira a partir do clique do *mouse* sobre a seção de interesse (opção “Mapa”), e a segunda (opção “Coordenadas geográficas”) a partir da entrada dos valores de latitude e longitude da seção de interesse.

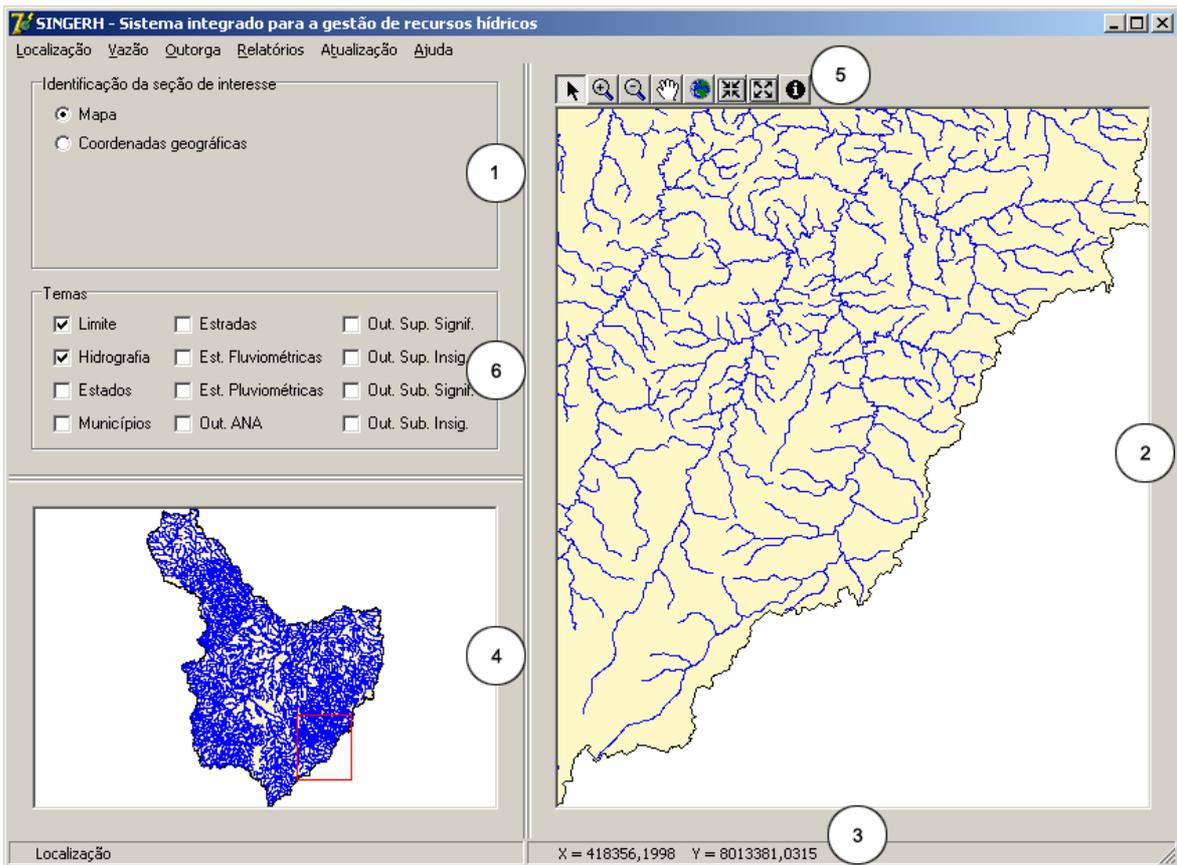


Figura 9 – Tela Localização do SINGERH.

Na Figura 10a apresenta-se a condição na qual o usuário fornece os valores de latitude e longitude no sistema de coordenadas geográficas, *datum* Córrego Alegre e elipsóide Hayford 1909. No caso de as coordenadas geográficas não estarem contidas na bacia em estudo, é emitida uma mensagem de erro alertando para tal fato.

Na Figura 10b é apresentada a condição na qual o usuário fica habilitado a identificar a seção de interesse pelo clique em um mapa (campo 2 da Figura 9). Conforme o usuário movimenta o cursor sobre o mapa é apresentada na barra de *status* do software (campo 3 da Figura 9) a posição X e Y no sistema de projeção Universal Transversa de Mercator (UTM), *datum* Córrego Alegre e elipsóide Hayford 1909 da posição corrente.

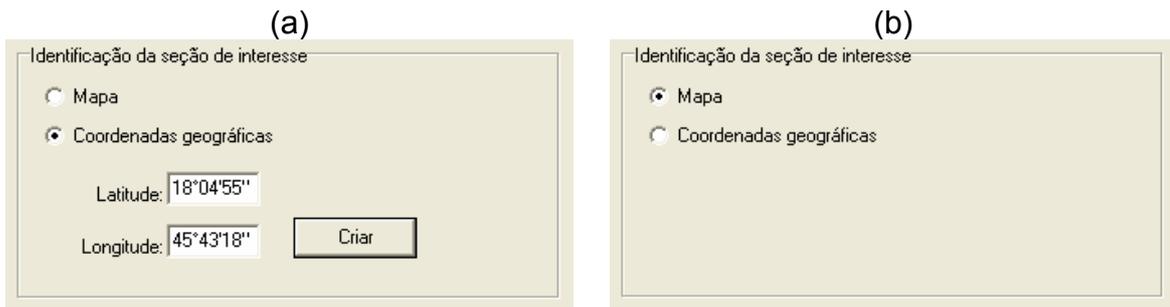


Figura 10 – Identificação da seção de interesse: (a) coordenadas geográficas e (b) mapa.

Considerando que o SINGERH foi desenvolvido para condições de outorga a fio d'água, caso o usuário não escolha uma seção sobre um curso d'água é criado um ponto de cor amarela (Figura 11a) e emitida uma mensagem pedindo o ajuste da coordenada identificada para uma posição coincidente com um curso d'água. Uma vez obtida a coincidência da seção de interesse com a hidrografia, a coloração do ponto muda para branco (Figura 11b). A realização do ajuste do ponto de interesse à hidrografia pode ser feito tanto pela opção correspondente à identificação da seção de interesse quanto pelas suas coordenadas geográficas.

Visando facilitar a identificação da seção de interesse, a tela “Localização” possui dois mapas, apresentando no primeiro (campo 4 da Figura 9) o limite e a hidrografia da bacia em estudo, bem como a delimitação, por um retângulo

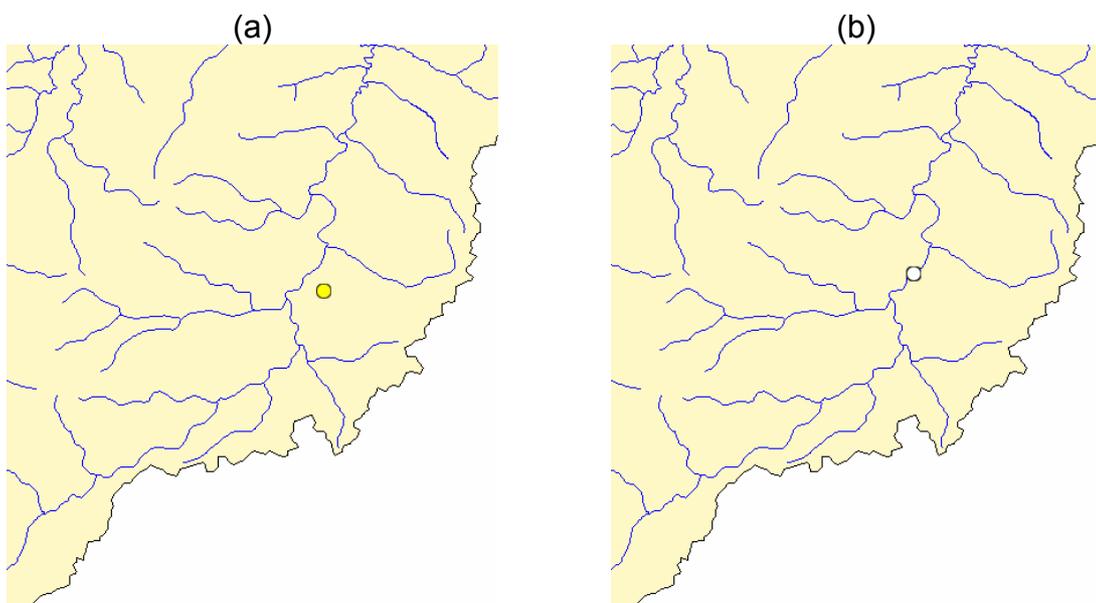


Figura 11 – Identificação da seção de interesse: (a) ponto criado fora da hidrografia e (b) ponto criado sobre a hidrografia.

vermelho, da área para a qual é feito o detalhamento da hidrografia apresentada no mapa do campo 2. Para a manipulação deste mapa são disponibilizadas ferramentas (campo 5) comumente encontradas em softwares de SIGs, sendo estas:

-  Cursor: utilizada para definir a seção de interesse;
-  Zoom +: permite aumentar a escala da região selecionada;
-  Zoom -: permite diminuir a escala da região selecionada;
-  Pan: permite movimentar o mapa;
-  Full Extend: permite visualizar toda a extensão dos temas visíveis;
-  Fixed zoom +: permite aumentar a escala do mapa em uma mesma proporção;
-  Fixed zoom -: permite diminuir a escala do mapa em uma mesma proporção; e
-  Identificação: permite obter informações a respeito do ponto escolhido.

Na Figura 12 apresenta-se a tela “Identificação”, a qual é resultante da escolha de um ponto a partir da utilização da ferramenta “Identificação”, sendo nesta apresentadas as informações da posição (coordenadas geográficas e projetadas), da área de drenagem e dos temas que estão habilitados no campo 6 da Figura 9.

O SINGERH permite a adição e, ou, exclusão de novos temas (campo 6 da Figura 9), sendo disponibilizados, além do limite e da hidrografia da bacia, outros temas como o limite dos estados e municípios, as estradas de rodagem, as estações fluviométricas e pluviométricas e as outorgas emitidas pelo(s) órgão(s) gestor(es) de recursos hídricos responsável(is) pela emissão de outorgas na bacia. Em relação às outorgas emitidas, o SINGERH faz a discretização em outorgas emitidas pela ANA e outorgas emitidas pelo órgão Estadual da bacia, sendo estas discriminadas em superficiais significantes e insignificantes e subterrâneas significantes e insignificantes.

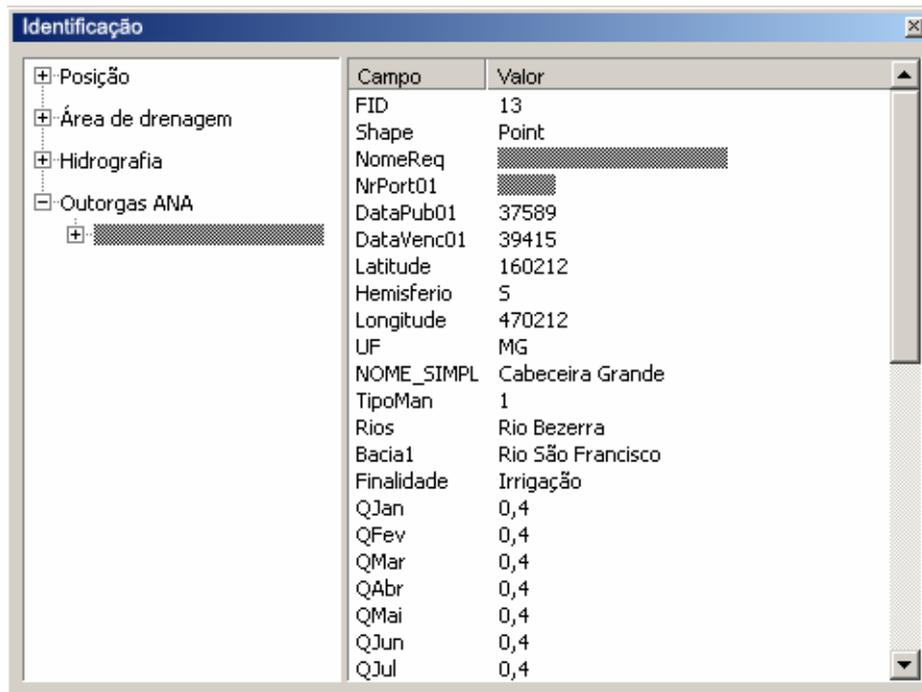


Figura 12 – Tela Identificação.

Uma vez feita a identificação da seção de interesse, o software procede, automaticamente, a obtenção dos dados necessários para a aplicação dos métodos de regionalização, a estimativa das vazões mínimas e média e o cálculo das vazões outorgadas a montante da seção de interesse. Devido ao tempo de processamento exigido nesta etapa, o SINGERH apresenta, em sua barra de *status*, a indicação da realização dos cálculos (Figura 13), permitindo, assim, a verificação pelo usuário do progresso dessa atividade.



Figura 13 – Barra de *status* indicando o progresso do cálculo das vazões outorgadas a montante da seção de interesse.

4.1.2. Vazão

Na Figura 14 apresenta-se a tela “Vazão” do SINGERH, constando, para a seção de interesse, as vazões mínimas ($Q_{7,10}$, Q_{90} e Q_{95}) e média (Q_{mld}) obtidas pelos três métodos de regionalização de vazões contemplados pelo software.

The screenshot displays the 'SINGERH - Sistema integrado para a gestão de recursos hídricos' interface. It features a menu bar with options: Localização, Vazão, Outorga, Relatórios, Atualização, and Ajuda. The main window is divided into two primary sections: 'Vazões mínimas estimadas' (Estimated minimum flows) on the left and 'Vazões médias estimadas' (Estimated average flows) on the right. The 'Vazões mínimas estimadas' section is further divided into three sub-sections for different flow types: $Q_{7,10}$, Q_{90} , and Q_{95} . Each sub-section contains three input fields: 'Tradicional', 'Proporc. de vazões', and 'Conser. de massas', each followed by a unit of m^3s^{-1} . The 'Vazões médias estimadas' section contains a single sub-section for Q_{mid} with the same three input fields. The status bar at the bottom left indicates 'Vazão'.

Flow Type	Method	Value (m^3s^{-1})	
Vazões mínimas estimadas	$Q_{7,10}$	Tradicional	0,120
		Proporc. de vazões	0,882
		Conser. de massas	1,080
	Q_{90}	Tradicional	0,462
		Proporc. de vazões	1,680
		Conser. de massas	1,980
	Q_{95}	Tradicional	0,331
		Proporc. de vazões	1,32
		Conser. de massas	1,59
Vazões médias estimadas	Q_{mid}	Tradicional	5,260
		Proporc. de vazões	5,350
		Conser. de massas	5,360

Figura 14 – Tela Vazão do SINGERH.

Para fins de caracterização da vazão mínima, o SINGERH disponibiliza tanto a $Q_{7,10}$ quanto a Q_{90} e a Q_{95} , que constituem as principais formas de quantificação da vazão mínima utilizadas pelos órgãos gestores de recursos hídricos (Tabela 1) para a concessão da outorga.

O SINGERH fornece os valores das vazões mínimas estimados por três métodos de regionalização, sendo estes: tradicional; baseado na proporcionalidade de vazões específicas e baseado na conservação de massas/continuidade de vazões, constituindo, dessa forma, em uma ferramenta de simulação que permite aos órgãos gestores a avaliação do método para utilização nas condições específicas do estudo realizado.

Tendo em vista as dificuldades associadas à aplicação dos diferentes métodos de regionalização de vazões e as restrições apresentadas por estes sob certas condições, o SINGERH apresenta ainda, como informação complementar ao estudo de vazões, a Q_{mid} , também estimada pelos três métodos de regionalização de vazões utilizados na estimativa das vazões mínimas. A estimativa da Q_{mid} visa identificar a vazão máxima possível de ser regularizada.

Em futuras versões do SINGERH, pretende-se proceder à adição de procedimentos que permitam a análise de concessão de outorga para a condição com regularização de vazões, sendo a Q_{mld} a base para o desenvolvimento destes procedimentos.

4.1.3. Outorga

Na Figura 15 apresenta-se a tela “Outorga” do SINGERH, a qual permite verificar o impacto da concessão de uma nova outorga na disponibilidade hídrica da seção de interesse, além de possibilitar a análise do impacto de diferentes critérios de concessão de outorga na disponibilidade hídrica. Nessa tela devem ser definidos pelo usuário o período e a vazão solicitada para outorga (campo 1), bem como a vazão máxima passível de ser outorgada (campo 2). Constam também nessa tela dois quadros, sendo o primeiro referente à vazão solicitada para outorga (campo 3), e o segundo à disponibilidade hídrica na seção de interesse após a concessão da outorga com a vazão solicitada (campo 4).

SINGERH - Sistema integrado para a gestão de recursos hídricos

Localização Vazão **Outorga** Relatórios Atualização Ajuda

Período e vazão a outorgar:

Início: 01/2006 Fim: 12/2010

Vazão solicitada: 0,001 m³s⁻¹ Ok

Critério de outorga e disponibilidade:

Vazão de referência: 30 % da: Q710

Método de regionalização: Tradicional Calcular

Vazão solicitada (m³s⁻¹):

	2006	2007	2008	2009	2010
Jan	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001
Fev	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001
Mar	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001
Abr	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001
Mai	0,015	0,015	0,015	0,015	0,015
Jun	0,035	0,035	0,035	0,035	0,035
Jul	0,035	0,035	0,035	0,035	0,035
Ago	0,035	0,035	0,035	0,035	0,035
Set	0,015	0,015	0,015	0,015	0,015
Out	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001
Nov	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001
Dez	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001

Disponibilidade após a outorga (m³s⁻¹):

	2006	2007	2008	2009	2010
Jan	-0,286	-0,209	-0,104	-0,08	0,005
Fev	-0,286	-0,209	-0,104	-0,08	0,005
Mar	-0,286	-0,209	-0,104	-0,08	0,035
Abr	-0,286	-0,129	-0,104	-0,08	0,035
Mai	-0,3	-0,143	-0,118	-0,094	0,021
Jun	-0,243	-0,138	-0,138	-0,114	0,001
Jul	-0,243	-0,138	-0,138	-0,114	0,001
Ago	-0,243	-0,138	-0,114	-0,114	0,001
Set	-0,223	-0,118	-0,094	-0,094	0,021
Out	-0,209	-0,104	-0,08	-0,08	0,035
Nov	-0,209	-0,104	-0,08	-0,08	0,035
Dez	-0,209	-0,104	-0,08	0,005	0,035

Outorga

Figura 15 – Tela Outorga do SINGERH.

Considerando que o processo de outorga normalmente é realizado em uma base mensal, no campo 1 constam as datas inicial (mês/ano) e final (mês/ano) da outorga a ser analisada, além de uma caixa de texto, na qual deve ser informada a vazão solicitada. Ao pressionar o botão “Ok”, todas as células do campo 3, para o período determinado pelas datas inicial e final, serão preenchidas com o valor correspondente àquele definido na caixa de texto “Vazão solicitada” do campo 1. Nas situações em que os valores de vazão solicitada não são constantes para todo o período em análise, o usuário deverá proceder, no campo 3, à alteração dos valores pré-definidos para os desejados.

O campo 2 destina-se à identificação do critério de outorga e do método de regionalização a ser utilizado para a estimativa da vazão mínima. Uma vez fornecidas essas informações, o usuário deve pressionar o botão “Calcular”, sendo então apresentados os valores (mês a mês) das vazões remanescentes permissíveis para concessão de outorga na seção de interesse após a concessão da nova outorga (campo 4). Visando facilitar a análise dos dados apresentados no campo 4, é utilizada no SINGERH uma escala de cores (Tabela 2) para a identificação da proporção entre as outorgas já emitidas e a vazão máxima passível de ser outorgada. No caso apresentado, identifica-se que no período de janeiro de 2006 a novembro de 2009 o preenchimento foi feito com a cor vermelha, que indica que as vazões outorgadas superaram o percentual da vazão de referência passível de outorga na seção de interesse, fato esse que também é indicado pelo sinal negativo.

4.1.4. Relatórios

Na Figura 16 é apresentado o menu “Relatórios”, no qual se deve escolher o tipo de relatório que se deseja gerar.

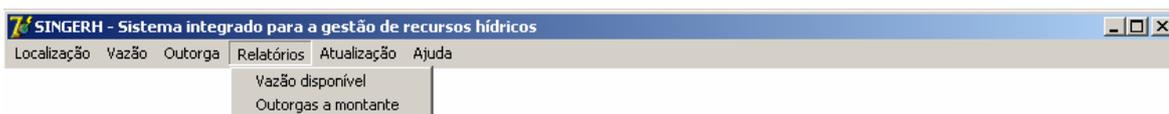


Figura 16 – Menu Relatórios do SINGERH.

Ao escolher a opção “Vazão disponível”, o SINGERH gera um relatório (Figura 17) em que constam as informações básicas da seção de interesse, como sua localização em coordenadas geográficas (latitude e longitude) e projetadas (Y e X), os nomes do rio, do estado e do município e sua área de drenagem.

Também são apresentados o valor da vazão máxima passível de outorga e o método de regionalização utilizado para a estimativa da disponibilidade hídrica. Na tabela referente à situação anterior à concessão da outorga em análise, são apresentadas as vazões ainda permissíveis de serem outorgadas na seção de interesse.

Visando facilitar a análise das vazões apresentadas, nesta tabela é feita, com base nos critérios apresentados na Tabela 2, a classificação das vazões em quatro classes. A primeira refere-se à condição em que a vazão ainda permissível para ser outorgada é superior a 30% da vazão máxima passível de outorga (período de 03/2010 a 12/2010). A segunda classe refere-se à condição em que a vazão ainda permissível para ser outorgada é inferior a 30% e superior a 10% da vazão máxima passível de outorga (período de 12/2009 a 02/2010), enquanto a terceira classe se refere à condição em que a vazão ainda permissível para ser outorgada é inferior a 10% da vazão máxima passível de outorga. A quarta classe refere-se à condição em que as vazões outorgadas superaram a vazão máxima passível de outorga, sendo que para essa condição se pode evidenciar que o sinal da vazão é negativo, reiterando que a vazão máxima permissível de ser outorgada já foi superada (período de 01/2006 a 11/2009).

Na tabela referente à situação posterior à concessão da outorga em análise, são apresentadas as vazões ainda permissíveis de serem outorgadas na seção de interesse considerando a concessão da outorga em análise. Nessa tabela, tal como naquela referente à situação anterior à concessão da outorga em análise, é realizada a classificação das vazões de acordo com os critérios apresentados na Tabela 2, sendo estes dispostos no final do relatório, servindo, dessa forma, como base de referência para as análises. A comparação das duas tabelas permite a fácil identificação do impacto da concessão da nova outorga nas vazões da seção de interesse, possibilitando ao órgão gestor a tomada de decisão quanto ao deferimento ou indeferimento da outorga em análise.

Ao escolher a opção “Outorgas a montante”, o SINGERH gera um relatório (Figura 18) apresentando o diagnóstico das outorgas emitidas na bacia, constando, tal como no relatório “Vazão disponível”, as informações básicas a respeito da seção de interesse. Também constam neste relatório, em uma base mensal, as vazões totais outorgadas a montante da seção de interesse por cada um dos órgãos gestores de recursos hídricos da bacia em estudo.

Relatório de vazões disponíveis

Seção de interesse

Coordenadas Geográficas:	Coordenadas Projetadas:
Latitude: 18° 04' 55"	Y: 8000574,7519126 metros
Longitude: 45° 43' 18"	X: 423633,56168828 metros
Estado: Minas Gerais	Município: Joao Pinheiro
Rio: Rio Santo Antonio	Área de drenagem: 351,37 km ²

Vazão disponível

Critério de outorga: 30 % da Q7,10

Método de regionalização: Tradicional

Situação anterior à concessão da outorga

	2006	2007	2008	2009	2010
▶ Jan	-0,285	-0,208	-0,103	-0,079	0,006
Fev	-0,285	-0,208	-0,103	-0,079	0,006
Mar	-0,285	-0,208	-0,103	-0,079	0,036
Abr	-0,285	-0,128	-0,103	-0,079	0,036
Mai	-0,285	-0,128	-0,103	-0,079	0,036
Jun	-0,208	-0,103	-0,103	-0,079	0,036
Jul	-0,208	-0,103	-0,103	-0,079	0,036
Ago	-0,208	-0,103	-0,079	-0,079	0,036
Set	-0,208	-0,103	-0,079	-0,079	0,036
Out	-0,208	-0,103	-0,079	-0,079	0,036
Nov	-0,208	-0,103	-0,079	-0,079	0,036
Dez	-0,208	-0,103	-0,079	0,006	0,036

Situação posterior à concessão da outorga

	2006	2007	2008	2009	2010
▶ Jan	-0,286	-0,209	-0,104	-0,08	0,005
Fev	-0,286	-0,209	-0,104	-0,08	0,005
Mar	-0,286	-0,209	-0,104	-0,08	0,035
Abr	-0,286	-0,129	-0,104	-0,08	0,035
Mai	-0,3	-0,143	-0,118	-0,094	0,021
Jun	-0,243	-0,138	-0,138	-0,114	0,001
Jul	-0,243	-0,138	-0,138	-0,114	0,001
Ago	-0,243	-0,138	-0,114	-0,114	0,001
Set	-0,223	-0,118	-0,094	-0,094	0,021
Out	-0,209	-0,104	-0,08	-0,08	0,035
Nov	-0,209	-0,104	-0,08	-0,08	0,035
Dez	-0,209	-0,104	-0,08	0,005	0,035

Escala de cores para a caracterização das faixas de vazões permissíveis de serem outorgas

Cor	Critério
Verde	Vazão ainda permissível para ser outorgada superior a 30% da vazão máxima passível de outorga
Amarelo	Vazão ainda permissível para ser outorgada inferior a 30% e superior a 10% da vazão máxima passível de outorga
Laranja	Vazão ainda permissível para ser outorgada inferior a 10% da vazão máxima passível de outorga
Vermelho	Condição em que as vazões outorgadas superaram a vazão máxima passível de outorga

Relatório elaborado pelo SINGERH em 09/02/2006.

Figura 17 – Relatório Vazão disponível gerado pelo SINGERH.

Relatório de vazões outorgadas

Seção de interesse

Coordenadas Geográficas:

Latitude: 18° 04' 55"

Longitude: 45° 43' 18"

Estado: Minas Gerais

Rio: Rio Santo Antonio

Coordenadas Projetadas:

Y: 8000574,7519126 metros

X: 423633,56168828 metros

Município: Joao Pinheiro

Área de drenagem: 351,37 km²

Vazão outorgada a montante da seção de interesse

IGAM

	2006	2007	2008	2009	2010
▶ Jan	0,321	0,244	0,139	0,115	0,03
Fev	0,321	0,244	0,139	0,115	0,03
Mar	0,321	0,244	0,139	0,115	0
Abr	0,321	0,164	0,139	0,115	0
Mai	0,321	0,164	0,139	0,115	0
Jun	0,244	0,139	0,139	0,115	0
Jul	0,244	0,139	0,139	0,115	0
Ago	0,244	0,139	0,115	0,115	0
Set	0,244	0,139	0,115	0,115	0
Out	0,244	0,139	0,115	0,115	0
Nov	0,244	0,139	0,115	0,115	0
Dez	0,244	0,139	0,115	0,03	0

ANA

	2006	2007	2008	2009	2010
▶ Jan	0	0	0	0	0
Fev	0	0	0	0	0
Mar	0	0	0	0	0
Abr	0	0	0	0	0
Mai	0	0	0	0	0
Jun	0	0	0	0	0
Jul	0	0	0	0	0
Ago	0	0	0	0	0
Set	0	0	0	0	0
Out	0	0	0	0	0
Nov	0	0	0	0	0
Dez	0	0	0	0	0

Total

	2006	2007	2008	2009	2010
▶ Jan	0,321	0,244	0,139	0,115	0,03
Fev	0,321	0,244	0,139	0,115	0,03
Mar	0,321	0,244	0,139	0,115	0
Abr	0,321	0,164	0,139	0,115	0
Mai	0,321	0,164	0,139	0,115	0
Jun	0,244	0,139	0,139	0,115	0
Jul	0,244	0,139	0,139	0,115	0
Ago	0,244	0,139	0,115	0,115	0
Set	0,244	0,139	0,115	0,115	0
Out	0,244	0,139	0,115	0,115	0
Nov	0,244	0,139	0,115	0,115	0
Dez	0,244	0,139	0,115	0,03	0

Relatório elaborado pelo SINGERH em 09/02/2006.

Figura 18 – Relatório Outorgas a montante gerado pelo SINGERH.

4.1.5. Atualização

Na Figura 19 está apresentado o menu “Atualização”, no qual é necessário escolher a base de dados que se deseja atualizar.



Figura 19 – Menu Atualização do SINGERH.

Tendo em vista o fato de que, para a aplicação do método baseado na proporcionalidade de vazões, as únicas informações necessárias são as vazões nas seções fluviométricas e as áreas de drenagem destas, a opção vazão do menu “Atualização” é utilizada para a atualização das informações necessárias para a aplicação deste método de regionalização de vazões. Na Figura 20 apresenta-se a tela que permite a atualização do banco de dados no que se refere aos valores de vazão e área de drenagem das estações fluviométricas.

No campo 1 da Figura 20 são apresentados os dados armazenados no banco de dados referentes às estações fluviométricas da bacia em estudo, sendo estes: o código da estação, a área de drenagem, a $Q_{7,10}$, a Q_{90} , a Q_{95} e a Q_{mld} . Na primeira coluna do campo 1, identificado por uma seta, é apresentado o registro que está ativo para a realização da atualização, sendo que o SINGERH disponibiliza dois procedimentos para a seleção de um registro: o primeiro a partir do clique do *mouse* sobre um dos registros apresentados no campo 1 e, o segundo, a partir do clique do *mouse* sobre um dos botões da barra de navegação (campo 2). Os botões da barra de navegação permitem mudar o registro que está ativo para o registro de interesse, no qual o usuário deverá proceder à atualização. O primeiro botão torna ativo o primeiro registro do banco de dados, enquanto o segundo e o terceiro tornam ativos o registro anterior ou o posterior, respectivamente. O último botão direciona o modo de atualização para o último registro do banco de dados.

Os valores do registro escolhido são apresentados nas caixas de texto (campo 3), sendo nestas possível efetuar as alterações de seus valores, excetuando-se a caixa de texto “Código estação”, por se tratar do identificador do registro.

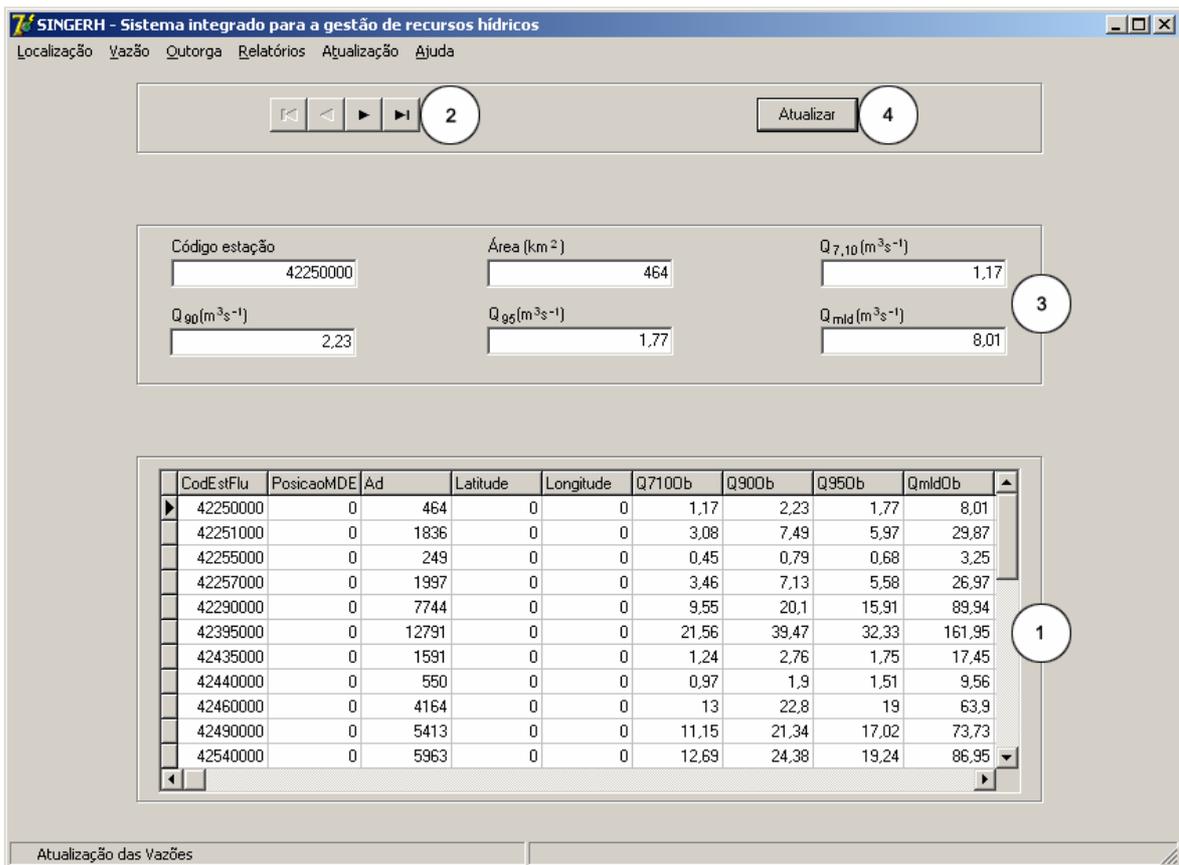


Figura 20 – Atualização dos valores de vazões das estações fluviométricas do banco de dados do SINGERH.

Procedidas as alterações, basta, então, pressionar o botão “Atualizar” (campo 4) para que os novos valores sejam armazenados no banco de dados e considerados nos próximos cálculos do SINGERH.

Para as opções “Equações do método tradicional” e “Equações do método baseado na conservação de massas/continuidade de vazões” do menu “Atualização” as informações requeridas no processo de atualização são as equações necessárias para a aplicação dos métodos. Nesse caso, o usuário deve proceder antecipadamente ao ajuste das novas equações de regionalização, procedendo, posteriormente, o ajuste destas pelo procedimento “Atualização”. Na Figura 21 apresenta-se a tela que permite a atualização do banco de dados das equações de regionalização do método tradicional.

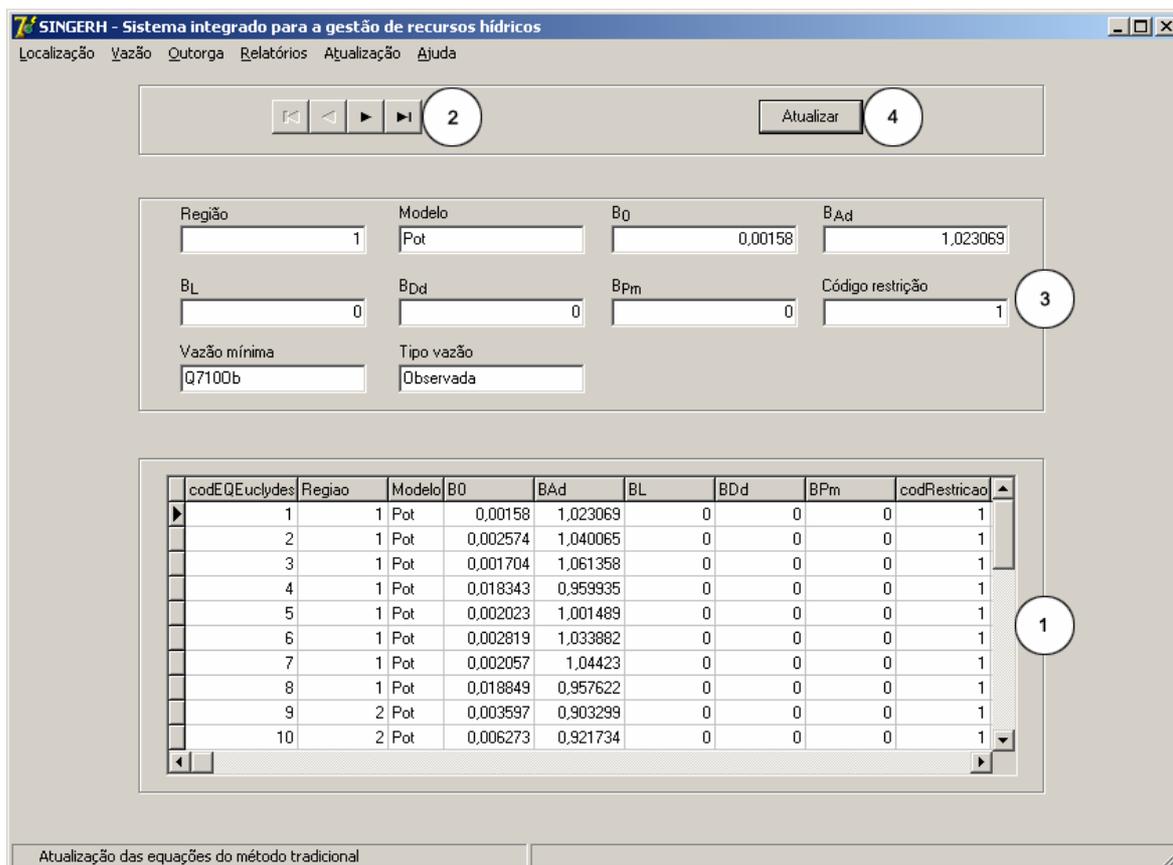


Figura 21 – Atualização das equações de regionalização do método tradicional armazenadas no banco de dados do SINGERH.

As opções “Outorgas Federais (ANA)” e “Outorgas (IGAM)” se referem à atualização dos cadastros de usuários de água da bacia. Tendo em vista a existência de diversos cadastros de usuários de água em níveis nacional (ANA) e estadual (órgãos gestores de recursos hídricos de cada Estado), o SINGERH possibilita o acesso e a integração das informações oriundas dos diversos órgãos gestores que estiverem envolvidos na bacia.

4.1.6. Ajuda

Acompanha o SINGERH um sistema de ajuda que permite ao usuário obter informações relativas à utilização do software e a aspectos teóricos relacionados à gestão de recursos hídricos. Na Figura 22 apresenta-se a tela pertinente ao sistema de ajuda do SINGERH, na qual constam, além de sua descrição, as instituições e o grupo responsável pelo seu desenvolvimento, bem como os órgãos que o financiaram.

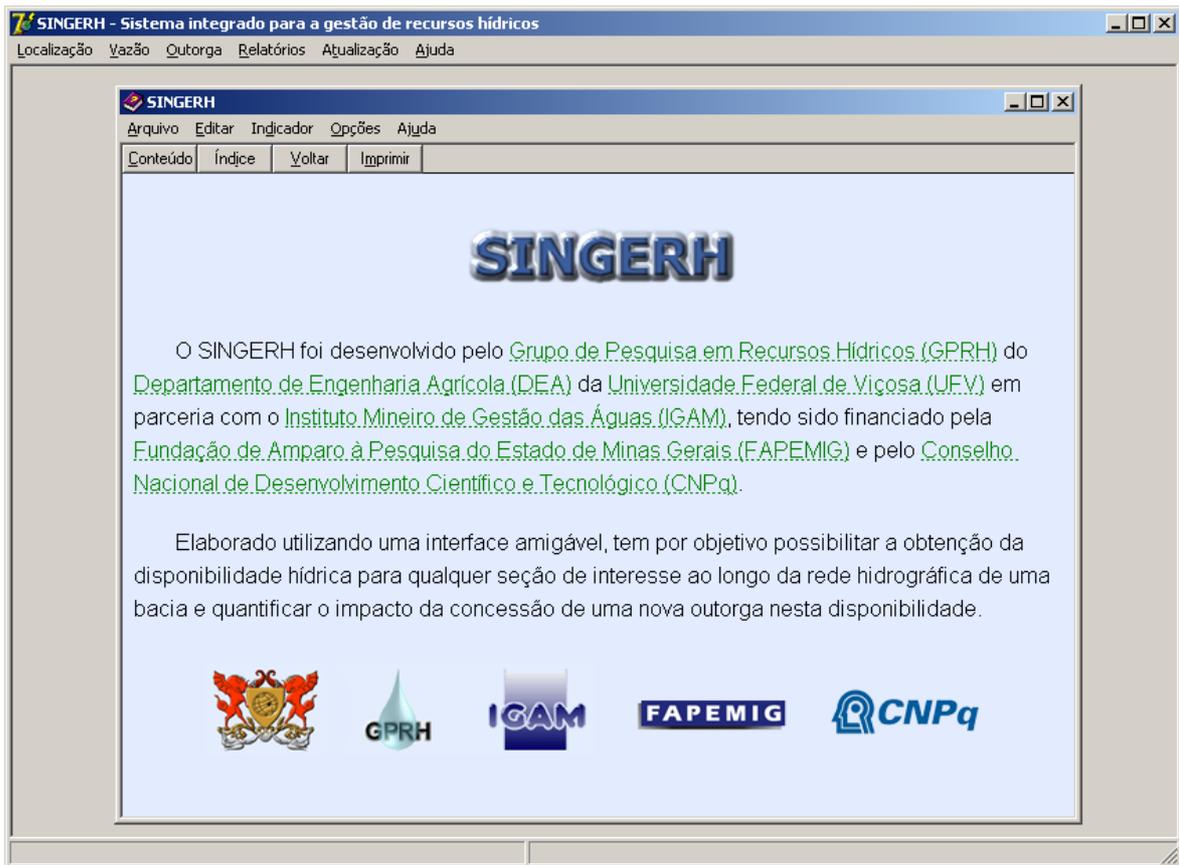
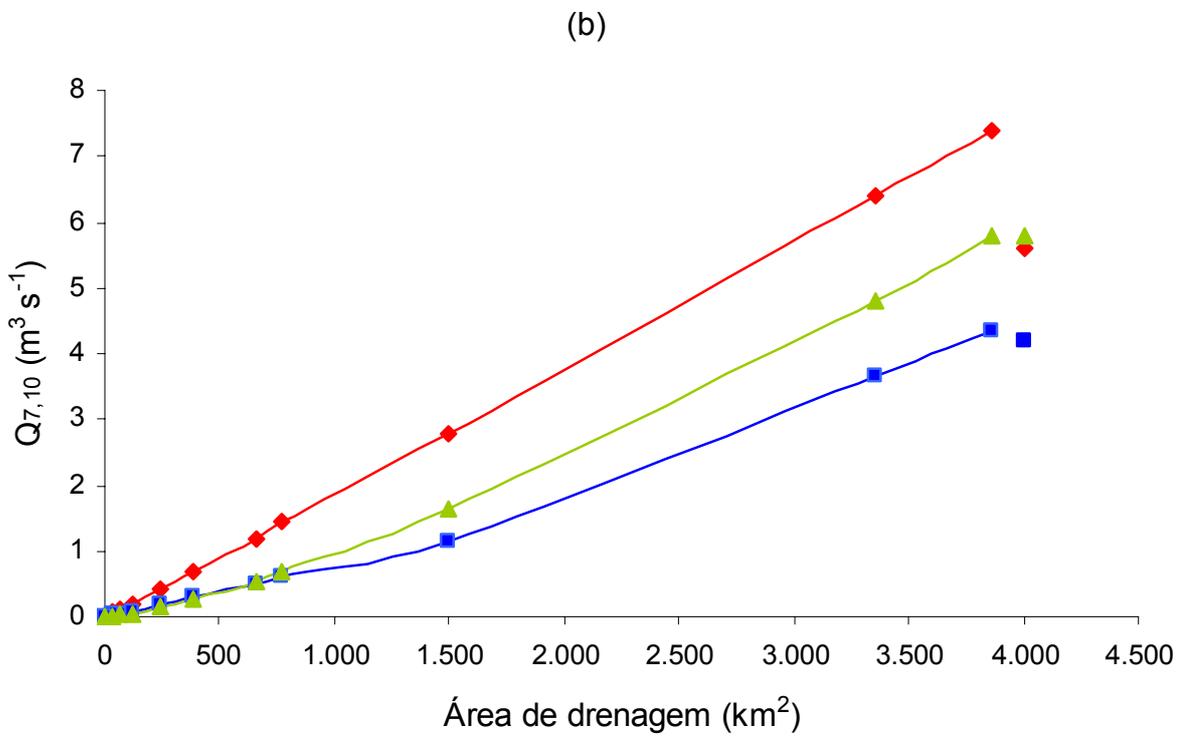
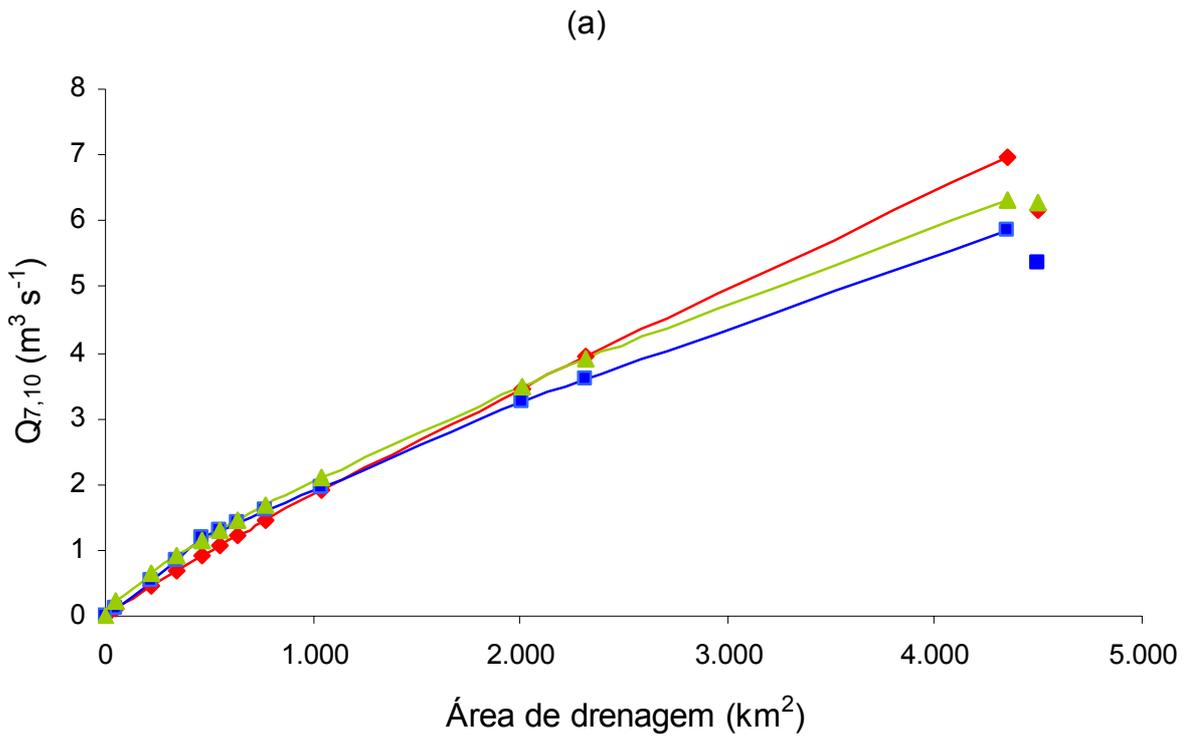


Figura 22 – Sistema de ajuda do SINGERH.

4.2. Aplicação do software – Estudo de caso para a bacia do rio Paracatu

4.2.1. Obtenção das vazões mínimas e média

Na Figura 23 apresenta-se a variação, em função da área de drenagem, dos valores da vazão mínima com sete dias de duração e período de retorno de 10 anos ($Q_{7,10}$) estimados pelos métodos tradicional (MT), baseado na proporcionalidade de vazões específicas (MPV) e baseado na conservação de massas/continuidade de vazões (MCM), com a utilização do SINGERH para diferentes seções do rio Escuro, ribeirão Entre Ribeiros e rio Paracatu.



continua...

Figura 23 – Cont.

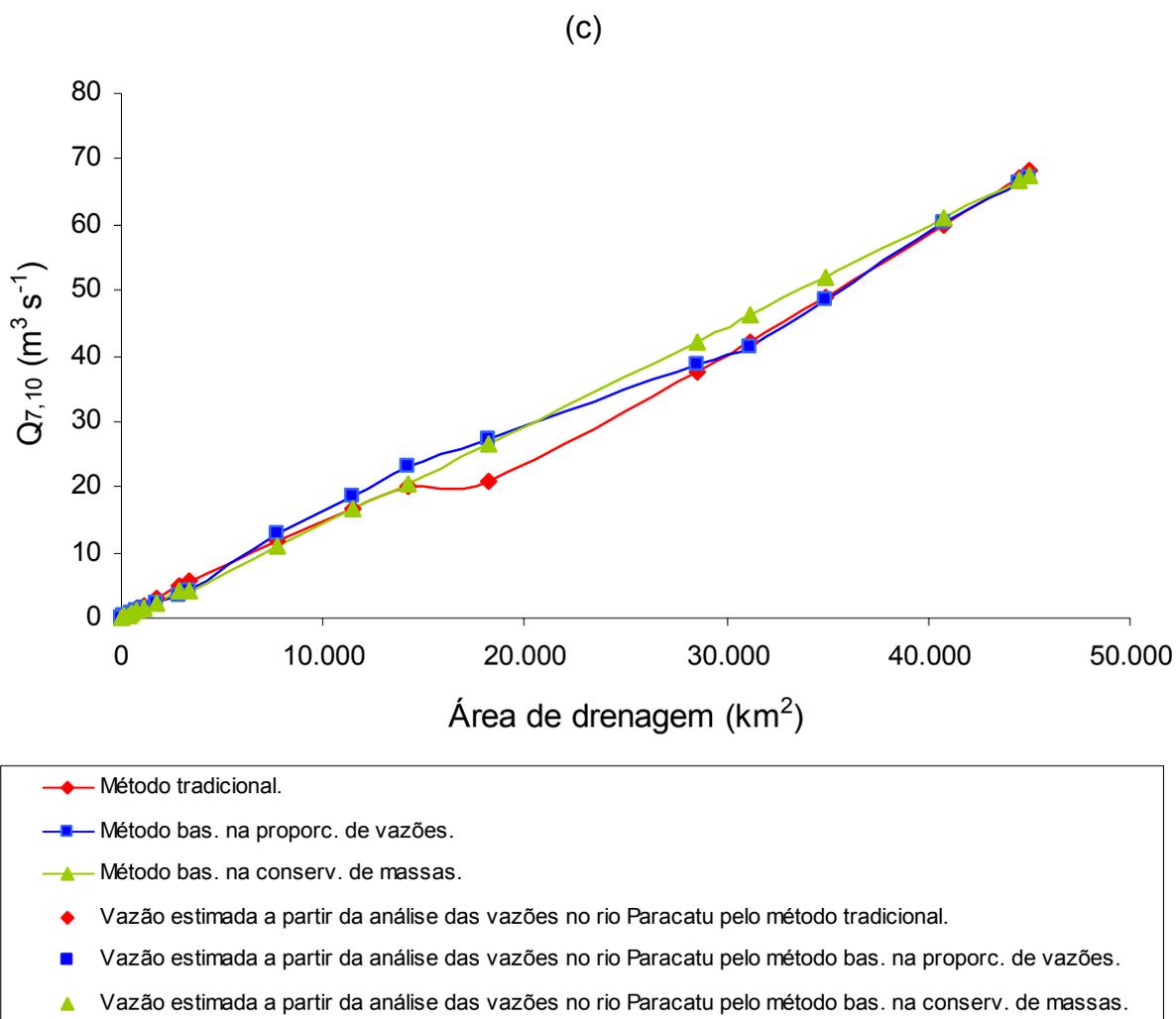


Figura 23 – $Q_{7,10}$, em $m^3 s^{-1}$, estimada pelos três métodos de regionalização de vazões implementados no SINGERH para diferentes seções: (a) rio Escuro; (b) ribeirão Entre Ribeiros e (c) rio Paracatu.

Pela análise do comportamento das vazões para o rio Escuro (Figura 23a) evidencia-se que para áreas de drenagem inferiores a $2.000 km^2$ os valores estimados pelos três métodos de regionalização não apresentaram grandes diferenças (absolutas) entre si, inclusive com oscilação entre os métodos em relação àquele que conduziu ao maior valor de $Q_{7,10}$.

Pela Tabela 5 nota-se, entretanto, que embora as diferenças na magnitude das $Q_{7,10}$ tenham sido muito pequenas, o fato de as vazões associadas a pequenas áreas de drenagem serem reduzidas acaba por acarretar erros relativos grandes. Assim, observa-se na relação dos métodos MT X MCM e MPV X MCM que houve tendência de decréscimo nos valores dos erros relativos percentuais (E_p) em relação ao aumento da área de drenagem, sendo verificados valores de

Ep correspondentes a 120% para diferenças absolutas das vazões estimadas de apenas $0,003 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ e área de drenagem de $0,25 \text{ km}^2$. Na relação dos métodos MT X MPV, no entanto, não houve uma tendência definida nos valores de Ep, sendo verificados nesses valores diferenças inferiores a 25%.

De modo geral, verifica-se que os maiores Ep estiveram associados a áreas de drenagem de 463 km^2 e $0,25 \text{ km}^2$, em que a diferença entre as vazões estimadas foi de apenas $0,249 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ para o MT X MPV, $0,003 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ para o MT X MCM e $0,003 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ para o MPV X MCM, caracterizando um comportamento já observado por diversos autores em relação à ocorrência de maiores desvios entre vazões estimadas nas regiões próximas às cabeceiras.

Tabela 5 – Diferença absoluta, em $\text{m}^3 \text{ s}^{-1}$, e erro relativo, em %, entre os três métodos de regionalização de vazões implementados no SINGERH para diferentes seções do rio Escuro

Área de drenagem (km^2)	MT X MPV		MT X MCM		MPV X MCM	
	Dif. Abs. ($\text{m}^3 \text{ s}^{-1}$)	Ep (%)	Dif. Abs. ($\text{m}^3 \text{ s}^{-1}$)	Ep (%)	Dif. Abs. ($\text{m}^3 \text{ s}^{-1}$)	Ep (%)
4.355	1,13	17,6	0,66	9,9	0,47	7,7
4.323	1,12	17,6	0,64	9,7	0,48	7,9
2.317	0,33	8,7	0,04	1,0	0,29	7,7
2.009	0,19	5,6	0,04	1,1	0,23	6,8
1.036	0,06	3,1	0,2	10,0	0,14	6,9
775	0,13	8,5	0,22	13,9	0,09	5,5
640	0,19	14,3	0,23	17,1	0,04	2,8
556	0,21	17,6	0,22	18,3	0,01	0,8
463	0,249	23,8	0,219	21,3	0,03	2,6
338	0,161	20,8	0,207	26,0	0,046	5,2
219	0,085	16,6	0,178	31,9	0,093	15,5
52	0,003	2,3	0,088	50,9	0,085	48,7
0,25	0	0,0	0,003	120,0	0,003	120,0

MT: método tradicional; MPV: método baseado na proporcionalidade de vazões específicas e MCM: método baseado na conservação de massas/continuidade de vazões.

Em áreas de drenagem superiores a 2.000 km^2 observa-se uma tendência de comportamento aproximadamente linear nos três métodos estudados, sendo os valores obtidos pelo MT superiores aos do MCM e estes, por sua vez, sempre superiores aos do MPV, o que conduz, para a foz do rio Escuro, aos seguintes valores de $Q_{7,10}$: $6,97 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ (MT), $5,84 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ (MPV) e $6,31 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ (MCM), acarretando em erros percentuais de 17,6% entre os métodos MT e MPV, 9,9% entre os métodos MT e MCM e 7,7% entre os métodos MPV e MCM.

Outro aspecto que pode ser evidenciado na Figura 23a é a diferença entre os valores estimados na foz do rio Escuro e aqueles obtidos pela diferença entre a vazão do rio Paracatu imediatamente a montante e a jusante da confluência com o rio Escuro. Enquanto no MCM não existe diferença entre esses valores, no MT a diferença foi de $0,82 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ (correspondente a 11,8% da vazão estimada na foz) e no MPV a diferença foi de $0,47 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$, o que representa 8,0% da vazão estimada na foz.

Considerando o comentário de Cruz (2001), de que a garantia da continuidade das vazões ao longo da rede hidrográfica de uma bacia é de suma importância para a gestão de recursos hídricos, pois uma estimativa das vazões em uma seção pode alterar a relação de proporção entre as disponibilidades das mesmas e, conseqüentemente, as proporções de vazões outorgadas entre as seções, evidencia-se que o MCM é o método que melhor atende a essa necessidade.

No ribeirão Entre Ribeiros (Figura 23b) observa-se, ao contrário do rio Escuro, uma tendência de o MT produzir as maiores estimativas de $Q_{7,10}$. Nos MCM e MPV evidencia-se que as $Q_{7,10}$ estimadas são semelhantes até valores de área de drenagem de 774 km^2 , sendo que, a partir de então, o MCM passa a produzir maiores valores de $Q_{7,10}$. Em relação à foz, nota-se que a $Q_{7,10}$ correspondente ao MT é de $7,39 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$, ao MPV de $4,36 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ e ao MCM de $5,78 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$, o que acarreta uma descontinuidade em relação às vazões estimadas a partir da análise da vazão do rio Paracatu imediatamente a montante e a jusante da confluência com o ribeirão Entre Ribeiros, de $1,79 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ para o MT, $0,16 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ para o MPV e uma vazão nula para o MCM, caracterizando, novamente, para o MCM a continuidade das vazões de um afluente para o rio principal.

Pela análise da Figura 23c observa-se uma tendência de comportamento aproximadamente linear no MCM, tal como evidenciado por Novaes (2005). Nos outros dois métodos, entretanto, foram observadas mudanças expressivas no comportamento da $Q_{7,10}$ em função da área de drenagem. No MPV essas variações podem ser atribuídas às diferenças entre as vazões específicas das seis estações situadas no rio Paracatu, correspondentes a: Porto Alegre ($1,49 \text{ L/s km}^{-2}$); Porto do Cavalo ($1,48 \text{ L/s km}^{-2}$); Caatinga ($1,33 \text{ L/s km}^{-2}$); Porto da

Extrema (1,34 L/s km⁻²); Santa Rosa (1,69 L/s km⁻²) e Ponte da BR-040 (1,23 L/s km⁻²).

No MT observa-se que da área de drenagem de 14.216 km² para a área de drenagem de 18.204 km² o valor da Q_{7,10} apresenta taxa de crescimento (contribuição específica) muito inferior à observada nos demais segmentos do rio. Esse comportamento está diretamente associado à transição de uma região hidrologicamente homogênea (região 2) para outra (região 3), conforme se pode evidenciar na Figura 1D, do Apêndice D.

Esse problema, associado à transição de uma região hidrologicamente homogênea para outra, é, aliás, um problema típico do MT. Na Figura 24 apresenta-se outra delimitação possível para as regiões hidrologicamente homogêneas, considerando, para tanto, não mais a confluência dos rios Preto e Paracatu, mas sim o que é habitual, o limite das áreas de drenagem das estações fluviométricas pertencentes à mesma região hidrologicamente homogênea.

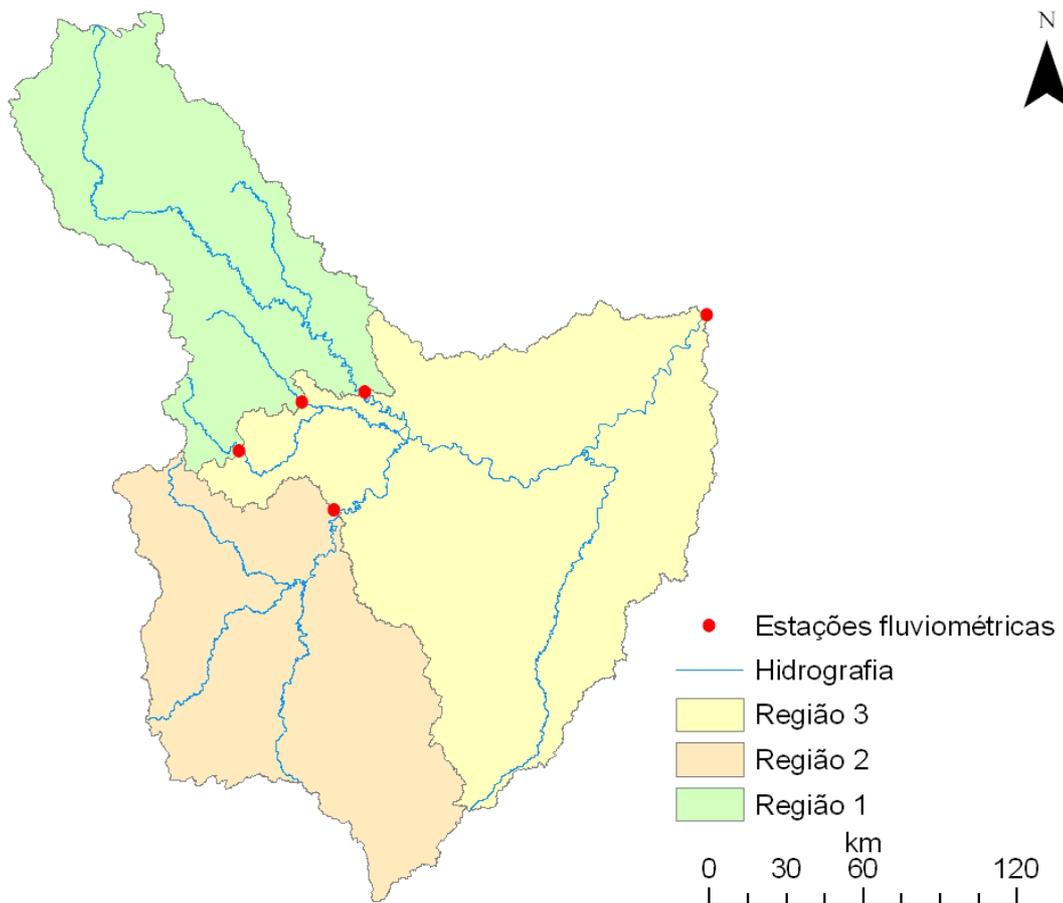


Figura 24 – Regiões hidrologicamente homogêneas determinadas a partir das áreas de drenagem das estações fluviométricas.

A alteração do limite das regiões hidrologicamente homogêneas transferiu o problema de descontinuidade ocorrida no rio Paracatu para os demais rios, como é evidenciado nos valores estimados de $Q_{7,10}$ para o ribeirão Entre Ribeiros (Figura 25). Nesta figura verifica-se, inclusive, redução da $Q_{7,10}$ da seção com área de drenagem de 1.492 km² na seção com área de drenagem de 3.355 km², fato que, conforme discutido anteriormente, está diretamente associado ao problema de transição de uma região hidrologicamente homogênea para outra. Tendo em vista esse fato optou-se pela manutenção da disposição das regiões hidrologicamente homogêneas apresentadas na Figura 1D, do Apêndice D.

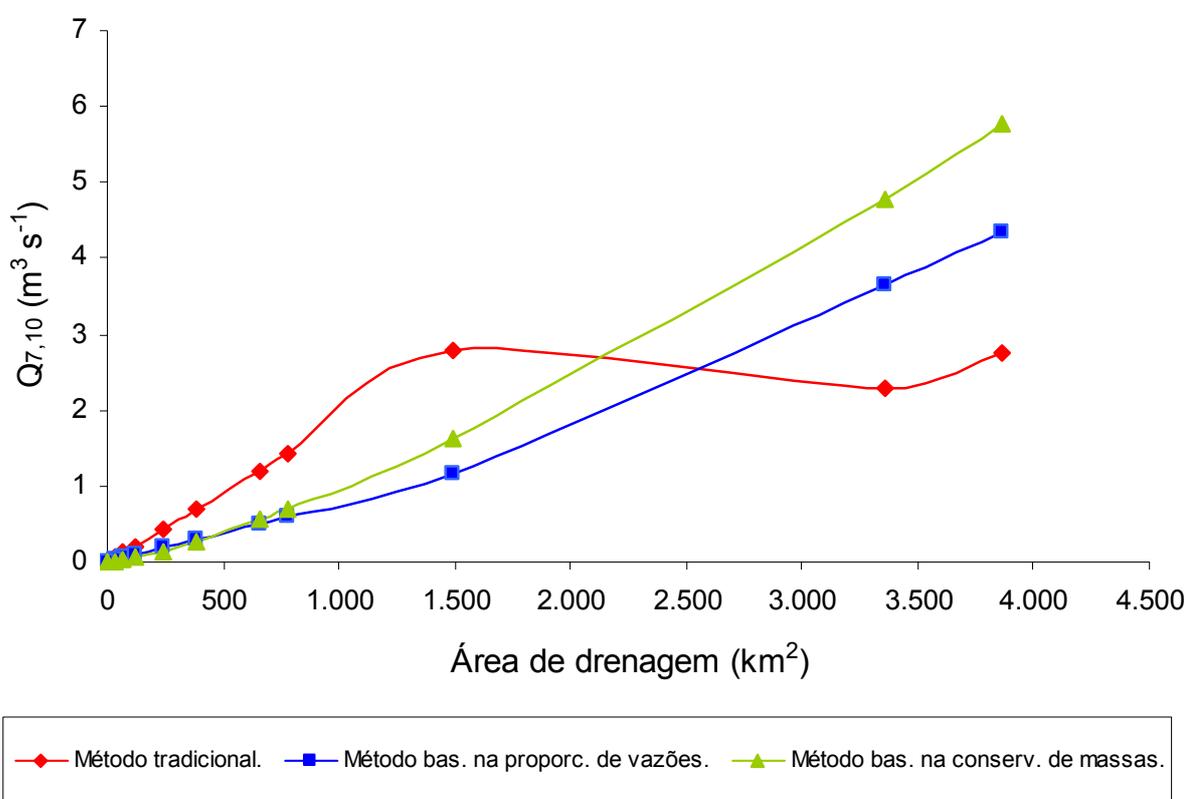


Figura 25 – $Q_{7,10}$, em $m^3 s^{-1}$, estimada pelos três métodos de regionalização considerando as regiões hidrologicamente homogêneas determinadas a partir das áreas de drenagem das estações fluviométricas.

Tendo em vista a similaridade do comportamento observado para a Q_{90} , Q_{95} e Q_{mid} em relação àquele descrito para a $Q_{7,10}$, os gráficos representativos do comportamento dessas variáveis em função da área de drenagem são apresentados no Apêndice F. Visando, entretanto, à representação de outro

aspecto de ocorrência freqüente na regionalização de vazões, apresenta-se na Figura 26 a variação da Q_{90} em função da área de drenagem do rio Paracatu.

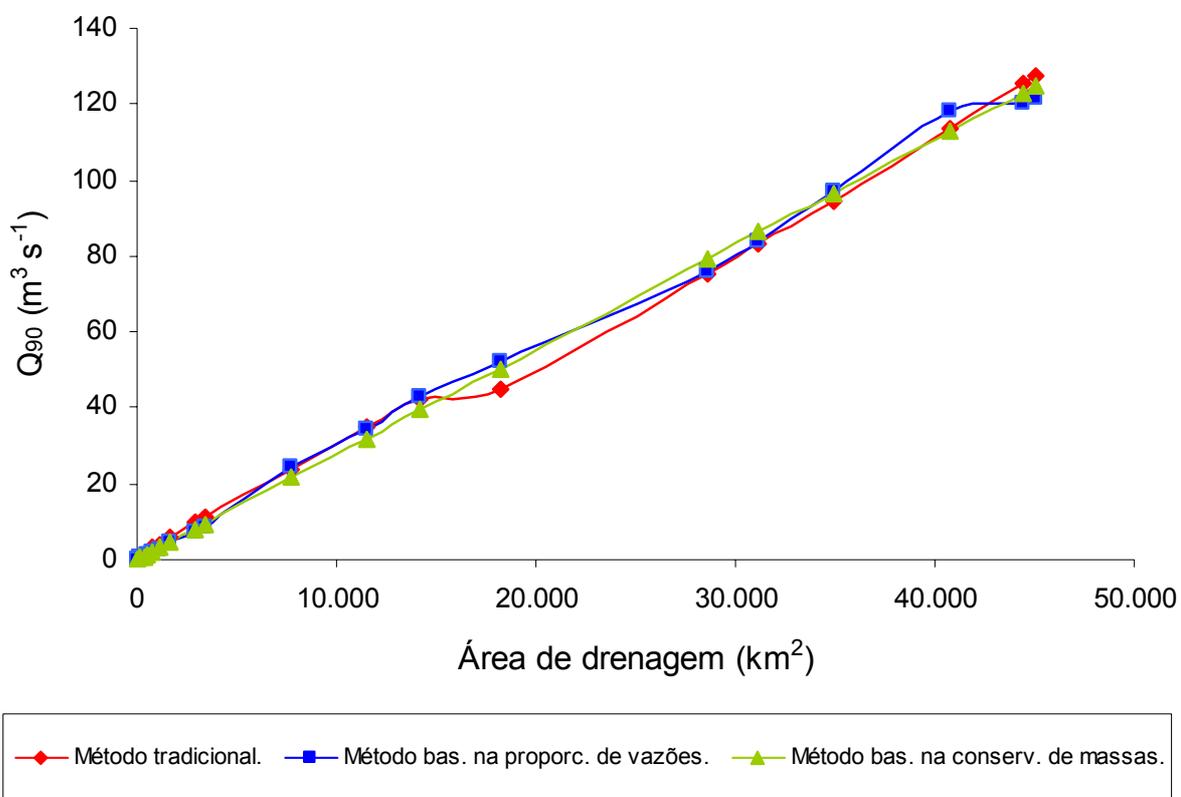


Figura 26 – Q_{90} , em $m^3 s^{-1}$, estimada pelos três métodos de regionalização de vazões implementados no SINGERH para diferentes seções do rio Paracatu.

Nessa figura evidencia-se, além da mudança brusca da declividade da curva relativa ao MT quando da passagem de uma região hidrologicamente homogênea para outra, a tendência apresentada pelo MPV de conduzir à redução do valor da Q_{90} com o aumento da área de drenagem quando esta é superior a 40.812 km^2 , fato que representa uma grande dificuldade na análise de processos de outorga.

Tendo em vista a análise apresentada, evidencia-se, em algumas seções, diferenças expressivas na estimativa das vazões mínimas pelos três métodos de regionalização estudados, sendo, portanto, necessário maior cuidado na escolha do método de regionalização, pois essa atividade pode comprometer o processo de tomada de decisão no gerenciamento dos recursos hídricos, vindo a gerar conflitos. Nesse sentido, o SINGERH, ao calcular a disponibilidade hídrica por

diferentes métodos de regionalização, fornece subsídios para o gestor proceder à análise de qual método é o mais adequado às condições da bacia em estudo.

Todas as equações consideradas no SINGERH para a regionalização de vazões utilizam apenas a área de drenagem como variável independente. A incorporação de outras características físicas e climáticas da bacia poderia conduzir a uma melhoria no desempenho dos modelos de regionalização já contemplados e constitui proposta para a continuidade deste trabalho.

É necessário salientar que a qualidade das vazões estimadas utilizando os métodos de regionalização depende do número de estações fluviométricas consideradas e de sua distribuição, sendo importante que se tenha consciência de que nenhum dado pode ser criado, o que se deve é buscar, da melhor maneira possível, extrair o máximo de informações dos dados existentes (IPH, citado por SILVA JÚNIOR et al., 2003). Cabe também lembrar que a estimativa das vazões mínimas e média pode não considerar particularidades locais, devendo, nesse caso, a decisão sobre o emprego dos valores a serem utilizados recair em critérios baseados na experiência do hidrólogo e de seu conhecimento da região.

4.2.2. Análise do processo de outorga para a sub-bacia do ribeirão Entre Ribeiros

Na Figura 27 apresentam-se as vazões passíveis de serem outorgadas na foz do ribeirão Entre Ribeiros (Latitude 16° 58' 55" e Longitude 46° 14' 21") para o período de janeiro de 2006 a dezembro de 2010, calculadas considerando as outorgas concedidas até 22 de janeiro de 2006, os critérios de outorga do Estado de Minas Gerais (30% da $Q_{7,10}$) e da União (70% da Q_{95}) e as vazões estimadas pelo método tradicional.

(a)						(b)					
	2006	2007	2008	2009	2010		2006	2007	2008	2009	2010
▶ Jan	-3,644	-2,833	-2,539	-2,123	-1,293	▶ Jan	1,595	2,606	2,9	3,317	4,146
Fev	-3,644	-2,833	-2,539	-2,123	-1,293	Fev	1,795	2,606	2,9	3,317	4,146
Mar	-3,644	-2,833	-2,539	-2,122	-1,293	Mar	1,795	2,606	2,9	3,317	4,146
Abr	-3,562	-2,783	-2,539	-2,122	-1,293	Abr	1,877	2,656	2,9	3,317	4,146
Mai	-3,516	-2,783	-2,539	-2,057	-1,293	Mai	1,923	2,656	2,9	3,382	4,146
Jun	-3,371	-2,555	-2,123	-2,057	-1,293	Jun	2,068	2,884	3,316	3,382	4,146
Jul	-3,371	-2,555	-2,123	-2,057	-1,293	Jul	2,068	2,884	3,316	3,382	4,146
Ago	-3,371	-2,539	-2,123	-1,293	-1,293	Ago	2,068	2,9	3,317	4,146	4,146
Set	-3,271	-2,539	-2,123	-1,293	-1,293	Set	2,168	2,9	3,317	4,146	4,146
Out	-3,258	-2,539	-2,123	-1,293	-1,293	Out	2,181	2,9	3,317	4,146	4,146
Nov	-3,172	-2,539	-2,123	-1,293	-1,293	Nov	2,267	2,9	3,317	4,146	4,146
Dez	-3,156	-2,539	-2,123	-1,293	-1,293	Dez	2,283	2,9	3,317	4,146	4,146

Figura 27 – Vazão remanescente para outorga na foz do ribeirão Entre Ribeiros, considerando o método de regionalização tradicional e os critérios de outorga: (a) 30% da $Q_{7,10}$ e (b) 70% da Q_{95} .

Pela análise da Figura 27a observa-se que considerando a $Q_{7,10}$ estimada pelo método tradicional e o critério de outorga do Estado de Minas Gerais ($xQ_{mr} = 2,21 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$), as vazões outorgadas nessa seção, em todos os meses em análise, superam a vazão máxima passível de ser outorgada, fato esse identificado pela cor vermelha (Tabela 2) e pelo sinal negativo dos valores. No primeiro ano em análise verifica-se que as vazões outorgadas superam em mais de $3 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ a vazão máxima passível de outorga, representando, no mês mais crítico, uma vazão outorgada da ordem de 81,92% da $Q_{7,10}$ estimada pelo método tradicional, valor esse muito superior ao da máxima vazão concedida para outorga no Estado de Minas Gerais.

Nessa figura, percebe-se, ainda, um aumento ao longo do tempo das vazões remanescentes para concessão de outorga, fato esse explicado pela perda de validade das outorgas vigentes, as quais, após o seu vencimento, têm essas vazões outorgadas novamente passíveis de novas outorgas.

Na Figura 27b, em que se consideram a $Q_{7,10}$ estimada pelo método tradicional e o critério de outorga da União ($xQ_{mr} = 7,63 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$), observa-se que em todo o ano de 2006 ainda existem vazões passíveis de serem outorgadas, sendo estas inferiores a 30% e superiores a 10% da vazão máxima passível de outorga (cor amarela da Tabela 2). No restante do período em análise, observam-se vazões ainda passíveis de serem outorgadas superiores a 30% da vazão máxima passível de outorga (cor verde da Tabela 2).

A maior disponibilidade de água para concessão de outorga, evidenciada na Figura 27b em relação à Figura 27a, decorre do fato do critério de 70% da Q_{95} ser menos restritivo que o critério de 30% da $Q_{7,10}$, podendo-se verificar na Tabela 1 que o critério de outorga de Minas Gerais é o mais restritivo do país. Johnson e Lopes (2003) afirmam que o critério de 30% da $Q_{7,10}$, para a bacia do rio Paracatu é muito restritivo, por não representar, com exatidão, o potencial hídrico da região. O próprio IGAM, em questionário encaminhado à ANA (ANA, 2005a), salienta a necessidade da definição de diferentes critérios de outorga conforme as particularidades de cada região do Estado.

Na Figura 28, em que são consideradas as mesmas condições aplicadas à Figura 27, utilizando, no entanto, as $Q_{7,10}$ e Q_{95} estimadas pelo método baseado na conservação de massas/continuidade de vazões, observam-se restrições

quanto à concessão de novas outorgas para o período em análise (cor vermelha da Tabela 2).

Na Figura 28a, evidencia-se no mês mais crítico (janeiro de 2006) uma vazão outorgada superior à máxima permissível para outorga no Estado de Minas Gerais, de $4,326 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$, representando uma vazão outorgada de 104,8% da $Q_{7,10}$ estimada pelo método baseado na conservação de massas/continuidade de vazões. Essa vazão outorgada, superior a 100% da $Q_{7,10}$, não implica necessariamente na 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 dez anos e o valor da vazão outorgada corresponde ao somatório das outorgas, o que não implica na retirada simultânea dessas vazões. Em entrevista com técnicos do IGAM, no entanto, foi afirmado que na sub-bacia do ribeirão Entre Ribeiros existem seções em que foram observadas vazões nulas, fato que tem levado este órgão a tomar medidas no sentido de minimizar esse problema.

A situação mais crítica quanto às vazões remanescentes para concessão de novas outorgas, evidenciada na Figura 28a em relação à Figura 27a pode ser explicada pelo menor valor de $Q_{7,10}$ estimado pelo método baseado na conservação de massas/continuidade de vazões ($5,78 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$) em relação ao método tradicional ($7,39 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$), fato esse apresentado graficamente na Figura 23b.

Na Figura 28b, elaborada com a utilização do critério de 70% da Q_{95} , é evidenciada apenas no primeiro mês em análise uma situação restritiva para concessão de novas outorgas, sendo que nos nove meses subseqüentes o baixo valor da vazão remanescente (cor laranja da Tabela 2) indica a necessidade de maior atenção na concessão de novas outorgas nesse período. No restante do período existe uma situação mais favorável quanto à existência de vazões ainda permissíveis de serem outorgadas, representada pelas cores amarela e verde, no período de novembro de 2006 a dezembro de 2010.

(a)						(b)					
	2006	2007	2008	2009	2010		2006	2007	2008	2009	2010
▶ Jan	-4,326	-3,315	-3,021	-2,605	-1,776	▶ Jan	-0,052	0,959	1,252	1,669	2,498
Fev	-4,126	-3,315	-3,021	-2,605	-1,776	Fev	0,148	0,959	1,252	1,669	2,498
Mar	-4,126	-3,315	-3,021	-2,605	-1,776	Mar	0,148	0,959	1,252	1,669	2,498
Abr	-4,044	-3,265	-3,021	-2,605	-1,776	Abr	0,23	1,009	1,252	1,669	2,498
Mai	-3,998	-3,265	-3,021	-2,54	-1,776	Mai	0,276	1,009	1,252	1,734	2,498
Jun	-3,853	-3,038	-2,605	-2,54	-1,776	Jun	0,421	1,236	1,668	1,734	2,498
Jul	-3,853	-3,038	-2,605	-2,54	-1,776	Jul	0,421	1,236	1,668	1,734	2,498
Ago	-3,853	-3,022	-2,605	-1,776	-1,776	Ago	0,421	1,252	1,669	2,498	2,498
Set	-3,753	-3,022	-2,605	-1,776	-1,776	Set	0,521	1,252	1,669	2,498	2,498
Out	-3,74	-3,022	-2,605	-1,776	-1,776	Out	0,534	1,252	1,669	2,498	2,498
Nov	-3,654	-3,022	-2,605	-1,776	-1,776	Nov	0,62	1,252	1,669	2,498	2,498
Dez	-3,638	-3,021	-2,605	-1,776	-1,776	Dez	0,636	1,252	1,669	2,498	2,498

Figura 28 – Vazão remanescente para outorga na foz do ribeirão Entre Ribeiros, considerando o método de regionalização baseado na conservação de massas/continuidade de vazões e os critérios de outorga: (a) 30% da $Q_{7,10}$ e (b) 70% da Q_{95} .

Na Figura 29, em que são consideradas as mesmas condições aplicadas às Figuras 27 e 28, utilizando, no entanto, as $Q_{7,10}$ e Q_{95} estimadas pelo método baseado na proporcionalidade de vazões específicas, observam-se maiores restrições quanto à concessão de novas outorgas para o período em análise. Na Figura 29a verifica-se em todo o período em análise que foram outorgadas vazões superiores à máxima permissível no Estado de Minas Gerais, apresentando no mês mais crítico (janeiro de 2006) uma vazão de $4,754 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$, o que representa uma vazão outorgada de 138,9% da $Q_{7,10}$ estimada pelo método baseado na proporcionalidade de vazões específicas para a foz do ribeirão Entre Ribeiros.

Na Figura 29b (Q_{95} estimada pelo método baseado na proporcionalidade de vazões específicas e vazão máxima passível de outorga correspondente a 70% da Q_{95}) verifica-se, no período de janeiro de 2006 a maio de 2008, uma maior restrição quanto à concessão de novas outorgas, em relação as restrições apresentadas nas Figuras 27b e 28b. A partir de junho de 2008 até o final do período em análise, no entanto, percebe-se que ainda existem vazões permissíveis de serem outorgadas.

Diversos autores também evidenciaram problemas de conflitos pelo uso da água na bacia do ribeirão Entre Ribeiros. ANA (2005b) em estudo que apresenta a relação entre a demanda e a disponibilidade hídrica de diversas bacias do país, classifica a situação dessa bacia como “Preocupante”, enquanto Rodriguez (2004) constatou, na seção Fazenda Barra da Égua (localizada na sub-bacia do ribeirão Entre Ribeiros), uma vazão de retirada pela irrigação no mês de maior demanda de 85,1% da $Q_{7,10}$.

(a)						(b)					
	2006	2007	2008	2009	2010		2006	2007	2008	2009	2010
▶ Jan	-4,754	-3,743	-3,449	-3,033	-2,203	▶ Jan	-1,429	-0,418	-0,124	0,292	1,121
Fev	-4,554	-3,743	-3,449	-3,033	-2,203	Fev	-1,229	-0,418	-0,124	0,292	1,121
Mar	-4,554	-3,743	-3,449	-3,032	-2,203	Mar	-1,229	-0,418	-0,124	0,292	1,121
Abr	-4,472	-3,693	-3,449	-3,032	-2,203	Abr	-1,147	-0,368	-0,124	0,292	1,121
Mai	-4,426	-3,693	-3,449	-2,967	-2,203	Mai	-1,101	-0,368	-0,124	0,357	1,121
Jun	-4,281	-3,465	-3,033	-2,967	-2,203	Jun	-0,956	-0,14	0,292	0,357	1,121
Jul	-4,281	-3,465	-3,033	-2,967	-2,203	Jul	-0,956	-0,14	0,292	0,357	1,121
Ago	-4,281	-3,449	-3,033	-2,203	-2,203	Ago	-0,956	-0,124	0,292	1,121	1,121
Set	-4,181	-3,449	-3,033	-2,203	-2,203	Set	-0,856	-0,124	0,292	1,121	1,121
Out	-4,168	-3,449	-3,033	-2,203	-2,203	Out	-0,843	-0,124	0,292	1,121	1,121
Nov	-4,082	-3,449	-3,033	-2,203	-2,203	Nov	-0,757	-0,124	0,292	1,121	1,121
Dez	-4,066	-3,449	-3,033	-2,203	-2,203	Dez	-0,741	-0,124	0,292	1,121	1,121

Figura 29 – Vazão remanescente para outorga na foz do ribeirão Entre Ribeiros, considerando o método de regionalização baseado na proporcionalidade de vazões específicas e os critérios de outorga: (a) 30% da $Q_{7,10}$ e (b) 70% da Q_{95} .

As situações apresentadas nas Figuras 27a, 28a e 29a indicam, para a bacia do ribeirão Entre Ribeiros, a impossibilidade de concessão de novas outorgas até o final do período em análise, cabendo ao órgão gestor maior atenção a fim de não permitir o agravamento dos conflitos pelo uso da água. Nesse sentido, o IGAM tem tomado medidas para a minimização desses conflitos, realizando um processo coletivo de outorgas, no qual as outorgas emitidas estão sendo revistas.

Tendo em vista o fato de que o critério de outorga impõe restrições à expansão do uso da água e, conseqüentemente, ao desenvolvimento econômico e social da região, cabe ao Estado definir políticas adequadas que otimizem a preservação ambiental e o desenvolvimento. Nesse sentido, diante das situações restritivas à concessão de novas outorgas apresentadas nas Figuras 27a, 28a e 29a, verificam-se nas Figuras 27b, 28b e 29b que, considerando as vazões estimadas pelo método tradicional, a alteração do critério de outorga para 70% da Q_{95} oportunizaria uma situação de maior disponibilidade hídrica para a concessão de outorga, implicando, nesse caso, na diminuição da vazão residual (vazão ecológica).

As simulações realizadas com o SINGERH, além de permitirem uma avaliação da forma que a variabilidade da disponibilidade hídrica influencia o processo de concessão de outorga, fornecem subsídios para a análise do desempenho de diferentes critérios adotados para a distribuição de vazões a serem outorgadas. Essas constatações reforçam a importância de se repensar o critério para estimar a disponibilidade hídrica para outorgas.

5. CONCLUSÕES

A análise dos resultados permitiu concluir que:

- O sistema integrado para a gestão de recursos hídricos desenvolvido, denominado SINGERH, permite: quantificar as outorgas estaduais e federais emitidas a montante de qualquer seção de interesse; obter a disponibilidade hídrica para qualquer seção ao longo da rede hidrográfica; quantificar o impacto da concessão de uma nova outorga sobre essa disponibilidade; e analisar o impacto de diferentes critérios de concessão de outorga na máxima vazão outorgável.

- No estudo de caso realizado para a bacia do rio Paracatu, evidenciaram-se, em algumas seções analisadas, diferenças expressivas nas vazões estimadas pelos três métodos de regionalização estudados; e a existência, em algumas seções da hidrografia, de vazões outorgadas superiores à máxima permissível no Estado de Minas Gerais.

6. RECOMENDAÇÕES

Uma vez que os objetivos propostos foram plenamente atingidos e que o SINGERH constitui um avanço para a gestão de recursos hídricos, considera-se que o avanço obtido com esse sistema pode ser ampliado com a incorporação de outros procedimentos metodológicos, os quais são apresentados na seqüência:

- Ferramentas que facilitem a aplicação do SINGERH para outras bacias.
- Rotinas que permitam a análise de concessão de outorga para condições que envolvam a regularização de vazões.
- Procedimentos que permitam a consideração da sazonalidade das vazões e, conseqüentemente, possibilitem a estimativa de vazões de referência variáveis ao longo do ano.
- Rotinas que permitam a consideração de outras variáveis fisiográficas e climáticas nos modelos de regionalização de vazões.
- Ferramentas que permitam realizar, de forma automática, o cálculo e a atualização das vazões mínimas e média a partir da série histórica.
- Ampliação da base de dados do SINGERH no que se refere às vazões naturais, permitindo a obtenção da disponibilidade hídrica natural ao longo da rede hidrográfica da bacia.
- Rotinas que permitam a consideração da qualidade da água como fator para a avaliação e decisão da concessão de outorga.

7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALMANAQUE Vale do São Francisco 2001. Brasília, DF: CODEVASF, 2001. 411 p.

ANA – AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS. Projeto de gerenciamento integrado das atividades desenvolvidas em terra na bacia do rio São Francisco: Programa de ações estratégicas para o gerenciamento integrado da bacia do rio São Francisco e da sua zona costeira – PAE: GEF São Francisco. In: ORGANIZAÇÃO DOS ESTADOS AMERICANOS et al. **Relatório final**. Brasília: TODA Desenho & Arte Ltda., 2004a. 336 p.

ANA – AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS. **Plano de recursos hídricos da bacia hidrográfica do rio São Francisco**. Brasília, 2004b. 318 p.

ANA – AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS. Plano decenal de recursos hídricos da bacia hidrográfica do rio São Francisco. In: ORGANIZAÇÃO DOS ESTADOS AMERICANOS et al. **Estudo Técnico de Apoio ao PBHSF – Nº 16. Alocação de Água**. Brasília, 2004c. 44 p.

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: <http://www.ana.gov.br/pnrh_novo/Tela_Apresentacao.htm>. Acesso em: 02 fev. 2006.

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.

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

BRASIL – Governo Federal. MINAS GERAIS; Governo do Estado. DISTRITO FEDERAL. **Plano diretor de recursos hídricos da bacia do rio Paracatu – PLANPAR**. [S. I.]: 1996. v. 1, T. 1. (CD-ROM).

CASTRO JUNIOR, R. M. de; TEMOTEO, J. P. da S.; BORTOLOTTI, F. D.; CARNEIRO, E. F.; ALVES, M. H. Sistema de informações hidrológicas do rio Itapemirim em Arcview. In: **VII Conferência Latino Americana de Usuários de ESRI/ERDAS**. San José, 2000. CD-ROM – Ponências y Programa, 2000.

CATALUNHA, M. J. **Sistema integrado em rede para gestão do uso múltiplo da água e regionalização da $Q_{7,10}$ para os períodos mensal, bimestral, trimestral e anual**. Viçosa, MG: UFV, 2004. 165 f. Tese (Doutorado em Engenharia Agrícola) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa.

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 geográficas. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, Porto Alegre, v. 7, n. 3, p. 43-51, 2002.

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.

CIRILO, J. A.; BALTAR, A. M.; ROLIM JÚNIOR, A. L.; TORRES FILHO, C. O.; AZEVEDO, J. R. G. Processamento integrado de dados para análise hidrológica. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, Belo Horizonte, v. 2, n. 1, p. 15-28, 1997.

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. Otimização e simulação comparativa de cenários de outorga. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, Porto Alegre, v. 10, n. 3, p. 75-91, 2005.

DINO, K. J. Projeto marca d'água: relatórios preliminares 2001. **A bacia do rio Paracatu, Minas Gerais – 2001**. Brasília: Finatec, 2002. v. 1. 46 p.

DINO, K. J. **Cultura política local como dimensão da sustentabilidade na gestão de recursos hídricos: o caso do comitê da sub-bacia hidrográfica mineira do rio Paracatu**. Brasília, DF: UnB, 2003. 135 f. Dissertação (Mestrado em Desenvolvimento Sustentável) – Universidade de Brasília, Brasília.

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

ELETROBRAS. Centrais Elétricas Brasileiras S.A. **Manual de minicentrais hidrelétricas**. Rio de Janeiro, 1985b.

ESRI – Environmental Systems Research Institute. **ArcGis, versão 8.3**: Html help control. Redlands, Califórnia: ESRI, 2002.

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).

EUCLYDES, H. P.; FERREIRA, P. A.; FARIA FILHO, R. F. R. **Atlas digital das águas de Minas**. Viçosa, MG: UFV, RURALMINAS, IGAM, 2005. 78 p.

FERRAZ, A. R. G.; BRAGA JÚNIOR, B. P. F. Modelo decisório para outorga de direito ao uso da água no estado de São Paulo. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, Belo Horizonte, v. 3, n. 1, p. 5-19, 1998.

FERREIRA, P. A. **Sistema de apoio a gestão de recursos hídricos** – SIAGER. Viçosa, MG: Imprensa Universitária, 1999. 30 p. (Manual do programa).

FISTAROL, O.; FRANK, B.; REFOSCO, J. C. Sistema de Informações de Recursos Hídricos da Bacia do Itajaí. In: **COBRAC 2004 Congresso Brasileiro de Cadastro Técnico Multifinalitário**. Florianópolis: UFSC, 2004. CD-Rom.

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.

GARBRECHT, J.; MARTZ, L. W. Digital elevation model issues in water resources modeling. In: GARBRECHT J.; MARTZ, L. W. **Annual ESRI users conference**. Network and subwatershed parameters extracted from digital elevation models: the bills creek experience. 1999. 29: p. 909-916. (Water Resouces Bulletin).

HOSKING, J. R. M.; WALLIS, J. R. **Regional frequency analysis**: an approach based on L-Moments. Cambridge, Reino Unido: Cambridge University Press, 1997. 224 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.

NASCIMENTO, M. C. do.; SOARES, V. P.; RIBEIRO, C. A. A. S.; SILVA, E. Delimitação automática de áreas de preservação permanente (APP) e identificação de conflito de uso da terra na bacia hidrográfica do rio Alegre. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 12., 2005, Goiânia, Brasil, 16-21 abril 2005. **Anais...** São José dos Campos, SP: INPE, 2005. p. 2289-2296.

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.

PEREIRA, S. B. **Evaporação no lago de sobradinho e disponibilidade hídrica no rio São Francisco**. Viçosa, MG: UFV, 2004. 105 f. Tese (Doutorado em Engenharia Agrícola) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa.

PIRES, J. M.; NASCIMENTO, M. C. do.; SANTANA, R. M.; RIBEIRO, C. A. A. S. Análise da exatidão de diferentes métodos de interpolação para geração de modelos digitais de elevação e obtenção de características morfométricas em bacias hidrográficas. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, Porto Alegre, v. 10, n. 2, p. 39-47, 2005.

RAMOS, M. M.; PRUSKI, F. F. Subprojeto 4.3 – quantificação e análise da eficiência do uso da água pelo setor agrícola na bacia do São Francisco. In: PROJETO GERENCIAMENTO INTEGRADO DAS ATIVIDADES DESENVOLVIDAS EM TERRA NA BACIA DO SÃO FRANCISCO. ANA/GEF/PNUMA/OEA. **Relatório Final**, Viçosa, MG, 2003. 190 p.

RIBEIRO, C. A. A. S. **Tópicos avançados de sistema de informações geográficas**. Viçosa, MG: UFV, 2003. 22 p. (Apostila).

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.

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.

SIGRH – Sistema integrado de gerenciamento de recursos hídricos de São Paulo – **Manual do usuário**. São Paulo, SP: Departamento de Águas e Energia Elétrica (DAEE), Fundo Estadual de Recursos Hídricos (FEHIDRO) e Secretaria de Energia, Recursos Hídricos e Saneamento, 2004. 47 p.

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.

SILVA, D. D.; RAMOS, M. M. **Planejamento e gestão integrados de recursos hídricos**. Brasília, DF: MMA/SRH/ABEAS/UFV, 2001. 89 p.

SILVEIRA, G. L.; TUCCI, C. E. M.; SILVEIRA, A. L. L. Quantificação de vazão em pequenas bacias sem dados. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, Belo Horizonte, v. 3, n. 3, p. 111-131, 1998.

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

TUCCI, C. E. M. **Regionalização de vazões**. Porto Alegre: Ed. Universidade: UFRGS, 2002. 256 p.

TUCCI, C. E. M.; CLARKE, R. T.; SILVA DIAS, P. L.; COLLISCHONN, W. **Previsão de médio prazo da afluência de reservatórios com base na previsão climática**. Porto Alegre, RS: Instituto de Pesquisa e Hidráulica – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2002. (Projeto: BRA/00/29 Relatório Final).

UNESCO – United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization. **Water for people, water for life: UN world water development report (WWDR)**. Paris: UNESCO Publishing, 2003.

VIEGAS FILHO, J. S.; LANNA, A. E. L. O paradigma da modelagem orientada a objetos aplicada a sistemas de recursos hídricos (II) Modelo de objetos aplicado ao planejamento de uso da água Propagar MOO. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, Porto Alegre, v. 8, n. 3, p. 91-103, 2003.

APÊNDICES

APÊNDICE A

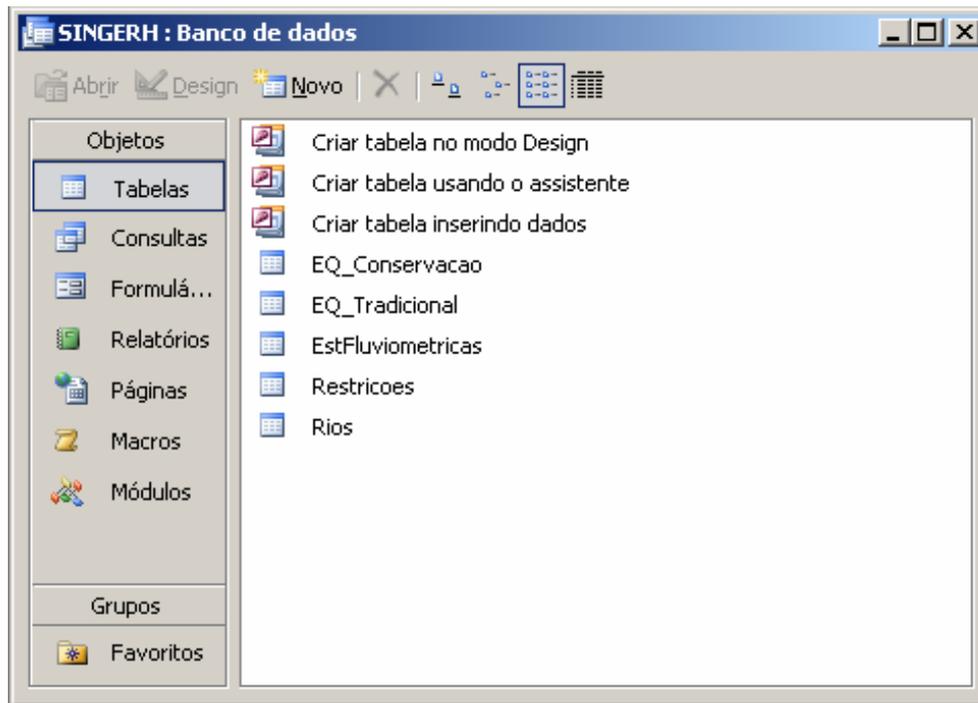


Figura 1A – Estrutura do banco de dados do SINGERH no formato compatível com o Microsoft Access.

The screenshot shows the "Contents" pane in ArcGIS. It has tabs for "Contents", "Preview", and "Metadata". The table below lists the data layers and their types:

Name	Type
Matrizes	Folder
AdRegioes.shp	Shapefile
estados_ucor.shp	Shapefile
fluviometricas_ucor.shp	Shapefile
hidro_mapeada	Raster Dataset
hidro_sem_esp.shp	Shapefile
hidrografia_ucor.shp	Shapefile
Limite.shp	Shapefile
mde_m_int	Raster Dataset
municipios_ucor.shp	Shapefile
OutAna.shp	Shapefile
OutSubInsignificante.shp	Shapefile
OutSubSignificante.shp	Shapefile
OutSuperInsignificante.shp	Shapefile
OutSuperSignificante.shp	Shapefile
pluviometricas_ucor.shp	Shapefile
Ponto.shp	Shapefile
RegMetTradicional.shp	Shapefile
Rios_ProcNovaes.shp	Shapefile
rodovias_ucor.shp	Shapefile
sede_municipios_ucor.shp	Shapefile

Figura 2A – Arquivos no formato *shape* e *raster* do SINGERH.

APÊNDICE B

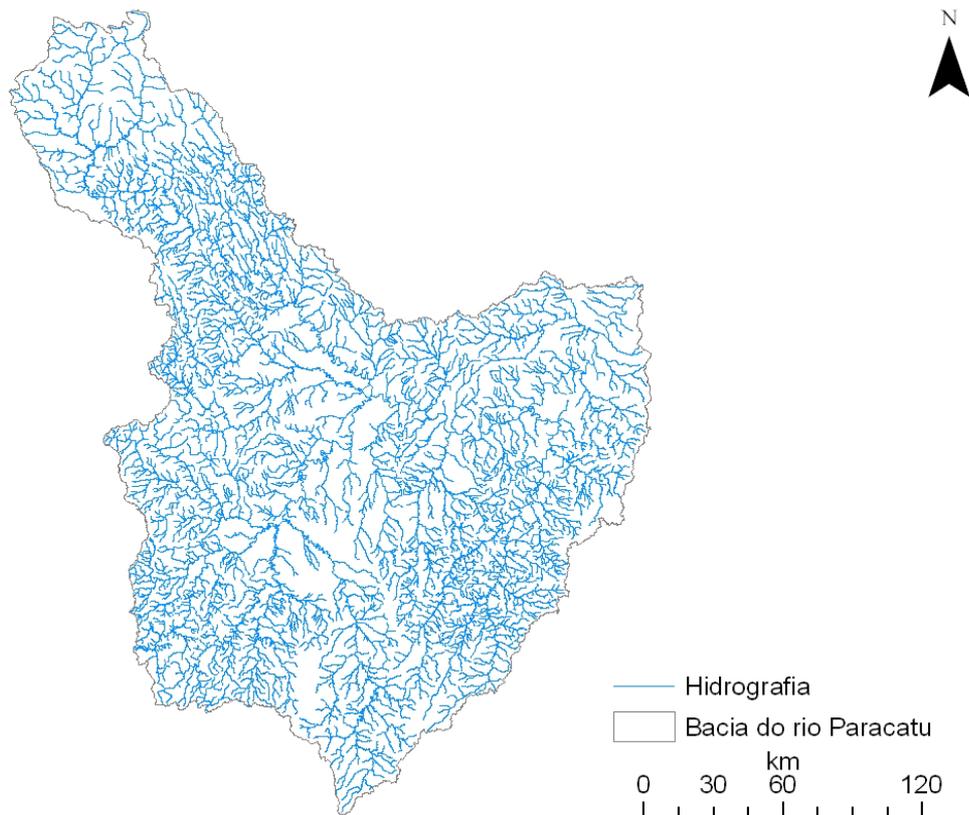


Figura 1B – Hidrografia da bacia do rio Paracatu digitalizada na escala de 1:250.000.

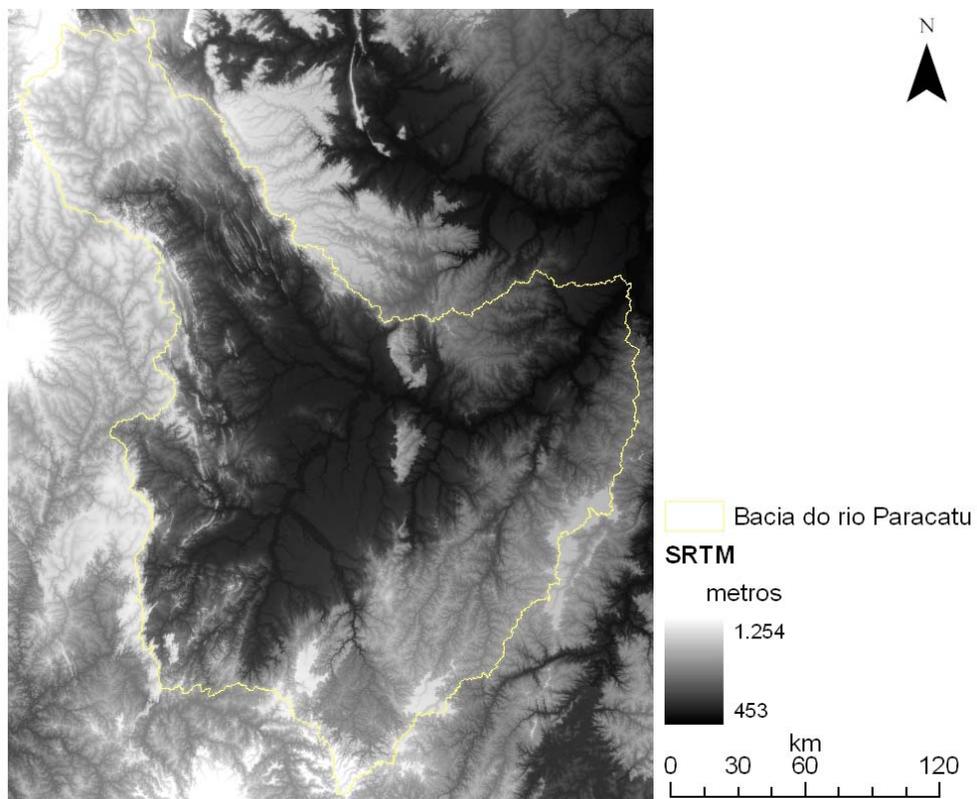


Figura 2B – Dados altimétricos da região da bacia do rio Paracatu obtidos do projeto SRTM.

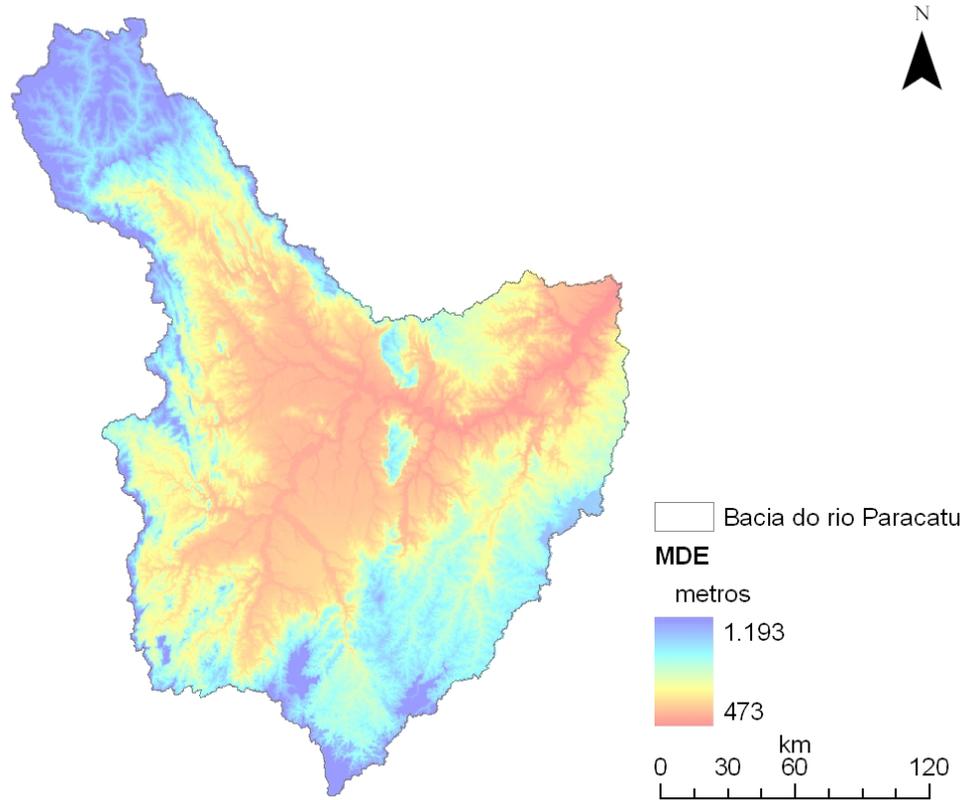


Figura 3B – Modelo digital de elevação da bacia do rio Paracatu.

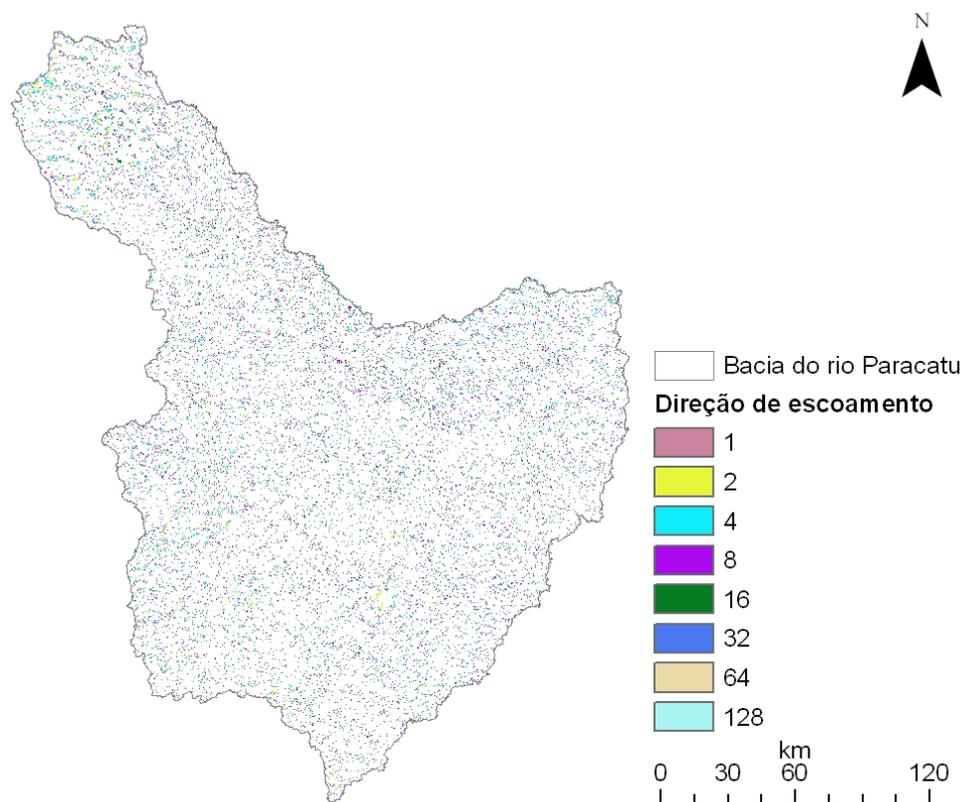


Figura 4B – Grid direção de escoamento da bacia do rio Paracatu.

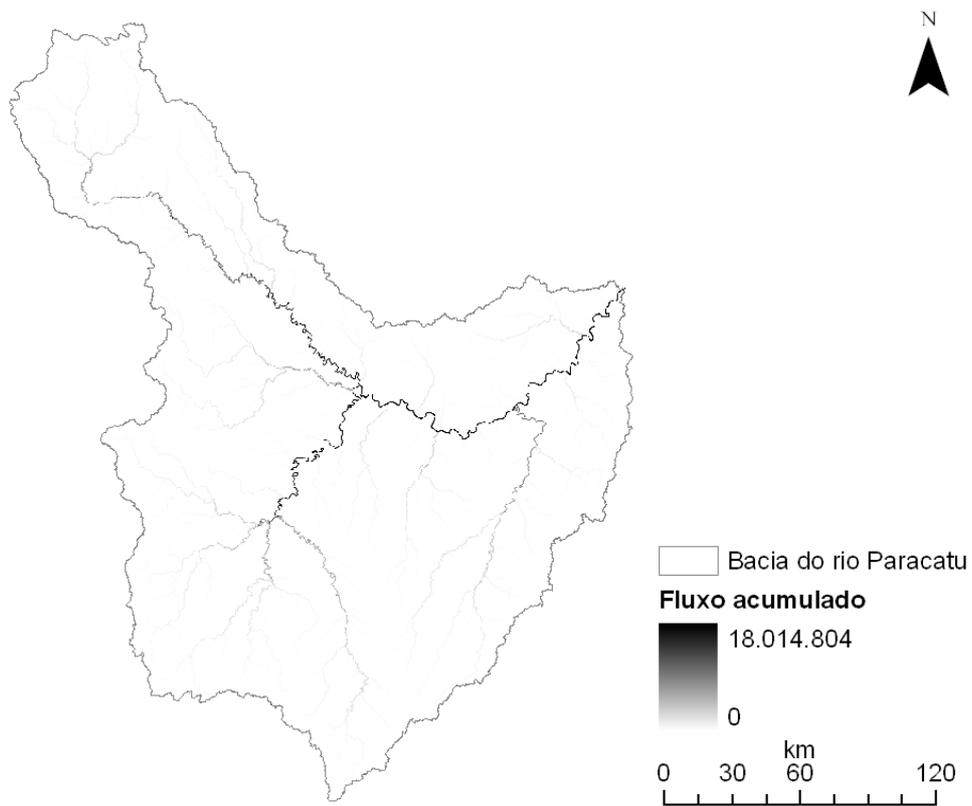


Figura 5B – *Grid* fluxo acumulado da bacia do rio Paracatu.

APÊNDICE C

Tabela 1C – $Q_{7,10}$, Q_{90} , Q_{95} e Q_{mld} , em $m^3 s^{-1}$, das 21 estações fluviométricas utilizadas no estudo

Código	Estação	$Q_{7,10}$	Q_{90}	Q_{95}	Q_{mld}
42250000	Fazenda Limoeiro	1,17	2,23	1,77	8,01
42251000	Fazenda Córrego do Ouro	3,08	7,49	5,97	29,87
42255000	Fazenda Nolasco	0,45	0,79	0,68	3,25
42257000	Barra do Escurinho	3,46	7,13	5,58	26,97
42290000	Ponte da BR-040 (Paracatu)	9,55	20,10	15,91	89,94
42395000	Santa Rosa	21,56	39,47	32,33	161,95
42435000	Fazenda Barra da Égua	1,24	2,76	1,75	17,45
42440000	Fazenda Poções	0,97	1,90	1,51	9,56
42460000	Fazenda Limeira	13,0	22,8	19,0	63,9
42490000	Unai	11,15	21,34	17,02	73,73
42540000	Santo Antônio do Boqueirão	12,69	24,38	19,24	86,95
42545500	Fazenda o Resfriado	0,97	1,99	1,48	9,22
42546000	Fazenda Santa Cruz	1,27	1,86	1,40	7,53
42600000	Porto dos Poções	16,41	30,22	24,50	114,22
42690001	Porto da Extrema	40,42	80,03	62,90	331,55
42750000	Caatinga	41,74	84,30	67,31	356,58
42840000	Veredas	0,81	1,41	1,13	3,39
42850000	Cachoeira das Almas	3,02	9,76	7,08	63,48
42860000	Cachoeira do Paredão	5,04	9,97	8,09	58,20
42930000	Porto do Cavalo	60,40	118,44	95,65	466,85
42980000	Porto Alegre	61,76	111,91	89,10	475,02

APÊNDICE D

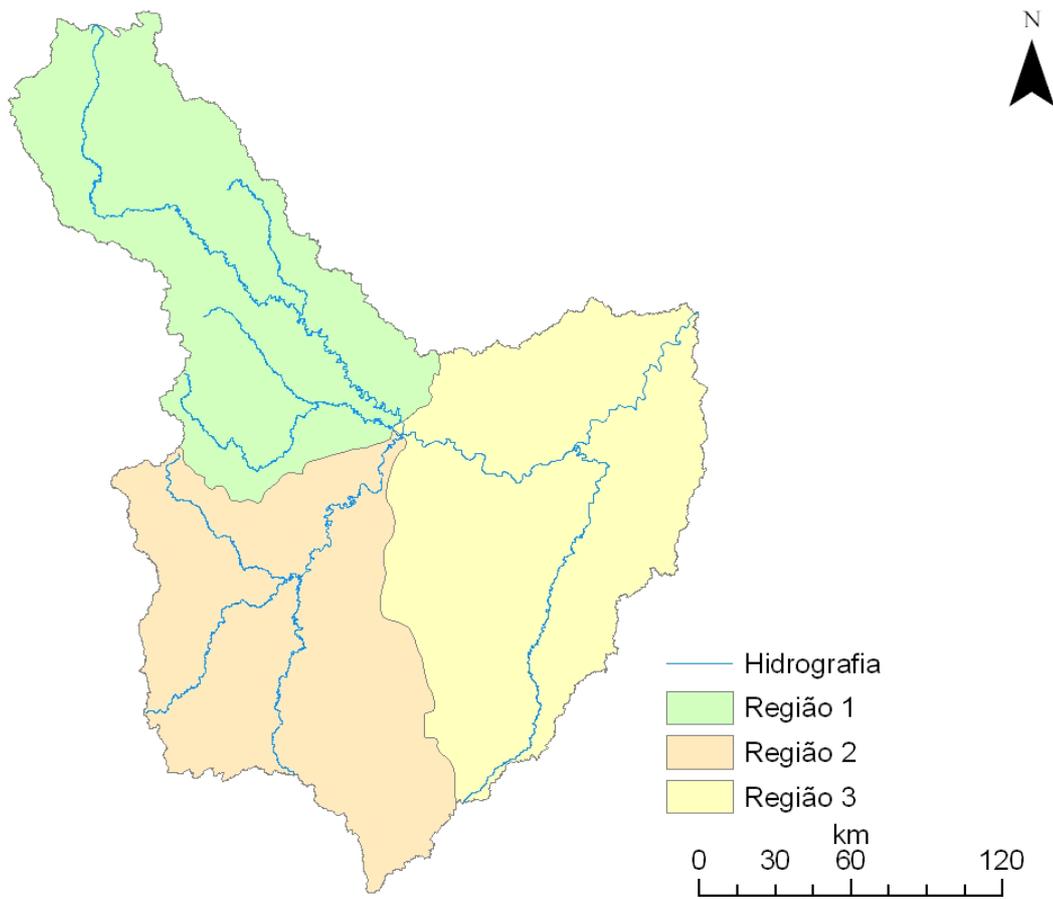


Figura 1D – Regiões hidrologicamente homogêneas da bacia do rio Paracatu.

Tabela 1D – Equações de regressão para a representação da $Q_{7,10}$, Q_{90} , Q_{95} e Q_{mld} nas três regiões homogêneas da bacia do rio Paracatu, ajustadas para aplicação do método tradicional

Vazão	Variável associada ao parâmetro		R^2	R^2_a	σF	F(%)	%dr _{máx}	Modelo ajustado	Parâmetros ajustados	
	β_0	β_1							β_0	β_1
Região I										
$Q_{7,10}$	Intercepto	Área	0,98479	0,980988	1,211384	0,008719	-28,50	Potencial	0,00158	1,023069
Q_{90}	Intercepto	Área	0,993739	0,992174	1,132597	0,001473	-16,35	Potencial	0,002574	1,040065
Q_{95}	Intercepto	Área	0,993704	0,99213	1,135893	0,001490	-15,39	Potencial	0,001704	1,061358
Q_{mld}	Intercepto	Área	0,987226	0,984671	1,159115	0,000629	-24,83	Potencial	0,018343	0,959935
Região II										
$Q_{7,10}$	Intercepto	Área	0,984875	0,981093	1,211290	0,008623	-22,66	Potencial	0,003597	0,903299
Q_{90}	Intercepto	Área	0,984525	0,980656	1,218816	0,009027	-26,77	Potencial	0,006273	0,921734
Q_{95}	Intercepto	Área	0,986447	0,983059	1,199393	0,006920	-21,86	Potencial	0,00576	0,905838
Q_{mld}	Intercepto	Área	0,992384	0,99048	1,152296	0,002180	-17,58	Potencial	0,021107	0,945006
Região III										
$Q_{7,10}$	Intercepto	Área	0,998319	0,997898	1,063333	0,000106	8,787	Potencial	0,000057	1,306113
Q_{90}	Intercepto	Área	0,993941	0,992427	1,109077	0,001379	-16,23	Potencial	0,000523	1,157379
Q_{95}	Intercepto	Área	0,997268	0,996585	1,073375	0,000280	-9,823	Potencial	0,000327	1,180754
Q_{mld}	Intercepto	Área	0,996841	0,996209	1,117668	0,000019	-22,77	Potencial	0,021714	0,936452

APÊNDICE E

Tabela 1E – Equações de regionalização para a representação da $Q_{7,10}$, Q_{90} , Q_{95} e Q_{mld} na bacia do rio Paracatu, ajustadas para aplicação do método baseado na conservação de massas/continuidade de vazões

Curso d'água	Variável associada ao parâmetro		R^2	Modelo ajustado	Parâmetros ajustados	
	β_0	β_1			β_0	β_1
Rio Paracatu						
$Q_{7,10}$	Intercepto	Área	0,9771	Potencial	0,0011	1,0289
Q_{90}	Intercepto	Área	0,991	Potencial	0,0028	0,9989
Q_{95}	Intercepto	Área	0,9867	Potencial	0,0023	0,9968
Q_{mld}	Intercepto	Área	0,9964	Potencial	0,0169	0,9625
Trecho do rio do Sono e rio Santo Antônio						
$Q_{7,10}$	Intercepto	Área	0,6592	Potencial	0,0131	0,753
Q_{90}	Intercepto	Área	0,9135	Potencial	0,0249	0,7469
Q_{95}	Intercepto	Área	0,8958	Potencial	0,0198	0,7478
Q_{mld}	Intercepto	Área	0,9897	Potencial	0,0303	0,8829
Rio Preto						
$Q_{7,10}$	Intercepto	Área	0,8844	Potencial	0,234	0,4547
Q_{90}	Intercepto	Área	0,8328	Potencial	0,9033	0,3738
Q_{95}	Intercepto	Área	0,8352	Potencial	0,6252	0,3898
Q_{mld}	Intercepto	Área	0,9471	Potencial	0,4085	0,6105
Ribeirões Entre Ribeiros, Barra da Égua, do Carmo e do Franco						
$Q_{7,10}$	Intercepto	Área	0,8902	Potencial	0,0001	1,3275
Q_{90}	Intercepto	Área	0,9869	Potencial	0,0001	1,4019
Q_{95}	Intercepto	Área	0,8924	Potencial	0,0001	1,3753
Q_{mld}	Intercepto	Área	0,9999	Potencial	0,0084	1,036

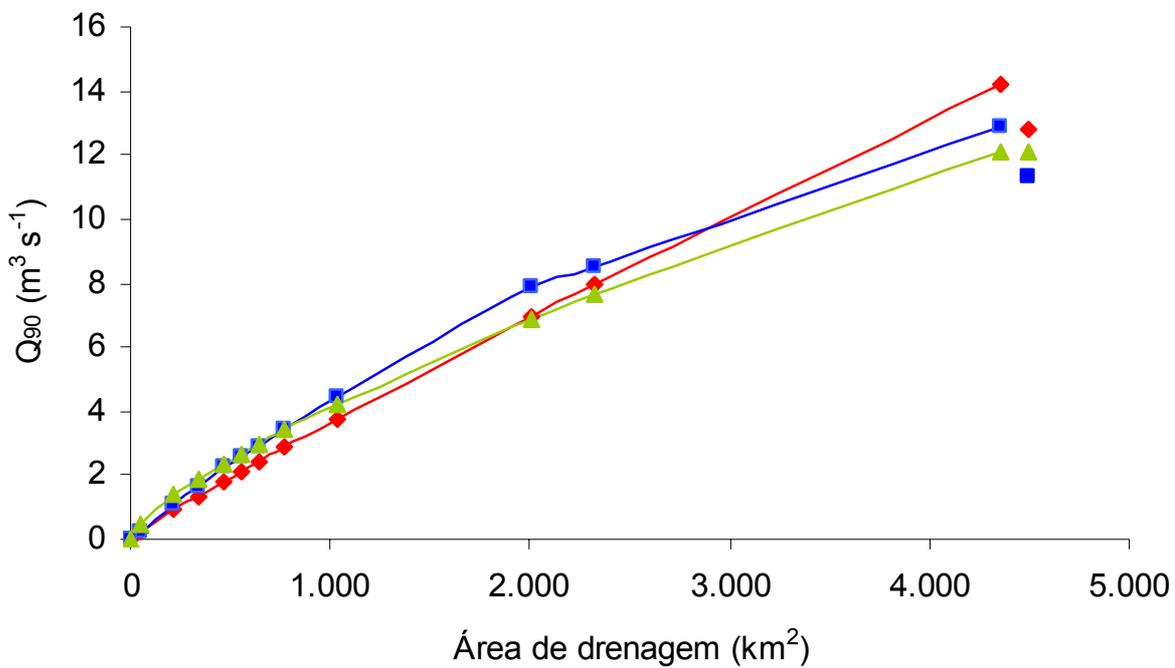
continua...

Tabela 1E – Cont.

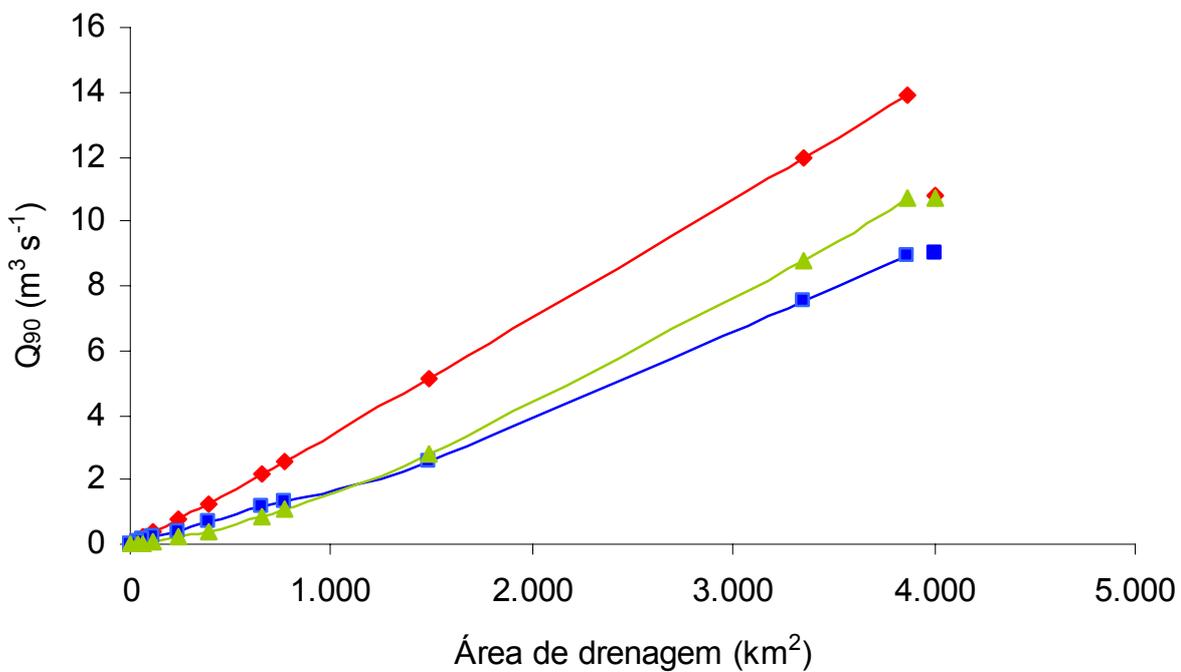
Curso d'água	Variável associada ao parâmetro		R ²	Modelo ajustado	Parâmetros ajustados	
	β_0	β_1			β_0	β_1
Rio Escuro e rio Claro						
Q _{7,10}	Intercepto	Área	0,9972	Potencial	0,0106	0,7625
Q ₉₀	Intercepto	Área	0,9826	Potencial	0,0268	0,7293
Q ₉₅	Intercepto	Área	0,9837	Potencial	0,0202	0,7371
Q _{mld}	Intercepto	Área	0,9853	Potencial	0,0609	0,804
Ribeirão Cana-Brava						
Q _{7,10}	Intercepto	Área	0,6125	Exponencial	0,0058	0,0041
Q ₉₀	Intercepto	Área	0,6198	Exponencial	0,0063	0,0044
Q ₉₅	Intercepto	Área	0,6321	Exponencial	0,0058	0,0043
Q _{mld}	Intercepto	Área	0,9993	Potencial	1,0475	0,3136
Ribeirão São Pedro						
Q _{7,10}	Intercepto	Área	0,9999	Potencial	0,0022	0,9651
Q ₉₀	Intercepto	Área	0,9999	Potencial	0,0053	0,9322
Q ₉₅	Intercepto	Área	0,9999	Potencial	0,0041	0,9364
Q _{mld}	Intercepto	Área	0,9999	Potencial	0,1901	0,6209
Trecho do ribeirão do Escurinho e Ribeirão Santa Isabel						
Q _{7,10}	Intercepto	Área	0,9958	Exponencial	0,0011	0,0038
Q ₉₀	Intercepto	Área	0,9942	Exponencial	0,0011	0,0041
Q ₉₅	Intercepto	Área	0,9947	Exponencial	0,0011	0,004
Q _{mld}	Intercepto	Área	0,9981	Exponencial	0,0011	0,0049

APÊNDICE F

(a)



(b)



continua...

Figura 1F – Cont.

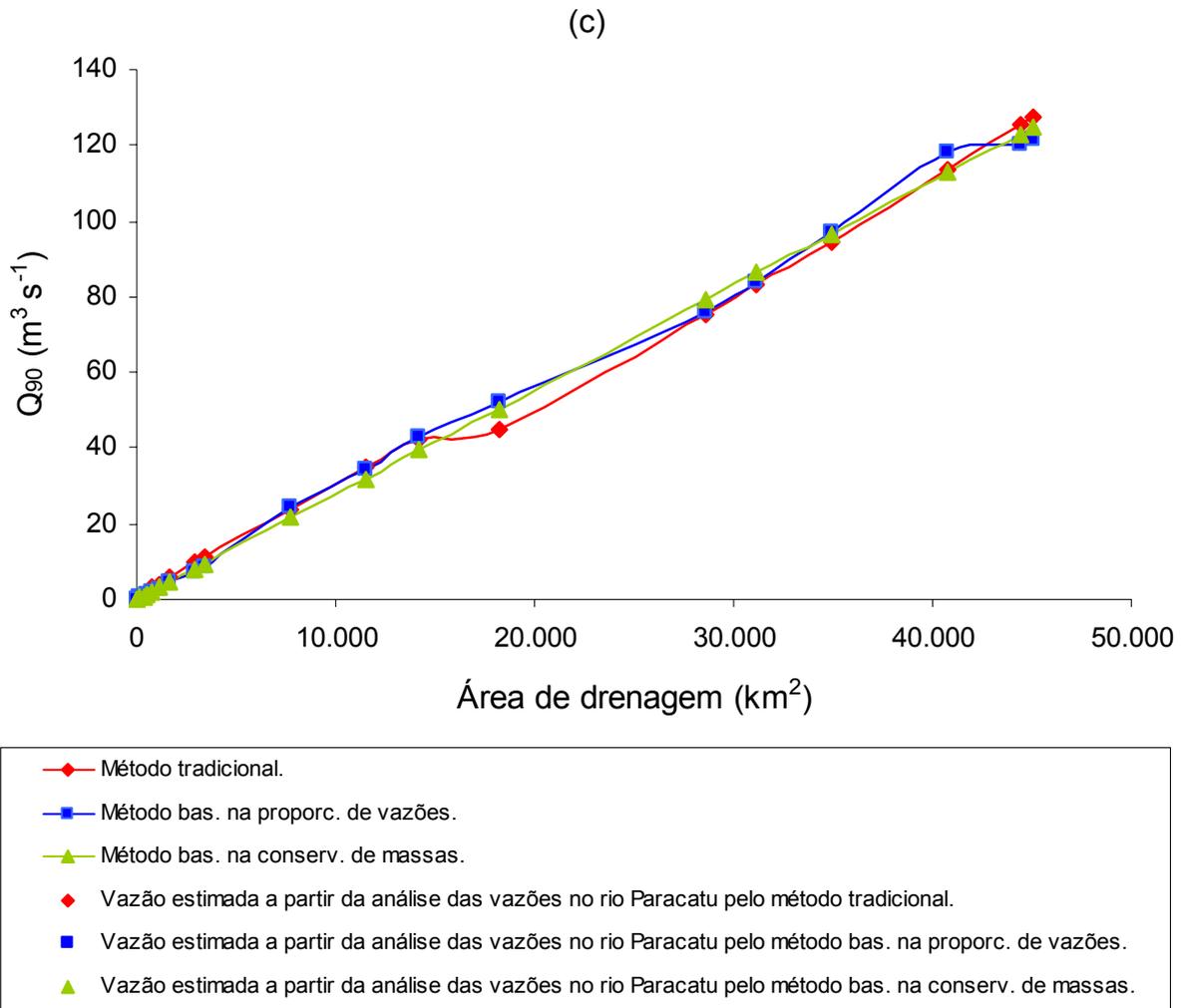
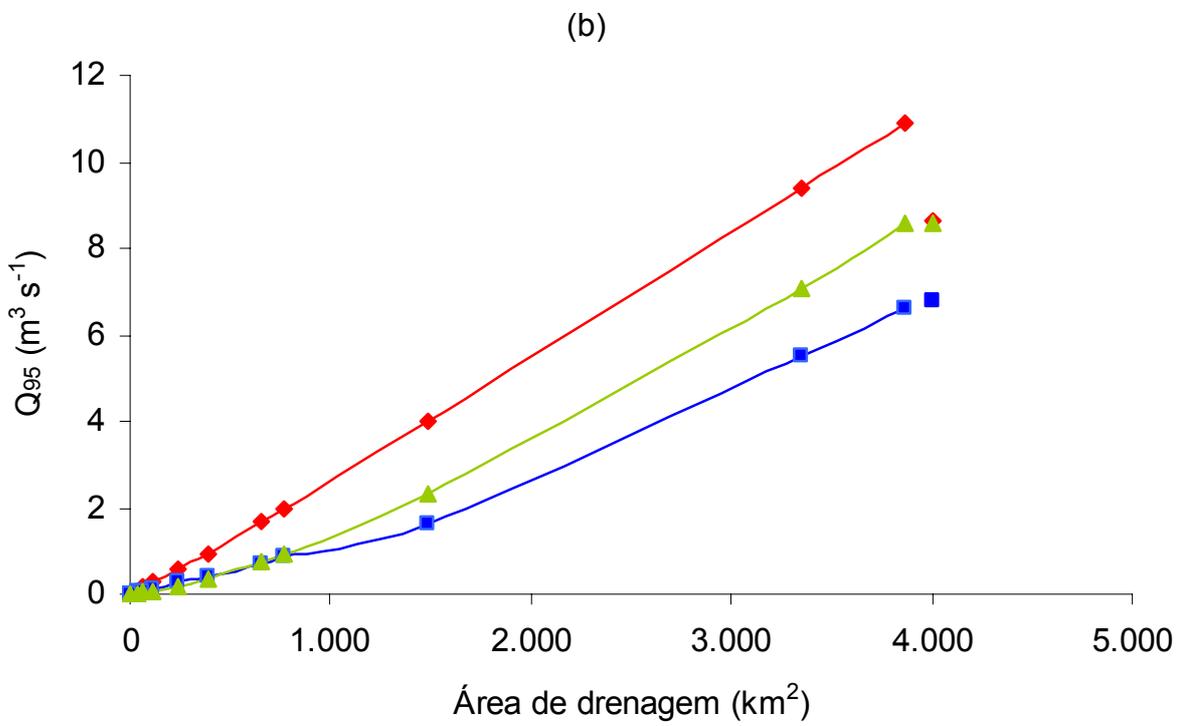
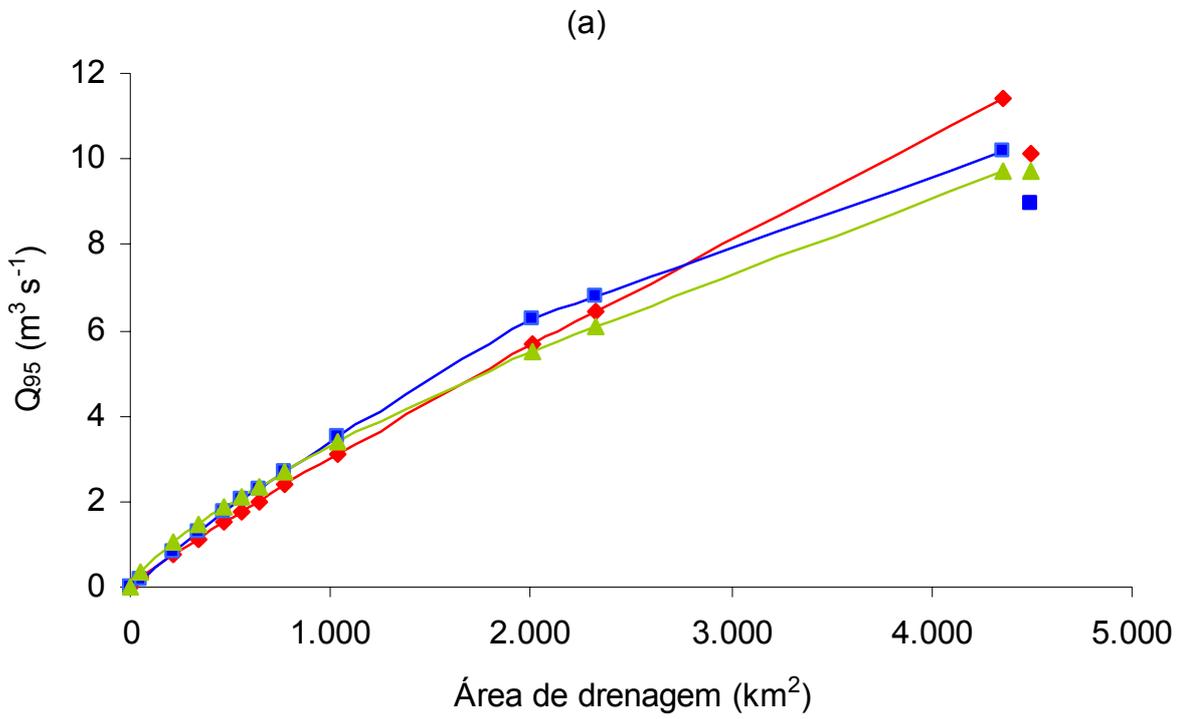


Figura 1F – Q_{90} , em $\text{m}^3 \text{s}^{-1}$, estimada pelos três métodos de regionalização de vazões implementados no SINGERH para diferentes seções: (a) rio Escuro; (b) ribeirão Entre Ribeiros e (c) rio Paracatu.



continua...

Figura 2F – Cont.

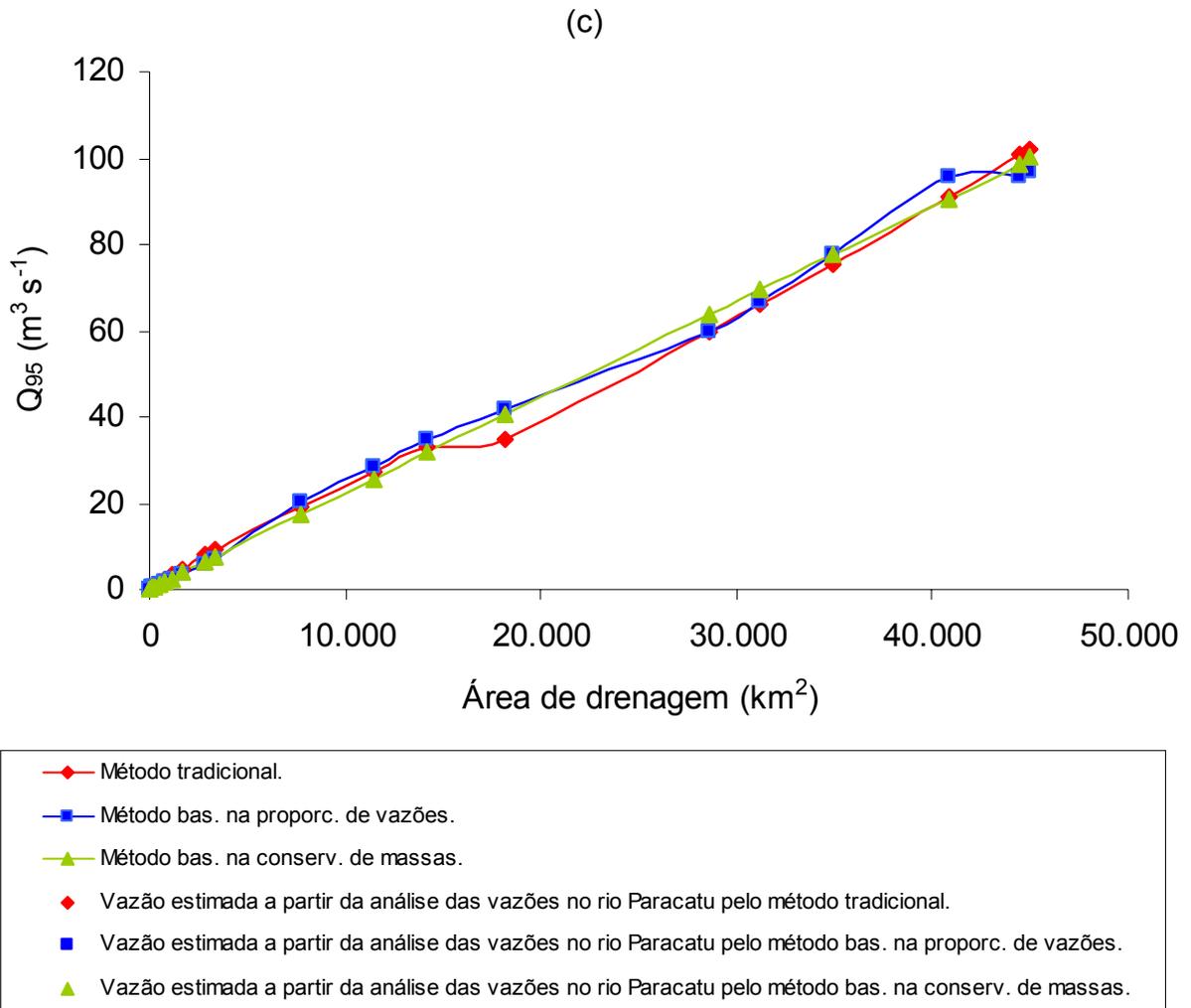
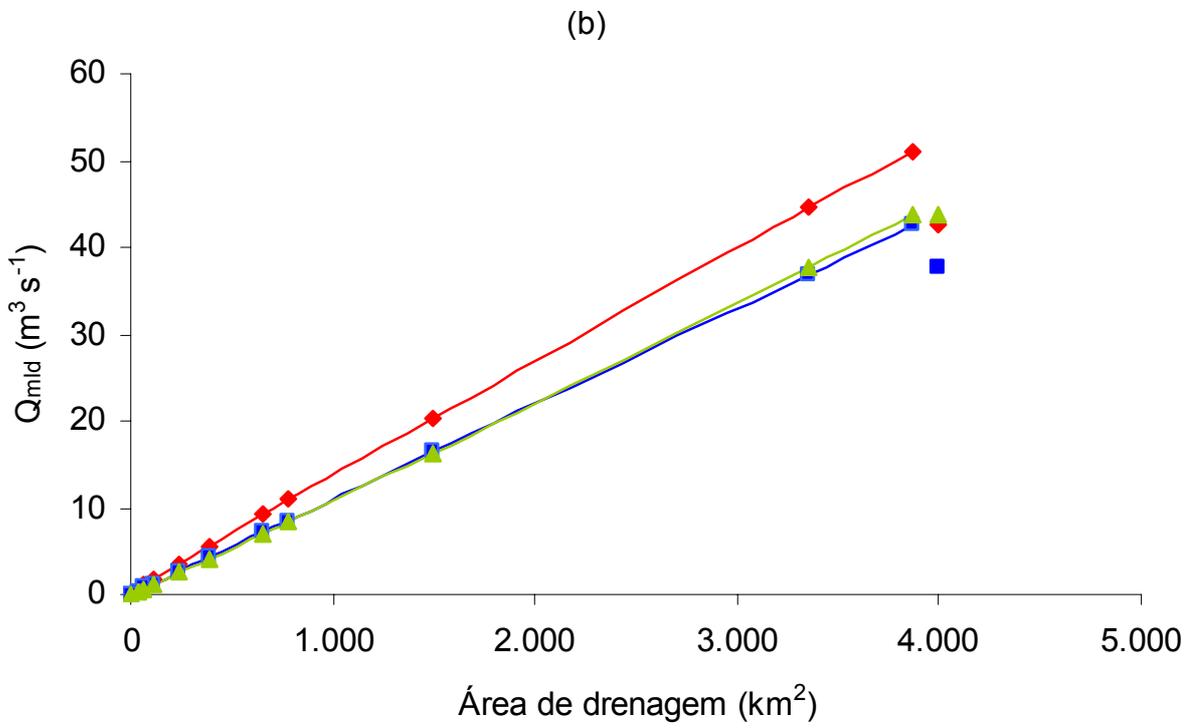
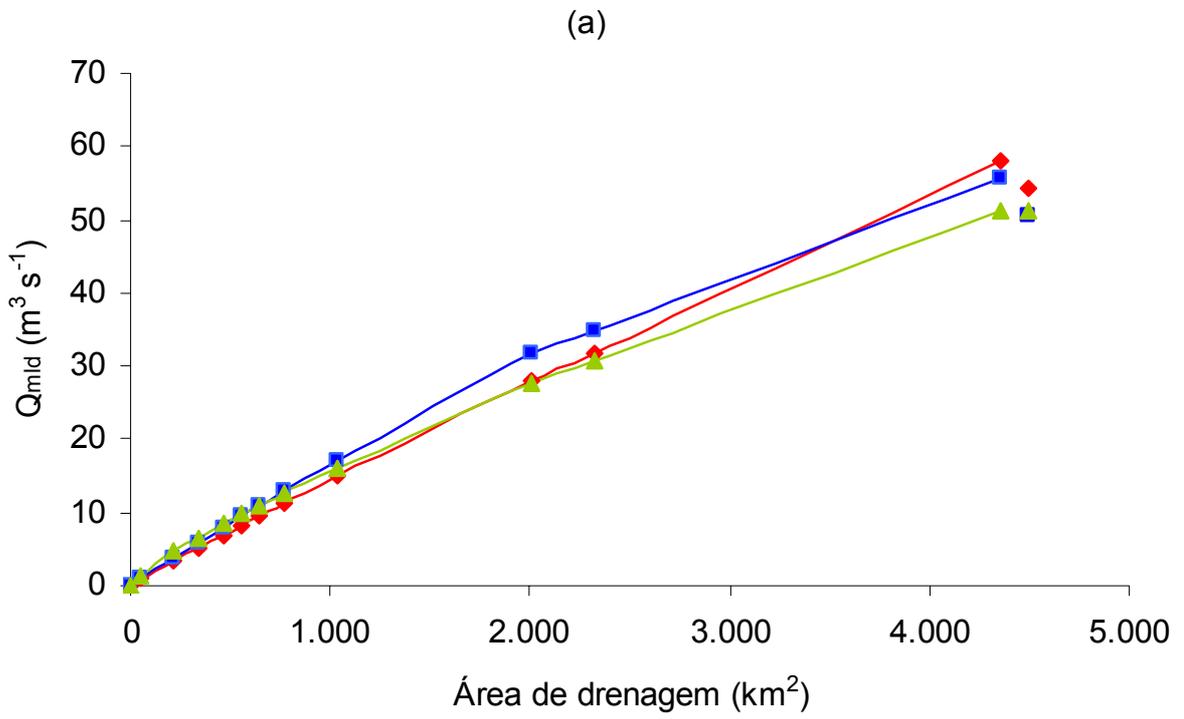


Figura 2F – Q_{95} , em $m^3 s^{-1}$, estimada pelos três métodos de regionalização de vazões implementados no SINGERH para diferentes seções: (a) rio Escuro; (b) ribeirão Entre Ribeiros e (c) rio Paracatu.



continua...

Figura 3F – Cont.

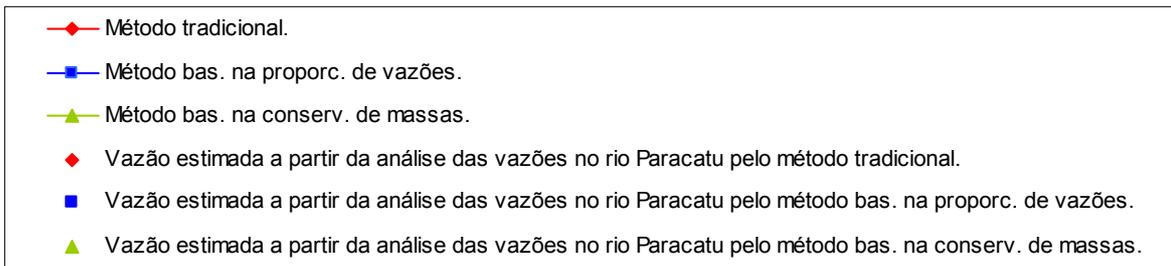
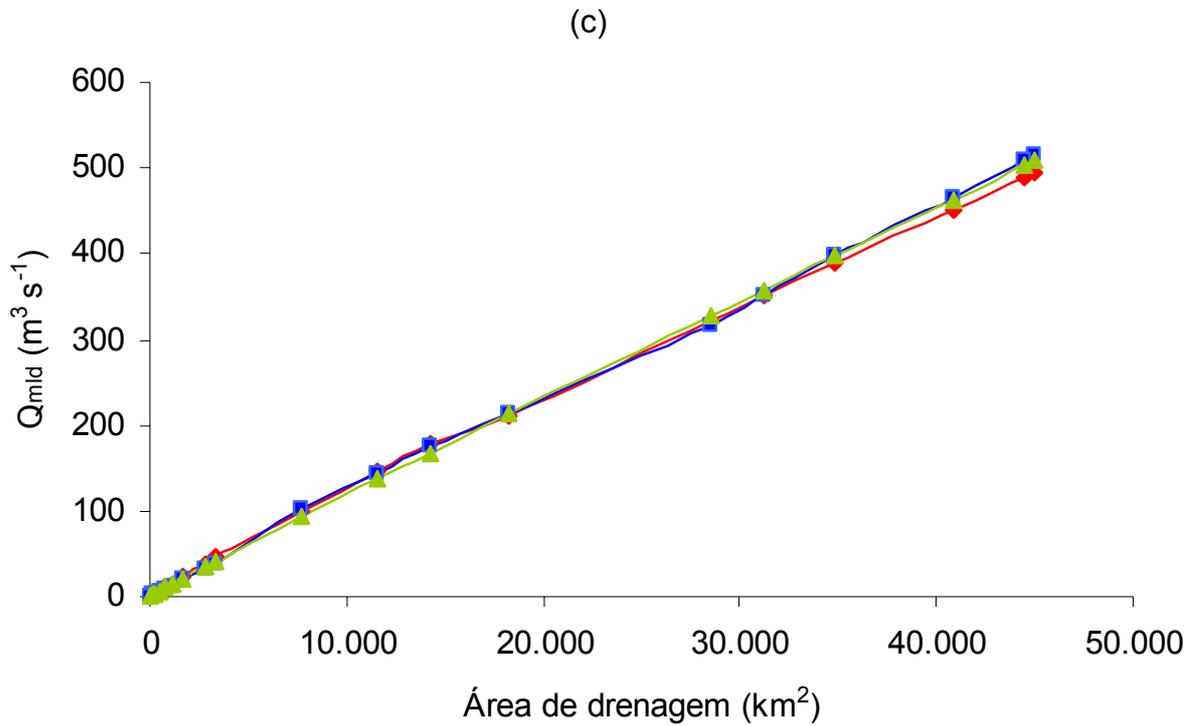


Figura 3F – Q_{mid} , em $m^3 s^{-1}$, estimada pelos três métodos de regionalização de vazões implementados no SINGERH para diferentes seções: (a) rio Escuro; (b) ribeirão Entre Ribeiros e (c) rio Paracatu.