

ALINE DE ARAÚJO NUNES

**RESERVATÓRIOS DE ACUMULAÇÃO DE ÁGUA: NOVAS PROPOSTAS  
PARA O DIMENSIONAMENTO E REPRESENTAÇÃO DOS SEUS EFEITOS**

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  
2013

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

T

N972r  
2013

Nunes, Aline de Araújo, 1987-

Reservatórios de acumulação de água: novas propostas para o dimensionamento e representação dos seus efeitos / Aline de Araújo Nunes. – Viçosa, MG, 2013.  
x, 60f. : il. (algumas color.) ; 29cm.

Inclui apêndices.

Orientador: Fernando Falco Pruski

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Viçosa.

Inclui bibliografia.

1. Recursos hídricos. 2. Bacias hidrográficas. 3. Água - Armazenamento. 4. Reservatórios. I. Universidade Federal de Viçosa. Departamento de Engenharia Agrícola. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola. II. Título.

CDD 22. ed. 551.483

ALINE DE ARAÚJO NUNES


RESERVATÓRIOS DE ACUMULAÇÃO DE ÁGUA: NOVAS PROPOSTAS PARA  
O DIMENSIONAMENTO E REPRESENTAÇÃO DOS SEUS EFEITOS


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: 28 de fevereiro de 2013

  
Roberto Avelino Cecílio

  
Mauro Aparecido Martinez

  
Sílvio Bueno Pereira

  
Fernando Falco Pruski  
(Orientador)

*"O único lugar onde o sucesso vem  
antes do trabalho é no dicionário."*

*Albert Einstein*

## **AGRADECIMENTOS**

A Deus, por me amparar nos momentos difíceis, por me dar força para superar as dificuldades e sempre mostrar o caminho nas horas incertas.

Ao Professor Fernando Falco Pruski, pelos ensinamentos, incentivo e amizade e, acima de tudo, pela excelente orientação desde a época da graduação.

Aos meus pais, Edson e Magali, pelo apoio nessa importante etapa da minha “eterna busca”. Meus amores, meus exemplos, minha vida!

À minha irmã Isabela, pelo amor, amizade e eterno companheirismo.

Ao meu noivo Guilherme Tiganá por todo amor, carinho e confiança dedicados ao longo dessa jornada.

Às minhas “pupilas” Andressa e Júlia pela grande ajuda na realização deste trabalho.

Aos amigos do Grupo de Pesquisa em Recursos Hídricos (GPRH), pelo convívio, pela amizade e por todos os momentos vividos.

Aos amigos de Viçosa, Cataguases e desse “mundão afora”, pela amizade fraterna e pela convivência maravilhosa.

Aos funcionários do Departamento de Engenharia Agrícola, pelo afeto e pelo suporte.

À Universidade Federal de Viçosa (UFV), por intermédio do Departamento de Engenharia Agrícola, pela oportunidade de realização do Curso.

Ao Conselho Nacional de Pesquisa (CNPq), pelo apoio financeiro.

À todos aqueles que contribuíram, de alguma forma, o meu sincero agradecimento.

## **BIOGRAFIA**

ALINE DE ARAÚJO NUNES, filha de Edson Barbosa Nunes e Magali de Araújo, nasceu em Cataguases / MG em 06 de julho de 1987.

Em janeiro de 2011, concluiu o curso de graduação em Engenharia Agrícola e Ambiental pela Universidade Federal de Viçosa - UFV.

Em março de 2011 iniciou o curso de Mestrado em Engenharia Agrícola na área de Recursos Hídricos e Ambientais, na Universidade Federal de Viçosa - UFV, submetendo-se à defesa de dissertação em fevereiro de 2013.

## CONTEÚDO

RESUMO .....	vii
ABSTRACT .....	ix
1. APRESENTAÇÃO GERAL.....	1
Referências Bibliográficas .....	3
ARTIGO I .....	4
1. INTRODUÇÃO .....	6
2. MATERIAL E MÉTODOS .....	9
2.1. Caracterização da área de estudo .....	9
2.2. Avaliação do impacto das outorgas concedidas na disponibilidade hídrica a fio d'água da bacia do ribeirão Entre Ribeiros .....	10
2.2.1. Demandas de uso da água na bacia do ribeirão Entre Ribeiros .....	10
2.2.2. Vazão de referência para a concessão de outorga na bacia do ribeirão Entre Ribeiros .....	12
2.2.3. Impacto das outorgas concedidas na disponibilidade hídrica a fio d'água da bacia .....	12
2.3. Análise do efeito que a construção de reservatórios apresenta na disponibilidade hídrica.....	14
2.3.1. Impacto dos reservatórios na demanda .....	14
2.3.2. Impacto dos reservatórios na vazão permissível para outorga.....	15
2.4. Avaliação da potencialidade que a regularização de vazões tem para atenuar os conflitos pelo uso da água na bacia do Ribeirão Entre Ribeiros.....	16
3. RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	17
3.1. Avaliação do impacto das outorgas concedidas na disponibilidade hídrica a fio d'água da bacia do ribeirão Entre Ribeiros .....	17
3.2. Análise do efeito que a construção de reservatórios apresenta na disponibilidade hídrica.....	18

3.2.1. Impacto dos reservatórios na demanda .....	19
3.2.2. Impacto dos reservatórios na vazão permissível para outorga.....	21
3.3. Potencialidade que a regularização de vazões tem para atenuar os conflitos pelo uso da água na bacia do Ribeirão Entre Ribeiros .....	24
4. CONCLUSÕES .....	26
5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	26
ARTIGO II.....	32
1. INTRODUÇÃO .....	34
2. MATERIAL E MÉTODOS .....	36
2.1. Método das diferenças acumuladas.....	36
2.2. Modificações no método das diferenças acumuladas .....	37
2.2.1. Geração das séries sintéticas .....	38
2.2.2. Determinação da capacidade do reservatório.....	38
2.2.2.1. Distribuição de Gumbel .....	39
2.2.2.2. Fator de correção para o período de retorno de interesse.....	40
2.2.2.3. Cálculo da capacidade do reservatório para o período de retorno de interesse ..	40
2.3. Estudo de caso.....	41
3. RESULTADOS E DISCUSSÃO .....	42
3.1. Método das diferenças acumuladas modificado: exemplo numérico .....	42
3.1.1. Geração das séries sintéticas .....	43
3.1.2. Determinação da capacidade do reservatório.....	43
3.1.2.1. Distribuição de Gumbel .....	44
3.1.2.2. Fator de correção para o período de retorno de interesse.....	45
3.1.2.3. Cálculo da capacidade do reservatório para o período de retorno de interesse ..	46
3.2. Resultados para as estações estudadas .....	47
4. CONCLUSÕES .....	50
5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	51
APÊNDICES.....	54
APÊNDICE A.....	54
APÊNDICE B .....	60

## RESUMO

NUNES, Aline de Araújo, M.Sc, Universidade Federal de Viçosa, fevereiro de 2013. **Reservatórios de acumulação de água: novas propostas para o dimensionamento e representação dos seus efeitos.** Orientador: Fernando Falco Pruski.

Um dos principais problemas enfrentados na atualidade é a dificuldade em atender à demanda de água requerida pela sociedade, sendo utilizado para esta finalidade o processo de armazenamento de água em reservatórios. A implantação de reservatórios de regularização modifica a distribuição das vazões nos rios, ocorrendo um aumento do valor da vazão mínima disponível, que tende a se aproximar do valor da vazão média de longa duração. O aumento da disponibilidade hídrica, por sua vez, possibilita que as outorgas de direito de uso da água sejam concedidas para um maior número de usuários. Considerando a aleatoriedade da ocorrência das vazões, ou seja, a impossibilidade da previsão de ocorrências a longo prazo, não é possível prevê-se com precisão o tamanho da reserva de água necessária para suprimento das demandas de períodos de seca no futuro. Os gestores de recursos hídricos têm buscado, cada vez mais, o aprimoramento das técnicas de dimensionamento de reservatórios. Na ótica da simplicidade, sem fugir a uma base técnico-científica, o método das diferenças acumuladas é um método expressivamente difundido, mas com limitações referentes à dependência em relação às características da base de dados disponível. Dividiu-se o trabalho em dois artigos científicos, sendo que no Artigo I objetivou-se avaliar o impacto do uso de reservatórios de regularização na disponibilidade hídrica ao longo da hidrografia, sendo, para tanto, feito um estudo de caso para a bacia do ribeirão Entre Ribeiros. Neste artigo foi realizada a avaliação do impacto da construção de reservatórios na disponibilidade hídrica com base no efeito que o armazenamento de água potencializa em relação à substituição das vazões superpostas por vazões distribuídas no tempo e na possibilidade de consideração do critério de outorga para barramentos em substituição ao critério de

outorga a fio d'água. Considerando a substituição das vazões superpostas por vazões distribuídas no tempo o aumento da potencialidade de utilização dos recursos hídricos foi de até 60% e quando da consideração do critério de outorga para barramentos em substituição ao critério de outorga a fio d'água houve um aumento na disponibilidade hídrica de até 1610%. No Artigo II objetivou-se propor modificações no método das diferenças acumuladas que permitam superar as limitações referentes à dependência do ano de início da série histórica e à impossibilidade de associar a capacidade do reservatório a um período de retorno. A fim de alcançar a independência do ano de início da série histórica foi proposta a criação de séries sintéticas e visando associar a capacidade do reservatório a um fator de frequência (período de retorno) se aplicou a distribuição de Gumbel aos valores de capacidade estimados a partir destas séries. Considerando valores de  $\beta$  (proporção da vazão média a ser regularizada) maiores ou iguais a 0,75 a criação de séries sintéticas foi de grande eficiência para superar as limitações referentes à dependência do ano de início da série histórica, assim como a associação da capacidade do reservatório a períodos de retorno maiores ou iguais ao número de anos das séries de dados foi de grande aplicabilidade.

## ABSTRACT

NUNES, Aline de Araújo Nunes, M.Sc, Universidade Federal de Viçosa, February, 2013. **Water storage reservoirs: new proposals for the sizing and representation of their effects.** Adviser: Fernando Falco Pruski.

One of the main problems faced nowadays is the difficulty in supplying the water demand required by society, being used for this purpose the process of water storage in reservoirs. The construction of regularization reservoirs modifies the streamflows distribution in rivers, occurring an increase of the value of available low flow, which tends to approach of average streamflow value. The increase of water availability, in turn, enables that water use grants are granted for a larger number of users. Considering the randomness of the streamflow occurrence, in other words, the impossibility of occurrences predicting in long-term, it is not possible to predict accurately the size of water reserve that is needed to supply the demands of drought periods in the future. The water managers have increasingly sought improvements in the techniques of sizing reservoirs. In the perspective of simplicity, without escaping at a technical-scientific basis, the accumulated difference method is an expressively diffused method, but with limitations regarding the dependence on the characteristics of the available database. The work was divided in two papers, and in Paper I the objective was to evaluate the impact of use of regularization reservoirs on water availability along the hydrography, and, for that, was made a case study for Entre RIBEIROS river basin. The impact of reservoir construction on water availability was evaluated based on the effect that water storage potentiates in relation to the replacement of superposed flows by flows distributed in time and in the possibility of considering the criteria for conceding water use grants in conditions of water storage replacing to the criteria used in natural conditions. Considering the replacement of superposed flows by flows distributed in time the increase in potentiality of water resources use was up to 60% and at the

consideration of the criteria for conceding water use grants in conditions of water storage replacing to the criteria used in natural conditions there was an increase in water availability up to 1,610%. In Paper II the objective was to propose modifications in accumulated differences method to overcome the limitations related to the dependence of the database start year and the impossibility to combine the reservoir capacity to a return period. In order to achieve the independence from database start year was proposed the creation of synthetic series and aiming to associate the reservoir capacity to a frequency factor (return period) was applied the Gumbel distribution to the capacity values estimated from these series. Considering  $\beta$  values (proportion of the average streamflow to be regularized) greater than or equal to 0.75 the creation of synthetic series was of great efficiency to overcome the limitations related to the dependence of database start year, as well as the association of the reservoir capacity to return periods greater than or equal the number of years of database was of great applicability.

## **1. APRESENTAÇÃO GERAL**

A água é um elemento essencial à vida e ao desenvolvimento de diversas atividades humanas. A crescente demanda por sua utilização para fins diversos, tais como irrigação, consumo doméstico, entre outros, tem feito com que a disponibilidade hídrica seja insuficiente para atender a todas as demandas e para manter as condições ambientais mínimas necessárias para o desenvolvimento sustentável, caracterizando, portanto, situação de escassez hídrica.

Em diversas regiões do Brasil tem sido evidenciadas situações de escassez hídrica, como é o caso da bacia do ribeirão Entre Ribeiros, afluente do rio Paracatu, que teve expressivo aumento da demanda pelo uso da água, principalmente devido à expansão das áreas irrigadas, após os incentivos governamentais ocorridos na década de 70. A bacia do Entre Ribeiros sofre uma crise hídrica e apresenta situação preocupante (DIAGNÓSTICO AMBIENTAL DA SUB-BACIA DO RIBEIRÃO ENTRE RIBEIROS, 2003).

Em situações em que a disponibilidade hídrica natural (a fio d'água) não é suficiente para suprir as demandas existe a possibilidade de aumento da disponibilidade pelo aproveitamento do potencial de regularização de vazão nos cursos d'água. Com a regularização das vazões pela construção de reservatórios visa-se atingir vários objetivos, destacando-se: o atendimento às necessidades do abastecimento urbano ou rural (irrigação); o aproveitamento hidroelétrico (geração de energia); a atenuação de cheias (combate às inundações); o controle de estiagens; o controle de sedimentos; a recreação; e, também, permitir a navegação fluvial (BARBOSA, 2011).

A implantação de reservatórios de regularização modifica a distribuição das vazões nos rios, ocorrendo um aumento do valor da vazão mínima disponível, que tende a se aproximar do valor da vazão média (ASFORA; CIRILO, 2005). O aumento da

disponibilidade hídrica, por sua vez, possibilita que as outorgas de direito de uso da água sejam concedidas para um maior número de usuários.

Considerando a aleatoriedade da ocorrência das vazões, ou seja, a impossibilidade da previsão de ocorrências a longo prazo, não é possível prevê-se com precisão o tamanho da reserva de água necessária para suprimento das demandas de períodos de seca no futuro. Isto leva o planejador de recursos hídricos a duas situações ineficientes: superdimensionar as reservas às custas de investimentos demasiados no reservatório de acumulação, ou subdimensionar as reservas às custas de racionamento durante o período seco (LANNA, 2012).

Os gestores de recursos hídricos têm buscado, cada vez mais, o aprimoramento das técnicas de dimensionamento de reservatórios. Na ótica da simplicidade, sem fugir a uma base técnico-científica, existem diversos métodos para dimensionamento de reservatórios. Dentre estes, o “método das diferenças acumuladas”, conforme apresentado em Lanna (2012), calcula a capacidade mínima do reservatório para atender a uma certa equação de regularização pela diferença entre o volume que seria necessário para atender à vazão requerida no período mais crítico de estiagem e o volume que aflui ao reservatório no mesmo período. O método se baseia, portanto, no estudo de períodos críticos da série histórica.

Algumas limitações associadas ao método das diferenças acumuladas são a forte dependência deste em relação ao ano de início da série histórica disponível e o fato de não permitir associar a capacidade do reservatório a um fator de frequência (período de retorno). A desvantagem de se projetar reservatórios baseado em registros de dados históricos é que uma única estimativa da capacidade é obtida. Tal abordagem não dá uma medida de risco (XU et al., 1997). A extrema dependência à base de dados disponível, muitas vezes, limita a aplicação do método.

Diante do exposto e dos diferentes objetivos a serem alcançados, optou-se por dividir a dissertação em dois artigos científicos.

O Artigo I foi fundamentado na hipótese de que o uso de práticas de regularização pode proporcionar o melhor uso da água em uma bacia hidrográfica. Portanto, objetivou-se avaliar o impacto do uso de reservatórios de regularização na disponibilidade hídrica ao longo da hidrografia, sendo, para tanto, feito um estudo de caso para a bacia do ribeirão Entre Ribeiros.

O Artigo II foi fundamentado na hipótese de que a simplicidade e a base técnico-científica do método das diferenças acumuladas aliadas a uma menor dependência em relação às características da base de dados disponível podem fazer deste um método

mais abrangente. Portanto, objetivou-se propor modificações no método das diferenças acumuladas, que permitam superar as limitações referentes à dependência do ano de início da série histórica e à impossibilidade de associar a capacidade do reservatório a um período de retorno.

### **Referências Bibliográficas**

ASFORA, M. C.; CIRILO, J. A. Reservatórios de regularização: alocação de água para usos múltiplos com diferentes garantias. **Revista de Gestão de Água da América Latina**, v. 2, p.27-38, 2005.

BARBOSA, A. R. **Regularização de Vazão**. Notas de aula da disciplina Hidrologia Aplicada. 2011. 9 p. Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2011.

CAMPOS, N. **Dimensionamento de reservatórios: o método do diagrama triangular de regularização**. Fortaleza: Expressão Gráfica e Editora, 2005.

DIAGNÓSTICO AMBIENTAL DA SUB-BACIA DO RIBEIRÃO ENTRE RIBEIROS. Paracatu. **Irriplan Engenharia Ltda.** [S.l.], 2003.

LANNA, A.E. **Regularização de vazões em reservatórios**. In: TUCCI, C.E.M. et al. Hidrologia: ciência e aplicação. 4ª reimp. Porto Alegre: UFRGS/ABRH, 943 p. 2012.

XU, Z.X., ITO, K., LIAO, S., WANG, L. Incorporating inflow uncertainty into riskassessment for reservoir operation. **Stochastic Hydrology and Hydraulics**, v.11 (5), p.433–448, 1997.

## **ARTIGO I**

### **Impacto do uso de reservatórios na disponibilidade hídrica**

## **IMPACTO DO USO DE RESERVATÓRIOS NA DISPONIBILIDADE HÍDRICA**

**RESUMO** - Um dos principais problemas enfrentados na atualidade é a dificuldade em atender à demanda de água requerida pela sociedade, sendo utilizado para esta finalidade o processo de armazenamento de água em reservatórios. Objetivou-se com o presente trabalho avaliar o impacto do uso de reservatórios de regularização na disponibilidade hídrica ao longo da hidrografia, sendo, para tanto, feito um estudo de caso para a bacia do ribeirão Entre Ribeiros. Foi realizada a avaliação do impacto da construção de reservatórios na disponibilidade hídrica com base no efeito que o armazenamento de água potencializa em relação à substituição das vazões superpostas pelas vazões distribuídas no tempo e na possibilidade de consideração do critério de outorga para barramentos em substituição ao critério de outorga a fio d'água. Considerando a substituição das vazões superpostas por vazões distribuídas no tempo o aumento da potencialidade de utilização dos recursos hídricos foi de até 60% e quando da consideração do critério de outorga para barramentos em substituição ao critério de outorga a fio d'água houve um aumento na disponibilidade hídrica de até 1610%.

**Palavras chave** – Regularização de vazões, recursos hídricos, armazenamento de água

**ABSTRACT** - One of the main problems faced nowadays is the difficulty in supplying the water demand required by society, being used for this purpose the process of water storage in reservoirs. The objective of the present study was to evaluate the impact of the use of regularization reservoirs on water availability along the hydrography, and, for that, was made a case study for Entre Ribeiros river basin. The impact of reservoir construction on water availability was evaluated based on the effect that water storage potentiates in relation to the replacement of superposed flows by flows distributed in time and in the possibility of considering the criteria for conceding water use grants in conditions of water storage replacing to the criteria used in natural conditions. Considering the replacement of superposed flows by flows distributed in time the increase in potentiality of water resources use was up to 60% and at the consideration of the criteria for conceding water use grants in conditions of water storage replacing to the criteria used in natural conditions there was an increase in water availability up to 1,610%.

**Keywords** – Streamflow regularization, water resources, water storage

## 1. INTRODUÇÃO

A água, um dos mais preciosos recursos naturais, é um bem essencial à vida e ao desenvolvimento econômico (MATONDO, 2002; ZHAO; CHEN, 2008). A crescente demanda por sua utilização, tanto em termos de quantidade como de qualidade, tem exigido que os planejadores utilizem projetos mais abrangentes para o planejamento dos recursos hídricos (LI et al., 2010a). Garantir a segurança alimentar em um mundo com população e necessidades crescentes tornou-se uma questão complexa. A disponibilidade de água em quantidade adequada, em particular no domínio da agricultura irrigada, é um grande desafio (SCHULTZ; De WRACHIEN, 2002).

Um dos principais problemas enfrentados pelos gestores de recursos hídricos é a quantificação das vazões que ocorrem ao longo da hidrografia e de suas variações temporais e espaciais, para que se possa atender aos padrões de consumo de água requeridos pela sociedade. O processo de armazenamento de água nos períodos em que ocorre excedente hídrico para utilização nos períodos em que ocorre déficit é utilizado para esta finalidade (XU et al., 1997; CAMPOS, 2005).

O uso de práticas de regularização é uma das medidas mais eficazes para promover o desenvolvimento sustentável e otimizar a gestão dos recursos hídricos (HUGHES; HANNART, 2003; GUO et al., 2004; LIU et al., 2006; SONG et al., 2007; LI et al., 2010b). Ao alterar a distribuição espacial e temporal do escoamento os reservatórios podem ter muitos usos benéficos, como controle de enchentes, geração de energia elétrica, abastecimento de água, navegação e recreação, reduzindo, dessa forma, a dependência humana em relação à disponibilidade natural de água (XU et al., 1997; GUO et al., 2004; NILSSON et al., 2005; LIU et al., 2006; YUN; SINGH, 2008; LI et al., 2010b; XU et al., 2011).

O armazenamento de água pode ser feito por meio de um grande número de pequenos reservatórios individuais localizados nas cabeceiras do curso d'água principal ou de seus afluentes ou por meio de grandes reservatórios, localizados mais a jusante (ANA, 2010; SWIECH, 2012). A sustentabilidade da agropecuária, em muitas regiões, é dependente do armazenamento de água para uso em períodos de escassez, o que é geralmente resolvido com a construção de pequenos reservatórios. Os danos provocados por estes reservatórios geralmente são de pouca expressividade face os benefícios que eles podem proporcionar (ATLAS DIGITAL DAS ÁGUAS DE MINAS, 2012).

Na região Sul do Brasil, a cultura de arroz irrigado apresenta uma demanda muito grande de água que, em geral, não pode ser suprida apenas pela vazão dos rios

durante os meses de primavera-verão, que é a época de maior requerimento de água. Ao longo dos últimos 100 anos foram construídos milhares de pequenos reservatórios para garantir o suprimento de água para irrigação. Estes reservatórios, que recebem o nome local de açudes, foram construídos, muitas vezes, pelos proprietários das terras, e estão localizados, em geral, inteiramente no interior de suas propriedades (COLLISCHONN et al., 2011).

Bacias com um grande número de reservatórios pequenos, para os quais são desconhecidas características fundamentais, como o volume de armazenamento, são bastante comuns no Brasil (CAMPOS et al., 2000). Estudo recente, baseado em imagens do *China-Brazil Earth Resources Satellite* ou Satélite Sino-Brasileiro de Recursos Terrestres (CBERS), permitiu identificar mais de 4000 reservatórios com área inundada superior a 20 ha somente na região Nordeste (MARTINS et al., 2007).

A implantação de reservatórios de regularização modifica a distribuição das vazões nos rios e altera o suprimento de água a jusante do mesmo. As vazões a jusante do reservatório passam, portanto, a apresentar comportamentos diferentes no que se refere à garantia das disponibilidades, ocorrendo um aumento do valor da vazão mínima disponível, que tende a se aproximar do valor da vazão média de longa duração. As disponibilidades hídricas não podem ultrapassar a potencialidade da bacia, representada pela máxima vazão regularizável, a menos que haja importação de água (ASFORA; CIRILO, 2005).

Pruski et al. (2007) evidenciaram que na bacia do ribeirão Entre Ribeiros, localizada no Estado de Minas Gerais, mais especificamente na seção correspondente à estação Fazenda Barra da Água, a vazão estimada como de retirada pela irrigação na área de contribuição correspondente a esta seção no mês de maior requerimento de irrigação (agosto) representou, em 1996, 87,1% da  $Q_{7,10}$ . Neste mesmo estudo foi também evidenciado que a vazão média total consumida pelos quatro segmentos considerados (abastecimento urbano, dessedentação humana no meio rural, dessedentação animal e irrigação) foi de apenas 2,1% da vazão média de longa duração ( $Q_{mld}$ ), o que mostra a grande potencialidade do aumento da disponibilidade de água pela implantação de estruturas que promovam a regularização do escoamento da água na hidrografia.

O aumento da disponibilidade hídrica, por meio dos reservatórios, possibilita também que as outorgas de direito de uso da água sejam concedidas para um maior número de usuários, atendendo, assim, aos múltiplos usos da água de maneira mais eficaz. De acordo com a Resolução Conjunta SEMAD-IGAM nº 1548, de 29 de março

de 2012, em grande parte do Estado de Minas Gerais é permitida, em condições a fio d'água, a concessão de outorgas de direito do uso das águas até que se atinja a vazão equivalente a 50% da vazão mínima de sete dias de duração e de dez anos de período de retorno ( $Q_{7,10}$ ). Por ser um critério definido a partir da análise de períodos críticos de estiagem, esta vazão de outorga é bastante restritiva quanto à expansão dos sistemas de uso das águas (LANNA, 1997; MEDEIROS; NAGHETTINI, 2001; CASTRO et al., 2004). Quando do uso de práticas de regularização, entretanto, é permitida a concessão de outorgas até que se atinja a vazão média de longa duração ( $Q_{mld}$ ), garantindo um fluxo residual (vazão que deve permanecer no rio) superior a 50% da  $Q_{7,10}$ .

Como em diversas bacias hidrográficas brasileiras existem conflitos pelo uso da água, a outorga de direito de uso é um dos instrumentos necessários para uma gestão mais eficiente dos recursos hídricos. Na bacia do Paracatu, sub-bacia do rio São Francisco, como consequência da grande expansão da agricultura irrigada, a partir da década de 70 sérios conflitos têm surgido, principalmente nas sub-bacias do ribeirão Entre Ribeiros e do rio Preto.

Pruski et al. (2007) evidenciaram que na bacia do ribeirão Entre Ribeiros a irrigação é responsável por mais de 92% do total de água consumido e, de acordo com o Diagnóstico Ambiental da Bacia do Ribeirão Entre Ribeiros (2003), a bacia sofre atualmente uma crise no que diz respeito à disponibilidade hídrica, apresentando um quadro de escassez preocupante. O aumento da área cultivada, a intensificação do uso da água na agricultura, o manejo inadequado e a falta de planejamento na utilização dos recursos naturais, principalmente a água, geraram conflitos ambientais e sociais para os habitantes.

Em estudo realizado por Oliveira (2011) para a otimização do aproveitamento da disponibilidade de águas superficiais na bacia do ribeirão Entre Ribeiros foi constatado que a substituição da  $Q_{7,10}$  calculada em base anual pelas  $Q_{7,10}$  calculadas em base mensal e a consideração do cenário mais positivo, correspondente ao critério de outorga de 50% da  $Q_{7,10}$  mensal, não foram suficientes para garantir que o somatório das demandas não superasse a disponibilidade em todos os segmentos da hidrografia. Após a análise foi identificada a necessidade de construção de barramentos em nove trechos da hidrografia.

Deste modo, o presente trabalho foi fundamentado na hipótese de que o uso de práticas de regularização constitui uma técnica que pode proporcionar o melhor uso da água em uma bacia hidrográfica. Portanto, o trabalho foi desenvolvido visando a avaliação do impacto do uso de reservatórios de regularização na disponibilidade

hídrica ao longo da hidrografia, sendo, para tanto, feito um estudo de caso para a bacia do ribeirão Entre Ribeiros.

Os objetivos específicos foram:

- avaliar o impacto das outorgas concedidas na disponibilidade hídrica a fio d'água ainda remanescente da bacia do ribeirão Entre Ribeiros;
- avaliar o efeito que a construção de reservatórios apresenta na disponibilidade hídrica; e
- avaliar a potencialidade que a regularização de vazões tem para atenuar os conflitos pelo uso da água na bacia.

## **2. MATERIAL E MÉTODOS**

### **2.1. Caracterização da área de estudo**

A sub-bacia hidrográfica do ribeirão Entre Ribeiros, um dos principais afluentes da bacia do rio Paracatu, está localizada entre os paralelos 16°30' e 17°16' de latitude Sul e os meridianos 46°15' e 47°05' de longitude Oeste (Figura 1). A sub-bacia abrange cerca de 3.973 km<sup>2</sup>, situados integralmente no Estado de Minas Gerais.

A localização geográfica da bacia faz com que haja uma predominância climática de natureza tropical chuvosa, com chuvas concentradas nas estações da primavera e verão, estação seca bem marcante e temperatura média do mês mais frio superior a 18°C (GOMES, 2007). A precipitação média anual varia de 1.100 a 1.600 mm, não uniformemente distribuída ao longo do ano, com média na bacia na ordem de 1.453 mm.

A evapotranspiração de referência média anual é de 1.140 mm, com valores mensais variando de um mínimo de 50 a 80 mm, nos meses de junho e julho, a um máximo de 90 a 163 mm, nos meses de outubro a março, sendo que o balanço hidroclimático mostra que durante o período de maio a setembro ocorre déficit hídrico em toda a bacia, enquanto nos meses de dezembro a fevereiro ocorre excedente hídrico (BRASIL, 1996).

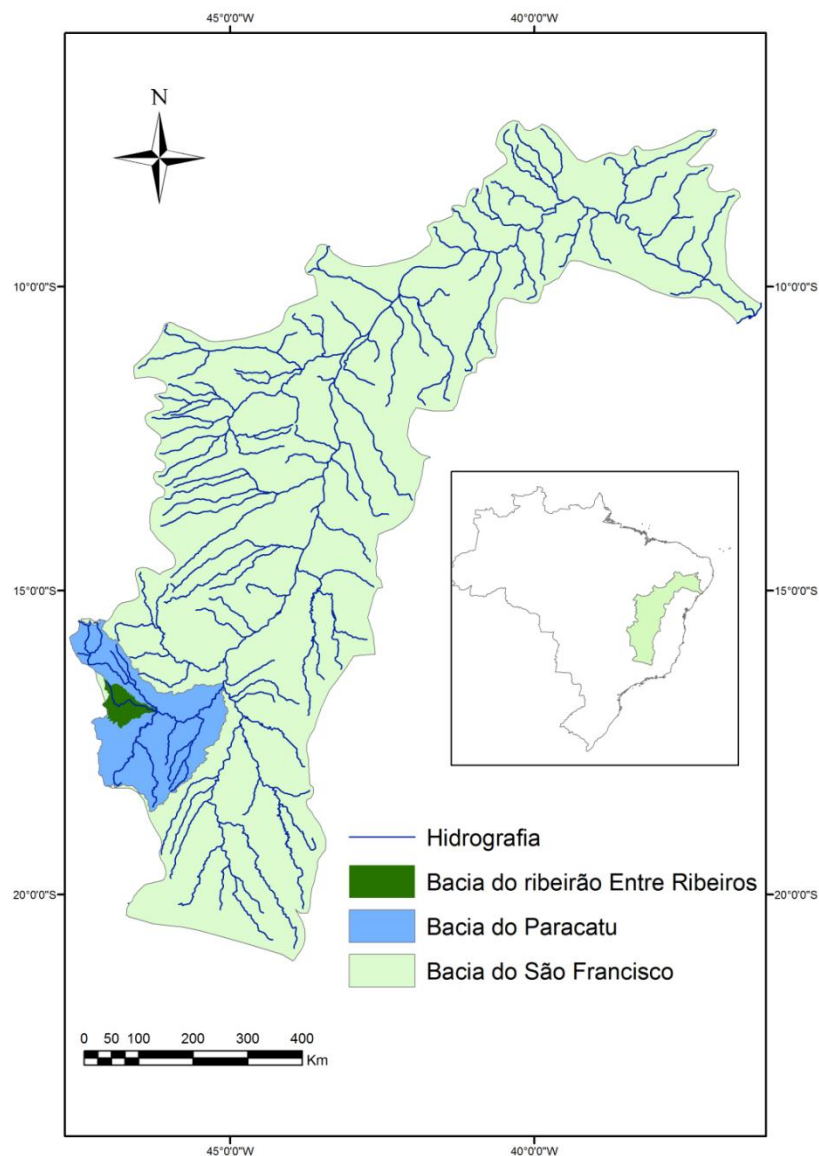


Figura 1 – Representação geográfica da bacia do ribeirão Entre Ribeiros.

## 2.2. Avaliação do impacto das outorgas concedidas na disponibilidade hídrica a fio d'água ainda remanescente da bacia do ribeirão Entre Ribeiros

### 2.2.1. Demandas de uso da água na bacia do ribeirão Entre Ribeiros

Para quantificar os usos de água na bacia do ribeirão Entre Ribeiros foram consideradas no estudo as outorgas superficiais, a fio d'água e em barramentos, emitidas pelo órgão responsável pela concessão de direito de uso dos recursos hídricos em Minas Gerais, o Instituto Mineiro de Gestão das Águas (IGAM), até o ano de 2010.

Na Figura 2 é apresentada a espacialização dos pontos de outorga ao longo da hidrografia da bacia do ribeirão Entre Ribeiros, na qual pode ser observado que muitas das seções com outorga estão localizadas em regiões de cabeceira, onde grandes demandas, associadas à baixa disponibilidade, fazem com que sejam evidenciadas situações de escassez durante grande parte do ano.

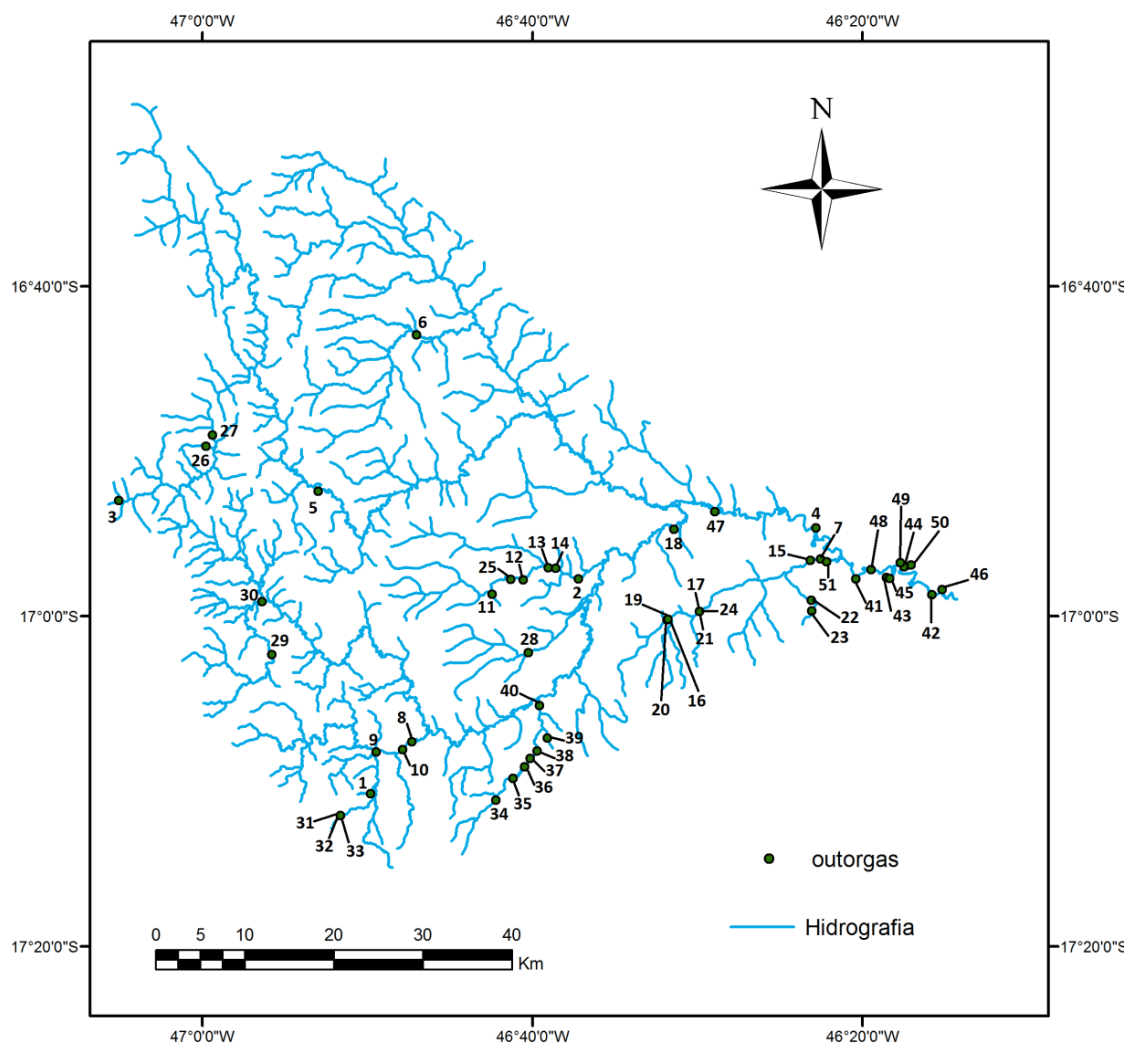


Figura 2 – Pontos de outorga ao longo da hidrografia da bacia do Entre Ribeiros.

As análises das demandas foram feitas em base mensal e foi considerado o valor total de demanda, em cada trecho da hidrografia, obtido a partir do somatório dos valores outorgados nas seções a montante da confluência do trecho considerado com o trecho subsequente em cada mês.

### **2.2.2. Vazão de referência para a concessão de outorga na bacia do ribeirão Entre Ribeiros**

A vazão mínima de referência foi caracterizada pela vazão mínima de sete dias de duração e período de retorno de dez anos ( $Q_{7,10}$ ), por ser esta a vazão mínima de referência no Estado de Minas Gerais. Sua quantificação foi obtida em base anual através do estudo de regionalização de vazões para o Estado de Minas Gerais (GPRH; IGAM, 2012). A equação de regionalização utilizada no estudo, em base anual, para a  $Q_{7,10}$ , em  $m^3/s$ , foi:

$$Q_{7,10} = 0,1167 P_{eq750}^{0,9870} \quad (1)$$

em que  $P_{eq750}$  é a vazão equivalente ao volume precipitado considerando a subtração do fator de abstração da precipitação de 750 mm para a formação das vazões,  $m^3/s$ .

A variável explicativa  $P_{eq750}$  representa as características físicas e climáticas da bacia. Embora a precipitação média anual seja uma variável explicativa do processo de formação das vazões mínimas e médias, não reflete efetivamente a contribuição para a formação dessas vazões. Visando a melhor representação dos processos físicos envolvidos na formação das vazões GPRH & IGAM (2012) utilizaram o valor de 750 mm como o fator que passa a ser caracterizado como fator de abstração da precipitação na formação das vazões. Este fator visa contemplar a parte da precipitação que não é convertida em escoamento ao longo da hidrografia em decorrência de outros processos, sobretudo a evapotranspiração (PRUSKI et al., 2013)

### **2.2.3. Impacto das outorgas concedidas na disponibilidade hídrica a fio d'água ainda remanescente da bacia**

A cada ponto de outorga foram associados os valores demandados em cada mês ao longo do ano, considerando que todas as retiradas são feitas a fio d'água, independentemente da condição real ser a fio d'água ou em barramento, durante 24 horas por dia e 30 dias por mês. Esta consideração foi feita com base no princípio da superposição das demandas de vazão, ou seja, foi considerado que todas as vazões outorgadas são utilizadas de forma simultânea, sendo estas denominadas de “vazões superpostas”.

O princípio da superposição de informações é um princípio básico utilizado pelos órgãos gestores a fim de assegurar a disponibilidade dos recursos hídricos a todos os usuários. A partir dos dados referentes às vazões outorgadas foi obtida, para cada trecho da hidrografia, a porcentagem da vazão mínima de referência já outorgada a montante, sendo esta obtida pela equação

$$O_{\text{min\_s\% i}} = \frac{\sum Q_{s i}}{Q_{7,10 i}} 100 \quad (2)$$

em que:

$O_{\text{min\_s\% i}}$  = porcentagem da vazão mínima de referência já outorgada a montante do trecho i, incluindo o trecho i, considerando as vazões superpostas, %;





$\sum Q_{s i}$  = somatório das vazões superpostas a montante do trecho i, incluindo o trecho i,  $\text{m}^3\text{s}^{-1}$ ; e

$Q_{7,10 i}$  = vazão mínima de referência no segmento i,  $\text{m}^3\text{s}^{-1}$ .

Foi analisada, para cada trecho, e em cada mês, a relação entre o somatório das vazões superpostas outorgadas nos pontos a montante da confluência do trecho considerado com o trecho subsequente e a  $Q_{7,10}$ , calculada em base anual.

A análise realizada considerou o critério usado pelo IGAM para a concessão de outorgas de direito de uso dos recursos hídricos em Minas Gerais, que é fixado em 50% (cinquenta por cento) da  $Q_{7,10}$  (limite máximo de derivações consuntivas a serem outorgadas na porção da bacia hidrográfica limitada por cada seção considerada, em condições naturais).

Foram elaborados mapas nos quais os trechos foram coloridos de acordo com a proporção de utilização da  $Q_{7,10}$ . Para fins de caracterização dos segmentos da hidrografia utilizou-se a seguinte escala de cores:

-  Trechos sem outorga ou não impactados por outorgas de montante
-  Vazão outorgada variando entre 0 e 50% da  $Q_{7,10}$
-  Vazão outorgada variando entre 50 e 100% da  $Q_{7,10}$
-  Vazão outorgada maior que 100% da  $Q_{7,10}$

### **2.3. Análise do efeito que a construção de reservatórios apresenta na disponibilidade hídrica**

A adoção do princípio da superposição é uma medida de segurança para a garantia do suprimento das demandas que pode ser substituída quando da implantação de estruturas de retenção (reservatórios). Os reservatórios permitem considerar as retiradas distribuídas durante o número de horas de utilização por dia e o número de dias por mês, uma vez que estarão acumulando água nos momentos em que não há retiradas e, conseqüentemente, garantindo uma melhor regularização das vazões.

Sendo assim, para os trechos onde o somatório das vazões outorgadas a montante supera a vazão máxima outorgável foi realizada a avaliação do impacto que a construção de reservatórios de regularização tem na disponibilidade hídrica, com base em dois efeitos: no efeito que o armazenamento de água em reservatórios potencializa em relação à substituição das vazões superpostas por vazões distribuídas no tempo; e na consideração da vazão permissível para outorga em condições de regularização.

A análise relativa ao impacto destes dois efeitos é apresentada neste trabalho apenas para as condições relativas ao mês em que as demandas são máximas, ou seja, para a condição mais crítica.

#### **2.3.1. Impacto dos reservatórios na vazão demandada**

Tendo em vista o fato de que em condições a fio d'água é necessária a consideração de superposição da retirada das vazões, à medida que não existe nenhuma estrutura de regularização, em condições em que haja esta estrutura já não é mais necessária a consideração das ditas “vazões superpostas”. Portanto, para a condição em que é requerida a construção de um reservatório de regularização, a análise foi feita com base no princípio de que o uso de reservatórios possibilita a consideração de vazões distribuídas no tempo.

As “vazões distribuídas no tempo” foram estimadas pela equação

$$Q_{dt} = \frac{Q_s N M}{K} \quad (3)$$

em que:

$Q_{dt}$  = vazão distribuída no tempo,  $m^3 s^{-1}$ ;

$Q_s$  = vazão superposta,  $m^3 s^{-1}$ ;

- N = número de horas de utilização por dia, h dia<sup>-1</sup>;  
M = número de dias de utilização por mês, dias mês<sup>-1</sup>; e  
K = fator de conversão, 720.

Na análise do impacto dos reservatórios na demanda foram confrontados os dados de  $Q_{dt}$  com os valores de vazão disponível para outorga, a fim de se ter uma comparação com o cenário original (equação 2). Foi obtida, para cada trecho da hidrografia, a porcentagem da vazão mínima de referência já outorgada a montante, sendo esta obtida pela equação

$$O_{\min\_dt\% i} = \frac{\sum Q_{dt i}}{Q_{7,10 i}} 100 \quad (4)$$

em que:

- $O_{\min\_dt\% i}$  = porcentagem da vazão mínima de referência já outorgada a montante do trecho i, incluindo o trecho i, considerando as vazões distribuídas no tempo, %; e  
 $\sum Q_{dt i}$  = somatório das vazões distribuídas no tempo a montante do trecho i, incluindo o trecho i, m<sup>3</sup>s<sup>-1</sup>.

A partir da comparação entre os dois cenários foi gerado um mapa de “ $\Delta$  Demanda%”, que representa a redução percentual em termos de demanda quando se considera a mudança de  $Q_s$  para  $Q_{dt}$ , conforme a equação

$$\Delta \text{ Demanda } \% = \frac{Q_{dt} - Q_s}{Q_s} 100 \quad (5)$$

### 2.3.2. Impacto dos reservatórios na vazão permissível para outorga

A principal função de um reservatório é a de fornecer uma vazão regularizada, tendo recebido do rio vazões variáveis no tempo. Dessa forma a garantia de suprimento de água passa a se aproximar do potencial da bacia, representado pela vazão média de longa duração. As vazões a jusante do reservatório passam a representar proporções da vazão potencial do curso d’água, e não mais da vazão mínima ou natural.

O aumento da disponibilidade hídrica obtido por meio deste efeito possibilita que a concessão de outorgas de direito de uso da água seja menos restritiva. Em grande parte do Estado de Minas Gerais é permitida, quando do uso de práticas de regularização, a concessão de outorgas de direito do uso das águas até que se atinja a vazão média de longa duração ( $Q_{mld}$ ), garantindo, entretanto, uma vazão residual (vazão que deve permanecer no rio) que não seja inferior a 50% da  $Q_{7,10}$ .

A fim de representar a mudança em termos de garantia de suprimento de água para os múltiplos usuários, em decorrência do efeito da vazão permissível para outorga, foi gerado um mapa de “ $\Delta$  Disponibilidade%”, que representa o acréscimo em disponibilidade hídrica quando da alteração do critério de outorga decorrente da construção de reservatórios. Foi analisada a diferença entre os critérios de “ $Q_{mld} - 50\%$  da  $Q_{7,10}$ ” (barramento) e “50% da  $Q_{7,10}$ ” (a fio d’água), conforme a equação

$$\Delta \text{ Disponibilidade } \% = \frac{(Q_{mld} - 0,5 Q_{7,10}) - (0,5 Q_{7,10})}{(0,5 Q_{7,10})} 100 \quad (6)$$

#### **2.4. Avaliação da potencialidade que a regularização de vazões tem para atenuar os conflitos pelo uso da água na bacia do Ribeirão Entre Ribeiros**

Considerando os dois efeitos decorrentes da construção de reservatórios de regularização, ou seja, a consideração da vazão distribuída no tempo e a mudança da vazão permissível para outorga, foi também avaliada a potencialidade da combinação destes dois efeitos para sanar os conflitos pelo uso da água na bacia do Ribeirão Entre Ribeiros.

Aos pontos de outorga que se encontravam em trechos com disponibilidade hídrica insuficiente para atendê-los foram associados os valores demandados no mês mais crítico do ano, considerando que as vazões retiradas são distribuídas no tempo ( $Q_{dt}$ ). Nesta análise foram confrontados os valores de  $Q_{dt}$  com os valores de vazão disponível para outorga considerando o critério de regularização.

A equação de regionalização que foi utilizada para a estimativa da  $Q_{mld}$ , em  $m^3/s$ , também foi obtida do estudo de regionalização de vazões e geração de modelo para a automatização da obtenção de vazões mínimas e média para o Estado de Minas Gerais (GPRH; IGAM, 2012).

$$Q_{mld} = 0,9884 P_{eq750}^{0,9714} \quad (7)$$

A porcentagem da vazão média já utilizada a montante de cada trecho da hidrografia é expressa pela equação

$$O_{\text{med}\% i} = \frac{\sum Q_{\text{dt } i} + 0,5 Q_{7,10}}{Q_{\text{mld } i}} 100 \quad (8)$$

em que:

- $O_{\text{med}\% i}$  = porcentagem da vazão média já utilizada a montante do trecho  $i$ , incluindo o trecho  $i$ , %; e
- $Q_{\text{mld } i}$  = vazão média no segmento  $i$ ,  $\text{m}^3 \text{s}^{-1}$ .

### 3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

#### 3.1. Avaliação do impacto das outorgas concedidas na disponibilidade hídrica a fio d'água ainda remanescente da bacia do ribeirão Entre Ribeiros

Na Figura 3 é apresentado o mapa com a porcentagem da vazão mínima já outorgada considerando as vazões superpostas para os meses de maio, junho e julho, que representaram os meses de maior criticidade no que se refere ao número de trechos em que há excedência da vazão máxima permissível para outorga. Os mapas referentes aos demais meses estão apresentados no Apêndice A.

Os trechos cujo somatório não excede a vazão máxima outorgável representam apenas 50,7% do total de trechos nos quais existem outorgas. A situação torna-se ainda mais preocupante quando é levada em consideração a porcentagem de trechos cujo somatório excede, inclusive, a vazão de referência, nesse caso igual a 27,5%.

A Figura 3 permite caracterizar os trechos da hidrografia em que o somatório das demandas supera a vazão máxima permissível para outorga, indicando a necessidade de construção de reservatórios de regularização de vazões.

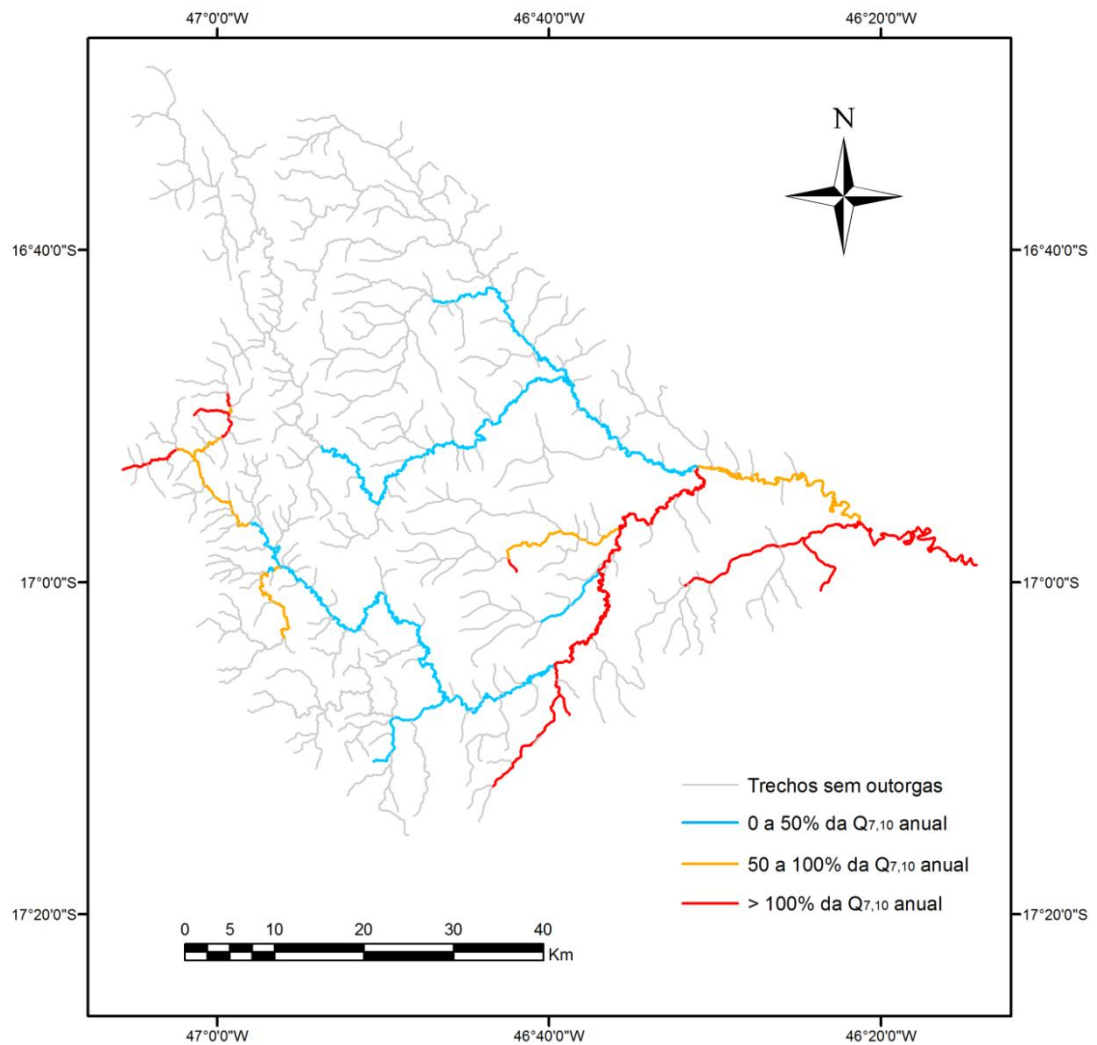


Figura 3 – Porcentagem da vazão mínima já outorgada considerando as vazões superpostas para os meses mais críticos (maio, junho e julho).

### 3.2. Análise do efeito que a construção de reservatórios apresenta na disponibilidade hídrica

A fim de analisar o impacto que a construção de reservatórios tem na disponibilidade hídrica ao longo da hidrografia foi avaliada, para cada trecho, a relação tanto do impacto decorrente da distribuição das demandas no tempo como o impacto associado à consideração do critério de vazão permissível para outorga em condições de regularização.

### 3.2.1. Impacto dos reservatórios na vazão demandada

Na Figura 4 é apresentado o mapa com a porcentagem da vazão mínima já outorgada considerando as vazões distribuídas no tempo para os meses de maio, junho e julho. Para os trechos em que somatório das vazões outorgadas não excede a máxima vazão outorgável em condições a fio d'água (trechos sem necessidade de regularização) a análise não foi realizada.

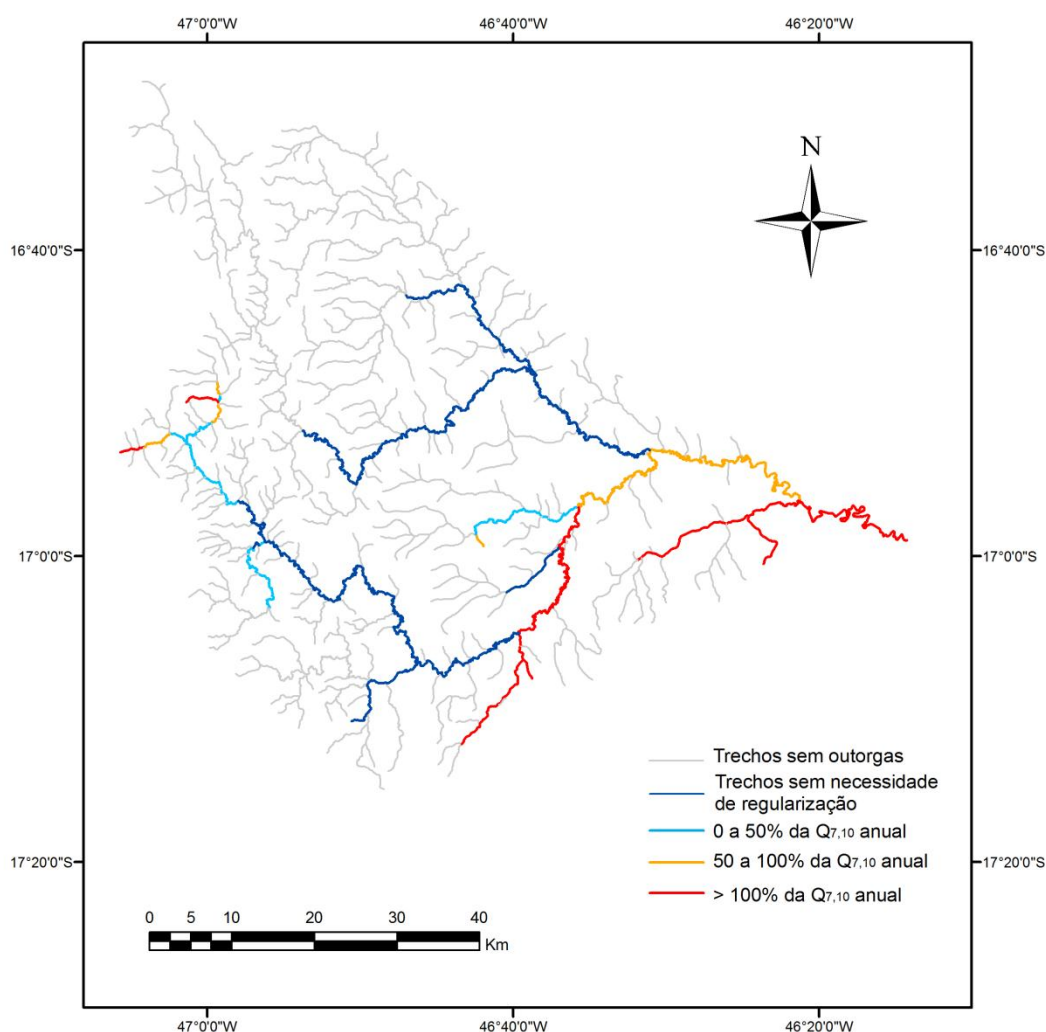


Figura 4 – Porcentagem da vazão mínima já outorgada considerando as vazões distribuídas no tempo para os meses mais críticos (maio, junho e julho).

Os trechos com somatório das outorgas menor que a máxima vazão outorgável (50% da  $Q_{7,10}$ ) que eram de 50,7% quando da consideração das  $Q_s$ , passaram a representar 68,1% do total de trechos impactados pelas outorgas quando da consideração das  $Q_{dt}$ . Os trechos que excedem a vazão de referência e que antes representavam 27,5% dos trechos impactados representam, agora, aproximadamente 18,8% destes trechos.

A mudança na consideração da distribuição temporal das vazões demandadas se reflete diretamente na disponibilidade hídrica remanescente. Na Figura 5 é representada a redução em vazão demandada quando da consideração das  $Q_{dt}$  em substituição às  $Q_s$ .

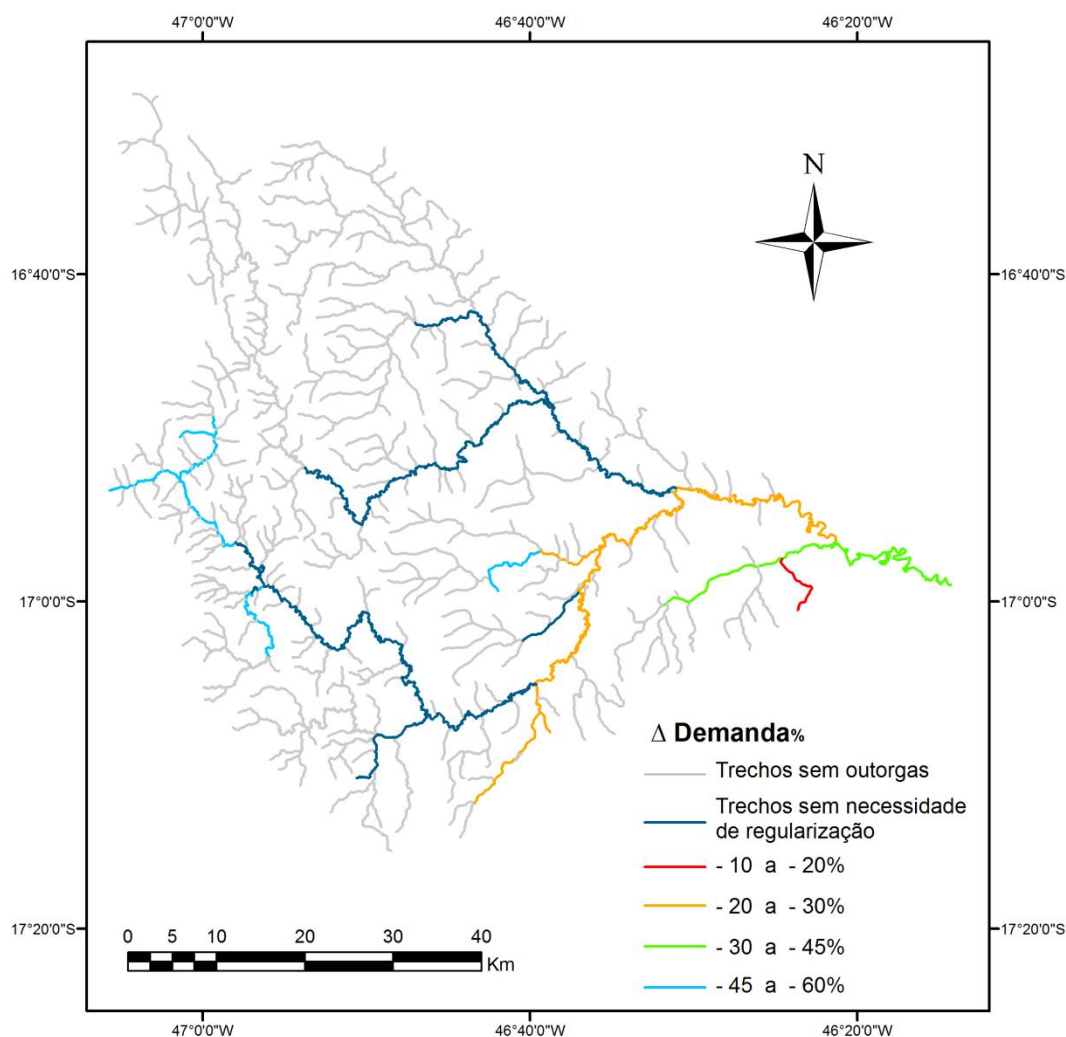


Figura 5 – Redução da vazão demandada quando da consideração das  $Q_{dt}$  em substituição às  $Q_s$ .

Analisando a Figura 5 é possível observar que a redução em vazão demandada quando da substituição de  $Q_s$  por  $Q_{dt}$  varia de -10 a - 60% ao longo dos trechos. Neste caso a diminuição da vazão demandada em até 60% equivale, em termos práticos, a um aumento da potencialidade de utilização dos recursos hídricos em proporção semelhante. Aproximadamente 57% dos trechos em que há excedência da vazão máxima permissível para outorga apresentaram redução da vazão demandada superior a 30% e, em apenas um trecho a redução foi inferior a 20%.

As regiões de cabeceira que, em geral, apresentaram diminuição da demanda superior a 30%, são um forte indicativo de que a construção de reservatórios de pequena capacidade de regularização pode solucionar os conflitos estabelecidos, até mesmo, em regiões onde a disponibilidade hídrica é menor. Destaca-se o fato de que na bacia do Ribeirão Entre Ribeiros muitos dos trechos com outorga estão localizados em regiões de cabeceiras, onde grandes demandas, associadas à baixa disponibilidade, fazem com que sejam evidenciadas situações de escassez durante grande parte do ano.

O cenário exposto pela Figura 5 representa, portanto, os benefícios que reservatórios de pequena capacidade de regularização podem proporcionar a regiões que sofrem com o conflito pelo uso da água. A ideia de que cada usuário tenha seu próprio reservatório, de forma a garantir o suprimento de água, pode ser uma alternativa técnica e economicamente viável, desde que respeitadas as questões ambientais.

### **3.2.2. Impacto dos reservatórios na vazão permissível para outorga**

A consideração de vazões distribuídas no tempo não é o único benefício proporcionado pelos reservatórios. A construção de reservatórios de regularização modifica a distribuição das vazões nos rios, altera a garantia do suprimento de água a jusante do mesmo e, conseqüentemente, a vazão permissível para uso. Na Figura 6 é apresentado o acréscimo da disponibilidade hídrica, neste trabalho caracterizado como  $\Delta$  Disponibilidade, quando da consideração do critério de outorga para barramentos ( $Q_{mld} - 0,5\% Q_{7,10}$ ) em substituição ao critério de outorga a fio d'água ( $0,5\% Q_{7,10}$ ). Esta condição corresponde ao máximo incremento da disponibilidade hídrica potencial (representada pela  $Q_{mld}$ ) e desconsiderado o efeito da evaporação.

A análise foi realizada em todos os trechos da hidrografia, uma vez que o aumento da disponibilidade hídrica pelo aumento da vazão permissível para outorga independe do fato dos trechos já terem ou não outorgas concedidas.

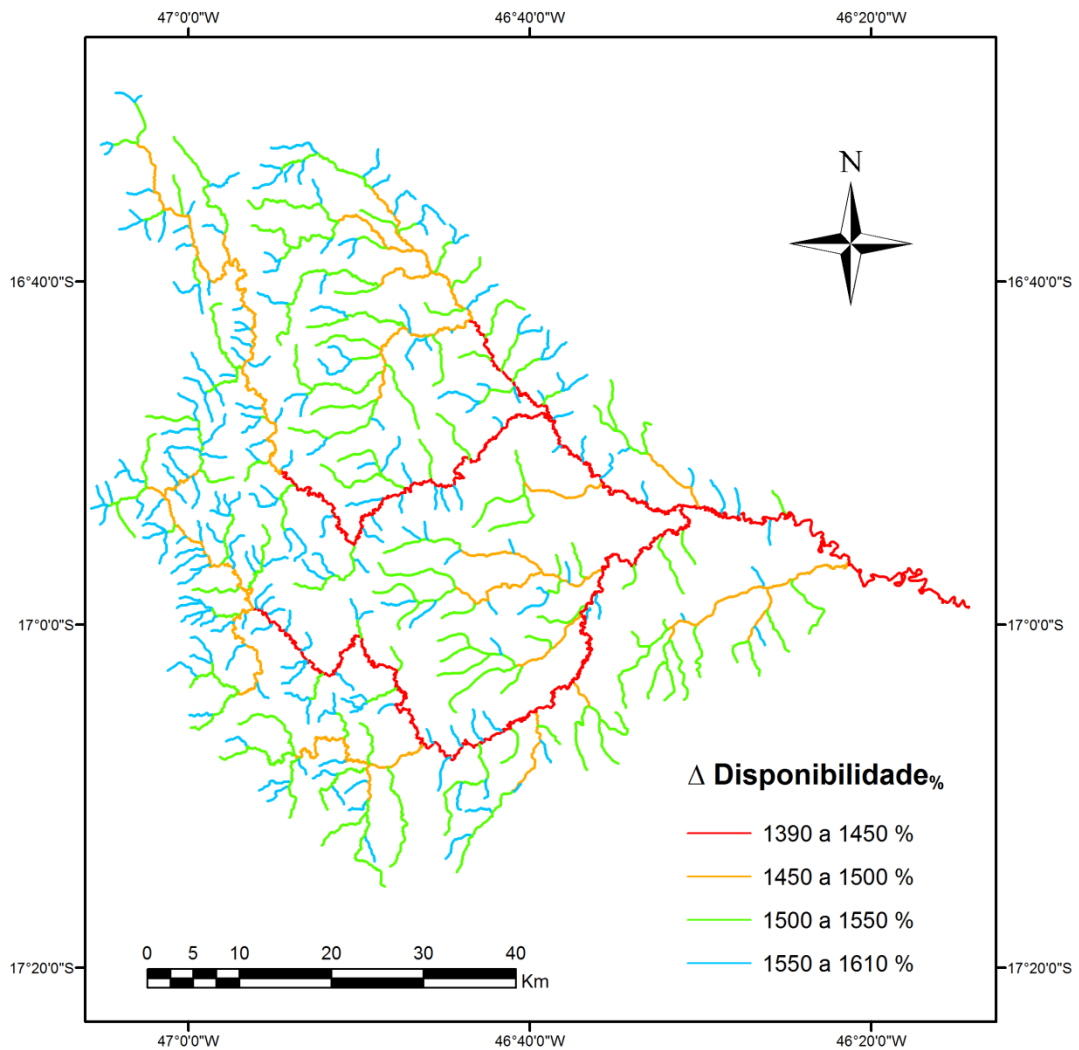


Figura 6 - Acréscimo de disponibilidade hídrica quando da consideração do critério de outorga para barramentos em substituição ao critério de outorga a fio d'água.

O aumento da vazão permissível para outorga quando da regularização máxima obtida com a construção de reservatórios varia de 1390 a 1610 %. Embora a amplitude de variação seja pequena é nítida a tendência de um maior aumento nas regiões de cabeceira, apresentando incrementos na disponibilidade superiores a 15 vezes. A fim de se entender melhor esta tendência, na Figura 7 é apresentada a relação  $Q_{mld}/Q_{7,10}$  ao longo da hidrografia.

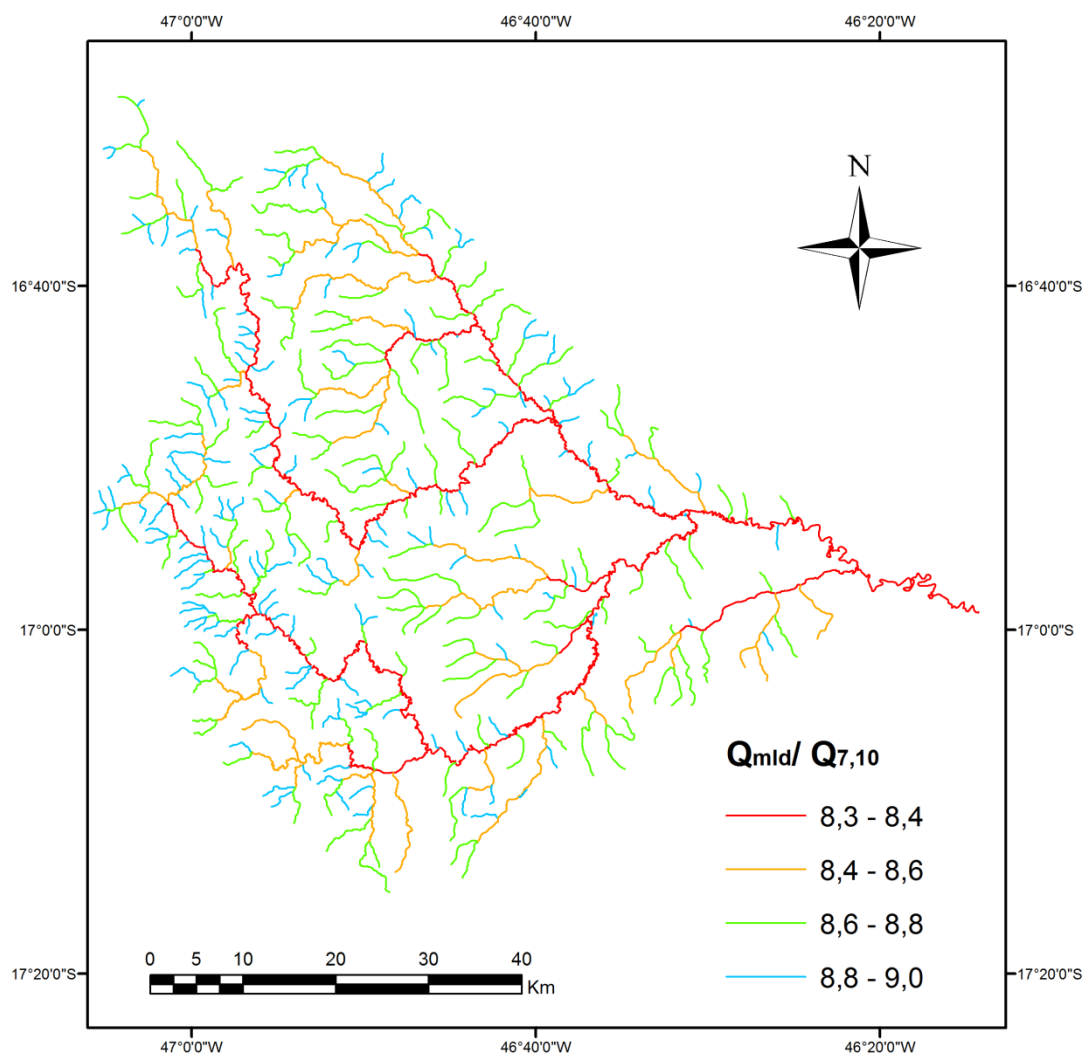


Figura 7 - Relação  $Q_{mld}/Q_{7,10}$  ao longo da hidrografia.

Os valores da relação  $Q_{mld}/Q_{7,10}$  variam de 8,3 a 9,0 ao longo da hidrografia. É possível observar, também para esta relação, a tendência de maiores valores no sentido das cabeceiras, ou seja, o valor de  $Q_{mld}$  tende a diminuir em uma proporção menos acentuada que a  $Q_{7,10}$  neste sentido.

Considerando que a  $Q_{7,10}$  é uma vazão associada à contribuição do lençol freático (escoamento subterrâneo) e a  $Q_{mld}$  está associada tanto à contribuição do escoamento subterrâneo como do escoamento superficial (SMAKHTIN, 2001; NOVAES, 2005), alguns aspectos físicos das regiões de cabeceira explicam a maior ou menor tendência de formação destas vazões. Uma vez que em regiões de cabeceira o declive é mais acentuado a água tende a escoar rapidamente e, portanto, têm menos oportunidade de infiltração do que em um declive suave, fato que contribui para uma maior formação da  $Q_{mld}$  em relação à  $Q_{7,10}$  (HAAN et al., 1994). Também contribui para essa relação, o fato de que as precipitações diminuem, de modo geral, das regiões de

cabeceira para a foz (PEREIRA et al., 2007; ARAI et al., 2010; ERMENEGILDO et al., 2012).

Uma vez que as regiões de cabeceira são as que, normalmente, caracterizam maior risco de conflito pelo uso da água, principalmente devido à baixa disponibilidade hídrica, a construção de reservatórios nestas regiões mostra-se, portanto, uma alternativa com grande potencialidade.

### **3.3. Potencialidade que a regularização de vazões tem para atenuar os conflitos pelo uso da água na bacia do Ribeirão Entre Ribeiros**

Na Figura 8 é apresentada, para os meses de maio, junho e julho, a situação dos trechos impactados pelas outorgas considerando a construção de reservatórios de regularização. Foi analisada a porcentagem da vazão média já outorgada considerando as vazões distribuídas no tempo e a garantia de uma vazão residual de 50% da  $Q_{7,10}$ .

A  $Q_{mld}$  representa a máxima vazão teoricamente regularizável, ou seja, sem considerar as perdas por evaporação e infiltração. Com base neste limite teórico ( $Q_{mld}$ ), se teria como máxima vazão permissível para outorga um valor correspondente a  $Q_{mld} - 0,5 Q_{7,10}$ , valor que é superado em 5,9% dos trechos com necessidade de regularização. Nestas situações o atendimento das demandas somente é possível pela adoção de medidas adicionais, como: a transposição de vazões de outras partes da bacia, ou mesmo, de outras bacias (KHRAN et al., 2012); ou a revisão das outorgas já concedidas a montante destes trechos.

De Villers (2000) considera que a transposição de águas pode ser uma alternativa importante em muitas regiões, reduzindo a pressão sobre o uso dos recursos hídricos. No entanto é importante a compreensão dos processos decorrentes desta transposição a fim de garantir a sustentabilidade das bacias hidrográficas envolvidas.

Considerando que um fator de grande importância na análise da implantação de reservatórios se refere às perdas de água por evaporação e infiltração, seria importante a obtenção dos valores destas perdas de forma a avaliar a quantidade de água que se perde ou se ganha com a construção de um reservatório (KAN; DIAS, 1999). Estimativas confiáveis de evaporação nos reservatórios são essenciais, tanto no planejamento e gerenciamento dos recursos hídricos como em estudos de impacto ambiental (PEREIRA et al., 2009). Albuquerque e Rêgo (1998) recomendam que em regiões úmidas a disponibilidade máxima considerada seja de 60% da  $Q_{mld}$ , enquanto Tucci (2012)

recomenda, nestas mesmas regiões, valores de 60 a 80%, dependendo das condições topográficas.

Com base na recomendação de regularização máxima de 60% da  $Q_{mld}$ , 92,6% dos trechos em que há excedência da vazão máxima permissível para outorga (cor azul claro na Figura 8) atendem a este requisito. Apenas um trecho da hidrografia (cor laranja na Figura 9) apresenta o somatório das  $Q_{dt}$  entre 60 e 100% da  $Q_{mld}$ , neste caso superando até mesmo o limite de 80% da  $Q_{mld}$  recomendado por Tucci (2012) e representando, portanto, um cenário mais preocupante.

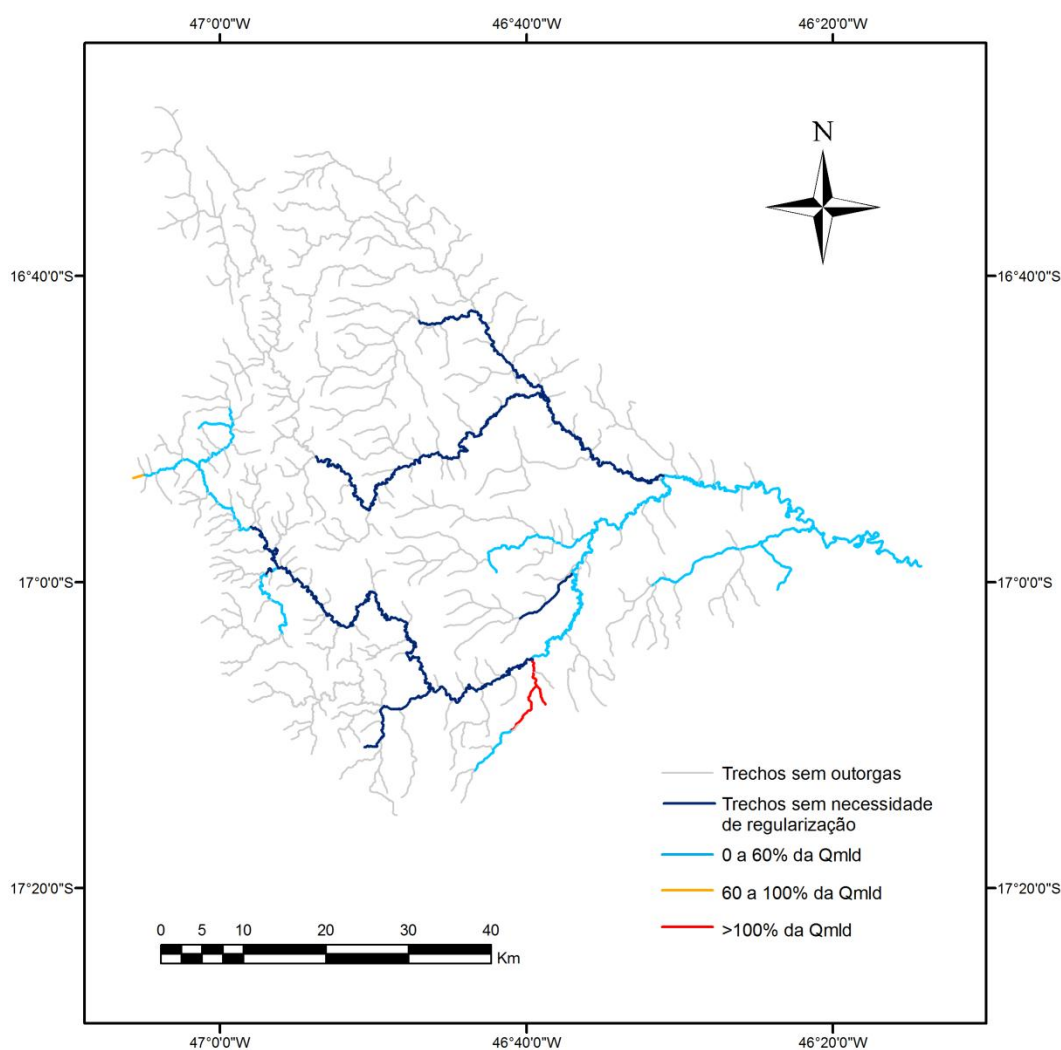


Figura 8 – Porcentagem da vazão média já outorgada considerando as vazões distribuídas no tempo e a garantia de uma vazão residual de 50% da  $Q_{7,10}$  para os meses mais críticos (maio, junho e julho).

#### 4. CONCLUSÕES

Com base nos resultados obtidos neste trabalho chegou-se às seguintes conclusões:

- em condições a fio d'água, 49,3% dos trechos impactados por outorgas apresentaram somatório das vazões demandadas maior que a vazão máxima outorgável, indicando a necessidade de regularização de vazões;

- a construção de reservatórios possibilita o aumento da disponibilidade hídrica tanto pelo efeito decorrente da distribuição das demandas no tempo como do impacto na vazão permissível para outorga em condições de regularização;

- a substituição das vazões superpostas ( $Q_s$ ) por vazões distribuídas no tempo ( $Q_{dt}$ ) possibilitou uma redução da vazão demandada de até 60%, o que equivale a um aumento da potencialidade de utilização dos recursos hídricos na mesma proporção;

- quando da consideração do critério de outorga para barramentos em substituição ao critério de outorga a fio d'água houve um aumento na disponibilidade hídrica que varia de 1390 a 1610 %; e

- quando da avaliação da potencialidade que os dois efeitos advindos da construção de reservatórios têm para atenuar os conflitos pelo uso da água na bacia, mesmo considerando uma regularização teórica de 100% da  $Q_{mld}$ , em 5,9% dos trechos com necessidade de regularização as demandas não poderiam ser atendidas.

#### 5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALBUQUERQUE, J. do P. T. ; RÊGO, J. C. Conceitos e Definições para Avaliação e Gerenciamento Conjunto de Recursos Hídricos Superficiais e Subterrâneos. **Anais do IV Simpósio de Recursos Hídricos do Nordeste**, Campina Grande, 1998.

ARAI, F.K., GONÇALVES, G.G.G., PEREIRA, S.B., COMUNELLO, E., VITORINO, A.C.T., DANIEL, O. Espacialização da precipitação e erosividade na bacia hidrográfica do rio Dourados – MS. **Engenharia Agrícola**, v. 30(5), p. 922-931, 2010.

ASFORA, M. C.; CIRILO, J. A. Reservatórios de regularização: alocação de água para usos múltiplos com diferentes garantias. **Revista de Gestão de Água da América Latina**, v. 2, p.27-38, 2005.

ATLAS DIGITAL DAS ÁGUAS DE MINAS. **Roteiro básico para o dimensionamento de pequenas barragens de terra no estado de MG.** Disponível em: <[http://www.atlasdasaguas.ufv.br/exemplos\\_aplicativos/roteiro\\_dimensionamento\\_barragens.html](http://www.atlasdasaguas.ufv.br/exemplos_aplicativos/roteiro_dimensionamento_barragens.html)>. Acesso em: 20setembro 2012.

AUTORIDAD NACIONAL DEL AGUA (ANA), 2010. **Principales reservorios del Peru, in Infraestructura.** Disponível em: <<http://intranet.ana.gob.pe/snrh/infraestructura/infraestructura.aspx>>. Acesso em: 20setembro 2012.

BRASIL – Governo Federal. MINAS GERAIS; Governo do estado. DISTRITO FEDERAL. **Plano diretor de recursos hídricos da bacia do rio Paracatu – PLANPAR.** [S. I.]: Belo Horizonte, v.1, T.1. 149 p. (CD-ROM), 1996.

CAMPOS, J.N.B., VIEIRA NETO, J., QUEIROZ, E.A. Impacto cumulativo da pequena açudagem: Estudo de caso do açude Várzea do Boi, em Tauá-CE. **Anais do V Simpósio de Recursos Hídricos do Nordeste**, 1, p. 231-237, 2000.

CAMPOS, N. **Dimensionamento de reservatórios: o método do diagrama triangular de regularização.** Fortaleza: Expressão Gráfica e Editora, 2005.

CASTRO, L.M.A., DINIZ, M.G.M., SILVA, A.G. Aplicação do Instrumento da Outorga no Gerenciamento dos Recursos Hídricos em Minas Gerais: A Bacia do Ribeirão Entre Ribeiros. **Anais do VII Simpósio de Recursos Hídricos do Nordeste**, São Luís – MA, 2004.

COLLISCHONN, B., de PAIVA, R.C.D., COLLISCHONN, W., MEIRELLES, F.S. C., SCHETTINI, E.B.C., FAN, F. M. Modelagem hidrológica de uma bacia com uso intensivo de água: caso do rio Quaraí-RS. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 16(4), p. 119-133, 2011.

DE VILLERS, M. **Water the fate of our most precious resource.** Boston, New York: Houghton Mifflin Company, 2000.

DIAGNÓSTICO AMBIENTAL DA SUB-BACIA DO RIBEIRÃO ENTRE RIBEIROS. Paracatu. In: **Irriplan Engenharia Ltda**, 2003.

ERMENEGILDO, L.F.S., PEREIRA, S.B., ARAI, F.K., ROSA, D.B.C.J. Vazão específica e precipitação média na bacia do Ivinhema. **Revista Agrarian**, v. 5 (18), p. 428-432, 2012.

GOMES, L.A.M. **Uso optimal do território da bacia hidrográfica com fundamentos no conceito de geociências agrárias e ambientais – bacia do Ribeirão Entre Ribeiros no vale do rio Paracatu**. 2007. 191p. Dissertação (Mestrado em Evolução Crustal e Recursos Naturais) – Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2007.

GRUPO DE PESQUISA EM RECURSOS HÍDRICOS (GPRH), INSTITUTO MINEIRO DE GESTÃO DAS ÁGUAS (IGAM), Vários colaboradores. **Estudo de regionalização de vazão para o aprimoramento do processo de outorga no Estado de Minas Gerais**. Belo Horizonte: IGAM. 415p. 2012.

GUO, S., ZHANG, H., CHEN, H., PENG, D., LIU, P., PANG, B.A reservoir flood forecasting and control system for China. **Hydrological Sciences–Journal–des Sciences Hydrologiques**, v. 49(6), p.959-972, 2004.

HAAN, C.T., BARFIELD, B.J., HAYES, J.C. **Design Hydrology and Sedimentology for Small Catchments**. California: Academic Press, Inc., 1994.

HUGHES, D. A., HANNART, P. A desktop model used to provide an initial estimate of the ecological instream flow requirements of rivers in South Africa. **Journal of Hydrology**, v. 270, p.167–181, 2003.

KAN, A., DIAS, N.L. Evaporação, evapotranspiração e evaporação líquida no reservatório de Foz do Areia. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 4 (3), p. 29-38, 1999.

KHRAN, F.S., MACIEL, S., DOURADO, T.M. **Transposição de águas e bacias – Aspectos teóricos e conceituais**. Disponível em: < [www.site.uft.edu.br](http://www.site.uft.edu.br)>. Acesso em: 15novembro2012.

LANNA, A. E. Modelos de gerenciamento das águas. **A água em revista**, Belo Horizonte, ano V, n. 8, p. 24-33, 1997.

LI, Y.P., HUANG, G.H., NIE, S.L. Planning water resources management systems using a fuzzy-boundary interval-stochastic programming method. **Advances in Water Resources**, v. 33, p.1105-1117, 2010a.

LI, X., GUO, S., LIU, P., CHEN, G. Dynamic control of flood limited water level for reservoir operation by considering inflow uncertainty. **Journal of Hydrology**, v. 391, p.124-132, 2010b.

LIU, P., GUO, S., XIONG, L., LI, W., ZHANG, H. Deriving Reservoir Refill Operating Rules by Using the Proposed DPNS Model. **Water Resources Management**, v. 20, p.337-357, 2006.

MARTINS, E.S.P.R.; MENESCAL, R.A.; SHERER-WARREN, M.; CARVALHO, M.S.B.S.; MELO, M.S.; PERINI, D.S.; OLIVEIRA, F.A.J. Utilização de imagens CBERS para mapeamento dos espelhos d'água do Brasil. **Anais do XIII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto**. Florianópolis, 2007.

MATONDO, J.I.A comparison between conventional and integrated water resources planning and management. **Physics and Chemistry of the Earth**, v. 27, p.831-838, 2002.

MEDEIROS, M.J., NAGHETTINI, M. Análise da viabilidade de aplicação de um fator de correção anual para o critério da vazão de outorga adotado no estado de Minas Gerais. **Anais do XIV Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos e V Simpósio de Hidráulica e Recursos Hídricos de língua oficial portuguesa**. Aracajú – SE, 2001.

NILSSON, C., REIDY, C.A., DYNESIUS, M., REVENGA, C. Fragmentation and Flow Regulation of the World's Large River Systems. **Science**, v.308, p.405-408, 2005.

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

OLIVEIRA, J. R. S. **Otimização do aproveitamento da disponibilidade de águas superficiais na bacia do Ribeirão Entre Ribeiros**. 2011. 86 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2011.

PEREIRA, S.B., PRUSKI, F.F., SILVA, D.D., RAMOS, M.M. Estudo do comportamento hidrológico do Rio São Francisco e seus principais afluentes. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 11 (6), p. 615-622, 2007.

PEREIRA, S.B., PRUSKI, F.F., SILVA, D.D., RAMOS, M.M. Evaporação Líquida no lago de Sobradinho e impactos no escoamento devido à construção do reservatório. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.13 (3), p. 346-352, 2009.

PRUSKI, F.F.; NUNES, A.A.; PRUSKI, P.L.; RODRIGUEZ, R. del G. Improved regionalization of streamflow by use of the streamflow equivalent of precipitation as an explanatory variable. **Journal of Hydrology**, v. 476, p. 52-71, 2013.

PRUSKI, F.F.; RODRIGUEZ, R.G.; NOVAES, L.F. SILVA, D.D.; RAMOS, M.M.; TEIXEIRA, A.F. Impacto das vazões demandadas pela irrigação e pelos abastecimentos animal e humano, na bacia do Paracatu. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 11(2), p.199-210, 2007.

SCHULTZ, B., De WRACHIEN, A. Irrigation and drainage systems research and development in the 21st century. **Irrigation and Drainage**. v.51, p. 311–327, 2002.

SMAKHTIN, V.U. Low flow hydrology: a review. **Journal of Hydrology**, v.240, p.147-186, 2001.

SONG, J.X., XU, Z.X., LIU, C.M., LI, H.E. Ecological and environmental instream flow requirements for the Wei River - the largest tributary of the Yellow River. **Hydrological Processes**, v.21, p.1066–1073, 2007.

SWIECH, T., ERTSEN, M. W., PERERYA, C.M. Estimating the impacts of a reservoir for improved water use in irrigation in the Yarabamba region, Peru. **Physics and Chemistry of the Earth**, v. 47-48, p. 64-75, 2012.

TUCCI, C.E.M. **Regularização de vazões**. Notas de aula. Universidade Federal do Rio Grande do sul, Porto Alegre. Disponível em: < <http://www.ppt2txt.com/r/fe6108ee/>>. Acesso em: 15novembro2012

XU, Z.X., ITO, K., LIAO, S., WANG, L. Incorporating inflow uncertainty into riskassessment for reservoir operation. **Stochastic Hydrology and Hydraulics**, v.11 (5), p.433–448, 1997.

XU, Y., ZHANG, M., WANG, L., KONG, L., CAI, Q. Changes in water types under the regulated mode of water level in Three Gorges Reservoir, China. **Quaternary International**, v. 244 , p.272-279, 2011.

YUN, R., SINGH, V.P. Multiple duration limited water level and dynamic limited water level for flood control, with implications on water supply. **Journal of Hydrology**, v. 354, p.160– 170, 2008.

ZHAO, R., CHEN, S. Fuzzy pricing for urban water resources: Model construction and application. **Journal of Environmental Management**, v. 88, p.458–466, 2008.

## **ARTIGO II**

**Dimensionamento de reservatórios para o controle de  
estiagem: método das diferenças acumuladas modificado**

## **DIMENSIONAMENTO DE RESERVATÓRIOS PARA O CONTROLE DE ESTIAGEM: MÉTODO DAS DIFERENÇAS ACUMULADAS MODIFICADO**

**RESUMO** - Os gestores de recursos hídricos têm buscado, cada vez mais, o aprimoramento das técnicas de dimensionamento de reservatórios. Na ótica da simplicidade, sem fugir a uma base técnico-científica, o método das diferenças acumuladas é um método expressivamente difundido, mas com limitações referentes à dependência em relação às características da base de dados disponível. Deste modo, objetivou-se com o presente trabalho, a proposição de modificações no método das diferenças acumuladas que permitam superar as limitações referentes à dependência do ano de início da série histórica e à impossibilidade de associar a capacidade do reservatório a um período de retorno. A fim de alcançar a independência do ano de início da série histórica foi proposta a criação de séries sintéticas e visando associar a capacidade do reservatório a um fator de frequência (período de retorno) se aplicou a distribuição de Gumbel aos valores de capacidade estimados a partir destas séries. Considerando valores de  $\beta$  (proporção da vazão média a ser regularizada) maiores ou iguais a 0,75 a criação de séries sintéticas foi de grande eficiência para superar as limitações referentes à dependência do ano de início da série histórica, assim como a associação da capacidade do reservatório a períodos de retorno maiores ou iguais ao número de anos das séries de dados foi de grande aplicabilidade.

**Palavras chave** – Regularização de vazões, séries sintéticas, período de retorno

**ABSTRACT** – The water managers have increasingly sought improvements in the techniques of sizing reservoirs. In the perspective of simplicity, without escaping at a technical-scientific basis, the accumulated difference method is an expressively diffused method, but with limitations regarding the dependence on the characteristics of the available database. Thus, the objective of the present work was to propose modifications in accumulated differences method to overcome the limitations related to the dependence of the database start year and the impossibility to combine the reservoir capacity to a return period. In order to achieve the independence from database start year was proposed the creation of synthetic series and aiming to associate the reservoir capacity to a frequency factor (return period) was applied the Gumbel distribution to the capacity values estimated from these series. Considering  $\beta$  values (proportion of the average streamflow to be regularized) greater than or equal to 0.75 the creation of

synthetic series was of great efficiency to overcome the limitations related to the dependence of database start year, as well as the association of the reservoir capacity to return periods greater than or equal the number of years of database was of great applicability.

**Keywords** – Streamflow regularization, synthetic series, return period

## 1. INTRODUÇÃO

A escassez de água e seus impactos na produção agrícola e segurança alimentar são uma preocupação crescente em todo o mundo (FORCH, 2000; BERBEL e GOMEZ-LIMON, 2000; AHMAD, 2000; COSGROVE e RIJSBERMAN, 2000; YANG et al., 2003). Aproximadamente 80% da população mundial está exposta a ameaças expressivas no que se refere a níveis aceitáveis de quantidade e qualidade da água (VÖRÖSMARTY et al., 2010).

Em situações em que a disponibilidade hídrica natural (a fio d'água) não é suficiente para suprir as demandas existe a possibilidade de aumento da disponibilidade pelo aproveitamento do potencial de regularização de vazão nos cursos d'água. O uso de práticas de regularização é uma das medidas mais eficazes para promover o desenvolvimento sustentável e otimizar a gestão dos recursos hídricos (GUO et al., 2004; LI et al., 2010).

A construção de reservatórios é uma ferramenta essencial para a gestão de recursos hídricos escassos, uma vez que aumenta a disponibilidade de água em períodos menos chuvosos (OWEIS; HACHUM, 2006; WISSER et al., 2010). Os reservatórios desempenham um papel importante na modificação da distribuição desigual da água no espaço e no tempo (WURBS, 1993; NANDALAL; SAKTHIVADIVEL, 2002). Um dos propósitos da sua implantação é aumentar a vazão disponível para aumentar a garantia de abastecimento de água (KOMATSU et al., 2010).

Estudos de dimensionamento e planejamento de sistemas de reservatórios são normalmente baseados nos registros históricos de vazões dos rios (COSER, 2011). Na teoria do dimensionamento de reservatórios vários métodos podem ser encontrados, sendo classificados, segundo Yevjevich (1967), como empíricos, analíticos e experimentais.

Os métodos empíricos são baseados no estudo de períodos críticos da série histórica. Classificam-se como analíticos os métodos que assumem que as vazões seguem uma dada lei de probabilidade (log-normal, gama, modelos auto-regressivos, etc) e estimam o desempenho do reservatório através de cálculos analíticos. Esses métodos apresentam como limitação a impossibilidade de tratarem regras de operação complexas. Os métodos experimentais assumem que as vazões seguem uma certa lei de probabilidade, geram séries sintéticas de vazões e executam a operação simulada do reservatório. Para esses métodos, a capacidade do reservatório é uma variável aleatória, sendo que a limitação do seu uso consiste no esforço computacional requerido (CAMPOS, 2005).

O primeiro grande marco no dimensionamento de reservatórios para o controle de estiagem é atribuído a Rippl (1883), que propôs o diagrama de massas (PHATARFOD, 1989; LLOYD, 1993; CASTELLETTI et al., 2008; HAMED, 2009; COSER, 2011), que é definido como a integral da hidrógrafa, correspondendo a um diagrama de volumes acumulados. O método é empírico e se baseia unicamente em registros históricos (RAHEEM; KHAN, 2002).

Outra proposta para o estudo de reservatórios foi feita por Moran em 1954 (LLOYD, 1993). Baseado na hipótese de retratar a natureza dos rios intermitentes no Norte da Austrália, Moran desenvolveu a teoria do armazenamento. A teoria admite que o volume estocado por um reservatório segue uma cadeia Markoviana para, a partir desse conceito, calcular as probabilidades de esvaziamento dos reservatórios (FARIAS, 2003).

Em termos de métodos experimentais, com larga aplicação no dimensionamento de reservatórios, têm-se as simulações de Monte Carlo (YEVJEVICH, 1967). O método consiste em admitir que os deflúvios seguem uma determinada lei de probabilidade e, a partir daí, gera dados sintéticos de vazões e simula a operação do reservatório. A análise do desempenho do reservatório na simulação fornece os elementos necessários à tomada de decisão sobre a capacidade de projeto. A grande vantagem dessa linha é a extrema versatilidade da técnica de simulação que permite analisar uma grande amplitude de regras que possam ser utilizadas para operação de um reservatório (FARIAS, 2003).

Yevjevich (1967) salienta que a tendência geral no dimensionamento de reservatórios é a aplicação de métodos experimentais com o auxílio de métodos analíticos, pois estes podem reduzir os esforços computacionais dos primeiros. De fato

os métodos experimentais continuam ganhando espaço, porém muitos estudos ainda se resumem aos métodos empíricos (CAMPOS, 2005).

Os estudos hidrológicos devem ser suficientemente compreensíveis para que profissionais não especializados na área possam analisá-los e participar do processo decisório. Na ótica da simplicidade, sem fugir a uma base técnico-científica, existem diversos métodos para dimensionamento de reservatórios. Dentre estes, o “método das diferenças acumuladas”, conforme apresentado em Lanna (2012), calcula a capacidade mínima do reservatório para atender a uma certa equação de regularização pela diferença entre o volume que seria necessário para atender à vazão requerida no período mais crítico de estiagem e o volume que aflui ao reservatório no mesmo período. Considerando vários períodos de estiagem, o mais crítico é aquele que resulta na maior capacidade do reservatório. O método se baseia, portanto, no estudo de períodos críticos da série histórica.

Algumas limitações associadas ao método das diferenças acumuladas são a forte dependência deste em relação ao ano de início da série histórica disponível, assim como da extensão desta, e o fato de não permitir associar a capacidade do reservatório a um fator de frequência (período de retorno). A desvantagem de se projetar reservatórios baseado em registros de dados históricos é que uma única estimativa da capacidade é obtida. Tal abordagem não dá uma medida de risco (XU et al., 1997). A extrema dependência à base de dados disponível, muitas vezes, limita a aplicação do método.

Deste modo, o presente trabalho foi fundamentado na hipótese de que a simplicidade e a base técnico-científica do método das diferenças acumuladas aliadas a uma menor dependência em relação às características da base de dados disponível podem fazer deste um método mais abrangente. O trabalho foi desenvolvido visando a proposição de modificações no método das diferenças acumuladas, que permitam superar as limitações referentes à dependência do ano de início da série histórica e à impossibilidade de associar a capacidade do reservatório a um período de retorno.

## **2. MATERIAL E MÉTODOS**

### **2.1. Método das diferenças acumuladas**

A estimativa do volume necessário para regularização de uma determinada vazão ocorre pela análise da necessidade de armazenamento para que uma vazão

regularizada possa ser mantida a jusante do reservatório. Para tanto, é utilizada uma equação de regularização do tipo

$$\beta = \frac{Q_r}{\bar{Q}} \quad (1)$$

em que:

$$\begin{aligned} \beta &= \text{proporção da vazão média a ser regularizada, adimensional;} \\ Q_r &= \text{vazão regularizada, m}^3\text{s}^{-1}; \text{ e} \\ \bar{Q} &= \text{vazão média no período considerado, m}^3\text{s}^{-1}. \end{aligned}$$

De acordo com Lanna (2012) o método das diferenças acumuladas calcula a menor capacidade útil de um reservatório que atenda a maior demanda de água possível, num determinado período de anos. A capacidade mínima do reservatório para atender a certa equação de regularização é dada pela diferença entre o volume que seria necessário para atender à vazão requerida no período mais crítico de estiagem ( $V_n$ ) e o volume que aflui ao reservatório no mesmo período ( $V_a$ ). Considerando vários períodos de estiagem, o mais crítico é aquele que resulta na maior capacidade do reservatório. Assim, pode-se calcular a capacidade do reservatório para vários períodos de estiagem e adotar a maior capacidade encontrada. A capacidade mínima do reservatório (CR), em  $m^3$ , para manter a equação de regularização é:

$$CR = V_n - V_a \quad (2)$$

Como principais limitações associadas ao método pode-se citar: o método se baseia apenas nos registros já existentes de séries históricas, estando, dessa forma, fortemente dependente do ano de início das séries, assim como, da extensão destas; e o fato de não permitir associar a capacidade do reservatório a um fator de frequência (período de retorno).

## 2.2. Modificações no método das diferenças acumuladas

Considerando as limitações relacionadas ao método, algumas adaptações foram propostas visando minimizar a dependência em relação às características dos registros



### 2.2.2.1. Distribuição de Gumbel

Visando associar a capacidade do reservatório a um fator de frequência (período de retorno) se aplicou a distribuição de Gumbel aos “N” valores de capacidade do reservatório calculados pelo método das diferenças acumuladas.

Segundo Kite (1988), a magnitude do evento para séries finitas é dada por

$$x = \mu + \frac{\sigma_x}{\sigma_n} (y - y_{"N"}) \quad (1)$$

em que:

- x = capacidade do reservatório com período de retorno T, m<sup>3</sup>;
- μ = média dos valores de capacidade do reservatório, m<sup>3</sup>;
- σ<sub>x</sub> = desvio padrão dos valores de capacidade do reservatório, m<sup>3</sup>;
- σ<sub>n</sub> = desvio padrão da variável y;
- y = variável reduzida; e
- y<sub>"N"</sub> = média da variável reduzida para “N” valores de capacidade do reservatório.

sendo

$$y = -\ln \left[ -\ln \left( 1 - \frac{1}{T} \right) \right] \quad (2)$$

em que T é o período de retorno, anos.

Na aplicação do método de Gumbel existe o pressuposto de independência dos dados. Esse pressuposto não se verifica em muitos casos práticos, mas é comumente admitido em estudos, pois além de permitir uma maior facilidade dos cálculos, fornece resultados próximos aos que seriam obtidos caso a independência dos dados fosse considerada (BELITSKY; MOREIRA, 2007).

No presente caso se evidenciou uma grande repetição dos valores de capacidade do reservatório estimados a partir das séries sintéticas, fato esperado uma vez que os dados das séries sintéticas originaram-se da mesma série histórica e que fez com que o desvio padrão da série de capacidades do reservatório fosse muito baixo. Com isto o valor de capacidade do reservatório estimado por Gumbel, e associado a um período de retorno T igual ao número de anos (N) da série, foi superior ao máximo valor de

capacidade encontrado quando da análise das N séries de dados pelo método das diferenças acumuladas.

Em decorrência deste fato se inseriu um fator de correção que permite manter a proporcionalidade entre os valores de capacidade de reservatório associados aos diferentes períodos de retorno.

#### **2.2.2.2. Fator de correção para o período de retorno de interesse**

Para o cálculo do fator de correção foi considerada a relação entre o valor de capacidade do reservatório estimado pela distribuição de Gumbel para o período de retorno T de interesse e o valor de capacidade estimado para o período de retorno T igual a N anos da série, conforme a equação

$$FC_T = \frac{CR_T}{CR_{TN}} \quad (3)$$

em que:

- $FC_T$  = fator de correção para o período de retorno T de interesse, adimensional;
- $CR_T$  = capacidade do reservatório estimada por Gumbel para o período de retorno T de interesse,  $m^3$ ; e
- $CR_{TN}$  = capacidade do reservatório estimada por Gumbel para o período de retorno T igual a N anos da série,  $m^3$ .

#### **2.2.2.3. Cálculo da capacidade do reservatório para o período de retorno de interesse**

A capacidade do reservatório para o período de retorno de interesse foi obtida com o produto da maior capacidade do reservatório estimada a partir das séries de dados (série histórica original e séries sintéticas) pelo fator de correção calculado para o período de retorno de interesse, conforme a equação

$$CR_{Ti} = CR_{m\acute{a}x} FC_T \quad (4)$$

em que:

- $CR_{Ti}$  = capacidade do reservatório para o período de retorno T de interesse,  $m^3$ ; e

$CR_{\text{máx}}$  = maior capacidade do reservatório estimada a partir das N séries de dados (série histórica original e séries sintéticas),  $m^3$ .

### 2.3. Estudo de caso

Foram utilizadas no estudo as séries de dados históricos consistidos de duas estações fluviométricas pertencentes à bacia do ribeirão Entre Ribeiros e de outras seis estações fluviométricas situadas na bacia do rio Preto (Tabela 1 e Figura 2). As estações fluviométricas são pertencentes à rede hidrometeorológica da Agência Nacional de Águas (ANA).

Após a obtenção das séries históricas de cada estação foi feita a análise de disponibilidade de dados em cada ano e, com base nesta análise, foi escolhido um período comum de estudo, denominado período base, que abrange a menor quantidade de falhas nas séries históricas. O período base adotado foi de 1968 a 2005. No Apêndice B estão apresentados os diagramas de barras das estações em estudo.

Tabela 1 - Estações fluviométricas utilizadas no estudo

Código	Estação	Longitude (Oeste)	Latitude (Sul)	Curso d'água
42435000	Fazenda Barra da Égua	46°35'12"	16°52'28"	Ribeirão Barra da Égua
42440000	Fazenda Poções	46°49'04"	17°02'31"	Ribeirão São Pedro
42460000	Fazenda Limeira	47°13'58"	16°12'35"	Rio Preto
42490000	Unai	46°52'48"	16°20'58"	Rio Preto
42540000	Santo Antônio do Boqueirão	46°43'16"	16°31'47"	Rio Preto
42545500	Fazenda o Resfriado	46°39'46"	16°30'10"	Ribeirão Roncador
42546000	Fazenda Santa Cruz	46°44'52"	16°08'06"	Rio Salobro
42600000	Porto dos Poções	46°21'26"	16°50'23"	Rio Preto

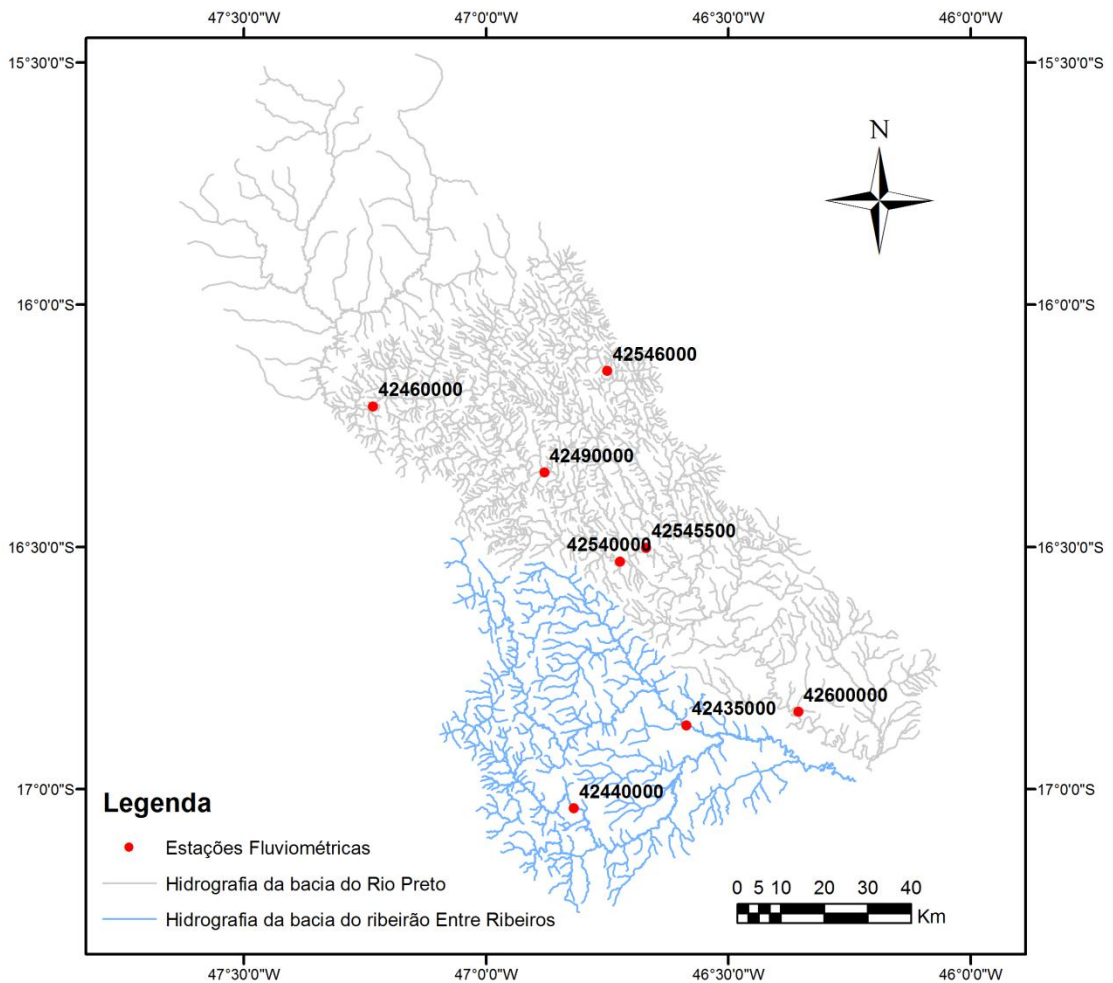


Figura 2 - Localização das estações fluviométricas utilizadas no estudo.

Considerando as séries históricas de vazões das oito estações em estudo, o método das diferenças acumuladas modificado foi aplicado, sendo analisados valores de  $\beta$  iguais a 0,25, 0,50, 0,75 e 1,0.

### 3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

#### 3.1. Método das diferenças acumuladas modificado: exemplo numérico

A fim de apresentar os resultados de cada uma das etapas do método das diferenças acumuladas modificado foi utilizada, como exemplo, a estação fluviométrica 42546000.

### 3.1.1. Geração das séries sintéticas

O período base pré-determinado para a estação em estudo foi de 1968 a 2005. Porém, devido às falhas identificadas na série histórica, alguns anos foram desconsiderados para a geração das séries sintéticas, sendo eles: 1968, 1969, 1970, 1971, 1972, 1973 e 1974 e 2003 (esta análise pode ser identificada no diagrama de barras que se encontra no Apêndice B). Foram geradas, portanto, para a estação 42546000 um total de 30 séries, sendo a primeira série correspondente à série histórica original (1975 - 2005) e as outras 29 séries correspondentes às séries sintéticas.

### 3.1.2. Determinação da capacidade do reservatório

Na Tabela 2 são apresentadas as capacidades do reservatório obtidas para cada  $\beta$  a partir das séries de dados (série histórica original e séries sintéticas). Foram destacados com a cor cinza os valores de capacidade que apresentaram grande número de repetições (diferenças entre os valores de até 0,5% foram desconsideradas).

Analisando a Tabela 2 é possível perceber a tendência de muitos valores de capacidade do reservatório iguais ou próximos entre si. Esta tendência era esperada uma vez que os dados das séries sintéticas originaram-se da mesma série histórica. Porém nota-se que a semelhança dos valores de capacidade diminui com o aumento dos valores de  $\beta$  (porcentagem da vazão média regularizada).

Para  $\beta = 1$  e considerando a série histórica original (método das diferenças acumuladas) a capacidade do reservatório obtida foi de 746,1 hm<sup>3</sup>, valor correspondente a 93% do maior valor de capacidade da série (valor também mais frequente), o que tenderia a promover uma insuficiência do reservatório para atender à vazão requerida com uma frequência superior à esperada.

Embora já existam diferenças de valores de capacidade do reservatório a partir de  $\beta = 0,5$ , estas diferenças passam a ser mais expressivas a partir de  $\beta = 0,75$ . Desta forma, buscando uma melhor aplicabilidade da distribuição de Gumbel, as análises posteriores foram realizadas para  $\beta = 0,75$  e  $\beta = 1$ .

Tabela 2 - Capacidades dos reservatórios obtidas para cada  $\beta$  a partir das séries sintéticas geradas.

Estação Fluviométrica 42546000 Séries	Valores de $\beta$				
	0,25	0,50	0,75	1,00	
	<b>Capacidade do reservatório (hm<sup>3</sup>)</b>				
1975 - 2005	13,9	61,7	272,4	746,1	*
1976 - 1975	13,9	61,7	272,4	746,1	
1977 - 1976	13,9	61,6	272,2	746,0	
1978 - 1977	13,9	61,6	272,2	801,3	
1979 - 1978	13,9	61,6	272,2	801,3	
1980 - 1979	13,9	61,6	272,2	801,3	
1981 - 1980	13,9	61,6	272,1	801,0	
1982 - 1981	13,9	61,6	272,1	801,0	
1983 - 1982	13,9	61,6	272,1	801,0	
1984 - 1983	13,9	61,6	272,1	801,0	
1985 - 1984	13,9	61,6	272,1	801,1	
1986 - 1985	13,9	61,6	272,1	801,1	
1987 - 1986	13,9	61,6	272,1	801,1	
1988 - 1987	13,9	61,6	272,1	801,1	
1989 - 1988	13,9	61,6	272,2	801,1	
1990 - 1989	13,9	61,6	272,2	801,1	
1991 - 1990	13,9	61,6	272,2	801,1	
1992 - 1991	13,9	61,6	272,2	801,1	
1993 - 1992	13,9	61,6	272,1	800,9	
1994 - 1993	13,9	61,6	272,1	800,9	
1995 - 1994	13,9	61,6	272,1	770,3	
1996 - 1995	13,9	61,6	250,3	705,9	
1997 - 1996	13,9	61,6	236,4	618,9	
1998 - 1997	13,9	61,6	231,7	528,3	
1999 - 1998	13,9	61,6	231,7	502,0	
2000 - 1999	13,9	61,6	217,3	429,8	
2001 - 2000	13,8	49,1	160,1	481,3	
2002 - 2001	13,8	56,5	211,4	627,8	
2004 - 2002	13,8	61,4	267,3	749,0	
2005 - 2004	13,8	61,4	267,3	749,0	

\* Valor obtido considerando a série original (método das diferenças acumuladas)

### 3.1.2.1. Distribuição de Gumbel

Na Tabela 3 são apresentados os valores de capacidade do reservatório obtidos pela distribuição de Gumbel para períodos de retorno de 30, 40, 50 e 100 anos e para  $\beta = 0,75$  e  $\beta = 1$ . Foram considerados apenas períodos de retorno maiores que a extensão das séries uma vez que a regularização de valores superiores a 75% da  $Q_{mld}$  está,

normalmente, associada a reservatórios de maior porte e, portanto, planejados com maior segurança (consideração de período de retorno maior).

Tabela 3 - Capacidades do reservatório obtidas pela distribuição de Gumbel para períodos de retorno de 30, 40, 50 e 100 anos e para  $\beta = 0,75$  e  $\beta = 1$ .

Valores de $\beta$	Período de retorno (T)			
	30	40	50	100
	Capacidade do reservatório - CR <sub>T</sub> (hm <sup>3</sup> )			
0,75	327,6	334,5	339,8	356,3
1	1017,9	1047,0	1069,5	1139,1

Considerando  $\beta = 0,75$  os valores de capacidade do reservatório variam, conforme o período de retorno (30 a 100 anos), de 327,6 a 356,3 hm<sup>3</sup> e, para  $\beta = 1$ , variam de 1017,9 a 1139,1 hm<sup>3</sup>. Quando analisados os valores de capacidade estimados a partir das séries de dados (Tabela 2) têm-se um valor máximo de 272,4 hm<sup>3</sup> para  $\beta = 0,75$  e de 801,3 hm<sup>3</sup> para  $\beta = 1$ . A diferença do valor estimado pela distribuição de Gumbel para o período de retorno igual a N anos da série (T = 30) em relação ao máximo valor de capacidade estimado a partir das séries sintéticas é, portanto, bastante evidente, sendo de 20% para  $\beta = 0,75$  e de 27% para  $\beta = 1$ . Esta diferença pode ser justificada pelo baixo desvio padrão que se obteve da série de capacidades (Tabela 2) e também pelo fato de não estar sendo respeitado o princípio de independência dos dados.

Para superar esta limitação e visando, também, a preservação da proporcionalidade dos valores de capacidade do reservatório associados aos diferentes períodos de retorno foi inserido o fator de correção.

### 3.1.2.2. Fator de correção para o período de retorno de interesse

Na Tabela 4 são apresentados os fatores de correção para períodos de retorno de 30, 40, 50 e 100 anos, considerando  $\beta = 0,75$  e  $\beta = 1$ .

Tabela 4 - Fatores de correção para períodos de retorno de 30, 40, 50 e 100 anos, considerando  $\beta = 0,75$  e  $\beta = 1$ .

Valores de $\beta$	Período de retorno (T)			
	30	40	50	100
	Fator de correção - FC			
0,75	1	1,021	1,037	1,088
1	1	1,028	1,051	1,119

Analisando a Tabela 4 é possível perceber que os fatores de correção calculados para períodos de retorno maiores de 30 anos estão mantendo uma proporção em relação a este, sendo esta proporção necessária para a consideração do período de retorno no cálculo da capacidade do reservatório.

### 3.1.2.3. Cálculo da capacidade do reservatório para o período de retorno de interesse

Na Tabela 5 são apresentadas as capacidades do reservatório para períodos de retorno iguais a 30, 40, 50 e 100 anos, considerando  $\beta = 0,75$  e  $\beta = 1$ .

Tabela 5 - Capacidade do reservatório para T igual a 30, 40, 50 e 100 anos, considerando  $\beta = 0,75$  e  $\beta = 1$ .

Valores de $\beta$	Período de retorno (T)			
	30	40	50	100
	Capacidade do reservatório - $CR_{Ti}$ (hm <sup>3</sup> )			
0,75	272,4	278,1	282,5	296,4
1	801,3	823,7	842,2	896,6

Considerando que as séries utilizadas para o cálculo dos “N” valores de capacidade do reservatório possuem 30 anos de dados, observa-se que para o período de retorno de 30 anos o valor de capacidade do reservatório calculado é igual ao máximo valor de capacidade estimado a partir das séries de dados (série histórica original e séries sintéticas), ou seja, o fator de correção proposto permitiu não só manter a proporção entre os valores de capacidade conforme o período de retorno associado, como também eliminar a defasagem observada quando da aplicação da distribuição de Gumbel.

Quando da comparação dos valores de capacidade do reservatório obtidos pelo método das diferenças acumuladas modificado com os valores obtidos pelo método das diferenças acumuladas (primeira linha da Tabela 2) nota-se que, para  $\beta = 0,75$  e  $T = N$  anos da série ( $T = 30$ ) os valores de capacidade estimados são iguais. Analisando os valores de capacidade associados a períodos de retorno maiores que o número de anos (N) da série, as diferenças variam de 2%, para  $T = 40$ , a 9%, para  $T = 100$ .

Diferentemente do que acontece para  $\beta = 0,75$ , para  $\beta = 1$  os valores de capacidade do reservatório estimados pelo método das diferenças acumuladas e pelo método das diferenças acumuladas modificado considerando  $T = N$  anos da série não

são iguais. De forma geral, para  $\beta = 1$ , as diferenças dos valores de capacidade estimados pelos métodos de variam de 7%, para  $T = 30$ , a 20%, para  $T = 100$ .

### 3.2. Resultados para as estações estudadas

A fim de analisar os resultados para as estações estudadas são apresentados nas Figuras 3 a 6 cenários comparativos entre as capacidades de reservatório estimadas pelo método das diferenças acumuladas e pelo método das diferenças acumuladas modificado. Considerando que o método das diferenças acumuladas se baseia apenas na série histórica original, apenas uma estimativa de capacidade do reservatório foi obtida para  $\beta = 0,75$  e para  $\beta = 1,0$ , sendo os valores estimados representados por uma reta denominada MDA. Dentre os “N - 1” valores de capacidade estimados a partir das séries sintéticas, o menor foi representado pela reta  $CR_{\min}$ . Os valores de capacidade do reservatório estimados pelo método das diferenças acumuladas modificado para diferentes períodos de retorno foram representados por uma curva denominada MDAM.

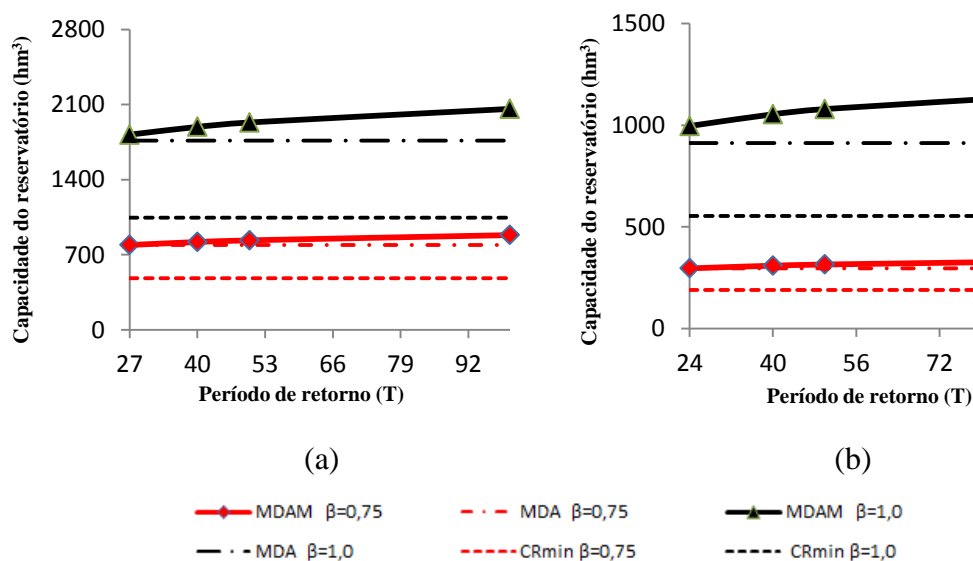


Figura 3- Valores de capacidade do reservatório estimados pelo método das diferenças acumuladas (MDA) e pelo método das diferenças acumuladas modificado (MDAM) e o menor valor de capacidade estimado a partir das séries sintéticas ( $CR_{\min}$ ) para as estações 42435000 (a) e 42440000 (b), considerando  $\beta = 0,75$  e  $\beta = 1$ .

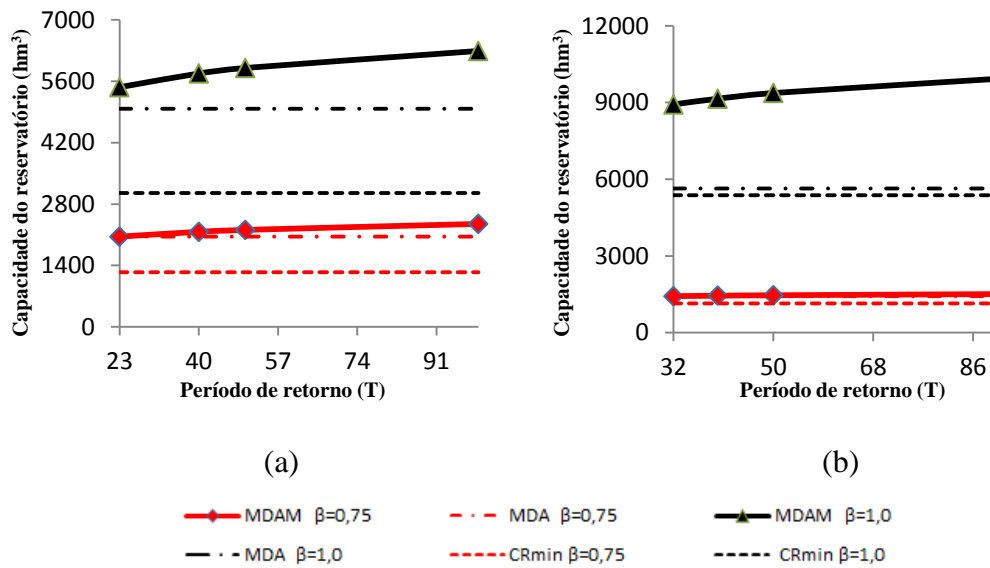


Figura 4- Valores de capacidade do reservatório estimados pelo método das diferenças acumuladas (MDA) e pelo método das diferenças acumuladas modificado (MDAM) e o menor valor de capacidade estimado a partir das séries sintéticas ( $CR_{\min}$ ) para as estações 42460000 (a) e 42490000 (b), considerando  $\beta = 0,75$  e  $\beta = 1$ .

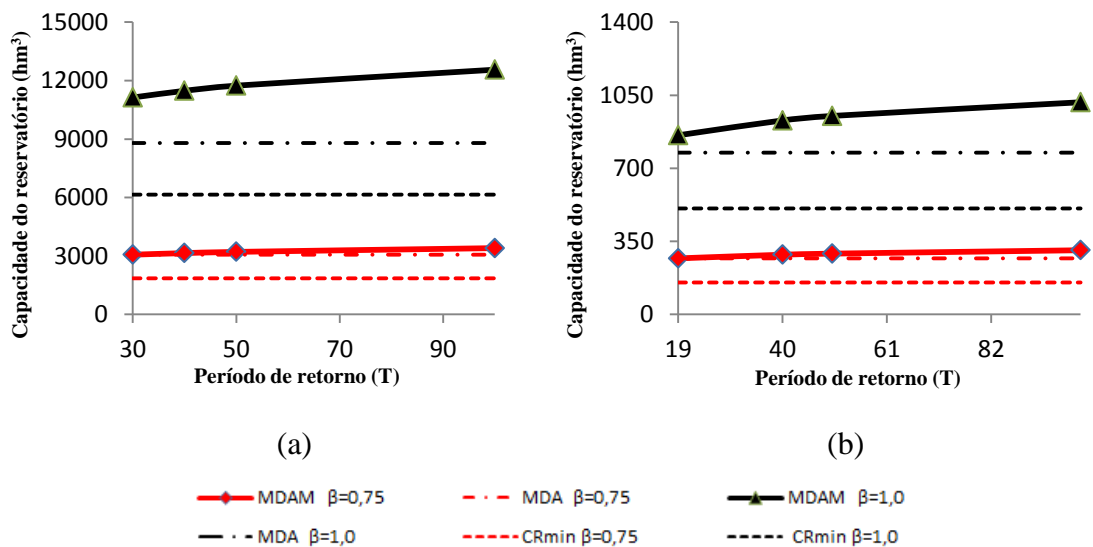


Figura 5- Valores de capacidade do reservatório estimados pelo método das diferenças acumuladas (MDA) e pelo método das diferenças acumuladas modificado (MDAM) e o menor valor de capacidade estimado a partir das séries sintéticas ( $CR_{\min}$ ) para as estações 42540000 (a) e 42545500 (b), considerando  $\beta = 0,75$  e  $\beta = 1$ .

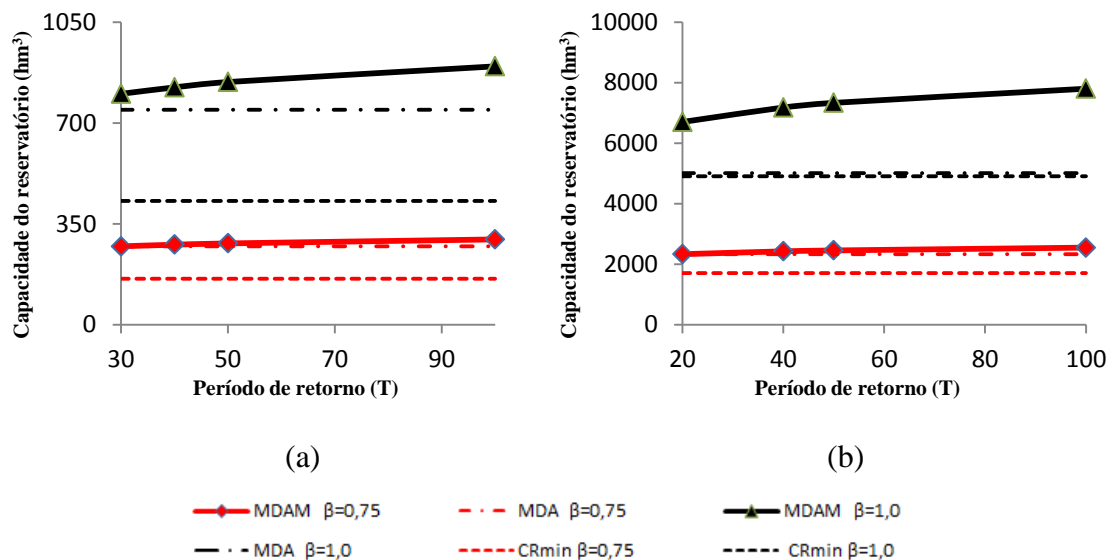


Figura 6- Valores de capacidade do reservatório estimados pelo método das diferenças acumuladas (MDA) e pelo método das diferenças acumuladas modificado (MDAM) e o menor valor de capacidade estimado a partir das séries sintéticas (CR<sub>mín</sub>) para as estações 42546000 (a) e 42600000 (b), considerando  $\beta = 0,75$  e  $\beta = 1$ .

Analisando a Figura 3a (estação 42435000) é possível observar que para  $\beta = 0,75$  o menor valor de capacidade do reservatório estimado a partir das séries sintéticas é 39% menor que o valor de capacidade estimado pelo método das diferenças acumuladas (série histórica original). Considerando esta mesma análise para as outras estações se evidencia que a diferença de CR<sub>mín</sub> em relação à capacidade estimada pelo MDA varia de -20 a -43%. Diferentes combinações na sequência de ocorrência de vazões demonstram, nesse caso, o risco de insuficiência de um reservatório para regularizar a vazão pretendida. As diferenças entre os valores de capacidade do reservatório estimados a partir da série histórica original e a partir das séries sintéticas representam, de forma clara, a sensibilidade do método à mudança do ano de início da série.

Quando da consideração do efeito da associação dos valores de capacidade do reservatório a diferentes períodos de retorno (MDAM) nota-se que, para  $T = N$  anos da série e  $\beta = 0,75$  os valores de capacidade do reservatório estimados pelo método das diferenças acumuladas e pelo método das diferenças acumuladas modificado são iguais. Analisando os valores de capacidade associados a períodos de retorno maiores que o

número de anos (N) da série, para a estação 42435000 as diferenças em relação ao valor estimado pelo método das diferenças acumuladas variam de 4%, para  $T = 40$ , a 12%, para  $T = 100$ . Quando da análise das outras estações, estas diferenças variam de 1 a 7%, para  $T = 40$ , e de 6 a 14%, para  $T = 100$ .

Para  $\beta = 1$ , a estação 42435000 apresentou uma diferença de - 41% entre o menor valor de capacidade do reservatório estimado a partir das séries sintéticas e o valor de capacidade estimado pelo método das diferenças acumuladas. Para as outras estações esta diferença variou de - 2 a - 42%, caracterizando, mais uma vez, o efeito que a mudança do ano de início da série pode acarretar na estimativa da capacidade do reservatório.

Analisando a associação da capacidade do reservatório a diferentes períodos de retorno é possível perceber que para  $\beta = 1$  os resultados são ainda mais expressivos que os obtidos para  $\beta = 0,75$ . Considerando a estação 42435000 os valores de capacidade associados a períodos de retorno maiores que o número de anos (N) da série apresentam diferenças em relação ao valor estimado pelo método das diferenças acumuladas que variam de 7%, para  $T = 40$ , a 17%, para  $T = 100$ . Quando da análise das outras estações, estas diferenças variam de 10 a 62%, para  $T = 40$ , e de 20 a 78%, para  $T = 100$ .

Diferentemente do que acontece para  $\beta = 0,75$ , para  $\beta = 1$  os valores de capacidade do reservatório estimados pelo método das diferenças acumuladas e pelo método das diferenças acumuladas modificado considerando  $T = N$  anos da série não são iguais. As diferenças entre estes valores variam, considerando todas as estações, de 3 a 58%.

#### **4. CONCLUSÕES**

As modificações propostas para o método das diferenças acumuladas mostraram-se de pouca aplicabilidade para valores de  $\beta$  menores que 0,75. No entanto, para valores de  $\beta$  maiores ou iguais a 0,75 a criação de séries sintéticas foi de grande eficiência para superar as limitações referentes à dependência do ano de início da série histórica, assim como a associação da capacidade do reservatório a períodos de retorno maiores ou iguais ao número de anos das séries de dados foi de grande expressividade para a estimativa de valores mais representativos.

## 5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AHMAD, M. Water pricing and markets in the Near East: policy issues and options. **Water Policy**, v. 2 (3), p. 229–242, 2000.

BELITSKY, V., MOREIRA, F. M. **Emprego do método “Peaks-Over-Threshold” na estimação de risco; uma exposição abrangente, detalhada mas simples**. Instituto de Matemática e Estatística, Universidade de São Paulo, 2007.

BERBEL, J., GOMEZ-LIMON, J. The impact of water-pricing policy in Spain: an analysis of three irrigated areas. **Agricultural Water Management**, v. 43, p. 219–238, 2000.

CAMPOS, N. **Dimensionamento de reservatórios: o método do diagrama triangular de regularização**. Fortaleza: Expressão Gráfica e Editora, 2005.

CASTELLETTI, A., PIANOSI, F., SONCINI-SESSA, R. Water reservoir control under economic, social and environmental constraints. **Automatica**, v. 44, p. 1595–1607, 2008.

COSER, M.C. **Modelagem estocástica de séries mensais apresentando dependência de longo termo para dimensionamento de reservatórios de regularização**. 2011. 373 p. Tese (Doutorado em Engenharia Ambiental) - Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória, 2011.

COSGROVE, W., RIJSBERMAN, F. **Making Water Everybody’s Business, World Water Vision**. The World Water Council. Earthscan Ltd., London, 2000.

FARIAS, J.A.M. **Métodos de geração de vazões mensais e suas influências sobre a curva de garantia versus vazão regularizada em reservatórios do Estado do Ceará**. 2003. 115 p. Dissertação (Mestrado em Recursos Hídricos) - Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2003.

FORCH, G. Water costs money— the user has to pay his part. Paper presented at the **VIII Nile 2002 Conference on Comprehensive Water Resources Management for the Nile Basin Priorities for the New Century**, Addis Ababa, 2000.

GUO, S., ZHANG, H., CHEN, H., PENG, D., LIU, P., PANG, B. A reservoir flood forecasting and control system for China. **Hydrological Sciences Journal/ Journal des Sciences Hydrologiques**, v. 49(6), p.959-972, 2004.

HAMED, K.H. On the implementation of Prabhu's exact solution of the stochastic reservoir equation. **Advances in Water Resources**, v. 32, p. 594–606, 2009.

KITE, G.W. Frequency and risk analysis in hydrology. **Littleton, Water Resources Publications**, 257p. 1988.

KOMATSU, H., KUME, T., OTSUKI, K. Water resource management in Japan: Forest management or dam reservoirs?. **Journal of Environmental Management**, v. 91, p. 814-823, 2010.

LANNA, A.E. **Regularização de vazões em reservatórios**. In: TUCCI, C.E.M. et al. Hidrologia: ciência e aplicação. 4ª reimpr. Porto Alegre: UFRGS/ABRH, 943 p. 2012.

LI, X., GUO, S., LIU, P., CHEN, G. Dynamic control of flood limited water level for reservoir operation by considering inflow uncertainty. **Journal of Hydrology**, v. 391, p.124-132, 2010.

LLOYD, E.H. The stochastic reservoir: exact and approximate evaluations of the storage distribution. **Journal of Hydrology**, v. 151, p. 65-107, 1993.

MORAN, P.A.P. A Probability Theory of Dams and Storage System. **Australian Journal of Applied Science**, v. 5, 1954

NANDALAL, K.D.W., SAKTHIVADIVEL, R. Planning and management of a complex water resource system: case of Samanalawewa and Udawalawe reservoirs in the Walawe river, Sri Lanka. **Agricultural Water Management**, v. 57, p. 207-221, 2002.

OWEIS, T., HACHUM, A. Water harvesting and supplemental irrigation for improved water productivity of dry farming systems in West Asia and North Africa. **Agricultural Water Management**, v. 80 (1–3), p. 57–73, 2006.

PHATARFOD, R.M. Riverflow and reservoir storage models. **Mathematical and Computer Modelling**, v. 12 (9), p. 1057-1077, 1989.

RAHEEM, E., KHAN, S.H. Combining probability of emptiness and mean first overflow time of a dam to determine its capacity. **Journal of Spatial Hydrology**, v. 2 (2), p. 1-7, 2002.

RIPPL, W. Capacity of Storage Reservoirs for Water Supply. **Minutes of Proceedings of the Institution of Civil Engineers**, v. 71, 1883.

VÖRÖSMARTY, C.J., McINTYRE, P.B., GESSNER, M.O., DUDGEON, D., PRUSEVICH, A., GREEN, P., GLIDDEN, S., BUNN, E., SULLIVAN, C.A., REIDY LIERMANN, C., DAVIES, P.M. Global threats to human water security and river biodiversity. **Nature**, v. 467, p. 555–561, 2010.

WISSER, D., FROLKING, S., DOUGLAS, E.M., FEKET, B.M., SCHUMANN, A.H., VÖRÖSMARTY, C.J. The significance of local water resources captured in small reservoirs for crop production – A global-scale analysis. **Journal of Hydrology**, v. 384 p. 264–275, 2010.

WURBS, R.A. Reservoir system simulation and optimization models. *Journal of Water Resources Planning and Management (ASCE)*, v. 119 (4), p. 455-472, 1993.

XU, Z.X., ITO, K., LIAO, S., WANG, L. Incorporating inflow uncertainty into riskassessment for reservoir operation. **Stochastic Hydrology and Hydraulics**, v.11 (5), p.433–448, 1997.

YANG, H., ZHANG, X., ZEHNDER, A.J.B. Water scarcity, pricing mechanism and institutional reform in northern China irrigated agriculture. **Agricultural Water Management**, v.61, p.143–161, 2003.

YEVJEVICH, V. An objective approach to definitions and investigations of continental hydrologic droughts. Colorado State University, **Hydrol. Paper 23**, Fort Collins, Colorado, USA, 1967.

## **APÊNDICES**

## APÊNDICE A

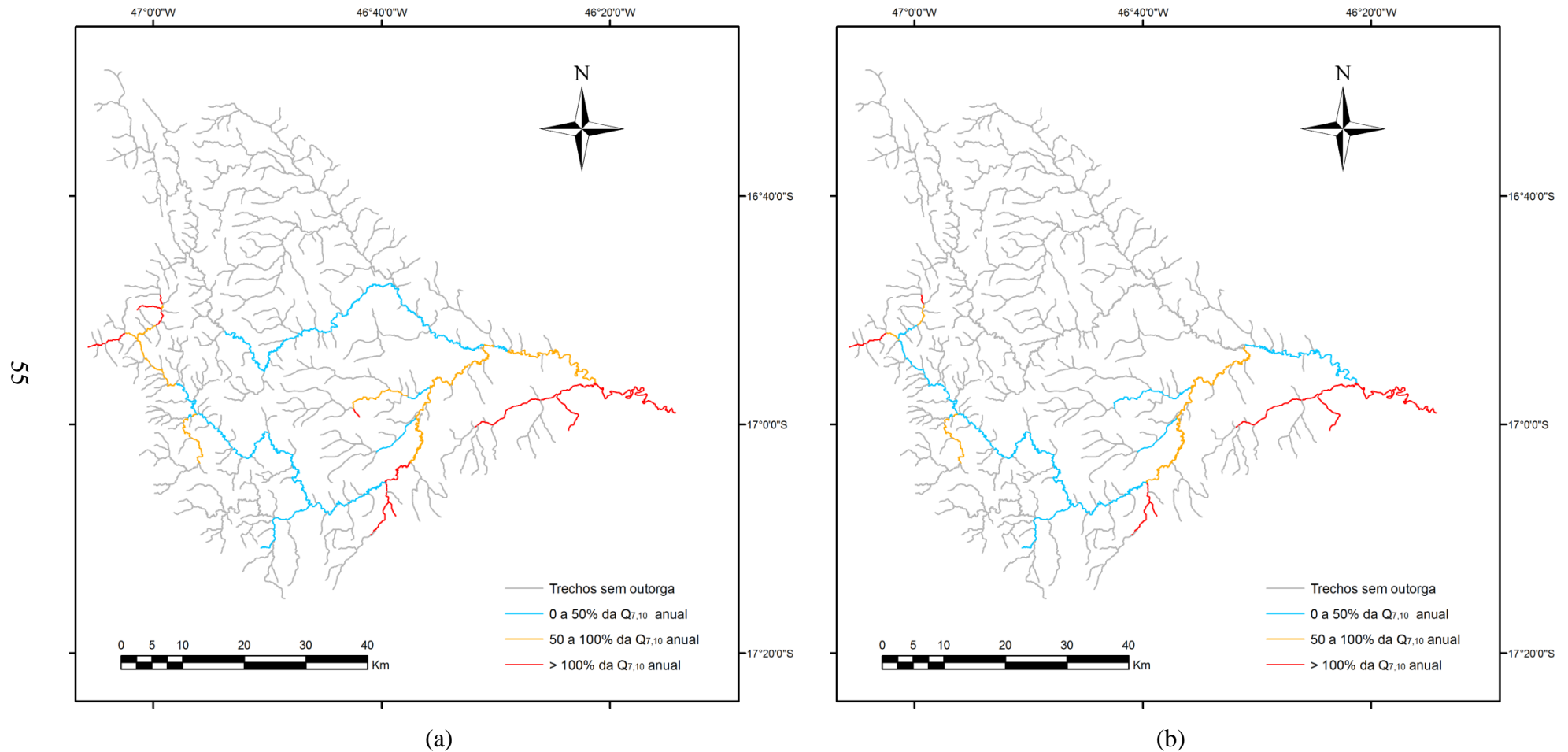


Figura 1A – Relação entre o somatório das vazões superpostas outorgadas a montante do trecho considerado, incluindo o trecho considerado, e a  $Q_{7,10}$  para os meses de janeiro (a) e fevereiro (b).

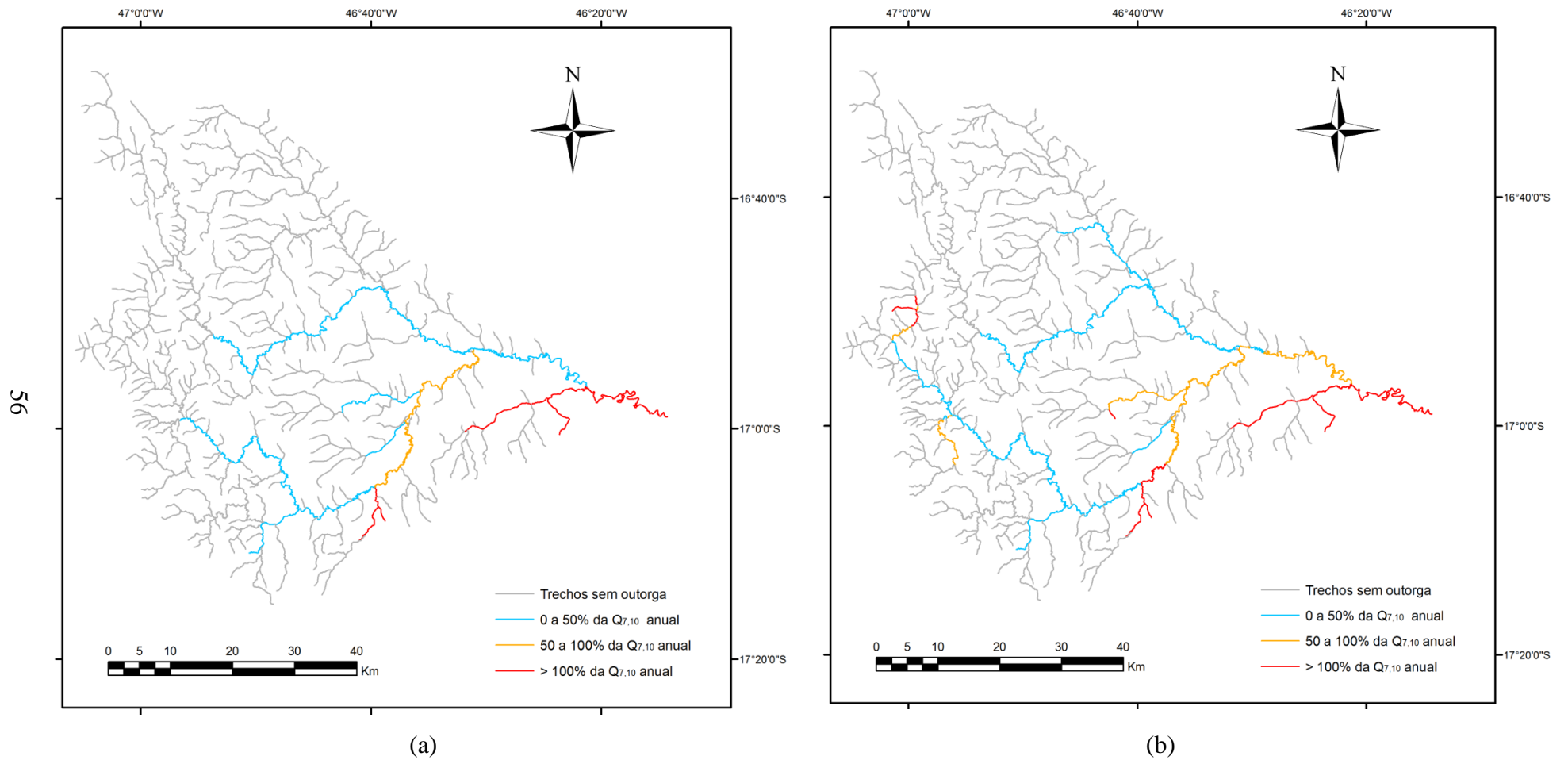
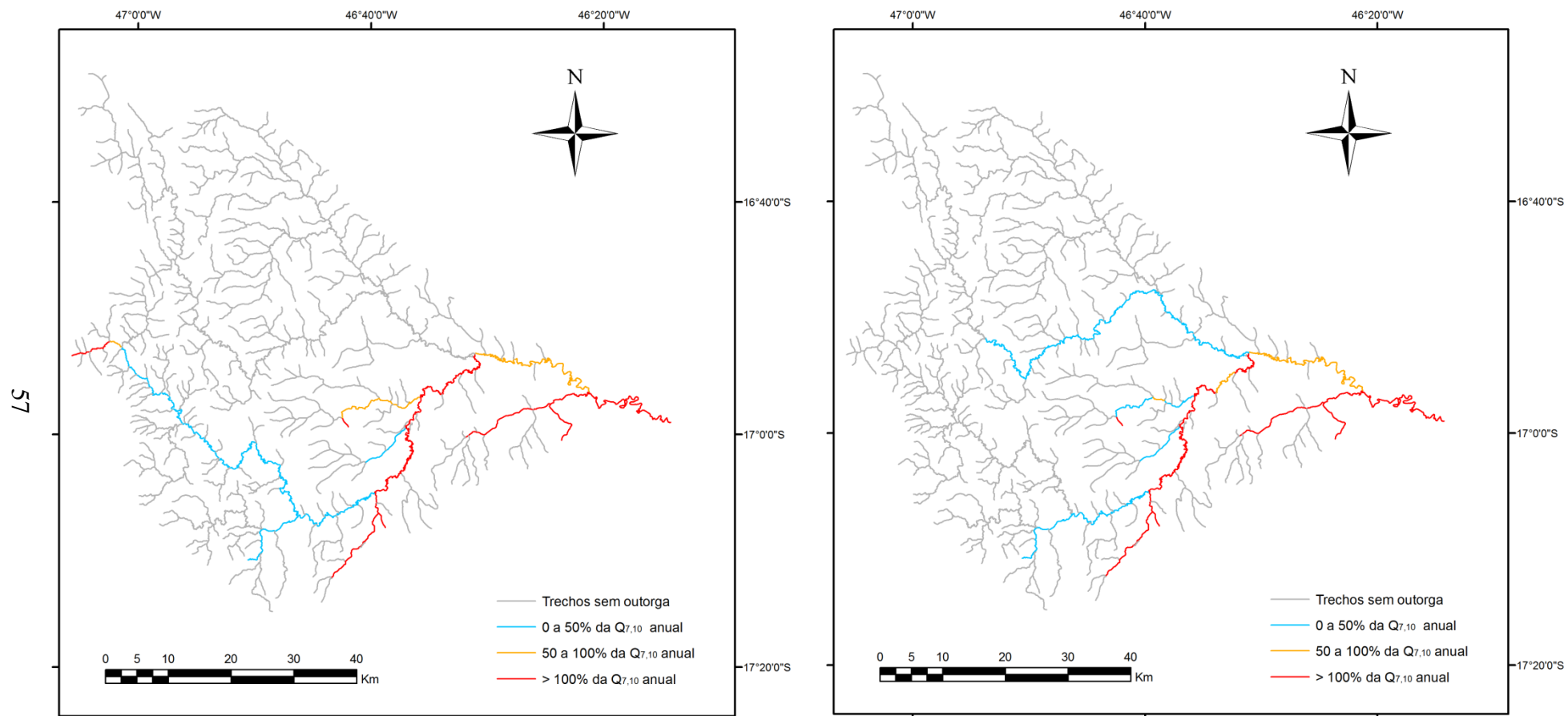


Figura 2A – Relação entre o somatório das vazões superpostas outorgadas a montante do trecho considerado, incluindo o trecho considerado, e a  $Q_{7,10}$  para os meses de março (a) e abril (b).



(a)

(b)

Figura 3A – Relação entre o somatório das vazões superpostas outorgadas a montante do trecho considerado, incluindo o trecho considerado, e a  $Q_{7,10}$  para os meses de agosto (a) e setembro (b).

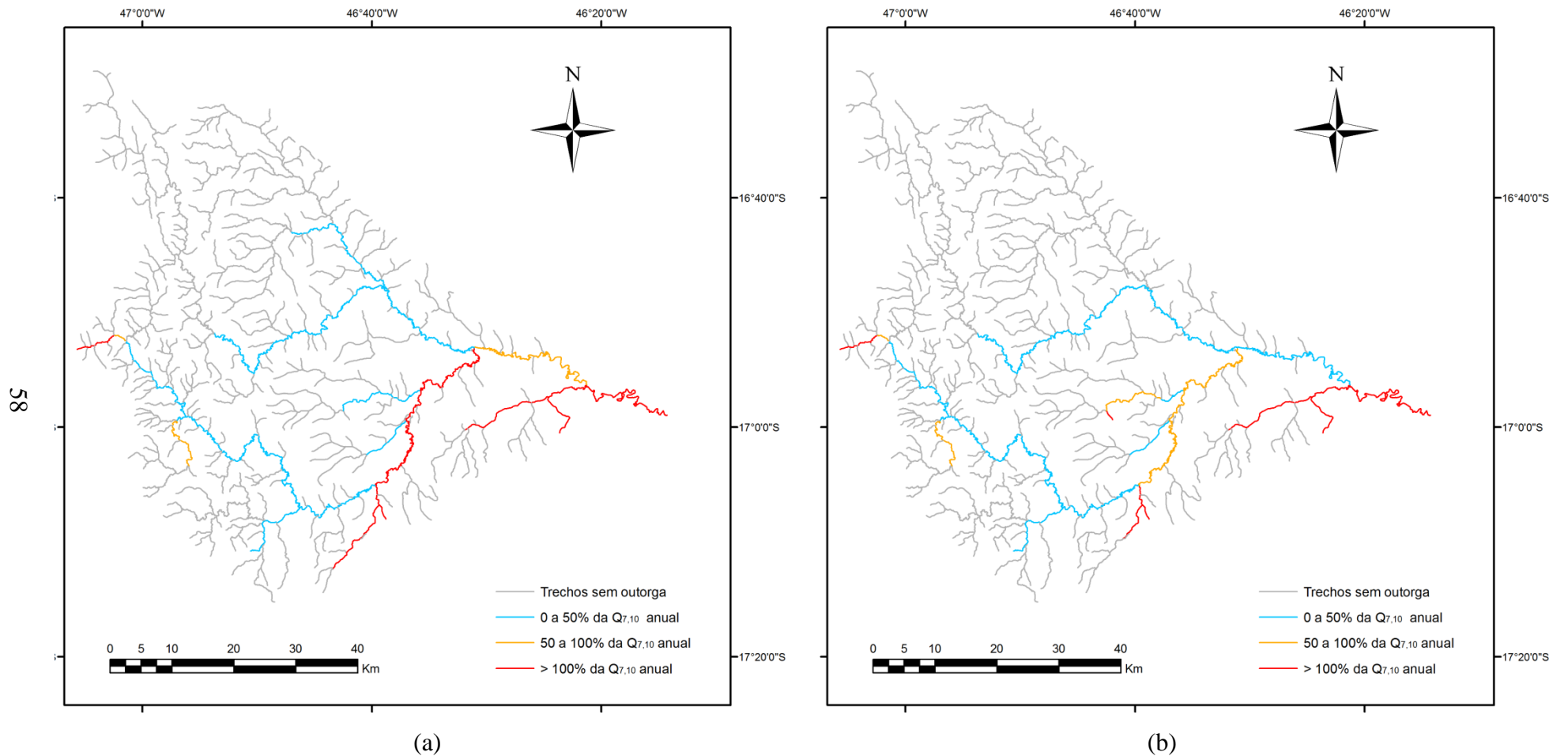


Figura 4A – Relação entre o somatório das vazões superpostas outorgadas a montante do trecho considerado, incluindo o trecho considerado, e a  $Q_{7,10}$  para os meses de outubro (a) e novembro (b).

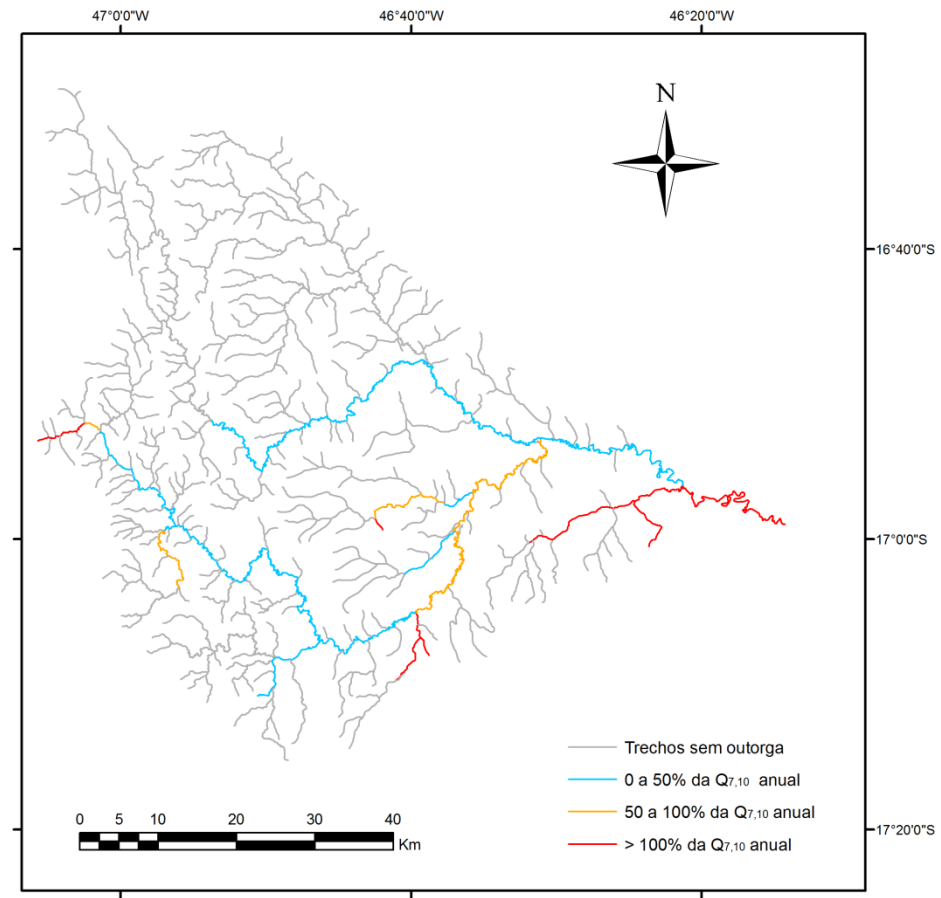


Figura 5A – Relação entre o somatório das vazões superpostas outorgadas a montante do trecho considerado, incluindo o trecho considerado, e a  $Q_{7,10}$  para o mês de dezembro.

## APÊNDICE B

Quadro 1B – Diagrama de barras de dados de vazão no período de 1968 a 2005 nas estações fluviométricas utilizadas no estudo.

Cód. da Estação	1968	1969	1970	1971	1972	1973	1974	1975	1976	1977	1978	1979	1980	1981	1982	1983	1984	1985	1986
42435000																			
42440000																			
42460000																			
42490000																			
42540000																			
42545500																			
42546000																			
42600000																			

69

Quadro 1B – Continuação

Cód. da Estação	1987	1988	1989	1990	1991	1992	1993	1994	1995	1996	1997	1998	1999	2000	2001	2002	2003	2004	2005
42435000																			
42440000																			
42460000																			
42490000																			
42540000																			
42545500																			
42546000																			
42600000																			

Legenda:  Anos com mais de 95% dos dados