

RAYSSA BALIEIRO RIBEIRO

**CRITÉRIOS DE VALORAÇÃO DO USO DA ÁGUA CONSIDERANDO O
MANANCIAL DE CAPTAÇÃO SUBTERRÂNEO E A REGULARIZAÇÃO DE
VAZÕES**

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
2016

**Ficha catalográfica preparada pela Biblioteca Central da Universidade
Federal de Viçosa - Câmpus Viçosa**

T

R484c
2016

Ribeiro, Rayssa Balieiro, 1991-

Crítérios de valoração do uso da água considerando o
manancial de captação subterrâneo e a regularização de vazões /
Rayssa Balieiro Ribeiro. – Viçosa, MG, 2016.
xii, 80f. : il. (algumas color.) ; 29 cm.

Inclui apêndices.

Orientador: Fernando Falco Pruski.

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Viçosa.

Referências bibliográficas: f.70-77.

1. Recursos hídricos - Desenvolvimento. 2. Água -
Consumo. 3. Bacias hidrográficas. 4. Águas subterrâneas.
5. Reservatórios. I. Universidade Federal de Viçosa.
Departamento de Engenharia Agrícola. Programa de
Pós-graduação em Engenharia Agrícola. II. Título.

CDD 22. ed. 333.91

RAYSSA BALIEIRO RIBEIRO

**CRITÉRIOS DE VALORAÇÃO DO USO DA ÁGUA CONSIDERANDO O
MANANCIAL DE CAPTAÇÃO SUBTERRÂNEO E A REGULARIZAÇÃO DE
VAZÕES**

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: 22 de fevereiro de 2016

Eduardo Antonio Gomes Marques

Mauro Aparecido Martinez

Fernando Falco Pruski
(Orientador)

A Deus.
A minha família,
Aos meus amigos.

AGRADECIMENTOS

A Deus pelas bênçãos concedidas e por me iluminar em mais uma conquista.

À minha mãe pelo carinho, dedicação e por não medir esforços para realizar meus sonhos e ao meu pai por todo o amor e compreensão.

À minha abençoada família, que mesmo longe está sempre presente nos meus dias. Amo vocês!

A Roberto por seu amor e confiança.

Ao Professor Fernando Falco Pruski, pela exemplar dedicação, pelo compromisso, pelos ensinamentos transmitidos, pela compreensão e confiança.

À Luane e Magno pela amizade e pelo apoio.

A todos os amigos do CRRH pelos momentos de trabalho e pela parceria.

Ao grupo GPRH em especial a Andressa, Josiane, Laisi e Nívia pelos bons momentos vividos e por serem, além de excepcionais colegas de trabalho, grandes conselheiras e amigas e a Arthur, Renata e Rafael pela disposição e pela ajuda sempre solícita.

Às meninas da RBO, Camila, Laura e Nayara pela grande amizade e pela ótima convivência, e aos amigos, Cássio, David, Felipe, Micael e Tarcila pelas brincadeiras, pelo companheirismo e por tornar meus dias em Viçosa mais divertidos.

A todos os professores que contribuíram com a minha formação profissional.

À UFV, principalmente ao Departamento de Engenharia Agrícola pela oportunidade de realização desse trabalho.

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

A todos aqueles que contribuíram e torceram por mim, o meu sincero agradecimento.

BIOGRAFIA

RAYSSA BALIEIRO RIBEIRO, filha de Wandi Milton Ribeiro e Lucidaura Balieiro, nasceu em Montes Claros, MG, no dia 07 de outubro de 1991.

Em março de 2009 iniciou o curso de Engenharia Agrícola e Ambiental na Universidade Federal de Minas Gerais, concluindo em janeiro de 2013.

Em março de 2014 iniciou o curso de Mestrado em Engenharia Agrícola, na área de Recursos Hídricos e Ambientais, na Universidade Federal de Viçosa, submetendo-se à defesa de dissertação em fevereiro de 2016.

CONTEÚDO

RESUMO	ix
ABSTRACT	xi
1 INTRODUÇÃO	1
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	3
2.1 A água no contexto mundial	3
2.2 Gestão de Recursos Hídricos	4
2.3 Metodologias de cobrança utilizadas no Brasil	6
2.3.1 Bacia do rio Paraíba do Sul	7
2.3.2 Bacia hidrográfica do rio São Francisco	8
2.3.3 Bacia dos rios Piracicaba, Capivari e Jundiaí (PCJ)	8
2.3.4 Estado de São Paulo	9
2.4 Água subterrânea como recurso estratégico	10
2.5 Efeito dos reservatórios de regularização de vazões	12
2.6 Bacia do Paracatu	14
3 MATERIAL E MÉTODOS	15
3.1 Caracterização da área de estudo	15
3.2 Dados utilizados no estudo e seleção do período base	17
3.3 Desenvolvimento do critério de cobrança pelo uso da água de acordo com o manancial de captação	18
3.3.1 Análise da proporção de contribuição do escoamento subterrâneo para a formação das vazões no curso d'água	19
3.3.1.1 Separação dos escoamentos superficial direto e subterrâneo	19
3.3.1.2 Estimativa da relação mensal entre escoamento subterrâneo e escoamento total para cada estação fluviométrica	21
3.3.2 Identificação de regiões homogêneas para aplicação da metodologia de cobrança	21

3.3.2.1	Identificação de <i>outliers</i> através da estatística <i>Box Plot</i>	22
3.3.2.2	Identificação de regiões homogêneas pela análise de cluster	23
3.3.2.3	Definição de intervalos de confiança para os valores mensais	28
3.3.3	Estabelecimento do critério de cobrança pelo uso da água proveniente do manancial subterrâneo freático	28
3.4	Desenvolvimento do critério de cobrança pelo uso da água de acordo com a regularização de vazões	29
3.4.1	Impacto dos reservatórios na disponibilidade hídrica com base na legislação atual.....	29
3.4.2	Proposição de adoção de um critério diferenciado de cobrança pelo uso da água em condições de regularização e de alteração da vazão mínima residual	32
3.5	Análise do impacto econômico da adoção dos fatores manancial de captação e regularização de vazões.....	35
3.5.1	Critérios de cobrança considerados	35
3.5.1.1	Legislação vigente	35
3.5.1.2	Legislação vigente associada ao fator manancial de captação.....	37
3.5.1.3	Legislação vigente associada ao fator sazonalidade.....	37
3.5.1.4	Legislação vigente associada ao fator de deplecionamento pelo uso da água em condições de regularização.....	38
3.5.2	Demandas consideradas.....	38
3.5.2.1	Demanda variável ao longo do ano	39
3.5.2.2	Demanda fixa ao longo do ano.....	40
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO	42
4.1	Desenvolvimento do critério de cobrança pelo uso da água de acordo com o manancial de captação	42
4.1.1	Separação do escoamento superficial direto e escoamento subterrâneo	42
4.1.2	Estimativa das relações mensais entre escoamento subterrâneo e escoamento total para cada estação	46
4.1.3	Identificação de regiões homogêneas para aplicação da metodologia de cobrança	48
4.1.3.1	Identificação de <i>outliers</i> através da estatística <i>Box Plot</i>	48
4.1.3.2	Identificação de regiões homogêneas pela análise de cluster	49
4.1.4	Estabelecimento do critério de cobrança pelo uso da água do manancial subterrâneo freático	50
4.2	Análise do efeito das alterações propostas para a condição de regularização na disponibilidade hídrica da bacia do Paracatu	57

4.2.1	Legislação atual	57
4.2.2	Considerando a alteração da vazão mínima residual	59
4.3	Análise do impacto econômico da adoção dos critérios manancial de captação e regularização de vazões	60
4.3.1	Valores de cobrança pela captação	60
4.3.2	Valores totais de cobrança	65
5	CONCLUSÕES	68
6	CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	69
	REFERÊNCIAS	70
	APÊNDICES	78
	APÊNDICE A.....	79
	APÊNDICE B.....	80

RESUMO

RIBEIRO, Rayssa Balieiro, M.Sc., Universidade Federal de Viçosa, fevereiro de 2016. **Critérios de valoração do uso da água considerando o manancial de captação subterrâneo e a regularização de vazões.** Orientador: Fernando Falco Pruski.

Diante da necessidade de medidas mais eficientes para a gestão dos recursos hídricos e levando-se em conta que a maioria das legislações vigentes não contempla diferenciações de cobrança pelo uso da água no que diz respeito ao fato do manancial ser subterrâneo e às condições de regularização de vazões, o presente trabalho teve como objetivo desenvolver critérios de cobrança pelo uso da água a partir da consideração desses aspectos: manancial de captação e regularização de vazões. O critério relacionado ao uso da água subterrânea baseou-se na relação entre o escoamento subterrâneo e o escoamento total (R_{EST}) em cada mês do ano e para cada estação fluviométrica. A análise prévia dos dados permitiu a identificação e exclusão de *outliers*, posteriormente, foi realizada a identificação de regiões homogêneas e testes estatísticos para medida de homogeneidade. Para cada região homogênea foi calculado o seus respectivos valores médios da R_{EST} e intervalos de confiança com 95% de probabilidade. De posse das informações obtidas foi estabelecido o critério fator manancial de captação (F_{MC}). Já para o segundo critério, denominado fator de deplecionamento pelo uso da água em condições de regularização (F_R), avaliou-se o potencial do aumento da disponibilidade hídrica que o processo de regularização permite e considerou-se o deplecionamento do custo unitário da água. Para estabelecer um valor para o F_R foi utilizado um

outro fator, proposto por Ramos (2016), o fator sazonalidade (F_S). O F_R será o menor valor de F_S encontrado, ou seja, foi estabelecido que a água em condições de regularização possui o mesmo valor que a água no mês de maior disponibilidade hídrica natural conforme proposto por Ramos (2016). Além disso, foi proposta a alteração da vazão mínima residual para regularização. Com o intuito de analisar o impacto econômico da adoção dos diferentes critérios, propostos e já existentes, foram simulados oito cenários de cobrança originados da combinação de duas condições de demanda: variável e fixa, e, quatro critérios de cobrança: legislação vigente; legislação vigente e F_{MC} ; legislação vigente e F_S ; e, legislação vigente e F_R . A partir da análise dos resultados observou-se que: após a realização de três aproximações, sendo uma delas a incorporação da frequência de ocorrência das vazões mínimas, o F_{MC} permitiu maior valoração da água subterrânea nos períodos em que se tem maior abundância de água superficial e, menor valoração nos períodos em que o escoamento subterrâneo é a principal fonte de abastecimento. Quanto ao F_R , observou-se um expressivo aumento da disponibilidade hídrica, mesmo com a consideração do aumento da vazão mínima residual. Na condição de regularização, a água foi valorada da mesma forma que o mês de maior disponibilidade hídrica natural. Os cenários de simulação mostraram o efeito desejado de valorização da água subterrânea como um recurso estratégico, assim como do deplecionamento do custo da água em condições de regularização.

ABSTRACT

RIBEIRO, Rayssa Balieiro, M.Sc., Universidade Federal de Viçosa, february 2016. **Valuation criteria of water use considering the underground capture source and regulation of flows.** Adviser: Fernando Falco Pruski.

Given the need for more effective measures for the management of water resources and taking into account that the most of current legislation does not include differentiation of charges for water use by considering to the fact that source is underground and regularization conditions, this study aimed to develop criteria of charging for water use based on the consideration of these aspects: captation source and regulation of flows. The criterion related to groundwater use was based in the relationship between groundwater flow and total flow (R_{EST}) in each month of the year and for each fluviometric station. The preliminary analysis of the data allowed the identification and exclusion of outliers, subsequently, it was performed the identification of homogeneous regions and statistical tests for homogeneity measure. For each homogeneous region was calculated the average values of R_{EST} and confidence intervals, with 95% probability. Based on this information it was established a criterion captation factor source (F_{MC}). For the second criterion, named drawdown factor for water use in regularization conditions (F_R) wich evaluated the increase potential of water availability, allowed by the regularization process and by considering the depletion of the unit cost of water. To establish a value for F_R was used another factor proposed by Ramos (2016), the seasonality factor (F_S). F_R is the lowest value found for F_S , that is, it was established that the water in regularization conditions has the same value as the water on the months of

greater natural water availability, as proposed by Ramos (2016). Moreover, it was proposed to change the minimal residual flow for the regularization. With the aim of analyze the economic impact of the adoption of the various criteria, proposed and existing, eight scenarios of charging were simulated, originated by combining two demand conditions: variable and fixed, and four charging criteria: existing legislation; current legislation and F_{MC} ; current legislation and F_S ; and current legislation and F_R . From the analysis of the results, it was observed that after holding three approaches, one of which is the incorporation of the frequency of occurrence of minimum flows, the F_{MC} has allowed greater valuation of groundwater in the periods in which there is a greater abundance of surface water and lower valuation during periods when the groundwater flow is the main source of supply. For the F_R , it was observed that there was a significant increase in water availability, even with consideration of increasing residual minimum flow. In the regularization condition, the water was valued in the same way as the month of largest natural water availability. The simulation scenarios showed the desired effect of appreciation of groundwater as a strategic resource, as well as the depletion of the cost of water in regularization conditions.

1 INTRODUÇÃO

A água é um recurso natural de extrema importância para a manutenção da vida no planeta, sendo sua utilização indispensável para diversas atividades humanas. Com o intenso crescimento populacional e o desenvolvimento das atividades econômicas nos últimos anos, tem sido aumentado o consumo de água, tornando comuns cenários em que a disponibilidade hídrica não é suficiente para atender as demandas.

Neste contexto, a necessidade de racionalização desse recurso assim como sua preservação têm estimulado a criação de políticas de planejamento e gestão de recursos hídricos em diversos países. A estruturação dessas políticas deve procurar a adoção de medidas eficientes na garantia do desenvolvimento sustentável, buscando a compatibilização das demandas com a disponibilidade hídrica.

A promulgação da Lei 9.433/97, que instituiu a Política Nacional de Recursos Hídricos, foi um importante passo em relação à gestão de recursos hídricos no Brasil, tendo como um de seus fundamentos o fato de a água ser um recurso natural limitado, dotado de valor econômico. Essa lei dispõe de seis instrumentos de gestão, entre eles a cobrança pelo uso dos recursos hídricos, que tem como objetivo dar ao usuário uma indicação do real valor da água, incentivar seu uso racional e obter recursos financeiros para recuperação das bacias hidrográficas do País (ANA, 2015).

Uma estratégia é o manancial subterrâneo, que desempenha importante papel no abastecimento humano em muitas regiões, além de ser responsável pela perenização dos cursos d'água, uma vez que abastece os rios nos períodos de estiagem, através dos fluxos de base. Apesar dessa relevância dos recursos hídricos subterrâneos, as metodologias de cobrança pelo uso da

água estão mais voltadas para os recursos hídricos superficiais, evidenciando a necessidade de aprimoramento desses mecanismos.

Para o estabelecimento dos valores de cobrança pelo uso da água, um importante aspecto a ser considerado é a disponibilidade desse recurso, visto que o tratamento da água como bem econômico a coloca suscetível à interação entre oferta e demanda. Nesse sentido, situações em que se tem a utilização dos reservatórios de regularização merecem uma atenção especial, uma vez que essa técnica modifica a distribuição das vazões nos rios, possibilitando um expressivo aumento na disponibilidade hídrica.

Diante da necessidade da procura por medidas eficientes de gestão de recursos hídricos e levando-se em conta que a maioria das legislações vigentes não contempla diferenciações de cobrança pelo uso da água no que diz respeito ao manancial subterrâneo e às condições de regularização, o presente trabalho se baseia na hipótese de que a consideração dessas condições nos mecanismos de cobrança tem potencial de criação de um plano mais racional de utilização dos recursos hídricos.

Portanto, o objetivo deste estudo foi desenvolver critérios de cobrança pelo uso da água, embasados na compatibilização de aspectos econômicos e sociais, que possibilitem uma alocação mais racional dos recursos hídricos, pela consideração do manancial de captação subterrâneo e da regularização de vazões.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 A água no contexto mundial

O desenvolvimento das atividades antrópicas de maneira insustentável e as falhas das políticas governamentais têm afetado a qualidade e disponibilidade dos recursos hídricos, comprometendo a sua capacidade de gerar benefícios sociais e econômicos. Fatores como crescimento populacional, urbanização, mudanças nos hábitos alimentares e aumento no consumo tem influenciado o aumento da demanda por água doce e, ao menos que seja restaurado o equilíbrio entre oferta e demanda de água, o mundo enfrentará um déficit hídrico cada vez mais preocupante (WWAP, 2015).

O Brasil é mundialmente conhecido por sua grande oferta de água, possuindo a maior reserva de água doce subterrânea, o aquífero Amazonas (FILHO et al. 2011). A disponibilidade hídrica per capita brasileira indica uma situação confortável, quando comparada a outros países (ANA, 2013), contudo, a distribuição geográfica desse recurso é bastante irregular. A região Norte, com 8,3% da população, dispõe de 78% da água do País, enquanto o Nordeste, com 27,8% da população, tem 3,3%. Além disso, existe também uma grande variação sazonal desta disponibilidade (BRAGA & DOMINGUES 2008; SILVA, 2012). Esses fatores contribuem para a ocorrência de situações de escassez, já que o crescimento da demanda não acompanha, necessariamente, a oferta dos recursos hídricos.

Segundo a UN-Water (2007), em torno de 1,2 bilhões de pessoas, ou quase um quinto da população mundial, habita áreas de escassez hídrica física, e outras 500 milhões de pessoas estão chegando a esta situação.

Juntamente a isso, tem-se que 1,6 bilhões de pessoas, ou quase um quarto da população do mundo, enfrenta escassez econômica, isto é, países com deficiência de infraestrutura para aproveitamento da água dos mananciais.

Estima-se que em 2050 a população mundial ficará em torno de 8,9 bilhões de pessoas. Esse dado é preocupante, uma vez que o uso de água tem aumentado mais que o dobro da taxa de aumento da população, e ainda que não haja escassez de água no mundo como um todo, é crescente o número de regiões afetadas pela falta d'água. Uma projeção para 2025 prevê que 1,8 bilhões de pessoas viverá em regiões com absoluta escassez de água (UN-WATER, 2007).

Aliado ao crescimento populacional, tem-se a necessidade de produção de alimentos, também impulsionada por uma maior renda per capita dessa população. Este fator também está intimamente relacionado com o aumento da demanda pelos recursos hídricos, visto que altera os padrões de consumo. Além disso, para produção agrícola em larga escala, são imprescindíveis o uso de práticas de irrigação, bem como a utilização da água para o processamento desses alimentos (UNESCO, 2012). Estima-se que até 2050 a demanda mundial por alimentos crescerá aproximadamente 70% (BRUINSMA, 2009), e as retiradas de água para irrigação, que é o setor que atualmente responde pelo maior consumo, deve aumentar em torno de 5% (WWAP, 2012).

A escassez hídrica também é afetada pela qualidade da água, pois essa característica altera sua disponibilidade. Isto ocorre em razão das águas contaminadas não poderem ser usadas como água potável, uma vez que trazem risco à saúde humana e degradam os serviços derivados do ecossistema (WWAP, 2012). Calcula-se que aproximadamente 80% das águas residuais do mundo não recebem tratamento, afetando, principalmente, os núcleos populacionais (CORCORAN et al., 2010).

2.2 Gestão de Recursos Hídricos

A crescente demanda pelo uso da água, somada à sua distribuição irregular, caracteriza a necessidade da busca por medidas que promovam a racionalização de seu uso. Entre estas medidas, pode-se citar o desenvolvimento das políticas de gestão de recursos hídricos, que estão

passando por uma mudança de paradigma (CORTNER & MOOTE, 1994; WARD, 1995, GLEICK, 2003).

O processo de gestão afeta quase todos os setores econômicos, envolvendo saúde, produção e segurança alimentar, abastecimento doméstico de água e saneamento; energia e indústria; e sustentabilidade ambiental. Sendo assim, é de grande importância que as medidas de gestão sejam empreendidas adequadamente, caso contrário, o alcance de suas metas, como, por exemplo, o desenvolvimento sustentável em todas as suas esferas econômicas, sociais e ambientais pode ser prejudicado (UN-WATER, 2010).

A experiência com a implantação de sistemas de gestão de recursos hídricos em alguns países desenvolvidos, principalmente na Europa Ocidental, tem apresentado resultados positivos no que diz respeito a disciplinar o uso da água. Nesses países, a utilização de novos modelos de gestão da água está proporcionando a reversão de parte dos problemas relacionados aos recursos hídricos, como, por exemplo, a redução dos índices de desperdício e um maior controle da qualidade da água (SANTOS, 2002).

A Alemanha foi o primeiro país a utilizar a bacia hidrográfica como unidade de gestão. O modelo de gestão e de proteção alemão dos recursos hídricos surge da combinação de instrumentos de comando e controle, em que os estados e o governo federal exercem intensa função reguladora e fiscalizadora, aplicando alguns instrumentos econômicos, como a cobrança pelo uso da água (SANTOS, 2002).

A política de gestão francesa fundamenta-se em uma gestão integrada e participativa por bacia hidrográfica e destaca-se por ter sido precursora na cobrança pelo uso da água, tendo servido, em razão disso, como modelo em todo o mundo, inclusive no Brasil (SOUSA, 2006).

No Brasil, a gestão de recursos hídricos teve início na década de 1930 com o Código das Águas, Decreto Federal n.º 24.643, de 10 de julho de 1934. Este decreto é caracterizado por ser um modelo centralizado e voltado para a exploração do potencial hidráulico para geração de energia. Em 1988, com a Constituição Federal, esse cenário teve importantes alterações, como o estabelecimento da dominialidade pública das águas.

Em 1997, foi promulgada a Lei 9.433/97, também conhecida como “Lei das Águas”, que instituiu a Política Nacional de Recursos Hídricos, consistindo

em um marco legal de grande relevância para o país, inserindo conceitos inovadores em relação à organização do setor de planejamento e gestão de recursos hídricos (BRAGA & DOMINGUES 2008).

A Política Nacional de Recursos Hídricos instituiu como importante instrumento de gestão a cobrança pelo uso da água. Todos os usuários cujos usos provoquem alteração no regime, na quantidade ou na qualidade da água existente em um corpo hídrico, inclusive de águas subterrâneas estão sujeitos à cobrança, com exceção dos usos considerados insignificantes pelo comitê gestor (BRASIL, 1997).

2.3 Metodologias de cobrança utilizadas no Brasil

A efetivação da cobrança pelo uso da água no Brasil ocorreu primeiramente na Bacia do Rio Paraíba do Sul, em março de 2003, sendo seguida pelas bacias dos Rios Piracicaba, Capivari e Jundiaí -PCJ (janeiro de 2006), Rio São Francisco (julho de 2010) e Rio Doce (novembro de 2011) (ANA, 2015). Atualmente, é aplicada em 13 bacias hidrográficas brasileiras e em mais três domínios regionais específicos (Estado de São Paulo, Estado da Paraíba e Litoral Paulista). No geral, a cobrança pelo uso dos recursos hídricos abrange a captação, o consumo, o lançamento e a transposição (IBIO/FUNARBE, 2013).

As metodologias de cobrança existentes são constituídas, em geral, de três partes: a base de cálculo, o preço unitário e os coeficientes. A base de cálculo é estabelecida de acordo com o uso da água. O preço unitário é determinado com base nos objetivos da cobrança, como, por exemplo, obter recursos financeiros dos programas e intervenções nos planos de recursos hídricos; incentivar o uso racional da água; e dar uma indicação do real valor da água ao usuário. Os coeficientes são oriundos da necessidade de adaptar a cobrança a diversos objetivos específicos, como a diferenciação das classes de água e tipo de uso (THOMAS et al., 2005).

Com o intuito de analisar as metodologias de cobrança existentes, são discutidos na sequência os principais aspectos de cobrança para a bacia do Paraíba do Sul; bacias Hidrográficas dos Rios Piracicaba, Capivari e Jundiaí; bacia do Rio São Francisco; e Estado de São Paulo.

2.3.1 Bacia do rio Paraíba do Sul

A bacia do Rio Paraíba do Sul foi pioneira na implementação da cobrança pelo uso dos recursos hídricos no Brasil. As normas de cobrança são geridas pelo Comitê para Integração da Bacia do Rio Paraíba do Sul (CEIVAP), que engloba os estados de Minas Gerais, Rio de Janeiro e São Paulo, e do Comitê das Bacias Hidrográficas do Rio Paraíba do Sul, que contempla apenas o Estado de São Paulo (IBIO & FUNARBE, 2013).

Em seu histórico, pode-se observar a existência de dois modelos de cobrança, um deles praticado entre os anos 2003 e 2007, e o novo modelo estabelecido pela Deliberação da CEIVAP 65, de 28 de setembro de 2006, implementado a partir de janeiro de 2007 (CEIVAP, 2014).

A cobrança pelo uso da água na referida bacia, de acordo com a Deliberação 65/2006, é baseada nos volumes anuais captados do corpo hídrico (Q_{cap}), captados e transpostos para outras bacias (Q_{transp}), lançados no corpo hídrico ($Q_{lanç}$), consumidos do corpo hídrico (Q_{cons}) e na carga orgânica lançada no corpo hídrico (CO_{DBO}).

A cobrança pela captação leva em consideração, além do volume anual captado, a classe de enquadramento do corpo hídrico, que é mais barato quanto maior a classe de qualidade da água. Para o consumo, o valor a ser pago considera a diferença entre o volume captado e o volume lançado e, para o lançamento de efluentes, a cobrança é feita com base na carga orgânica efetivamente lançada. Com relação à cobrança pela transposição das águas da bacia do Paraíba do Sul para a bacia do Rio Guandu, a Deliberação CEIVAP N.º 52/2005 estabelece que o preço a ser pago deve ser correspondente a 15% do valor arrecado na bacia que recebe a transposição (CEIVAP, 2005).

Para o setor da agropecuária e irrigação, a cobrança pela captação e consumo tem como fatores multiplicativos o $K_{Agropec}$ e o $K_{consumo}$, respectivamente. O $K_{Agropec}$ leva em conta as boas práticas de uso e conservação da água na propriedade rural em questão, para tanto tem como base a tecnologia de irrigação empregada; e o $K_{consumo}$ considera a parte da água que não retorna aos corpos d'água, sendo assim é baseado na eficiência

do sistema de irrigação adotado. No caso específico da cultura do arroz, o valor de K_{Agropec} é de 0,05 e o de K_{consumo} é de 0,04 (CEIVAP, 2014).

2.3.2 Bacia hidrográfica do rio São Francisco

A cobrança pelo uso da água na bacia do Rio São Francisco tem como base de cálculo os volumes totais anuais captados, lançados, consumidos e de carga orgânica lançada no corpo hídrico (CBHSF, 2008).

Para a cobrança referente à captação, essa metodologia considera, além do volume anual captado e do preço público referente à captação, um fator multiplicativo denominado K_{cap} , que leva em conta os objetivos específicos a serem atingidos mediante a cobrança pela captação de água. Para o cálculo do K_{cap} , são utilizados dois coeficientes: o K_{classe} , que considera a classe de enquadramento do corpo hídrico em que se faz a captação; e o K_t , que considera as boas práticas de uso e conservação da água (CBHSF, 2008).

De maneira semelhante ao K_{cap} , tem-se o K_{cons} para a cobrança pela água consumida, considerado igual ao K_t . Para o caso particular da irrigação, o coeficiente a ser utilizado é K_{consirr} , que visa a quantificar o volume de água consumido (CBHSF, 2008).

A metodologia da bacia do São Rio Francisco determina, para a cobrança pelos volumes de água outorgáveis para alocação externa de água de domínio da União, a utilização dos coeficientes $K_{\text{gestão}}$, $K_{\text{cap classe}}$ e $K_{\text{prioridade}}$. Esse último leva em conta a prioridade de uso estabelecida no plano de Recursos Hídricos da Bacia do São Francisco (CBHSF, 2010).

2.3.3 Bacia dos rios Piracicaba, Capivari e Jundiaí (PCJ)

A bacia dos Rios Piracicaba, Capivari e Jundiaí foi a segunda bacia a implementar a cobrança pelo uso da água em nível nacional, em 2006. Em janeiro de 2007, teve início a cobrança nas regiões de domínio do Estado de São Paulo e, em 2010, dos usuários do estado de Minas Gerais. Primeiramente será descrita a metodologia de cobrança adotada nas bacias de domínio da União e pertencentes ao estado de Minas Gerais, e, logo depois, tem-se a

descrição da metodologia adotada nas bacias estaduais do Estado de São Paulo.

As metodologias adotadas para os rios de domínio da União e do Estado de Minas Gerais têm a cobrança total feita sobre os volumes totais anuais pelo uso da água por captação, consumo, lançamento, carga orgânica lançada no corpo hídrico e pela transposição (COMITÊS PCJ, 2007).

Similarmente ao K_{Agropec} presente na proposta do Paraíba do Sul, a metodologia do PCJ tem o K_t , que também é definido pelos sistemas de irrigação adotados na propriedade rural. Outro fator em comum é o K_{consumo} , utilizado para a irrigação com base na eficiência dos sistemas adotados (COMITÊS PCJ, 2007; COMITÊS PCJ, 2008).

2.3.4 Estado de São Paulo

A metodologia de cobrança do Estado de São Paulo foi regulamentada pelo Decreto nº 50.667, de 30 de março de 2006, tendo, desde então, muitos comitês adotado essa metodologia para cobrança das águas do domínio do estado (IBIO & FUNARBE, 2013).

Para captação, extração e derivação, foi estabelecido, nessa metodologia, o uso de 13 coeficientes ponderadores, denominados X_i ($i=1$ a 13), determinados segundo várias características, as quais possibilitam a distinção dos valores a serem cobrados. Para a cobrança pelo lançamento de efluentes, são utilizados os coeficientes ponderadores Y_i ($i=1$ a 9), definidos segundo diversas características de uso, como, por exemplo, a classe de enquadramento do corpo d'água receptor, a carga lançada e seu regime de variação (CBH-SMT, 2008).

A utilização dos coeficientes ponderadores propostos nessa metodologia tem a finalidade de considerar as características físico-ambientais do local e os interesses estratégicos da bacia, racionalizar o uso demasiado da água em épocas de estiagem, preservar os mananciais, supervalorizar água de zonas de recarga de aquífero, entre outras finalidades (MAGALHÃES et al., 2003).

Embora tenham sido propostos 13 coeficientes ponderadores para captação e derivação, atualmente só estão implementados aqueles referentes à natureza do corpo d'água, superficial ou subterrâneo; à classe de uso

preponderante em que estiver enquadrado o corpo d'água no local do uso ou da derivação; à disponibilidade hídrica do local; ao volume captado, extraído ou derivado e seu regime de variação; ao consumo efetivo ou volume consumido; à finalidade do uso; e à transposição de água da bacia. Para a cobrança pelo lançamento, dos nove coeficientes propostos, são utilizados aqueles correspondentes à classe de uso preponderante do corpo d'água receptor, à carga lançada e seu regime de variação e à natureza da atividade (CRUZ & MENDIONDO; 2013).

2.4 Água subterrânea como recurso estratégico

A água subterrânea corresponde à maior reserva de água doce do mundo, representando mais de 97% de toda a água doce disponível no planeta (EUROPEAN COMMUNITIES, 2008). Apesar desse grande volume de água subterrânea, é importante ressaltar que nem todo esse volume está disponível para o consumo, em razão de uma série de limitações relacionadas às características físicas e à capacidade de recarga do aquífero, bem como às limitações econômicas de sua exploração. Entretanto, muitas vezes, situações de escassez de água superficial levaram o homem, ao longo dos séculos, a buscar a água armazenada no subsolo para suprir suas necessidades hídricas (MOURA, 2004).

As águas subterrâneas são de fundamental importância para a segurança alimentar em regiões da África e Ásia e para o suprimento doméstico de água de grande parte da população do resto do mundo. Nos últimos 50 anos, a extração de água subterrânea tem triplicado, favorecendo, particularmente, a produção de alimentos e o desenvolvimento rural (WWAP, 2012).

No Brasil, os recursos subterrâneos também apresentam grande relevância. Estima-se que os aquíferos sejam utilizados para o abastecimento de 30 a 40% da população do país. No Estado de São Paulo, 70% dos núcleos urbanos, como Ribeirão Preto, Marília, Bauru e São José do Rio Preto, são abastecidos total ou parcialmente por águas subterrâneas. No semiárido nordestino, o manancial subterrâneo representa uma importante fonte de abastecimento para comunidades rurais, bem como a irrigação no oeste da

Chapada do Apodi, entre os Estados do Ceará e do Rio Grande do Norte (HIRATA et al., 2010).

Além de se destacar como fonte para o abastecimento, outro grande valor da água subterrânea é seu papel ecológico, fundamental para manutenção da flora, fauna e fins estéticos e paisagísticos em corpos d'água superficiais, pois o abastecimento de maior parte dos cursos d'água, nos períodos de estiagem, é feita pelos fluxos de bases provenientes do manancial subterrâneo (HIRATA et al., 2010).

Muitas regiões em que a água subterrânea tem sido utilizada como fonte principal de abastecimento de água vêm apresentando problemas de escassez em decorrência da superexploração do manancial subterrâneo, ultrapassando, na maioria das vezes, a capacidade de recarga natural de tais aquíferos. Situações como essa acarretam o rebaixamento da superfície piezométrica da água, fato que pode ser acompanhado pela subsidência do solo ou pela penetração da água do mar, em regiões costeiras (MOURA, 2004).

Um exemplo da grande exploração do manancial subterrâneo é o “High Plain Aquifer”, também conhecido como “Ogalla Aquifer”, nos Estados Unidos, em que a utilização demasiada da água subterrânea acarretou problemas como sua exaustão, alteração no regime hidrológico de rios, alguns dos quais secaram, e rebaixamento de terrenos (ALBUQUERQUE, 2007).

Assim, torna-se cada vez mais evidente que a utilização de águas subterrâneas não deve ser contemplada apenas como um reservatório de água para abastecimento, sendo necessário se atentar também a seu valor ambiental. Apesar do grande volume de água disponível nos aquíferos, sua taxa de renovação é muito lenta. Portanto, a captação desse manancial de maneira não sustentável, isto é, que não obedeça à sua capacidade de reabastecimento, pode causar problemas de super-exploração, com reflexos na exaustão de aquíferos, desastres geotécnicos e ambientais, como, por exemplo, redução dos fluxos de base dos rios, prejudicando sua perenidade (EUROPEAN COMMUNITIES, 2008; ALBUQUERQUE, 2007).

Assim sendo, em razão da crescente utilização da água subterrânea, muitas vezes de forma descontrolada, e da sua importância como reserva estratégica, evidencia-se a necessidade de adoção de métodos que visem a disciplinar seu uso. Observa-se que as experiências em cobrança pelo uso da

água estão mais voltadas para os recursos hídricos superficiais, ficando notória a necessidade de pesquisas voltadas para as águas subterrâneas (SILVA, 2011, FREIRE, 2002).

2.5 Efeito dos reservatórios de regularização de vazões

O aumento da demanda pelo uso da água e os crescentes cenários de escassez hídrica têm forçado a busca por alternativas que promovam o aumento da disponibilidade de água.

A variação temporal da ocorrência de precipitações influencia no regime de vazões nos cursos d'água. Consequentemente, nos períodos de estiagem, podem ocorrer situações em que a disponibilidade natural, que é representada pelas vazões mínimas em condições a fio d'água, não é suficiente para atender as demandas existentes na bacia. Nessas circunstâncias, tem-se a possibilidade de potencializar o uso da água pela regularização de vazões, que pode ser feita pela construção de reservatórios (BARBOSA, 2011).

A utilização de reservatórios de regularização tem se destacado como instrumento em busca da sustentabilidade hídrica em regiões em que os recursos hídricos são limitados ou têm distribuição temporal desfavorável (ASFORA; CIRILO, 2005). Sobressai-se, portanto, como um dos mecanismos mais eficientes na gestão de recursos hídricos (LIU et al., 2006).

A adoção da regularização visa à redistribuição das vazões, diminuindo os prejuízos causados pela escassez de água, potencializando a eficiência do uso dos recursos hídricos (WANG et al., 2014). Na medida em que se altera a distribuição espaço-temporal do escoamento, os reservatórios podem gerar inúmeros benefícios, tais como controle de enchentes, geração de energia hidrelétrica, abastecimento urbano, navegação e recreação, reduzindo, assim, a dependência humana da disponibilidade natural de água (LIU et al., 2006).

Os reservatórios de regularização alteram o comportamento das vazões nos cursos d'água, modificando o suprimento de água a jusante, tendendo a aumentar a vazão mínima disponível, aproximando-a da vazão média. É importante destacar que a disponibilidade de água não pode superar o potencial da bacia, representada pela vazão média de longo período, a menos

que se tenha transposição (NUNES & PRUSKI, 2015; ASFORA & CIRILO, 2005).

Portanto, os reservatórios são relevantes na gestão dos recursos hídricos, uma vez que têm capacidade de estocar água nos períodos úmidos e liberar parte do volume acumulado em épocas de escassez. Dessa forma, podem ser utilizados como uma garantia de abastecimento de água para diversos usos sejam eles consuntivos ou não consuntivos (IBIO/FUNARBE, 2013).

Além de aumentar a disponibilidade hídrica, a construção de reservatórios de regularização permite que a concessão de outorgas de direito de uso da água englobe um maior número de usuários, maximizando os benefícios da adoção dessa prática. De acordo com a resolução conjunta da SEMAD-IGAM nº 1548, de 29 de março de 2012, que dispõe sobre a vazão de referência para o cálculo da disponibilidade hídrica superficial nas bacias hidrográficas do estado de Minas Gerais, as outorgas a fio d'água podem ser concedidas até que se atinja o valor de 50% da $Q_{7,10}$ anual para a maioria das bacias hidrográficas estaduais. Em condições em que o curso d'água esteja regularizado, a vazão outorgável passa a ser expressa pela vazão média de longa duração, deixando uma vazão residual de pelo menos 50% da $Q_{7,10}$.

Na região Sul do Brasil, a produção de arroz irrigado tem maior demanda por uso da água entre as outras atividades agrícolas, e, em geral, a disponibilidade hídrica natural não é capaz de atender a necessidade de irrigação durante os meses de maior consumo. Sendo assim, nos últimos 100 anos, foram construídos vários pequenos reservatórios com o intuito de garantir o suprimento de água para esta atividade (COLLISCHONN et al., 2011).

Em condições a fio d'água, considera-se que as retiradas de água sejam feitas durante 24 horas por dia, 30 dias no mês, em vazões sobrepostas, sendo essa pressuposição adotada pelos órgãos gestores como medida de garantir o suprimento de água aos usuários. Contudo, quando se tem a construção de reservatórios, é possível considerar as retiradas conforme o tempo de utilização, isto é, as vazões distribuídas no tempo (NUNES & PRUSKI, 2015).

Neste contexto, Nunes e Pruski (2015) realizaram um estudo para a bacia do Ribeirão Entre Ribeiros, com o objetivo de analisar os efeitos da construção de reservatórios na disponibilidade hídrica ao longo da hidrografia, e concluíram que a substituição das vazões sobrepostas por vazões distribuídas

no tempo permitiu uma redução da demanda de até 60%, o que equivale a um aumento da mesma proporção no potencial de utilização de recursos hídricos. Esse mesmo trabalho também constatou uma variação da razão entre a vazão mínima de referência ($Q_{7,10}$) e a vazão média de longa duração (Q_{mld}) de 8,3 a 9 vezes ao longo da hidrografia da bacia de estudo.

2.6 Bacia do Paracatu

A bacia do Rio Paracatu localiza-se na região do Médio São Francisco e tem a maior proporção de sua área, cerca de 92%, situada no estado de Minas Gerais, enquanto o restante, 5 e 3%, ocupa áreas do estado de Goiás e do Distrito Federal, respectivamente (IGAM, 2006).

A bacia do Paracatu apresentou, a partir da década de 70, um expressivo desenvolvimento econômico, acarretando alto crescimento no consumo de água. Esse aumento no uso de água ocorre em razão de o crescimento econômico estar relacionado a um aumento da renda “per capita”, que gera maior demanda por alimentos e infraestrutura, refletindo-se, conseqüentemente, em uma maior utilização dos recursos hídricos, necessários tanto para insumo como para corpo receptor de efluentes (RODRIGUEZ, 2004).

As principais retiradas de água na bacia do Rio Paracatu são destinadas à irrigação, sendo os outros consumos pouco expressivos quando comparados a esta atividade (BRASIL, 1996). Pruski et al. (2007) citam que, em consequência da grande expansão da agricultura irrigada nesta bacia a partir da década de 70, têm surgido sérios conflitos pelo uso da água.

Pruski et al. (2007), em um estudo realizado para a bacia do Rio Paracatu, analisaram o impacto das vazões demandadas pela irrigação e pelos abastecimentos animal e humano e observaram que as vazões consumidas pelos segmentos usuários analisados correspondem a uma pequena proporção da vazão média de longa duração, representando em torno de 0,5 a 2,1% das vazões dos rios para as 18 estações fluviométricas analisadas.

3 MATERIAL E MÉTODOS

3.1 Caracterização da área de estudo

A região de estudo corresponde à bacia hidrográfica do Rio Paracatu, que está inserida no Alto-Médio São Francisco, região noroeste de Minas Gerais, e apresenta uma área de drenagem de 45.600 km². Essa bacia, embora represente apenas 7,3% da área total da bacia do São Francisco, tem a maior parcela de contribuição (18,2%) para a formação da vazão do Rio São Francisco (IGAM, 2006; PEREIRA et al., 2007).

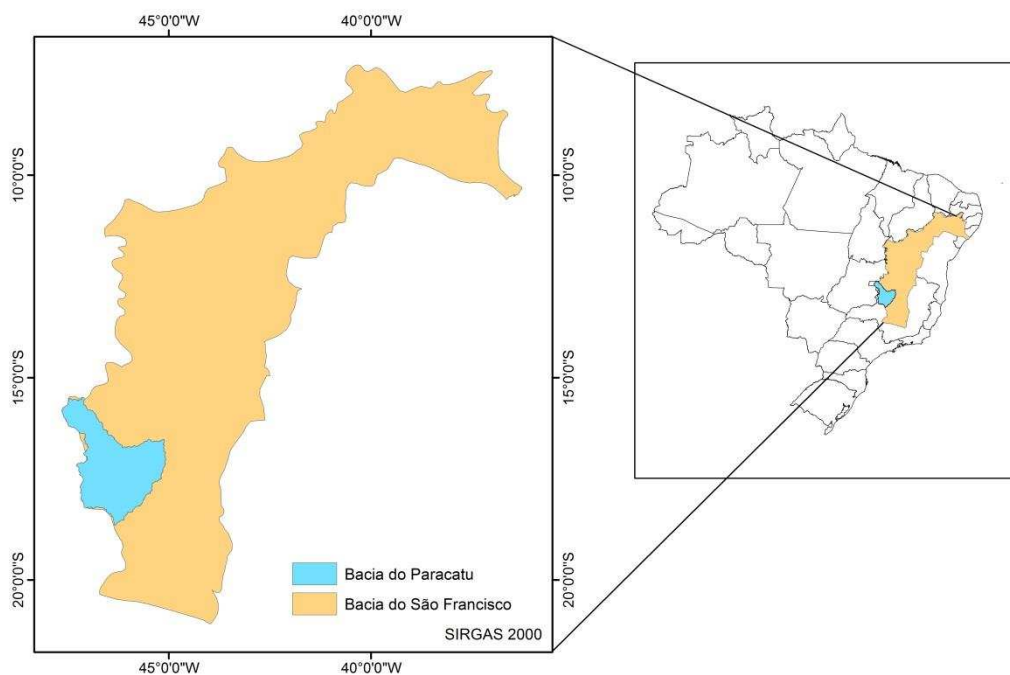


Figura 1 - Localização geográfica da bacia do rio Paracatu.

A bacia do rio Paracatu localiza-se no domínio do bioma Cerrado, apresentando, contudo, variações fitogeográficas como cerradão, mata seca, mata ciliar, veredas e capoeiras (IGAM, 2006).

As grandes classes de solo existentes na área de estudo são: Latossolos, Cambissolos, Neossolos Quartzarênicos, solos Hidromórficos, Neossolos Flúvicos e solos com horizonte B textural. Os solos com horizonte B latossólico são os mais comumente encontrados e se caracterizam por apresentar baixa fertilidade devido ao alto grau de intemperização, entretanto, sua alta permeabilidade permite que, pela aplicação de fertilizantes e corretivos, apresente grande potencial de utilização para a agricultura (VASCONCELOS et al., 2012; IGAM, 2006).

O clima da bacia do Paracatu é caracterizado como tropical chuvoso, com duas estações bastante distintas, uma quente e chuvosa, que compreende os meses entre outubro a abril, e se caracteriza pela ocorrência de cerca de 93% da precipitação total anual. Na estação seca, a precipitação é mínima e as temperaturas são mais amenas, sendo que a média mínima mensal é em torno de 18°C. A precipitação média anual nessa região é da ordem de 1340 mm (IGAM, 2006).

O regime de variação das vazões dos rios da bacia do Rio Paracatu caracteriza o início do ano hidrológico no mês de outubro, quando as vazões dos rios aumentam em função das primeiras precipitações, e termina em setembro, quando as vazões atingem seus valores mínimos (BRASIL, 1996).

A bacia do Rio Paracatu é dividida em três regiões hidrologicamente homogêneas (RHH) (Figura 2). A região I tem oito estações fluviométricas, englobando áreas que vão desde as nascentes do Rio Preto e do Ribeirão Entre Ribeiros até sua confluência com o Rio Paracatu, totalizando uma área de 14.088 km²; a região II tem seis estações fluviométricas e vai das nascentes do Rio Paracatu até a confluência com o Rio Preto, com uma área de drenagem de 14.213 km²; e a Região III, com sete estações fluviométricas, corresponde ao restante da bacia até a foz do Paracatu no Rio São Francisco, com área de drenagem igual a 16.642 km² (GPRH/IGAM, 2012; PRUSKI et al., 2011; ATLAS DIGITAL DAS ÁGUAS DE MINAS, 2007).

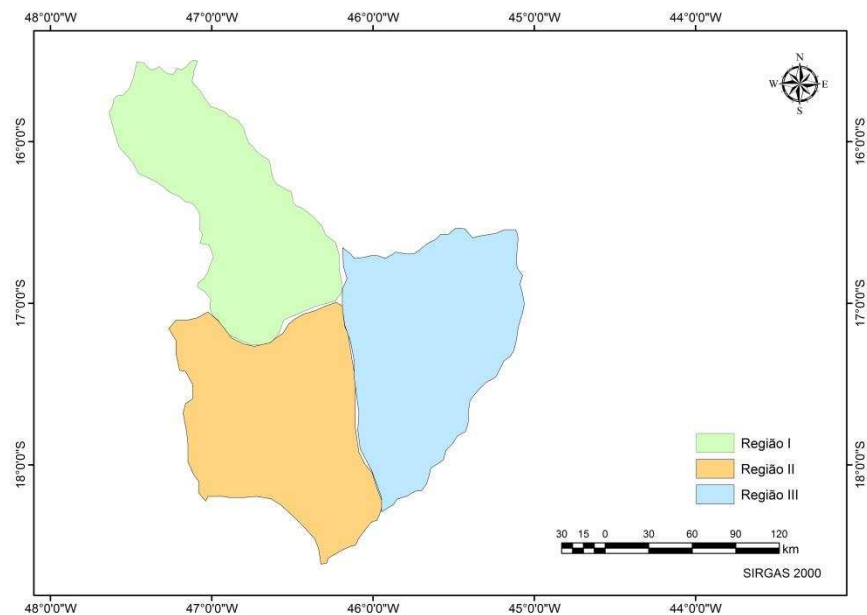


Figura 2 - Regiões hidrologicamente homogêneas da bacia do Paracatu.

3.2 Dados utilizados no estudo e seleção do período base

Para a realização do presente estudo, foram utilizados dados provenientes de 21 estações fluviométricas, Figura 3, inseridas na bacia do Rio Paracatu, pertencentes à rede da hidrometeorológica da ANA, adotando-se como período base os anos de 1974 a 2004. A tabela contendo a descrição dessas estações se encontra no Apêndice A.

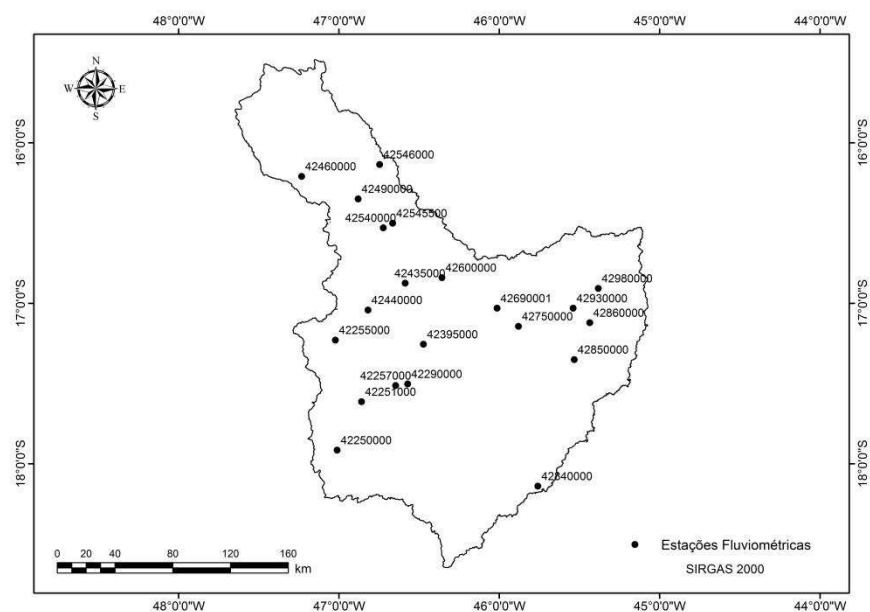


Figura 3 - Localização das estações fluviométricas

Além dos dados das estações fluviométricas, também foram utilizadas as equações de regionalização obtidas no estudo de regionalização de vazões para o Estado de Minas Gerais (GPRH/IGAM, 2012). As equações de regionalização são apresentadas no Quadro 1.

Quadro 1 - Equações de regionalização para as regiões homogêneas da Bacia do Paracatu

Região	Equações de regionalização
Região I	$Q_{mld} = 0,98845 \text{ Peq}_{750}^{0,97146}$
	$Q_{7,10} = 0,11673 \text{ Peq}_{750}^{0,987020}$
Região II	$Q_{mld} = 0,88746 \text{ Peq}_{750}^{0,935823}$
	$Q_{7,10} = 0,12054 \text{ Peq}_{750}^{0,90740}$
Região III	$Q_{mld} = 0,77112424 \text{ Peq}_{750}^{0,9707885}$
	$Q_{7,10} = 0,13035 \text{ Peq}_{750}^{0,89122}$

em que: Q_{mld} = vazão média de longa duração $\text{m}^3 \text{s}^{-1}$; Peq_{750} = vazão equivalente ao volume precipitado considerando a subtração do fator de abstração da precipitação de 750 mm para a formação das vazões, $\text{m}^3 \text{s}^{-1}$; $Q_{7,10}$ = vazão mínima com sete dias de duração e período de retorno de dez anos, $\text{m}^3 \text{s}^{-1}$.

3.3 Desenvolvimento do critério de cobrança pelo uso da água de acordo com o manancial de captação

A água proveniente do manancial subterrâneo é uma importante reserva estratégica, sendo a conexão entre esse manancial e os cursos d'água um conhecimento importante na gestão de recursos hídricos (IVKOVIC, 2009). Com a finalidade de se obter uma referência de caráter físico para o desenvolvimento do critério de valoração do uso da água subterrânea proveniente do lençol freático, foi desenvolvido um estudo da variação sazonal da proporção de contribuição da água subterrânea para a formação das vazões dos rios na bacia do Paracatu.

3.3.1 Análise da proporção de contribuição do escoamento subterrâneo para a formação das vazões no curso d'água

3.3.1.1 Separação dos escoamentos superficial direto e subterrâneo

A separação do escoamento, com base na análise de hidrograma de vazões, é uma estratégia que possibilita a compreensão da dinâmica e a magnitude da contribuição das águas subterrâneas, tendo uma grande variedade de métodos sido desenvolvida para esta finalidade (BRODIE & HOSTETLER, 2005).

3.3.1.1.1 Metodologia de separação

A separação dos escoamentos foi feita por um sistema computacional, *SepHidro* (Sistema computacional para auxílio à separação dos hidrogramas em escoamento superficial e escoamento subterrâneo), desenvolvido por Miranda et al., (2012). Esse sistema obtém os valores de escoamento com base em séries históricas de dados de vazão, utilizando as informações disponibilizadas no portal *Hidroweb* da ANA, no formato *.mdb*. No *SepHidro* estão disponíveis três metodologias de separação do escoamento superficial, sendo eles os método do intervalo fixo (IF), o método do intervalo móvel (IM) e o método dos mínimos locais (ML), os quais são embasados na análise gráfica de hidrogramas.

Para a aplicação neste trabalho, foi empregado o método dos mínimos locais, em razão de se aproximar mais dos resultados obtidos de processos manuais de separação. Neste método, verifica-se se a vazão do dia $D_{(i)}$ é a menor dentro do intervalo $2N^*$ dias.

O $2N^*$ corresponde ao número inteiro imediatamente superior ao dobro de N , o qual consiste no intervalo de duração do escoamento superficial direto após a ocorrência da vazão máxima (LINSLEY et al., 1982). Esse valor pode ser obtido pela equação empírica (FETTER, 2001):

$$N = 0,827 A^{0,2} \quad (1)$$

em que A é a área de drenagem, km²

Feita a verificação, então é considerado o dia $D_{(i)}$, um mínimo local. Este procedimento é feito para todos os dias da série. Posteriormente à detecção dos mínimos locais, eles são unidos por meio de retas (MIRANDA et al., 2012).

3.3.1.1.2 Quantificação do escoamento superficial direto e subterrâneo

Após a aplicação do método de separação dos escoamentos, os volumes de escoamento superficial e subterrâneo são obtidos pelas equações:

$$V_{(i)} = \int_{t_i}^{t_{i+1}} Q_i dt = \frac{(Q_{(i+1)} + Q_{(i)})}{2} \Delta t \quad (2)$$

$$V_{\text{ESub}(k)} = \int_{t_k}^{t_{k+1}} Q_{\text{ESub}(i)} dt = \frac{(Q_{\text{ESub}(k+1)} + Q_{\text{ESub}(k)})}{2} \Delta t \quad (3)$$

$$V_{\text{ES}(k)} = V_{(k)} - V_{\text{ESub}(k)} \quad (4)$$

em que: $V_{(k)}$ = volume de escoamento total no dia k, m³; $Q_{(k)}$ = vazão do dia k, obtida da base de dados da estação fluviométrica, m³·s⁻¹; Δt = intervalo de tempo compreendido entre os instantes t_k e t_{k+1} , igual a 86400s; $V_{\text{ESub}(k)}$ = volume de escoamento subterrâneo no dia k, m³; $Q_{\text{ESub}(k)}$ = vazão correspondente ao escoamento subterrâneo no dia k, m³·s⁻¹; e $V_{\text{ES}(k)}$ = volume de escoamento superficial direto no dia k, m³.

Para cada dia da série analisada, são obtidos os volumes de escoamento superficial e subterrâneo. O volume de escoamento superficial direto é obtido pela seguinte equação:

$$V_{\text{ESa}} = \sum_{i=1}^{ud} V_{\text{ES}(k)} \quad (5)$$

em que: V_{ESa} = volume de escoamento superficial direto total anual, m³; $V_{\text{ES}(k)}$ = volume de escoamento superficial direto no dia k, m³; e ud = último dia do ano hidrológico.

O ano hidrológico é obtido através do período de recessão dos escoamentos dos hidrogramas.

A aplicação do sistema computacional *SepHidro* permite a obtenção dos volumes de escoamento superficial direto e de escoamento subterrâneo e, conseqüentemente, do escoamento total para cada dia da série de dados de entrada. Além disso, esse sistema também fornece os valores médios mensais com base na série histórica utilizada.

3.3.1.2 Estimativa da relação mensal entre escoamento subterrâneo e escoamento total para cada estação fluviométrica

De posse dos valores de escoamento superficial direto e subterrâneo e com o intuito de verificar a proporção de contribuição do escoamento de base para a formação de vazões nos cursos d'água, foi estimada, para cada mês da série de estudo, a relação entre escoamento subterrâneo e total segundo a equação:

$$R_{EST\ m} = \frac{LE_{Sub\ m}}{LE_{Total\ m}} \quad (6)$$

em que: m = mês; $R_{EST\ m}$ = relação entre escoamento subterrâneo e escoamento total no mês m ; $LE_{Sub\ m}$ = lâmina de escoamento subterrâneo para o mês m ; LE_{total} = lâmina de escoamento superficial total para o mês m .

Para cada ano da série, foi obtido o valor mensal da relação anteriormente citada e, por fim, foi feita uma média desse valor, obtendo um valor médio da relação para cada mês do ano. Esse procedimento foi feito para cada uma das 21 estações fluviométricas de estudo.

3.3.2 Identificação de regiões homogêneas para aplicação da metodologia de cobrança

Uma vez obtidos os valores mensais da relação entre o escoamento subterrâneo e o escoamento total para cada uma das 21 estações, procedeu-

se à análise da distribuição dessa informação para uma maior área de abrangência na bacia do Paracatu, sendo realizadas as seguintes etapas: análise prévia dos dados para identificação e exclusão de *outliers*, identificação de regiões homogêneas e testes estatísticos para medida de homogeneidade.

3.3.2.1 Identificação de *outliers* através da estatística *Box Plot*

Para uma análise preliminar dos dados, foi feita a identificação de comportamentos discrepantes, através da estatística *Box Plot*, entre os valores das relações mensais de escoamento subterrâneo e escoamento total para as 21 estações fluviométricas de estudo.

Box Plot é um recurso estatístico, criado por Jonh Tukey, em 1977, que visa à identificação de valores discrepantes, *outliers*, em um conjunto de dados. Valores discrepantes podem indicar erros nos dados utilizados ou falhas no seu processamento, sendo assim, é necessário fazer uma correção ou exclusão dessas informações (REIS & REIS, 2002).

O gráfico *Box Plot* tem formato de caixa, sendo construído com base em cinco números: limite inferior, primeiro quartil, mediana (segundo quartil), terceiro quartil e limite superior. Os limites inferior (L_I) e superior (L_S), especificados nas equações 7 e 8, caracterizam um intervalo de valores para determinado conjunto de dados, sendo assim, os dados que se localizam fora desse intervalo são denominados *outliers*.

$$L_I = Q_1 - 1,5 (Q_3 - Q_1) \quad (7)$$

$$L_S = Q_3 + 1,5 (Q_3 - Q_1) \quad (8)$$

em que: L_I = limite inferior do *Box Plot* para identificação de *outliers*; L_S = limite superior do *Box Plot* para identificação de *outliers*; Q_1 = quartil 1; Q_3 = quartil 3; e 1,5 = valor obtido por meio da comparação com uma distribuição normal.

Nas situações em que os dados apresentam maior discrepância, eles são denominados *outliers* extremos, sendo os limites que caracterizam sua ocorrência apresentados nas equações 9 e 10:

$$LE_I = Q_1 - 3 (Q_3 - Q_1) \quad (9)$$

$$LE_S = Q_1 + 3 (Q_3 - Q_1) \quad (10)$$

em que: LE_I = limite inferior do *Box Plot* para identificação de *outliers* extremos; LE_S = limite superior do *Box Plot* para identificação de *outliers* extremos; e 3,0 = valor obtido por meio da comparação com uma distribuição normal.

O fato de a hidrologia ser uma ciência que faz uso de dados altamente suscetíveis a erros, como os erros oriundos da medição indireta de vazões e relacionados à delimitação da área de drenagem de estações fluviométricas, torna importante a utilização de ferramentas como o *Box Plot* (OLIVEIRA, 2008).

3.3.2.2 Identificação de regiões homogêneas pela análise de cluster

Com o intuito de transformar a informação obtida em cada estação fluviométrica em uma informação associada a uma maior área de abrangência, foi feita a análise de cluster para a identificação de regiões homogêneas quanto à proporção de contribuição do escoamento subterrâneo para formação do escoamento total.

A análise de cluster é uma técnica da estatística multivariada que vem sendo aplicada em diversas áreas de conhecimento (SASIDHARAN et al., 2015; WANG et al., 2013; CAO et al., 2013; RAO & SRINIVAS, 2006) e cuja aplicação tem o intuito de dividir os dados em grupos de objetos de características semelhantes.

As principais dificuldades da análise de cluster estão relacionadas à escolha da medida de dissimilaridade, do método de aglomeração e das variáveis a serem utilizadas, sendo importante frisar que essas decisões têm bastante influência nos resultados (NATHAN & MCMAHON, 1990).

As medidas ou distâncias de dissimilaridade entre dois indivíduos analisados devem ser representativas da variação mútua das características locais em um espaço p -dimensional. A medida mais comumente utilizada é a distância Euclidiana generalizada, equação 11, que consiste na distância geométrica tomada em um espaço de p dimensões (NAGHETTINI & PINTO 2007).

$$D_{xy} = \sqrt{\sum_{l=1}^p (Z_{xl} - Z_{yl})^2} \quad (11)$$

em que: D_{xy} = distância Euclidiana entre dois indivíduos x e y ; Z_x = característica relacionada ao indivíduo x ; Z_y = característica relacionada ao indivíduo y .

No presente estudo, a variável utilizada foi a relação mensal entre o escoamento subterrâneo e o escoamento total. O método selecionado para análise de cluster das estações da bacia do Rio Paracatu foi o método hierárquico desenvolvido por Ward em 1963, o qual aplica a análise de variância para determinar as distâncias entre clusters e, a cada nova iteração, reaglomerá-los de forma a minimizar a soma dos quadrados de quaisquer pares de dois clusters hipotéticos (NAGHETTINI & PINTO 2007). Para a realização dos processamentos referentes à análise de cluster, utilizou-se o programa R, com auxílio dos pacotes “DAAG” e “ClusterCrit”.

3.3.2.2.1 Testes estatísticos para medida de heterogeneidade

Posteriormente à realização da análise de cluster, os totais de 1, 2, 3, 4 e 5 grupos obtidos para a bacia do Paracatu foram analisados espacialmente de maneira a se observar qual divisão resultou em uma melhor representação. Os agrupamentos gerados também foram avaliados segundo medidas de heterogeneidade, utilizando momentos-L. Deste modo, a análise espacial, juntamente com a análise estatística, permitiu a definição do melhor agrupamento para o estabelecimento da metodologia de cobrança.

3.3.2.2.1.1 Medida de discordância – Di

A medida de discordância D_i , definida em termos de momentos-L, foi aplicada com a finalidade identificar, dentro dos clusters analisados, estações com características estatísticas muito discrepantes das demais.

Os quocientes dos momentos L de um local j : o CV-L, a assimetria-L e a curtose-L, são considerados como um ponto em um espaço tridimensional. Formando, assim, um vetor u_j (3x1):

$$u_j = (t^j \ t_3^j \ t_4^j)^T \quad (12)$$

em que: t , t_3 , t_4 denotam CV-L, assimetria-L e curtose-L, respectivamente, e o símbolo T indica matriz transposta.

Seja $\bar{u}$ um vetor (3x1), da média aritmética simples, de u_j para todas as estações de estudo:

$$\bar{u} = \frac{\sum_{i=1}^N u_i}{N} = (t^R \ t_3^R \ t_4^R)^T \quad (13)$$

em que: N representa o número de estações da região R em questão. Dada a matriz de covariância amostral S :

$$S = (N-1)^{-1} \sum_{i=1}^N (u_i - \bar{u})(u_i - \bar{u})^T \quad (14)$$

A medida de discordância D_j para o local j é definida pela equação:

$$D_j = \frac{N}{3(N-1)} (u_j - \bar{u})^T S^{-1} (u_j - \bar{u}) \quad (15)$$

A estação j é considerada discordante, caso o valor de D_j associado a ela seja classificado como D_{icrit} , conforme mostra a Quadro 2.

Quadro 2 - Valores críticos da medida de discordância D_i

Nº de locais na região	D_{crit}
5	1,333
6	1,648
7	1,917
8	2,140
9	2,329
10	2,491
11	2,632
12	2,757
13	2,869
14	2,971
≥ 15	3,0

Fonte: (HOSKING & WALLIS, 1997).

3.3.2.2.1.2 Medida de Heterogeneidade – H

A estatística H avalia o grau de heterogeneidade de uma região pela comparação da variabilidade amostral observada com uma variabilidade esperada para uma região homogênea. Contudo, é importante ressaltar que a homogeneidade de uma região deve ser baseada, sobretudo, em suas características de uniformidade física ou geográfica, não apenas nos valores de H (HOSKING E WALLIS, 1997).

O cálculo da dispersão das regiões proposta e simulada foi feito pelo coeficiente de variação amostral (CV-L), isto é, t , conforme recomendam Hosking e Wallis (1997). A medida de variância como uma medida de dispersão, ponderada pelo tamanho das séries, é calculada conforme a equação:

$$V = \left(\frac{\sum_{j=1}^N n_j (t^j - t^R)^2}{\sum_{j=1}^N n_j} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (16)$$

em que: V = medida de variância ponderada pelo tamanho das séries; N_j = número de locais na região; t^j , t_3^j , t_4^j = médias regionais dos quocientes CV-L, Assimetria-L e Curtose-L.

O cálculo das estatísticas simuladas para a região homogênea requer a definição de uma função de distribuição de probabilidades para a população à qual pertence a amostra. Hosking e Wallis (1997) recomendam a utilização da distribuição *Kappa*, de quatro parâmetros, pela sua maior flexibilidade e, também, para evitar o comprometimento com uma distribuição particular de dois ou três parâmetros (WOLF, 2013; NAGHETTINI & PINTO, 2007).

A média aritmética das variâncias V_j , calculadas para cada simulação, fornecerá a dispersão média esperada na região homogênea:

$$\mu_V = \frac{\sum_{j=1}^{N_{SIM}} V_j}{N_{SIM}} \quad (17)$$

em que N_{SIM} é o número de simulações.

A medida de heterogeneidade H estabelece uma comparação entre a dispersão observada e a dispersão simulada:

$$H_1 = \frac{(V - \mu_V)}{\sigma_V} \quad (18)$$

em que: v = estatística calculada por meio da equação 16; μ_V = média aritmética das estatísticas V_j calculada para cada simulação; σ_V = desvio padrão entre os N_{SIM} valores da medida de dispersão V_j , calculado pela equação:

$$\sigma_V = \sqrt{\frac{\sum_{j=1}^{N_{SIM}} (V_j - \mu_V)^2}{N_{SIM} - 1}} \quad (19)$$

Portanto, a região é considerada “aceitavelmente homogênea” se $H < 1$, “possivelmente heterogênea” se $1 < H < 2$, e, “definitivamente heterogênea”, se $H > 2$.

3.3.2.3 Definição de intervalos de confiança para os valores mensais

De posse das regiões homogêneas, foram calculados os seus respectivos valores médios mensais e, com a finalidade de associar uma maior confiabilidade aos dados, aplicou-se um intervalo de confiança de 95%, equação 20, que equivale a uma probabilidade de 95% de os intervalos construídos conterem a verdadeira média.

$$IC_R = \overline{R_{EST\ m}} \pm 1,96 \frac{\sigma}{\sqrt{N}} \quad (20)$$

em que: IC_R = intervalo de confiança das relações entre os escoamentos subterrâneo e escoamento total para cada mês; $\overline{R_{EST\ m}}$ = média das relações entre os escoamentos subterrâneo e escoamento total para cada mês m ; σ = desvio padrão para cada mês; e N = número de anos da série.

3.3.3 Estabelecimento do critério de cobrança pelo uso da água proveniente do manancial subterrâneo freático

O estabelecimento do critério de cobrança pelo uso da água subterrânea foi embasado nos estudos da relação entre escoamento subterrâneo e total ($R_{EST\ m}$) e nas seguintes considerações:

a) o valor de um produto é estabelecido de acordo com a lei da oferta e da procura, isto é, quando se tem maior oferta o custo é reduzido. Considerando que a oferta é representada pela soma do escoamento subterrâneo e do superficial direto, o período no qual a oferta de água é representada majoritariamente pelo escoamento subterrâneo, à água subterrânea deve ser associada um valor menor; e

b) a água subterrânea é um recurso estratégico, devendo seu uso ser desestimulado nos períodos em que se tem água superficial em maior disponibilidade.

Levando-se em conta esses aspectos e considerando a variação sazonal da relação entre escoamento subterrâneo e total, foram feitos os ajustes necessários para a criação de um critério de valoração da água subterrânea freática, o fator manancial de captação (F_{MC}), de maneira a estimular o uso mais racional dos recursos hídricos.

3.4 Desenvolvimento do critério de cobrança pelo uso da água de acordo com a regularização de vazões

3.4.1 Impacto dos reservatórios na disponibilidade hídrica com base na legislação atual

A Figura 4 mostra um esquema representativo da cobrança pelo uso da água de acordo com a legislação vigente, estando a Figura 4a associada a uma condição a fio d'água e a Figura 4b, à regularização de vazões. Na concepção dessa figura não se considera os valores relativos à construção de reservatórios de regularização e a indisponibilização das áreas inundadas pelos mesmos.

No eixo horizontal, são representados os volumes associados às vazões de referência para outorga no Estado de Minas Gerais, e no eixo vertical, é representado o valor unitário da água. Considerando que cada órgão gestor define um preço pelo uso da água baseado nos objetivos da cobrança e nas características da bacia, foi utilizada no presente trabalho a sigla U_{MRO} (Unidade Monetária de Referência para Outorga) com a finalidade de buscar um caráter de generalização para análise dos resultados obtidos.

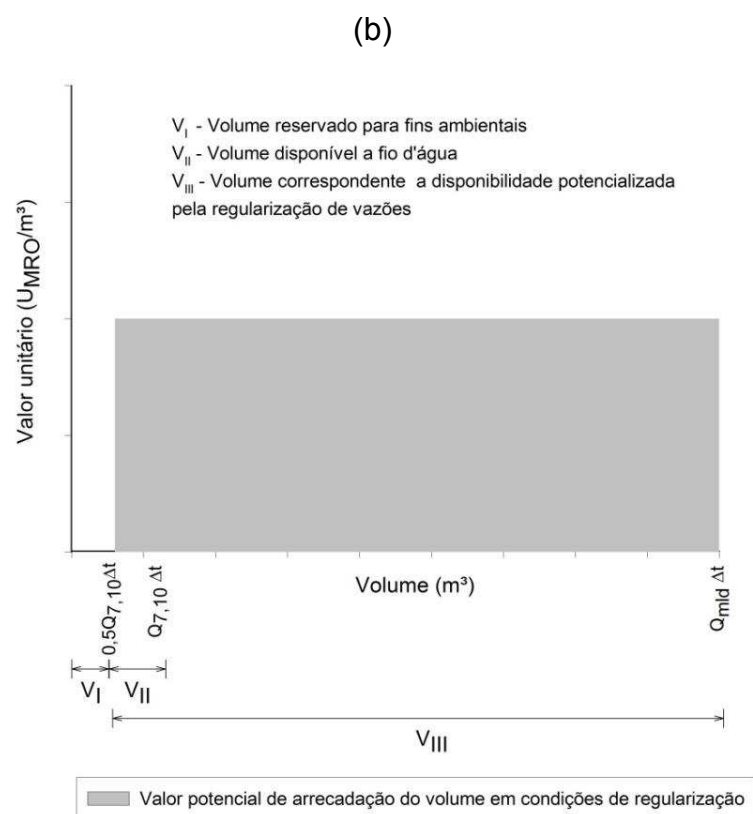
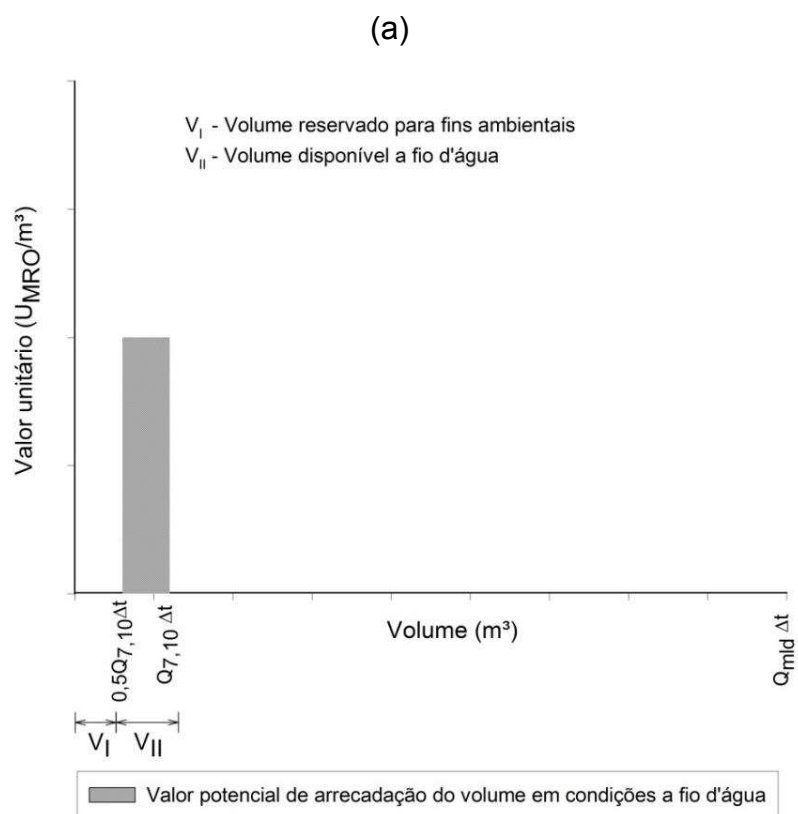


Figura 4 - Esquema representativo da cobrança pelo uso da água em condições a fio d'água (a) e de regularização (b).

Na Figura 4a, observa-se uma situação representativa da condição a fio d'água para os rios sob dominialidade do Estado de Minas Gerais. O volume, associado à vazão de 50% da $Q_{7,10}$, representado por V_I , corresponde ao volume residual mínimo que deve ser garantido a jusante de cada derivação com a finalidade de atender as exigências ambientais. A esse volume, portanto, não se atribui um valor econômico, visto não estar disponível para captação, por isso não está representado na Figura 4. O volume V_{II} está associado a uma vazão de 50% da $Q_{7,10}$ ($Q_{7,10} - 50\%Q_{7,10}$) e representa a disponibilidade hídrica em condições naturais.

Em situações em que a disponibilidade hídrica natural não é suficiente para atender as demandas, pode ser adotada a regularização de vazões, em que se constroem reservatórios para o armazenamento de água nos períodos de excedente hídrico para uso nos períodos de escassez. Nessa situação, Figura 4b, a garantia de suprimento de água aproxima-se do potencial da bacia, e a vazão de referência para outorga passa a ser a vazão média de longa duração. O volume V_{III} representa a disponibilidade hídrica em condições de regularização de vazões, que está associada à vazão média de longa duração menos a vazão mínima residual. Ao volume V_{II} e V_{III} , é aplicado o mesmo custo unitário.

A alteração da vazão de referência para outorga da $Q_{7,10}$ para Q_{mld} possibilita o aumento na utilização dos recursos hídricos. Com o intuito de estimar o aumento de disponibilidade, que se tem com a utilização da regularização de vazões em substituição à condição a fio d'água, gerou-se, para a bacia do Paracatu, um mapa de “ $\Delta Disp.$ ”, estimada pela equação:

$$\Delta Disp. \% = \frac{(Q_{mld} - 0,5 Q_{7,10}) - (0,5 Q_{7,10})}{(0,5 Q_{7,10})} 100 \quad (21)$$

em que $\Delta Disp. \%$ é o acréscimo em disponibilidade hídrica devido à alteração do critério de outorga em condições de regularização de vazão, %.

A utilização da regularização de vazões potencializa o aumento do uso da água com base num acréscimo de disponibilidade hídrica, contudo, de acordo com as legislações de recursos hídricos vigentes, esse volume

correspondente ao aumento da oferta de água em condições de regularização, está associado ao mesmo custo unitário do volume em condições a fio d'água. Esse procedimento contradiz o princípio clássico de que os preços dos bens ou serviços devem refletir a relação existente entre a oferta e a demanda desses bens e serviços (GARRIDO citado por CARVALHO et al., 2005), visto o volume potencial de aproveitamento em condições de regularização superar muito, em geral, o volume disponível em condições a fio d'água.

Outro aspecto que merece consideração é o fato de, embora todo o aumento da disponibilidade seja possível em condições de regularização, a vazão remanescente requerida pelas legislações de recursos hídricos vigentes no Brasil, normalmente, é a mesma vazão remanescente que em condições a fio d'água. Esse procedimento causa uma interferência expressiva para os usuários de jusante, inclusive para os que se valem do uso da água em condições naturais.

Na sequência, são apresentadas as proposições de adoção de um critério diferenciado para a cobrança pelo uso da água e de alteração da vazão mínima residual em condições de regularização de vazões.

3.4.2 Proposição de adoção de um critério diferenciado de cobrança pelo uso da água em condições de regularização e de alteração da vazão mínima residual

O incremento da disponibilidade hídrica obtido com a regularização de vazões é de grande importância nas situações em que a disponibilidade hídrica natural não é suficiente para atender às demandas existentes ou projetadas, possibilitando o desenvolvimento de atividades que, sem a regularização, não seriam possíveis. Considerando a crescente demanda dos recursos hídricos em diversas atividades, como, por exemplo, para a produção de alimentos, o aumento da oferta de água permite a expansão da área irrigada e, conseqüentemente, da produção agropecuária. Portanto, a utilização do volume de água potencializado pela regularização pode gerar grandes benefícios para a bacia, em relação ao aproveitamento racional dos recursos hídricos, e, por consequência, para o desenvolvimento socioeconômico da região.

Em razão dos benefícios relacionados a uma melhor locação da água pelo emprego da construção de reservatórios, o presente trabalho propõe a criação de um fator de deplecionamento do custo unitário da água para as condições de regularização de vazões.

Com a finalidade de favorecer a utilização mais racional dos recursos hídricos, sugere-se que, quando da utilização de reservatórios de regularização, haja uma alteração da vazão mínima residual de 50% da $Q_{7,10}$ para 100% da $Q_{7,10}$ visando a preservar as condições de disponibilidade natural, permitindo, desta forma, que o uso de água em condições de regularização não interfira nas condições de gestão a fio d'água.

Com base nesse propósito, procedeu-se a uma nova análise dos impactos da construção dos reservatórios na disponibilidade hídrica da bacia do Paracatu, considerando a alteração da vazão mínima residual para um valor igual a 100% da $Q_{7,10}$, em condições de regularização. Para esta condição, foi gerado um mapa correspondente à “ $\Delta \text{Disp.}_{\text{mod}}$ ”.

$$\Delta \text{Disp.}_{\text{mod}} \% = \frac{(Q_{\text{mld}} - Q_{7,10}) - (Q_{7,10})}{(0,5 Q_{7,10})} 100 \quad (22)$$

em que $\Delta \text{Disp.}_{\text{mod}} \%$ é o acréscimo na disponibilidade hídrica em relação à condição a fio d'água e considerando, portanto, a alteração da vazão mínima residual para 100% da $Q_{7,10}$, %.

A Figura 5 mostra um esquema representativo da proposta de alteração da vazão mínima residual e do valor de cobrança pelo uso da água em condições de regularização de vazões. A proposição de alteração da vazão mínima residual, de 50% da $Q_{7,10}$ para 100% $Q_{7,10}$, tem como consequência: o volume V_I não sofrer alteração, sendo ainda destinado às finalidades ambientais; o volume V_{II} , que anteriormente correspondia a parte do volume de água que podia ser aproveitado pela regularização, passar a ser uma reserva destinada aos usuários a fio d'água; e o volume V_{III_mod} sofrer uma abstração em relação ao V_{III} , equivalente ao aumento da vazão mínima residual, isto é, corresponde a $Q_{\text{mld}} - Q_{7,10}$.

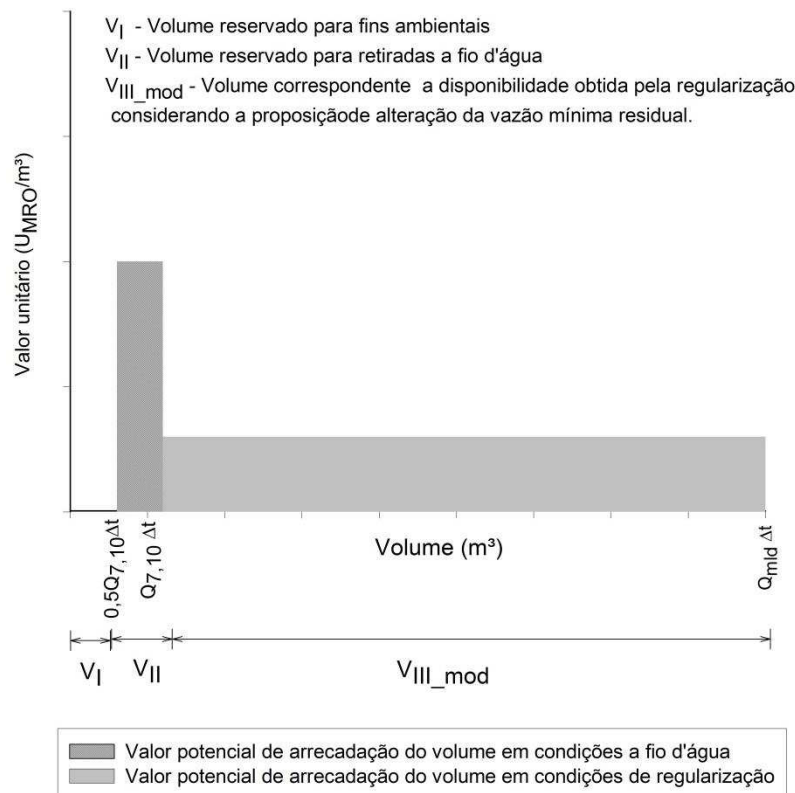


Figura 5 - Esquema representativo da proposta de estabelecimento do valor de cobrança pelo uso da água em condições de regularização de vazões e da alteração da vazão mínima residual.

No que diz respeito à proposição da criação de um fator de deplecionamento do custo unitário, essa proposição se baseia no fato de a regularização de vazões permitir agregação de valor a um volume de água que, em condições naturais, não seria utilizado para a realização de atividades econômicas. Outro aspecto que deve ser analisado é que a água, quando considerada um bem econômico, deve atender o princípio da oferta e demanda, sendo, conseqüentemente, seu valor estabelecido pela interação entre oferta e demanda (CARVALHO et al., 2005).

Considerando que a disponibilidade em condições naturais é representada pelas vazões mínimas e que essas vazões, segundo estudos realizados por Oliveira et al. (2013) e Pruski et al. (2014), apresentam variações de 10% nos meses de menor disponibilidade a 200% nos meses de maior disponibilidade, atribuiu-se às retiradas em condições de regularização o valor correspondente ao mês de maior oferta de água em condições naturais. Esse valor foi obtido em estudo feito por Ramos (2016) para a bacia do

Paracatu, que estabeleceu um critério de cobrança pelo uso da água, com base no comportamento sazonal das vazões, tendo constatado que o mês de março corresponde ao período de maior disponibilidade hídrica e, portanto, de menor valor da água.

3.5 Análise do impacto econômico da adoção dos fatores manancial de captação e regularização de vazões

Com o intuito de analisar o impacto econômico da adoção de diferentes critérios de cobrança pelo uso da água, foram criados oito cenários (C1 a C8) com base na combinação de quatro fatores de cobrança e duas situações de demanda, representados no Quadro 3, descritos nos itens 3.5.1 e 3.5.2.

Quadro 3 - Representação dos cenários simulados

		Critérios de cobrança			
		LV	LV e F _{MC}	LV e F _s	LV e F _R
Demanda	Fixa	C1	C2	C3	C4
	Variável	C5	C6	C7	C8

em que: LV = legislação vigente; F_{MC} = fator manancial de captação; F_s = fator sazonalidade; F_R = fator de deplecionamento pelo uso da água em condições de regularização.

3.5.1 Critérios de cobrança considerados

3.5.1.1 Legislação vigente

Para a simulação dos cenários, utilizou-se, como referência, a equação 23, que representa os mecanismos de cobrança pelo uso da água propostos por diversos comitês de bacias hidrográficas brasileiros, como, por exemplo, o CBHSF, o CEIVAP e os comitês PCJ.

$$\text{Valor}_{\text{total}} = \sum_i^{12} (v_{\text{cap}} \text{PPU}_{\text{cap}} K_{\text{cap}} + v_{\text{cons}} \text{PPU}_{\text{cons}} K_{\text{con}} + v_{\text{lan}} \text{PPU}_{\text{lan}} K_{\text{lan}}) K_{\text{gestão}} \quad (23)$$

em que: i = mês; $\text{Valor}_{\text{total}}$ = valor de cobrança anual pelo uso da água, em U_{MRO} ; v_{cap} , v_{cons} , v_{lan} = volumes mensais de captação, de consumo e de lançamento, respectivamente, m^3 ; PPU_{cap} , PPU_{con} , PPU_{lan} = preço público unitário para a captação, para o consumo e para a diluição de carga orgânica, respectivamente, $\text{U}_{\text{MRO}} \cdot \text{m}^{-3}$; K_{cap} , K_{con} , K_{lan} = coeficientes que levam em conta objetivos específicos da cobrança pela captação, pelo consumo e pela diluição, respectivamente, adimensional; $K_{\text{gestão}}$ = coeficiente que leva em conta o efetivo retorno às bacias dos recursos arrecadados pela cobrança do uso da água nos rios de domínio da União, adimensional.

Na equação 23, o volume v_{cap} corresponde à quantidade de água que é retirada do corpo hídrico, o v_{con} está relacionado à parcela do volume captado que não é devolvida ao corpo hídrico e o v_{lan} é o volume para diluição de determinada concentração de carga orgânica lançada nos cursos d'água. Esses volumes correspondem à base de cálculo das equações de cobrança adotadas pelos diversos órgãos gestores e tem o objetivo de quantificar os usos da água. Os PPU's correspondem ao preço público unitário, que tem a finalidade de definir o valor unitário do uso da água com base nos objetivos da cobrança. Já os coeficientes K são utilizados para o estabelecimento de adaptações dos mecanismos de cobrança a objetivos ou casos específicos.

Considerando que as simulações feitas no presente trabalho têm a finalidade de fazer uma análise mais quantitativa em relação à cobrança pelo uso da água, os aspectos relacionados à qualidade da água no que diz respeito ao lançamento de carga orgânica foram desconsiderados. Em relação aos volumes captados e consumidos, eles dependem do segmento usuário e serão tratados no item 3.5.2.

O preço público unitário adotado foi correspondente a $1 \text{ U}_{\text{MRO}} \cdot \text{m}^{-3}$ para a captação e em $2 \text{ U}_{\text{MRO}} \cdot \text{m}^{-3}$ para o consumo. Essa proporção está baseada no fato de as legislações vigentes normalmente atribuírem ao volume de consumo um custo unitário maior, sendo que para os comitês CBHSF, CEIVAP e comitês PCJ, a proporção entre os PPU's é da ordem de dois. A unidade considerada, conforme mencionado anteriormente, foi utilizada com o intuito de buscar um caráter de generalização para análise dos resultados, uma vez que cada órgão

de gestão atribui um valor de PPU, conforme os objetivos da cobrança da bacia hidrográfica.

Com relação aos coeficientes K_{cap} e K_{cons} , na consideração do critério de cobrança correspondente à legislação vigente, eles foram considerados iguais à unidade, sendo desconsideradas as particularidades existentes nas legislações, como, por exemplo, os coeficientes que consideram a classe de enquadramento dos corpos d'água e os que levam em conta as boas práticas de uso e conservação da água. Para os cenários correspondentes à consideração dos fatores manancial de captação, de sazonalidade e de regularização de vazão, os coeficientes K_{cap} e K_{cons} receberam os valores relativos a esses diferentes critérios, que são descritos na sequência.

O coeficiente $K_{gestão}$, que considera o efetivo retorno às bacias dos recursos arrecadados pela cobrança do uso da água nos rios de domínio da União, foi considerado para o presente trabalho igual à unidade para todos os cenários simulados, com base nas legislações vigentes.

3.5.1.2 Legislação vigente associada ao fator manancial de captação

A simulação da cobrança considerando o uso da água subterrânea utilizou a legislação vigente associada ao fator manancial de captação (cenários C2 e C6). Para tanto utilizou-se a equação 23 e os valores de K_{cap} e K_{cons} foram substituídos pelos valores mensais do fator manancial de captação, propostos no presente trabalho para a cobrança pelo uso da água proveniente do manancial subterrâneo freático.

3.5.1.3 Legislação vigente associada ao fator sazonalidade

Nos cenários C3 e C7 considerou-se o uso de água em condição a fio d'água. Nesses cenários também foi utilizada a equação 23 e os valores de K_{cap} e K_{cons} foram substituídos pelo fator sazonalidade (Figura 6), obtido em um estudo desenvolvido por Ramos (2016) para a cobrança pelo uso da água em condições a fio d'água, na bacia do Paracatu.

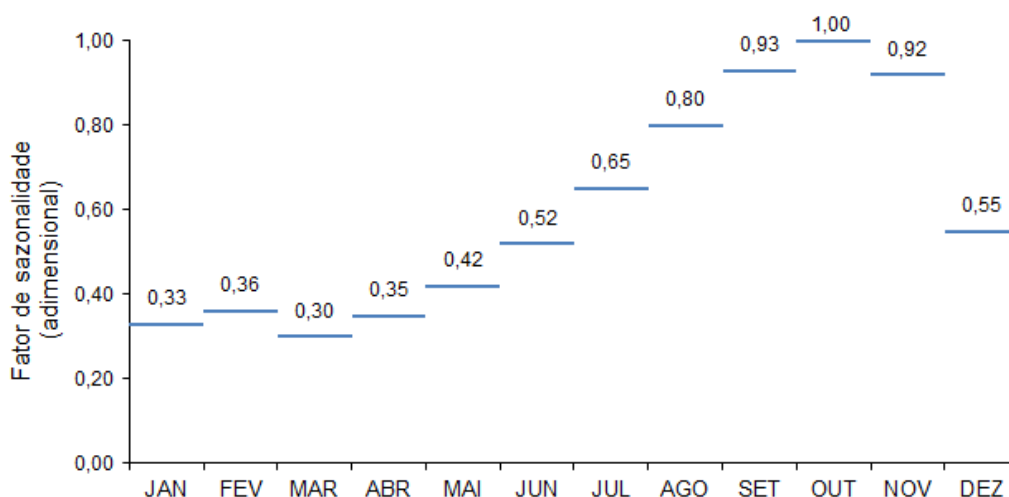


Figura 6 - Fator de sazonalidade obtido por Ramos (2016) para a bacia do Paracatu.

3.5.1.4 Legislação vigente associada ao fator de deplecionamento pelo uso da água em condições de regularização

Assim como os itens anteriores, no caso da utilização da água em condições de regularização (cenários C4 e C8), a simulação da cobrança foi feita a partir da equação 23, substituindo os valores K_{cap} e K_{cons} , pelo fator relativo ao uso da água em condições de regularização, definido no presente trabalho como sendo correspondente ao valor da água no mês de maior disponibilidade hídrica natural. Os resultados apresentados por Ramos (2016) mostram que o mês de maior disponibilidade hídrica na bacia do Paracatu corresponde ao mês de março, sendo assim, com base nos valores apresentados na Figura 6, o fator de deplecionamento pelo uso da água em condições de regularização é igual a 0,30.

3.5.2 Demandas consideradas

Para as condições relativas às demandas pelo uso da água, foram considerados dois padrões de demanda: um correspondente a uma condição de demanda variável ao longo do ano, levando-se em conta uma situação típica dos usuários de irrigação, e outro relativo à condição de demanda fixa, simulando uma situação de uso da água para o abastecimento humano.

3.5.2.1 Demanda variável ao longo do ano

A condição de demanda variável foi baseada nas vazões unitárias requeridas para irrigação obtidas por Silva (2014) e apresentadas na Figura 7 para o cultivo de milho em fevereiro e de feijão em outubro. Esse calendário de cultivo, por sua vez, representa o calendário adotado na sub-bacia do Entre Rios, região de grande importância econômica na bacia do Paracatu e, conforme constatado no trabalho citado, requer um menor volume de água para irrigação.

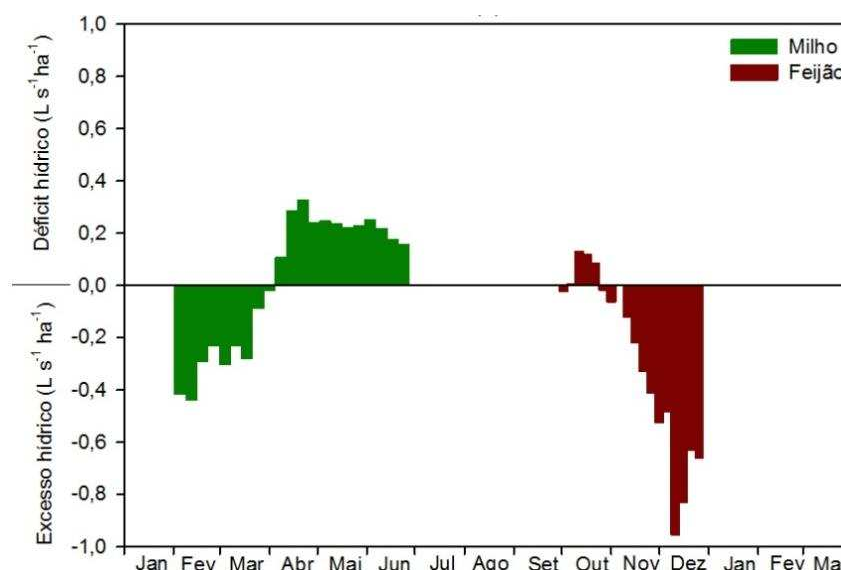


Figura 7 - Balanço hídrico referente ao cultivo do milho em 1/mai e do feijão em 1/jan. Fonte: Silva (2014).

Com base nos valores apresentados na Figura 7, foram obtidos os volumes captado e consumido para cada mês. O volume de captação foi estimado com base na quantidade de água necessária para atender as demandas de irrigação, e o volume consumido foi calculado com base no coeficiente de retorno, que representa a proporção de água captada devolvida ao ambiente após o uso. De acordo com informações apresentadas pela ONS (2005), o volume de água consumido pela irrigação corresponde a 80% do volume captado. Na Figura 8, são apresentados os volumes de captação e consumo estimados para esta condição de demanda.

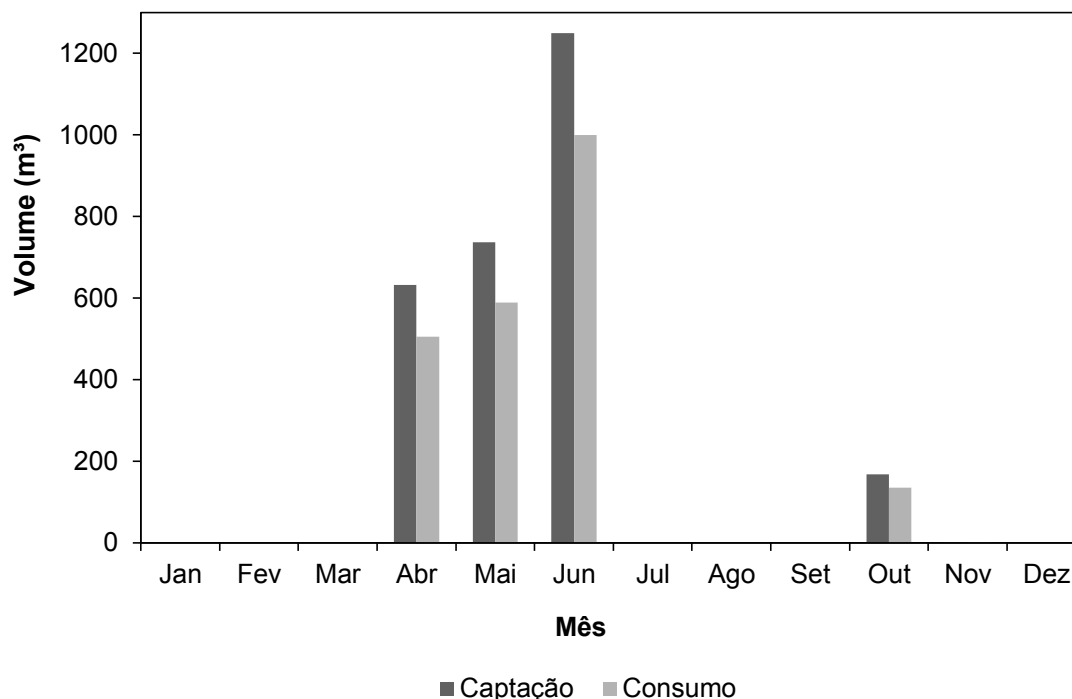


Figura 8 - Volumes mensais de captação e consumo estimados para a demanda de irrigação considerada.

3.5.2.2 Demanda fixa ao longo do ano

Tendo como referência o volume anual necessário para a irrigação de um hectare, conforme o balanço hídrico apresentado na Figura 7, foi feita uma equivalência de volume de captação para uma situação de abastecimento humano, que corresponde a um volume captado necessário para o abastecimento de um grupo de 39 habitantes, com um volume de captação equivalente a $200 \text{ L.hab}^{-1}\text{d}^{-1}$. O volume de consumo associado ao uso de abastecimento urbano corresponde, de acordo com a ONS (2005), a 20% do volume captado; com base nessa informação, são apresentados na Figura 9 os volumes associados à cobrança pelo uso da água, decorrentes da condição de abastecimento humano.

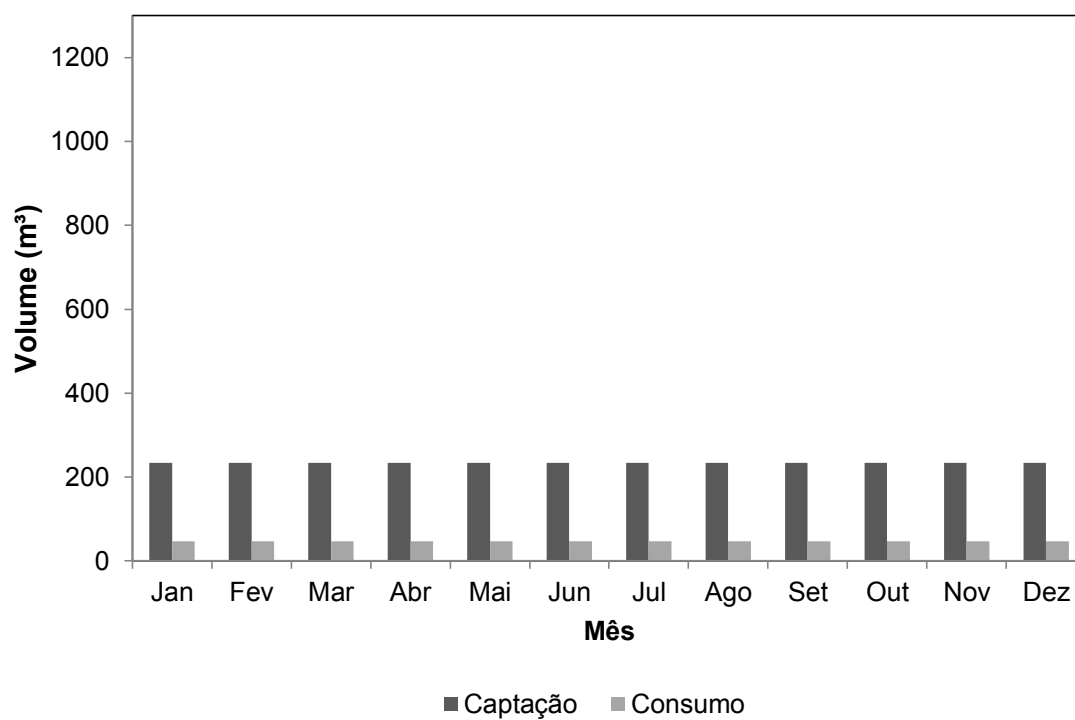


Figura 9 - Volumes mensais de captação e consumo estimados para a demanda de abastecimento humano considerada.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Desenvolvimento do critério de cobrança pelo uso da água de acordo com o manancial de captação

4.1.1 Separação do escoamento superficial direto e escoamento subterrâneo

Com base na aplicação da metodologia de separação do escoamento total, foram gerados, para cada uma das 21 estações fluviométricas estudadas, valores diários das lâminas de escoamento superficial direto e escoamento subterrâneo. Na Figura 10, é apresentado, a título de exemplo, o resultado da separação da lâmina de escoamento total em lâminas de escoamento superficial direto e de escoamento subterrâneo da estação Porto Alegre para dois anos do período base adotado.

A linha em verde corresponde à lâmina de escoamento superficial total, que, por sua vez, é composta pela soma da lâmina de escoamento superficial direto (em vermelho) e subterrâneo (em azul). Os segmentos em que não se evidencia a presença da linha azul correspondem a condições nas quais a lâmina de escoamento total é igual à lâmina de escoamento subterrâneo.

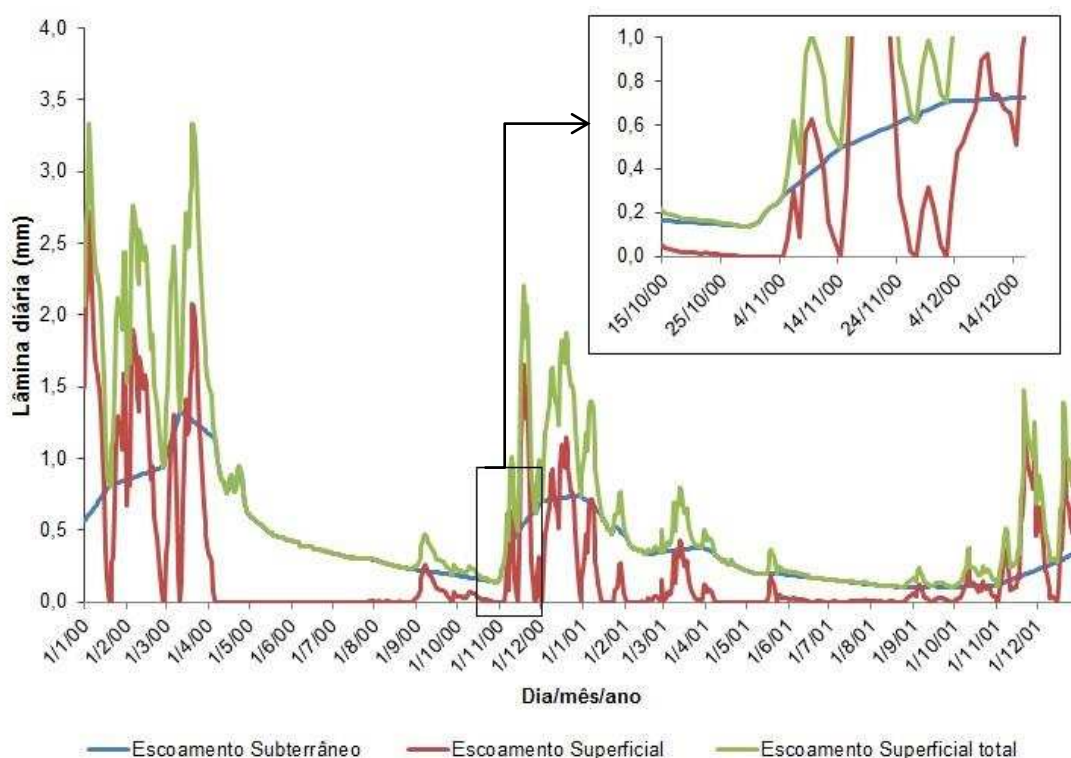


Figura 10 - Lâminas diárias de escoamento superficial total, superficial direto e subterrâneo para a estação Porto Alegre (42980000).

A Figura 11 mostra a distribuição temporal da precipitação média mensal para a bacia do Paracatu, obtida por Polígonos de Thiessen, de dados de 28 estações pluviométricas, considerando o período de 1974 a 2004.

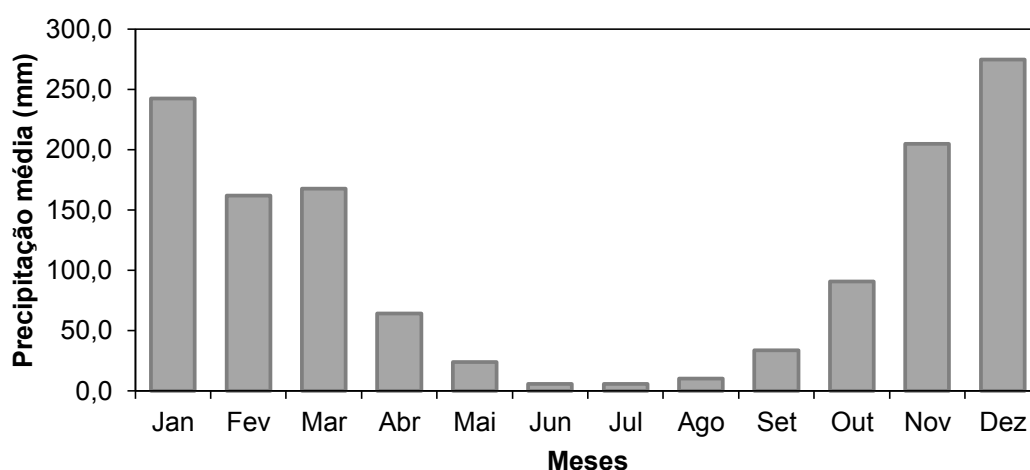


Figura 11 - Precipitação média mensal para a bacia do Paracatu obtida por Polígonos de Thiessen, de dados de 28 estações pluviométricas, considerando-se o período de 1974 a 2004.

Verifica-se na Figura 10 que as vazões no período de estiagem, maio a setembro, são advindas essencialmente da contribuição do escoamento subterrâneo, sendo a variação no hidrograma nesses meses relacionada ao movimento de água subterrânea. Os eventos de precipitação (Figura 11) que ocorrem nesse período não acarretam alterações no comportamento do escoamento subterrâneo, uma vez que essas precipitações vão estar diretamente associadas ao aumento da umidade do solo na zona não saturada, não atingindo o lençol freático. Por outro lado, a existência de superfícies impermeabilizadas como, por exemplo, áreas urbanizadas e áreas agrícolas compactadas, favorece a ocorrência de escoamento superficial direto, causando, assim, as alterações evidenciadas no escoamento total.

Com o início do período chuvoso, que ocorre normalmente no mês de outubro (Figura 11), tem-se um aumento da lâmina de escoamento superficial direto, já o escoamento subterrâneo não apresenta alterações. Esse comportamento mostra que no início do período chuvoso o fato de o solo se encontrar muito seco devido ao longo período de estiagem faz com que essas chuvas não impactem diretamente o lençol freático, não promovendo grandes mudanças nas vazões mínimas (PRUSKI et al., 2014). Com a continuidade dos eventos de precipitação e, após o déficit de umidade do solo ser suprido, ocorre aumento das lâminas de escoamento subterrâneo, o que acontece até por volta do mês de março, quando se observa o início da recessão do escoamento subterrâneo.

A Figura 12a mostra os valores médios anuais das lâminas de escoamento total (LES_{Total}), lâmina de escoamento superficial direto (LES) e lâmina de escoamento subterrâneo (LE_{Sub}) para cada uma das estações 21 estações fluviométricas de estudo. A Figura 12b mostra as porcentagens de contribuição do escoamento subterrâneo para a formação do escoamento superficial total (LE_{Sub}/LES_{Total}). Os valores dessas variáveis estão no Apêndice B.

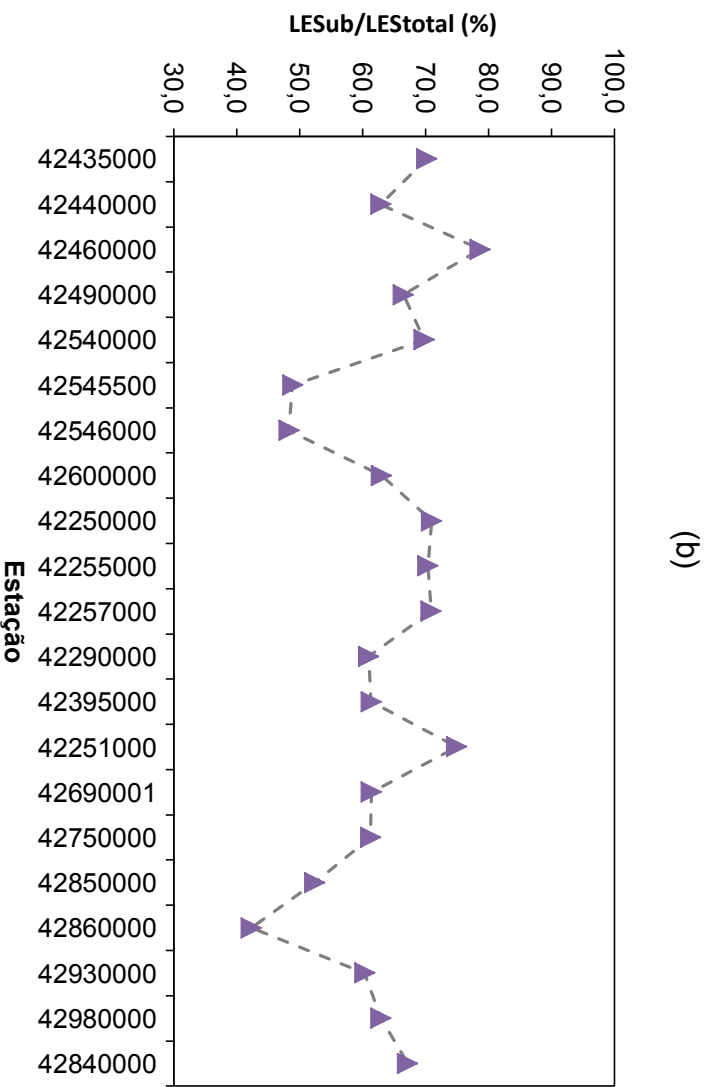
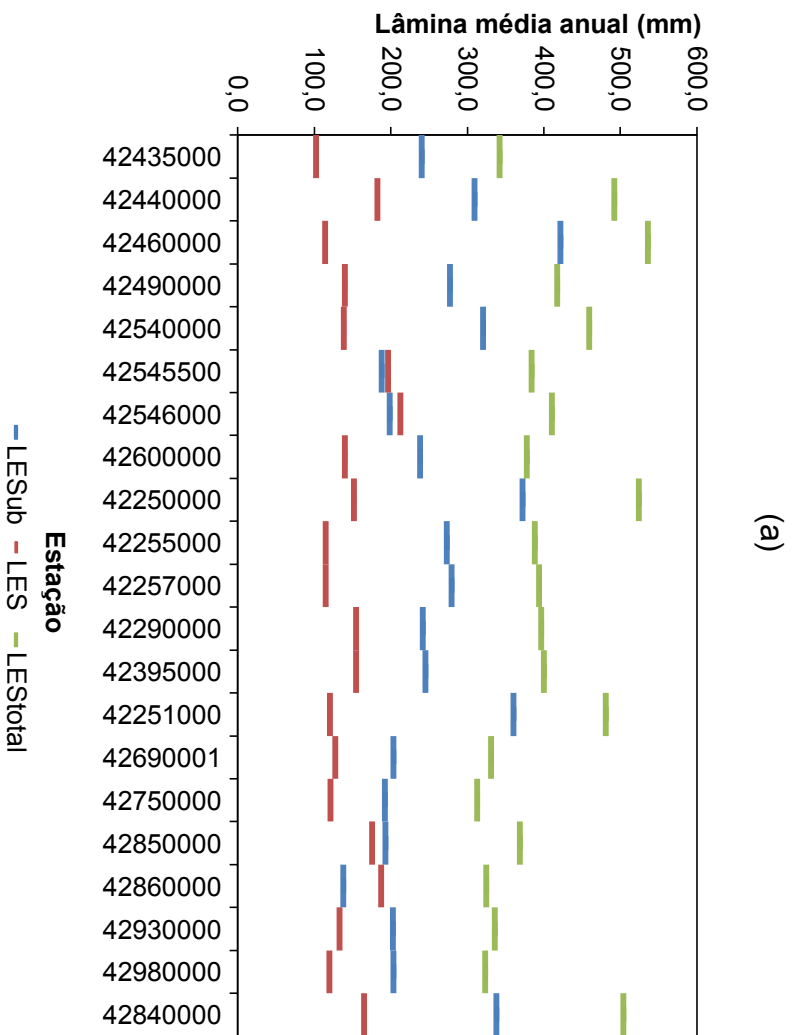


Figura 12 - Lâmina média anual (a) e relação entre escoamento subterrâneo e escoamento superficial total (b) para cada uma das 21 estações fluviométricas da bacia do Paracatu.

A LES_{Total} varia de 313 a 536 mm, enquanto a LES varia de 102 a 212 mm e a LE_{Sub} de 137 a 421 mm. A grande variabilidade dos valores reflete a influência dos diversos fatores que condicionam o processo de circulação de água na bacia hidrográfica, como, por exemplo, a magnitude da precipitação e sua sazonalidade de ocorrência, a hidrogeologia, a pedologia e as condições de uso e ocupação do solo.

A lâmina que apresentou maior amplitude de variação foi a LE_{Sub} , sendo o maior valor cerca de três vezes o menor. Essa variação pode estar relacionada ao fato de que, de acordo com Vasconcelos (2014), na hidrogeologia da bacia do Paracatu se observam diferentes sistemas de aquíferos, que influenciam diretamente a variação do potencial de recarga e o armazenamento da água subterrânea. Além disso, IGAM (2006) afirma que na bacia do Paracatu há diversos tipos de uso e ocupação do solo, e as sub-bacias estão em diferentes estados de conservação, e essas características interferem na infiltração de água no solo e, conseqüentemente, na recarga do lençol freático, contribuindo para a variabilidade dos valores de lâmina de escoamento subterrâneo (IGAM, 2006).

As proporções de escoamento subterrâneo em relação ao escoamento superficial total, Figura 12 (b), oscilam entre 42 a 79%. Esses valores estão em consonância com o estudo realizado por IGAM (2006), em que a variação observada foi de 51% a 74%, sendo a contribuição média estimada para a bacia do Paracatu de 55%.

4.1.2 Estimativa das relações mensais entre escoamento subterrâneo e escoamento total para cada estação

Com base nos valores diários das lâminas de escoamento individualizadas, foram estimadas as relações entre escoamento subterrâneo e escoamento total (R_{EST}) para cada mês e para cada estação. O resultado dessa estimativa é apresentado na Figura 13, em que os marcadores representam os valores da R_{EST} . As linhas ligando os marcadores não indicam continuidade dos valores, sendo utilizadas apenas para facilitar a visualização da variação das proporções.

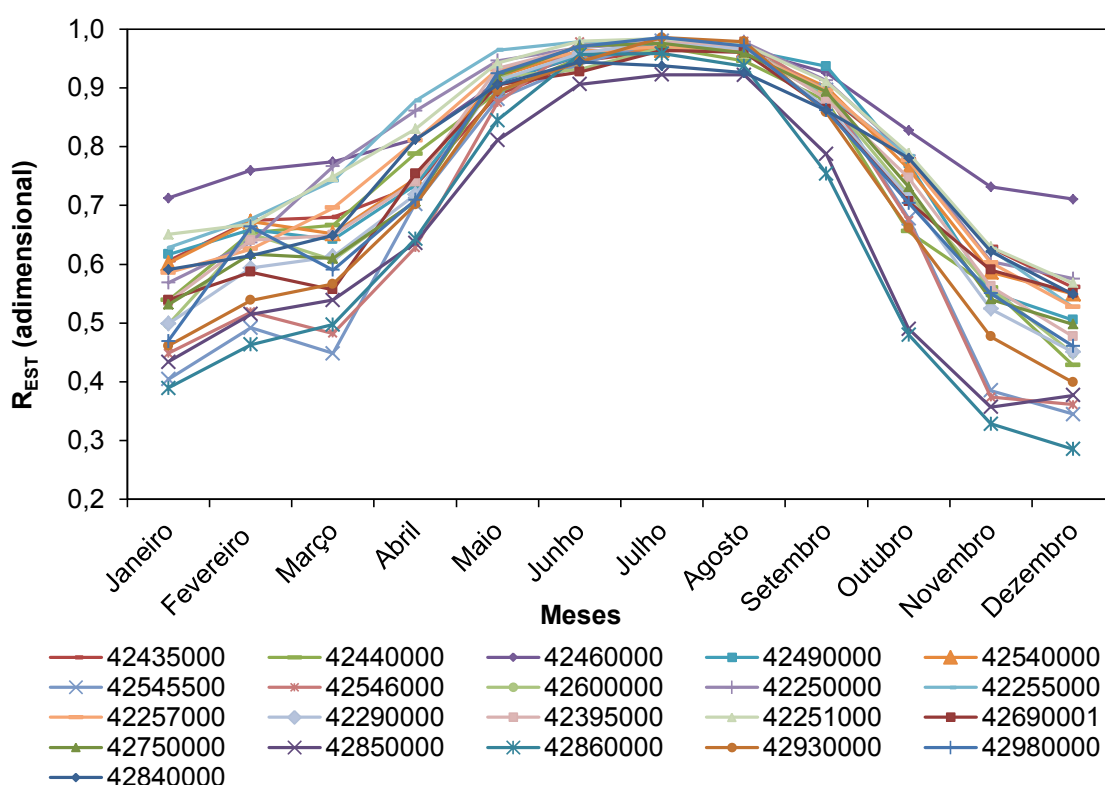


Figura 13 – Valores da (R_{EST}) obtida para as 21 estações fluviométricas da bacia do rio Paracatu.

As linhas mostram que, apesar das distintas magnitudes, as estações apresentam a mesma tendência de comportamento com relação à variação da R_{EST} ao longo do ano. O período de maio a setembro se caracteriza por menores lâminas precipitadas, Figura 11, e maiores valores da contribuição subterrânea, caracterizando, assim, a predominância do escoamento subterrâneo na formação das vazões nos cursos d'água nesses meses, sendo esta contribuição subterrânea decorrente da recarga do lençol freático ocorrida no período chuvoso. O escoamento superficial direto neste período representa uma parcela pouco expressiva na formação do escoamento total, Figura 10, que está associada principalmente ao escoamento de áreas impermeabilizadas, uma vez que as precipitações ocorridas em áreas não impermeabilizadas encontram o solo em umidade baixa, favorecendo a infiltração.

À medida que se inicia o período chuvoso (outubro a abril), verifica-se maior produção do escoamento superficial direto, que vai variar no tempo e no

espaço em razão da variabilidade de ocorrência das precipitações e das características físicas da bacia. Consequentemente, evidenciam-se, nesse período, menor magnitude e maior variação dos valores da R_{EST} .

4.1.3 Identificação de regiões homogêneas para aplicação da metodologia de cobrança

4.1.3.1 Identificação de *outliers* através da estatística *Box Plot*

A Figura 14 mostra os gráficos correspondentes à aplicação da estatística *Box Plot* para os valores da R_{EST} das 21 estações fluviométricas. Nestes gráficos, está representada a localização dos *outliers* em relação aos quartis e aos limites de dados aceitáveis, bigodes em azul.

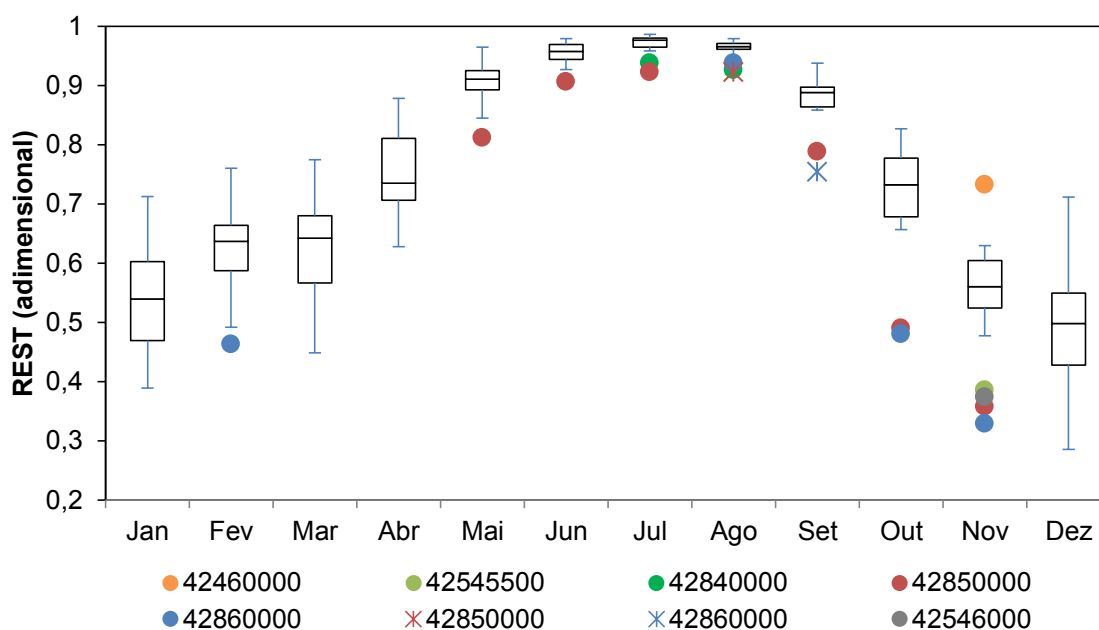


Figura 14 - Gráficos *Box Plot* para a relação entre escoamento subterrâneo e escoamento total (R_{EST}).

Observa-se que os meses de maio a setembro apresentam um pequeno limite de dados aceitáveis, e esse resultado é devido, principalmente, à menor ocorrência de precipitação nesses meses (Figura 11). De acordo com os resultados apresentados anteriormente, nesse período, tem-se pouco volume de escoamento superficial direto, uma vez que parte da precipitação ocorrida

em áreas não impermeabilizadas é utilizada para suprir o déficit de umidade do solo, ficando retida na camada não saturada e depois convertida em evapotranspiração. Sendo assim, há um predomínio da contribuição do escoamento subterrâneo para a formação do escoamento superficial total. Esse fato acarreta uma pequena dispersão dos valores da relação entre escoamento subterrâneo e escoamento total, o que faz com que a amplitude de variação seja pequena. Desse modo, pequenos desvios de uma estação em relação às demais favorecem a ocorrência de *outliers*.

Com o início do período chuvoso, há maior ocorrência de escoamento superficial direto, o que contribui para uma maior variação dos valores tanto em relação ao tempo quanto ao espaço, fato que ocasiona maior dispersão dos valores e induz, conseqüentemente, um maior limite de dados aceitáveis, tornando menos frequente a ocorrência de *outliers*.

A aplicação da estatística *Box Plot* permitiu a identificação de outliers em oito meses do ano, sendo que nos meses de agosto e setembro houve ocorrência de *outliers* extremos, representados por um asterisco.

Diante dos resultados, e utilizando um critério mais rigoroso quanto à identificação de comportamentos discrepantes, optou-se pela exclusão de todas as estações que se caracterizaram como *outliers* em algum dos meses, sendo assim, foram eliminadas seis estações 42460000 (Fazenda Limeira), 42545500 (Fazenda o Resfriado), 42546000 (Fazenda Santa Cruz), 42850000 (Cachoeira das Almas), 42860000 (Cachoeira do Paredão) e 42840000 (Veredas).

4.1.3.2 Identificação de regiões homogêneas pela análise de cluster

Após a exclusão das estações com base na estatística *Box Plot*, verificou-se a adoção da bacia do Paracatu como única região hidrologicamente homogênea em relação aos valores mensais da R_{EST} a partir da medida de heterogeneidade baseada em momentos-L.

Hosking e Wallis (1993) observaram que, na aplicação da medida de heterogeneidade H , baseada em momentos-L, as estatísticas H_2 e H_3 são menos eficientes na distinção entre regiões homogêneas e heterogêneas, sendo a estatística H_1 indicada como principal indicador de heterogeneidade.

Com base nessa afirmação, observou-se que a consideração da bacia como uma única região homogênea apresentou valor de H_1 igual a 0,24, sendo, portanto, classificada como “aceitavelmente homogênea”. Em virtude desse resultado e levando-se em conta que uma maior uniformidade geográfica e área de abrangência facilitam a aplicação da metodologia de cobrança pelo uso da água, optou-se pela adoção de uma única região homogênea para o estabelecimento do fator manancial de captação.

4.1.4 Estabelecimento do critério de cobrança pelo uso da água do manancial subterrâneo freático

Uma vez definida a bacia do Paracatu como uma única região hidrologicamente homogênea em relação à proporção de escoamento subterrâneo pelo escoamento total (R_{EST}), procedeu-se os cálculos dos valores médios e dos intervalos de confiança da R_{EST} para as 15 estações fluviométricas (Figura 15).

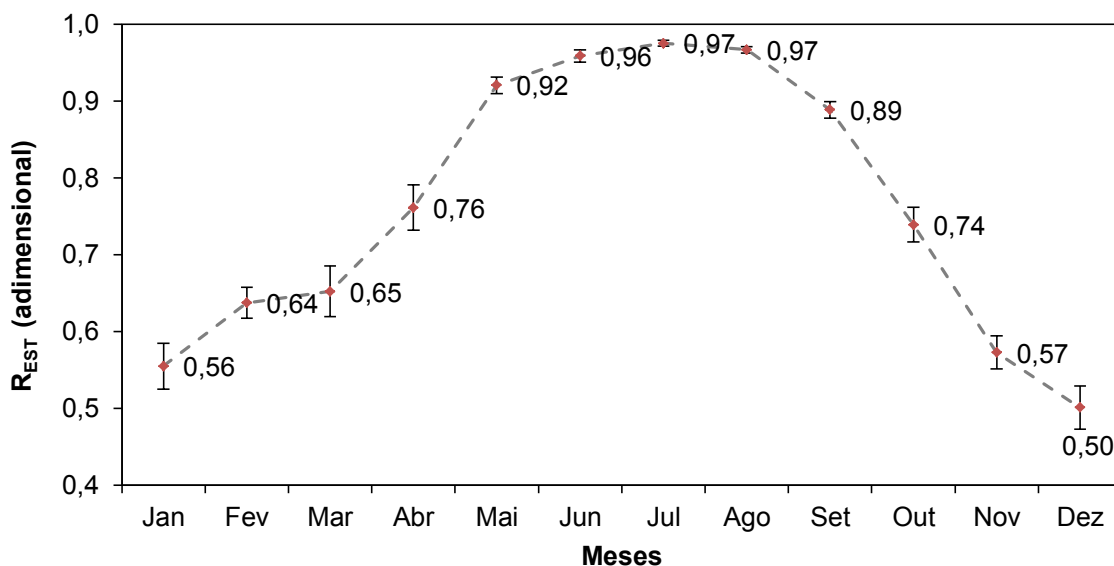


Figura 15 - Valores da relação entre escoamento subterrâneo e escoamento total (R_{EST}) médios mensais e os seus intervalos de confiança para a bacia do Paracatu.

Os valores médios da R_{EST} mostram a existência de um comportamento sazonal, em que os menores valores são observados no período de outubro a

abril e os maiores de maio a setembro, caracterizando, como descrito anteriormente, uma maior participação do escoamento subterrâneo no período de estiagem em virtude das precipitações de baixa magnitude. Percebe-se que no período de estiagem tem-se uma menor amplitude do intervalo de confiança, enquanto que, nos meses do período chuvoso essa amplitude é maior. Esse resultado é decorrente da maior participação do escoamento superficial direto para formação do escoamento total nos meses mais chuvosos, o que acarreta uma maior dispersão dos valores da R_{EST} em razão da variabilidade espacial e interanual da produção do escoamento superficial.

Com base nesses resultados e considerando que a utilização de um coeficiente multiplicador na cobrança pelo uso da água é de mais fácil compreensão que um divisor, propôs-se que, para a representação do fator manancial de captação seja feita a inversão do valor correspondente à (R_{EST}), conforme a equação:

$$F_{MCm_Aprox. I} = \frac{1}{\overline{R_{ESTm}}} \quad (24)$$

em que: $F_{MC \text{ Aprox. I.}}$ = a primeira aproximação obtida para o fator manancial de captação, adimensional; $\overline{R_{ESTm}}$ = relação entre escoamento subterrâneo e escoamento total média para o mês m , adimensional.

Na Figura 16 são representados os valores mensais estimados para o $F_{MC \text{ Aprox. I}}$ na qual se evidencia que os menores valores ocorrem no período de maio a setembro (período de estiagem). Por outro lado, os meses de outubro a abril que segundo Novaes et al. (2009) se caracteriza pela ocorrência de aproximadamente 93% da precipitação total, apresentam um fator manancial de captação de maior magnitude, proporcionando um acréscimo de até duas vezes no custo unitário da água, o que corresponde a uma maior valorização da água subterrânea proveniente do lençol freático e desestímulo do uso desta nesses períodos.

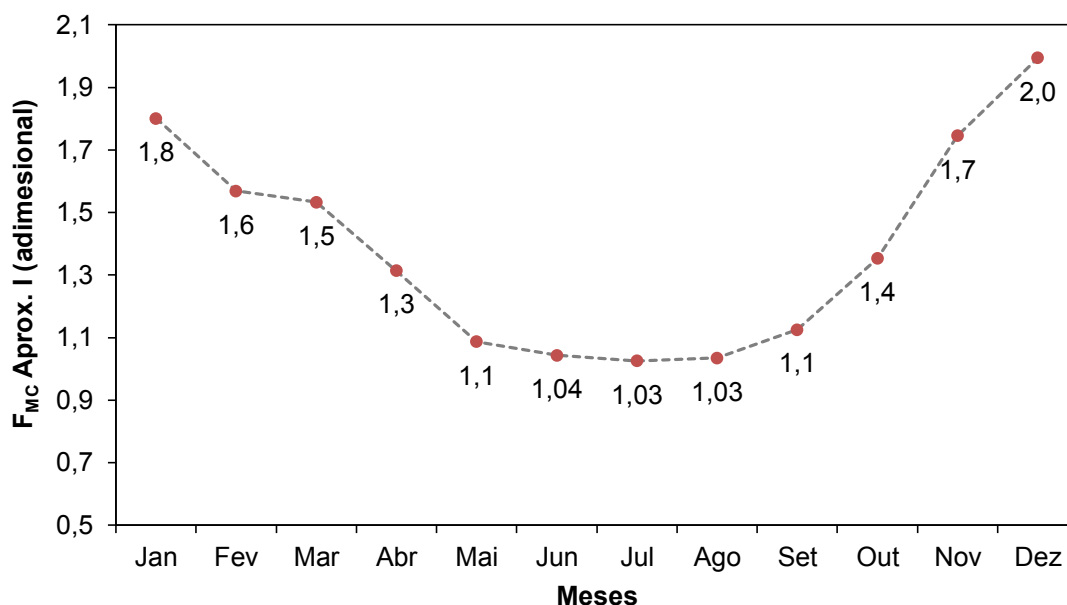


Figura 16 - Valores mensais para o F_{MC} Aprox. I.

Evidencia-se também que o período de janeiro a maio está associado a valores decrescentes do fator manancial de captação, e, a partir de maio esses valores tendem a se estabilizar, refletindo que nesses meses a formação de vazões está fortemente relacionada à água oriunda do lençol freático. A partir de agosto, observa-se uma tendência de crescimento dos valores, o que se deve a alguns eventos de precipitação que contribuem para o aumento da parcela de contribuição do escoamento superficial direto para a formação do escoamento total. Todavia, conforme observado na Figura 10, embora aumente a parcela de escoamento superficial direto, as vazões mínimas continuam a cair. Isto acontece em razão dessas vazões serem associadas à contribuição do escoamento subterrâneo o qual só volta a aumentar após as precipitações serem suficientes para suprir o déficit de umidade do solo que, por sua vez, depende do processo de evapotranspiração e das características estruturais e texturais do solo (PRUSKI et al., 2014; OLIVEIRA et al., 2013).

Considerando que o objetivo da criação do fator manancial de captação é incentivar o uso mais racional dos recursos hídricos, torna-se contraditório o aumento do valor da água subterrânea nos meses em que a disponibilidade hídrica superficial é mínima. Desse modo, visando a correção dessa distorção, observou-se a necessidade de incorporar um índice que considere a disponibilidade hídrica a fio d'água ao fator manancial de captação. Para tanto

realizou-se a análise da frequência de ocorrência das $Q_{7,10}$ anuais ao longo do ano, para o período base adotado no presente estudo, considerando as 15 estações fluviométricas correspondentes a região hidrologicamente homogênea, e se constatou o resultado apresentado na Figura 17.

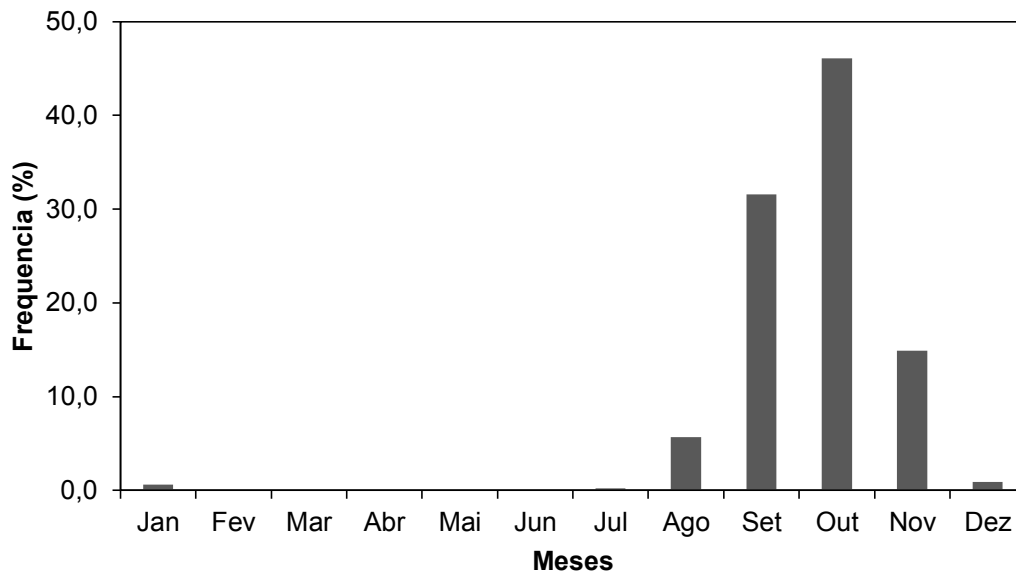


Figura 17 - Frequência média de ocorrência das $Q_{7,10}$ anuais para a bacia do Paracatu.

A incidência de $Q_{7,10}$ concentra-se nos meses de setembro e outubro, indicando, assim, baixa disponibilidade natural nesses meses. Os meses de novembro e dezembro apesar de serem caracterizados como chuvosos, também apresentaram ocorrências de vazões mínimas, fato que se deve a anos que se tem o prolongamento do período de estiagem e, conseqüentemente, um atraso no aumento das vazões nos cursos d'água. Com base nesse resultado e visando um aperfeiçoamento, propõe-se outra aproximação ao F_{MC} com base na equação:

$$F_{MCi_Aprox. II} = \frac{1}{\frac{R_{EST\ m}}{1 - f_m}} \quad (25)$$

em que: $F_{MC\ Aprox. II.}$ = segunda aproximação obtida para o fator manancial de captação, adimensional; f_m = é a frequência média de ocorrência da $Q_{7,10}$ para cada mês m , adimensional.

A partir da aplicação do novo ajuste, obteve-se o resultado apresentado na Figura 18, na qual se verifica que a incorporação da frequência de ocorrência da $Q_{7,10}$ no F_{MC} provocou uma diminuição dos valores referentes aos meses de setembro a novembro, o que decorre de um maior número de ocorrências de $Q_{7,10}$ nesses meses.

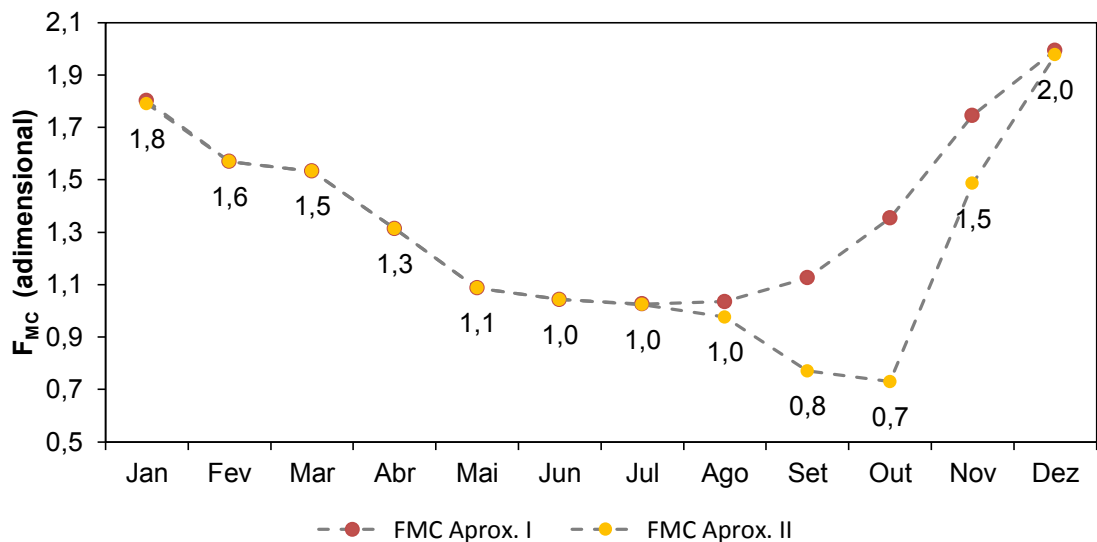


Figura 18 – Efeito do segundo ajuste no fator manancial de captação.

Portanto, a nova aproximação agrega maior valor à água subterrânea nos meses de novembro a abril, os quais, normalmente, correspondem ao período de maior disponibilidade hídrica a fio d'água, e menores valores aos meses de maio a outubro, período de menor disponibilidade. Devido ao fato dos meses de setembro e outubro corresponderem ao período de maior ocorrência da $Q_{7,10}$, os valores referentes a esses meses diminuíram muito, ficando menor que um. A aplicação desses valores como coeficiente multiplicador acarretaria, consequentemente, em abatimento no custo unitário da água subterrânea.

Considerando que o objetivo da metodologia proposta é a criação de um fator de valorização da água subterrânea, optou-se por fazer uma nova aproximação (equação 26), com o intuito de tornar o menor valor da água subterrânea igual à unidade, para isso utilizou-se o menor valor do F_{MCm} Aprox. II.

$$F_{MCi_Aprox. III} = \frac{1}{\frac{REST_m}{1-f_m}} \frac{1}{0,7} \quad (26)$$

em que: $F_{MCm_Aprox. III}$ = terceira aproximação obtida para o fator manancial de captação para o mês m , adimensional; e $\frac{1}{0,7}$ = fator de ajuste para a bacia do Paracatu.

O efeito resultante da terceira aproximação do F_{MC} é apresentado na Figura 19, em que se observa uma sobre-elevação dos valores, principalmente nos meses de novembro a abril. A partir desse ajuste, tem-se uma variação dos valores de F_{MC} que vai de 1 (outubro) a 2,7 (dezembro).

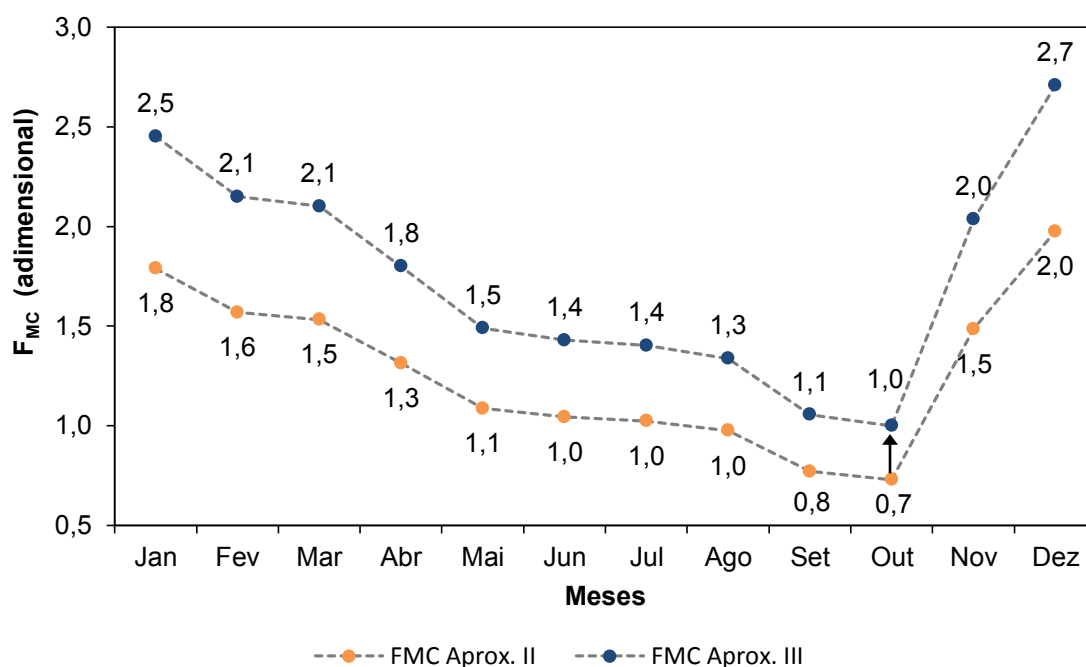


Figura 19 - Efeito resultante da terceira aproximação do fator manancial de captação.

O menor custo associado aos meses de setembro e outubro deve-se ao fato de que, embora seja observado o aumento da parcela de contribuição do escoamento superficial direto para a formação do escoamento total, esses meses apresentam uma grande ocorrência de vazões mínimas, e, levando-se em conta que as vazões mínimas estão associadas ao escoamento subterrâneo seria inapropriado cobrar a mais pela retirada de água subterrânea freática nesses meses. Portanto, a aplicação da terceira aproximação

proporcionou o efeito desejado para os meses de setembro a outubro, isto é, o F_{MC} para esses meses é igual à unidade, não resultando, assim, em um aumento no custo pelo uso da água em um período que se caracteriza por uma baixa disponibilidade hídrica natural.

Além disso, observa-se uma melhoria no valor referente ao mês de novembro, quando se compara a primeira aproximação com a terceira. O $F_{MC_Aprox. I}$ associa um valor ao mês de novembro (1,7) de maior magnitude que o mês de março (1,5) que de acordo com Pruski et al. (2014) e Oliveira et al. (2013) caracteriza-se por uma grande disponibilidade hídrica natural. Já o $F_{MC_Aprox. III}$ inverte esse comportamento, agregando um maior valor para o mês de março (2,1) em relação ao mês de novembro (2,0).

No mês de novembro ocorre uma elevação de duas vezes no valor do F_{MC} , esse fato é decorrente do aumento expressivo da parcela de contribuição do escoamento superficial direto para a formação do escoamento total que torna menor a R_{EST} . Entretanto, observa-se na Figura 17 que, em cerca de 15% dos anos do período base adotado, verifica-se a ocorrência de vazões mínimas, evidenciando que a inserção do fator de ajuste para esse mês não foi suficiente para corrigir seu valor. Esse resultado faz com que o uso do F_{MC} seja pouco representativo da busca por uma utilização mais racional dos recursos hídricos nos anos em que houver um prolongamento do período de estiagem. Para essas situações, sugere-se que seja prorrogado o uso desse fator igual à unidade até o momento em que se observe o aumento das vazões nos cursos d'água.

Após os três aperfeiçoamentos do fator manancial de captação, foi obtido um comportamento satisfatório em relação à criação de um critério de cobrança pelo uso da água subterrânea. Portanto, propõe-se que à cobrança pelo uso da água, associadas à utilização do manancial subterrâneo freático, sejam aplicados os valores de F_{MC} , sendo que no caso do mês de novembro, para o ano em que continuar havendo ocorrência das vazões mínimas, o valor desse fator deve sofrer uma adequação em sua magnitude, mantendo o valor unitário, em decorrência dos recursos superficiais ainda não caracterizarem uma recomposição das vazões dos cursos d'água.

4.2 Análise do efeito das alterações propostas para a condição de regularização na disponibilidade hídrica da bacia do Paracatu

A análise do efeito que a construção dos reservatórios tem na disponibilidade hídrica e no volume permissível para outorga foi feita com base em duas condições: uma correspondente aos critérios utilizados pela legislação vigente e outra com base na proposição de alteração da vazão mínima residual.

Em relação à questão da consideração do valor econômico da água em condições de regularização, ela foi fundamentada, conforme mencionado anteriormente, na interação existente entre a oferta e a demanda e no potencial que os reservatórios de regularização têm no que diz respeito ao aproveitamento da água. Portanto, de acordo com os resultados obtidos por Ramos (2016) e apresentados no item 3.5.1.4, atribuiu-se ao valor da água em condições de regularização o valor correspondente ao mês de março, tornando o custo da água nessas condições para a bacia do Paracatu igual a 30% do valor referente ao mês de menor disponibilidade.

4.2.1 Legislação atual

Com o intuito de avaliar o impacto da construção de reservatórios na disponibilidade hídrica da bacia do Paracatu, é apresentado na Figura 20 o mapa com o aumento da disponibilidade hídrica decorrente da alteração da vazão permissível para outorga de 50% da $Q_{7,10}$, condição a fio d'água, para $Q_{mld} - 50\% Q_{7,10}$, condição de regularização de vazões.

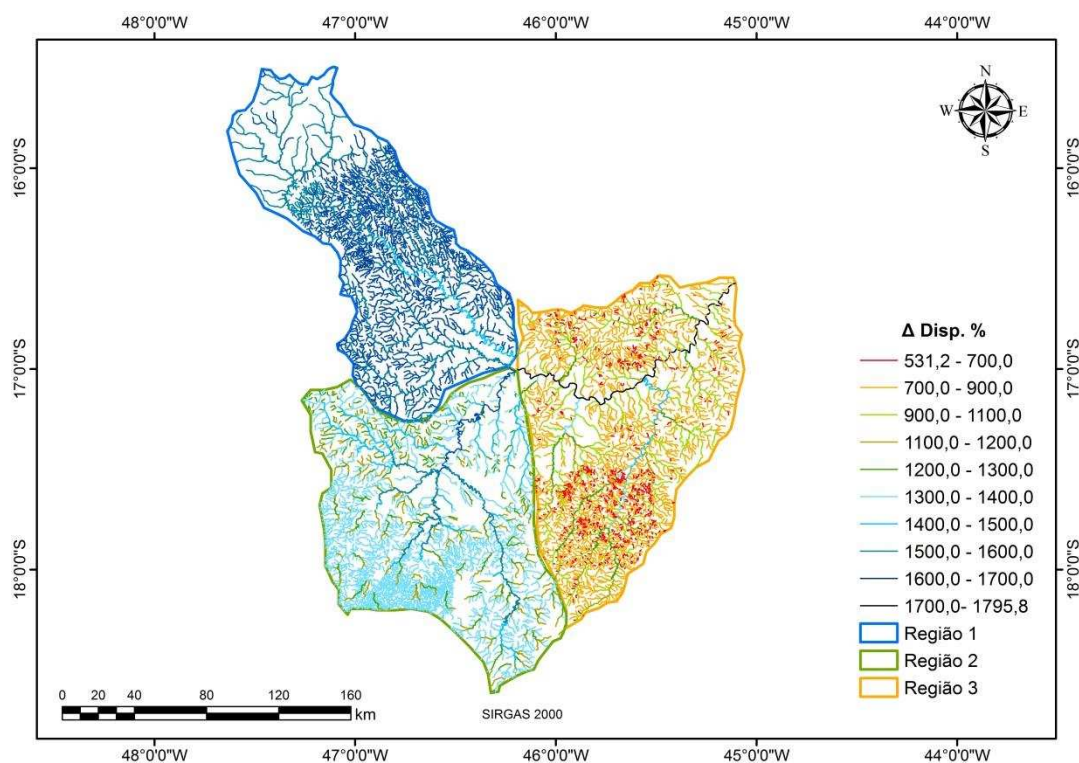


Figura 20 - Incremento de disponibilidade hídrica devido a alteração da vazão permissível para outorga da condição a fio d'água (50% da $Q_{7,10}$) para a condição de regularização de vazões ($Q_{mld} - 50\% Q_{7,10}$).

Evidencia-se na Figura 20 que a alteração do critério de outorga decorrente da construção de reservatórios de regularização proporciona aumento na disponibilidade, em relação à condição a fio d'água, de 531 a 1795%, resultado que reforça a potencialidade desses reservatórios no aproveitamento do uso da água.

Nota-se também uma expressiva diferença no incremento de disponibilidade entre as regiões hidrologicamente homogêneas. A região 1 destaca-se como a porção da bacia do Paracatu que apresenta maior acréscimo de disponibilidade, chegando os valores de $\Delta Disp. \%$ a 1631%. Nunes e Pruski (2015) obtiveram valores dessa mesma relação variando de 1390 a 1610 % para a sub-bacia do Entre Ribeiros, localizada na região noroeste da bacia do Paracatu, o que está consonante com os resultados apresentados.

4.2.2 Considerando a alteração da vazão mínima residual

A Figura 21 mostra o aumento da disponibilidade hídrica em relação à condição a fio d'água, ao longo da hidrografia da bacia do Paracatu, considerando a alteração da vazão mínima residual de 50% da $Q_{7,10}$ para 100% da $Q_{7,10}$.

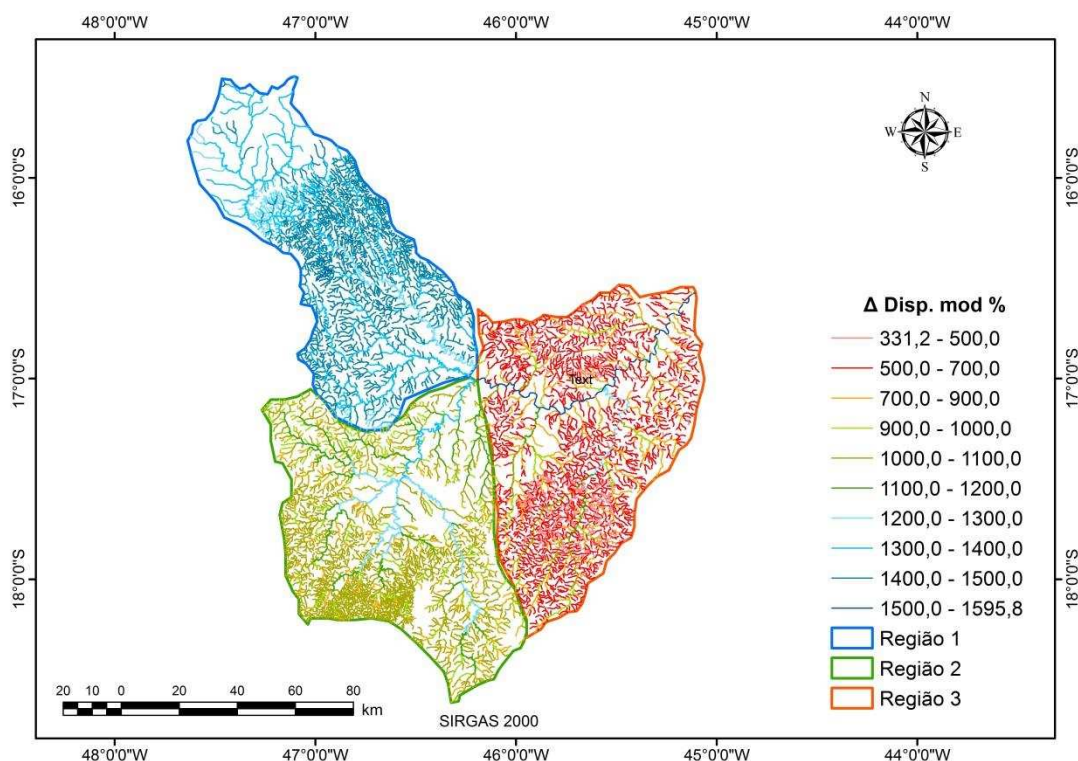


Figura 21 - Incremento de disponibilidade hídrica quando da construção de reservatórios de regularização considerando a proposição de alteração da vazão mínima residual para essas condições.

Na Figura 21 observa-se que, considerando o aumento da vazão mínima residual em condições de regularização para 100% da $Q_{7,10}$, ocorre aumento potencial na disponibilidade hídrica, que varia de 331 a 1595 %. Esses valores mostram que a alteração proposta, embora promova uma redução na disponibilidade hídrica, ainda mantém um valor expressivo em relação a seu aumento.

A alteração da vazão mínima residual constitui uma importante alternativa no âmbito da gestão de recursos hídricos, uma vez que permite resguardar aos

usuários a fio d'água a manutenção de suas condições de uso, isto é, a diminuição da disponibilidade, potencializada pela regularização, ocorre em favor de usos que apresentam uma condição mais restritiva.

4.3 Análise do impacto econômico da adoção dos critérios manancial de captação e regularização de vazões

Com o intuito de se fazer uma análise comparativa dos cenários de simulação de cobrança, foi apresentado primeiramente o resultado relativo aos valores de cobrança pela captação, uma vez que os volumes de captação para os dois tipos de demanda considerados são aproximadamente iguais, e posteriormente os valores totais de cobrança que corresponde a soma dos valores de captação e consumo.

4.3.1 Valores de cobrança pela captação

A Figura 22 mostra os valores mensais da cobrança pela captação de água para cada um dos oito cenários simulados (Quadro 3). A Figura 22a é a simulação da cobrança pela captação de água para os cenários relativos à condição de demanda fixa, e a Figura 22b à de condição de demanda variável. Os marcadores representam o valor mensal de captação, tendo o tipo de marcador sido definido de acordo com a condição de demanda e as cores estabelecidas conforme os critérios de cobrança.

A cor verde está associada à cobrança pelo uso da água de acordo com a legislação vigente; a azul corresponde à cobrança conforme a legislação vigente, considerando o fator manancial de captação; a vermelha, à legislação vigente com a consideração do critério com base na sazonalidade de vazões; e a amarela, à legislação vigente com o fator de deplecionamento pelo uso da água em condições de regularização. As linhas ligando os marcadores não indicam continuidade dos valores, sendo utilizadas apenas para facilitar a visualização da variação dos valores mensais.

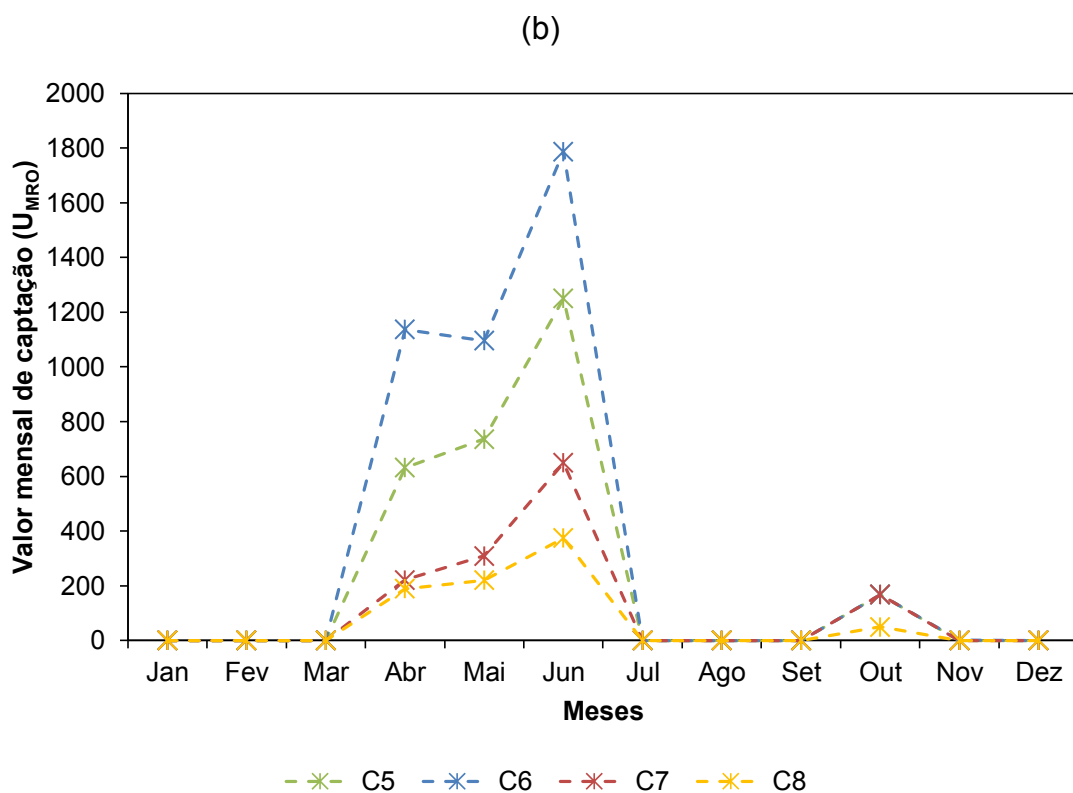
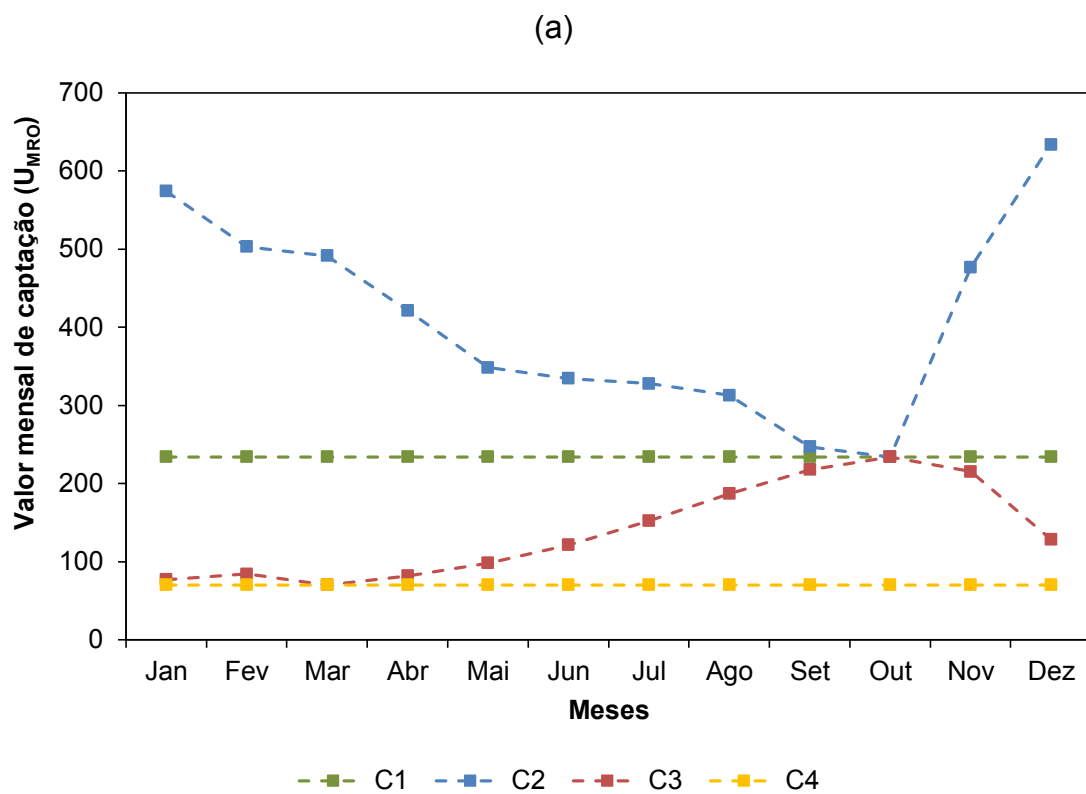


Figura 22 - Simulação da cobrança pela captação de água para os cenários relativos à condição de demanda fixa (a) e à de condição de demanda variável (b).

Para os cenários relativos à condição de demanda fixa (C1 a C4), as variações do custo não estão associadas às vazões de retirada, uma vez que esta retirada é a mesma para todos os meses. Dessa forma, o comportamento observado na Figura 22a é decorrente exclusivamente da adoção dos diferentes critérios de cobrança.

Evidencia-se que o cenário C1, relativo à condição da legislação vigente, se caracteriza por um valor constante ao longo do ano, sendo atribuído à água o mesmo valor, independentemente de sua disponibilidade e da fonte de captação utilizada.

A consideração de um critério diferenciado para a cobrança pelo uso da água em condições de regularização (cenário C4) também mantém um valor constante ao longo do ano, correspondendo esse valor a 30% do valor relativo ao cenário C1, visto que, conforme proposto nesse trabalho, esse valor corresponde ao mês de maior oferta de água. Esse abatimento no valor da água está diretamente relacionado ao expressivo aumento da disponibilidade hídrica gerado pela regularização de vazões, conforme visto no item 4.2. Já o valor constante ao longo do ano se deve ao fato de o armazenamento de água nos períodos de excedente hídrico amenizar o efeito da variação sazonal das vazões nos cursos d'água.

O cenário C3 representa a variação no valor da água considerando a adoção de um critério que leva em conta o comportamento sazonal das vazões em condição a fio d'água. Nesse cenário, observa-se maior abatimento no valor de captação da água no período que compreende os meses de dezembro a abril, aumentando o valor progressivamente até outubro, quando se iguala ao custo referente ao cenário C1.

A consideração de um critério para a captação da água proveniente do manancial subterrâneo (cenário C2), por sua vez, corresponde aos custos de cobrança mais elevados ao longo de todo o ano, exceto no mês de outubro. Esse resultado se deve ao fato de a água subterrânea ser um recurso estratégico que, portanto, funciona como um reservatório natural do qual se deve retirar água prioritariamente nos períodos em que os recursos superficiais são escassos.

Os maiores valores associados à água subterrânea ocorrem nos meses de novembro a abril, período caracterizado por uma maior disponibilidade

hídrica natural, chegando a atingir, no mês de dezembro, um valor 2,7 vezes maior que o custo referente à legislação vigente. A partir de maio, tem início o período de estiagem, e os valores referentes ao uso da água subterrânea diminuem até outubro, mês no qual todos os critérios conduzem a um único valor de cobrança em função da redução de disponibilidade hídrica nesse período. O único critério cujo valor se diferencia no mês de outubro é o relacionado à regularização de vazões, uma vez que essa técnica armazena água nos períodos de maior abundância.

Numa análise geral do comportamento dos cenários, observa-se que, à medida que o tempo se aproxima do período de estiagem, os valores correspondentes à consideração do fator manancial de captação (cenário C2) e do fator sazonalidade (cenário C3) se aproximam dos valores referentes à legislação vigente (cenário C1), havendo convergência dos três cenários em outubro. Em novembro, os valores voltam a se distanciar, mostrando uma elevação do custo da água subterrânea e uma diminuição dos valores referentes à condição a fio d'água.

Na Figura 22b, o cenário correspondente à legislação atual (C5) tem sua variação dependente apenas do volume captado. Para o período de novembro a março e de julho a setembro observa-se um custo mensal de captação nulo, uma vez que não se tem necessidade de irrigação para a condição de cultivo considerada.

Observa-se que, assim como ocorreu para a condição de demanda fixa, o custo da água, associado à condição que envolve a regularização de vazões (cenário C8), corresponde ao menor custo, o que reflete o efeito desejado de representar o aumento de disponibilidade que se tem com essa técnica.

Seguida da regularização, a consideração do fator sazonalidade (cenário C7) corresponde ao menor custo da água no período compreendido entre os meses de abril e junho. Esse resultado mostra que o período de maior retirada de água para irrigação, nessas condições de cultivo, não coincide com o período de menor disponibilidade hídrica a fio d'água, sendo constatado por Silva (2014) que esse calendário de cultivo para a rotação entre milho e feijão corresponde, entre os sete analisados, ao de menor requerimento de água para irrigação.

Os valores associados ao critério que leva em conta o uso da água subterrânea (cenário C6) correspondem aos maiores valores no período de abril a junho, sendo que a maior diferença em relação à legislação vigente é observada no mês de abril, em que o uso do F_{MC} eleva o valor da água em 1,8 vezes. Esse maior custo busca a valorização da água subterrânea em um período que há recursos superficiais disponíveis.

No mês de outubro, evidencia-se uma convergência dos valores de cobrança, com exceção da condição referente à regularização (cenário C8), que continua a representar o cenário de menor valor. Esse resultado, conforme mencionado anteriormente, mostra que o mês de outubro se caracteriza por ser um mês de menor disponibilidade hídrica, indicando, o fator de sazonalidade (cenário C7), um período em que a água em condições a fio d'água recebe maior valor, enquanto o fator manancial de captação (cenário C6) mostra o mês de menor valor da água subterrânea, refletindo em um período preferencial para seu uso.

A Figura 23 apresenta o custo total anual da captação para os oito cenários simulados. Os resultados mostram que a adoção de critérios diferenciados para a cobrança pelo uso da água que levam em conta a fonte de captação e a regularização de vazões provocou variações no valor total de cobrança pela captação. Em razão de os volumes totais de captação adotados para os cenários serem aproximadamente iguais, observa-se que os cenários referentes à legislação vigente (C1 e C5) e à consideração do fator de regularização (C4 e C8) apresentaram valores muito próximos entre as condições de demanda, sendo as diferenças observadas oriundas das aproximações dos volumes.

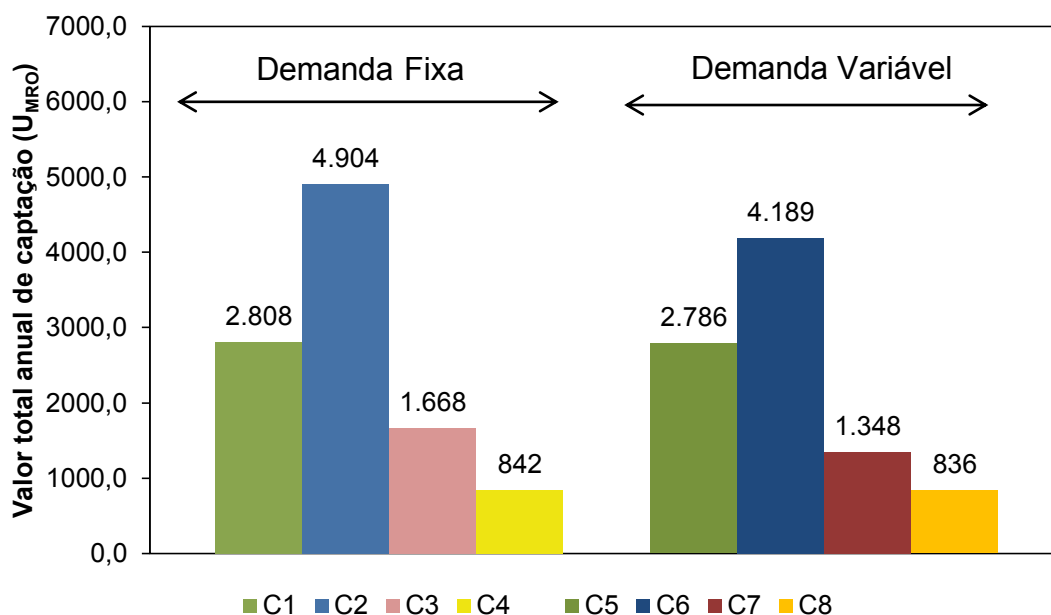


Figura 23. Custo total anual de captação para os oito cenários analisados.

Na consideração dos fatores de sazonalidade (cenários C3 e C7) e manancial de captação (cenários C2 e C6), a condição de demanda fixa apresentou maiores valores, com uma variação de cerca de 1,2 vezes o valor referente à demanda variável. Esse resultado ocorre em função de o calendário de cultivo utilizado para a simulação da condição de demanda variável corresponder ao mais favorável para a região, minimizando, assim, a captação de água nos períodos de estiagem. Além disso, essa condição de demanda não requer água no período de novembro a março, caracterizado por altos valores do F_{MC} .

4.3.2 Valores totais de cobrança

A Figura 24 mostra os valores totais mensais de cobrança pelo uso da água para as simulações realizadas. Observa-se ampliação nas diferenças entre os custos mensais relativos à condição de demanda variável em comparação com a demanda fixa. Esse aumento ocorre uma vez que a diferença entre os valores, quando se considera o custo total, não está relacionada apenas ao volume mensal captado, mas também ao volume consumido, que, para a condição de demanda variável, correspondente à irrigação, é de 80% do volume captado; para a demanda fixa, situação que

considera o abastecimento humano, o volume consumido é igual a 20% do volume captado. Além de o volume de consumo ser maior para a irrigação, o PPU_{cons} corresponde ao dobro do PPU_{cap}

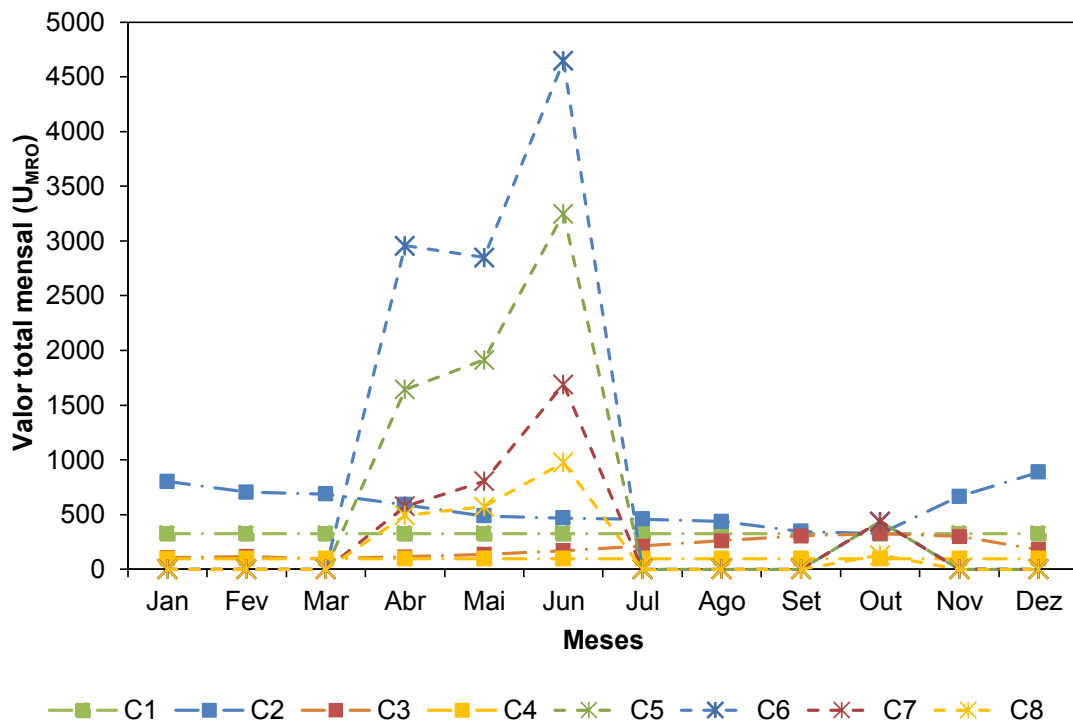


Figura 24 - Custos totais mensais pelo uso da água para os oito cenários simulados.

Na Figura 25 estão representados os custos totais anuais para os oito cenários. É possível observar uma inversão no comportamento do custo total anual em relação ao custo anual de captação e também uma ampliação das diferenças entre os cenários associados à condição de demanda variável e à condição de demanda fixa. Esse resultado é decorrente das particularidades relacionadas às condições dos segmentos usuários, irrigação e abastecimento humano, no que diz respeito ao volume de consumo, e ao PPU associado ao consumo, conforme citado anteriormente.

A Figura 25 mostra que os valores totais anuais de cobrança são maiores para os cenários relativos à condição de demanda variável, que, nesse caso, corresponde à irrigação. Entretanto, é importante ressaltar que a maioria dos comitês de bacias hidrográficas brasileiros estabelece um coeficiente redutor do custo unitário da água destinada a atividades agropecuárias, variando este

coeficiente conforme a legislação. Adotando como exemplo a bacia do São Francisco, que tem um dos menores coeficientes redutores, a adoção do fator redutor para o setor agropecuário reduz o custo da água em torno de 40 vezes.

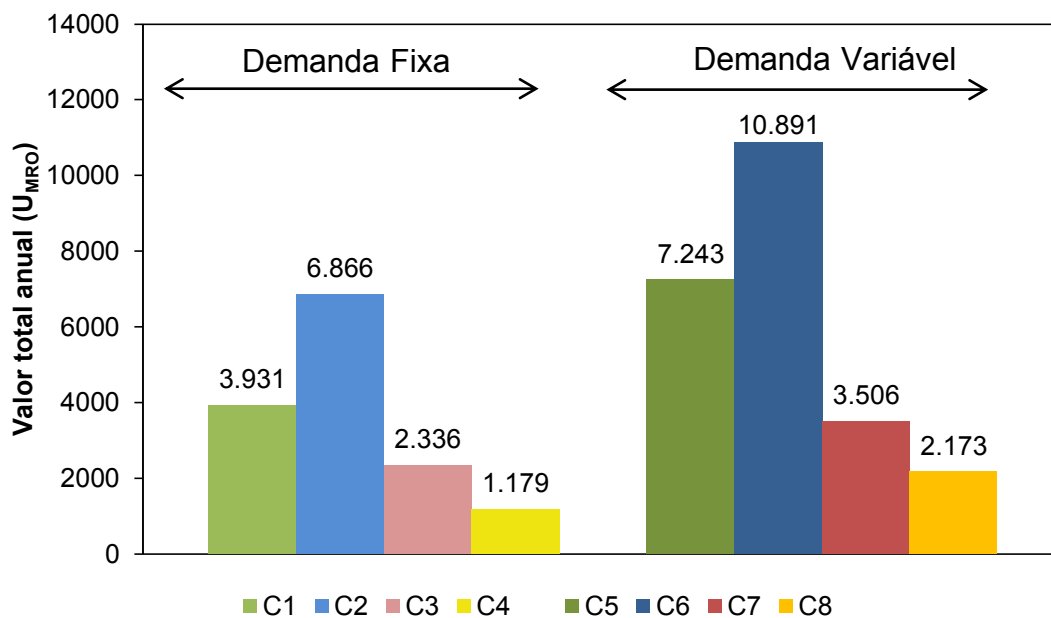


Figura 25. Custo total anual de cobrança pelo uso da água para os oito cenários analisados.

5 CONCLUSÕES

Para o cumprimento do objetivo proposto, foram criados dois critérios, um correspondente ao uso da água proveniente do manancial subterrâneo freático e outro, ao uso da água em condições de regularização, e em relação a esses critérios pode-se concluir que:

- o fator manancial de captação permitiu atribuir à água subterrânea uma maior valoração nos períodos de maior disponibilidade de recursos hídricos superficiais e, conseqüentemente, um menor valor no período em que o escoamento subterrâneo é a principal fonte de abastecimento. Para tanto, além da análise relacionada à proporção de contribuição do escoamento subterrâneo para a formação de vazões nos cursos d'água, foi agregada ao fator a frequência de incidência das vazões mínimas ao longo do ano;

- o fator relativo à regularização baseou-se no potencial que os reservatórios de regularização têm de aumentar a disponibilidade hídrica, sendo atribuído à água, em condições de regularização, o mesmo valor que ela tem no mês de maior disponibilidade hídrica, em condições a fio d'água; e

- a análise dos resultados advindos da simulação da cobrança pelo uso da água a partir da consideração do manancial de captação subterrâneo e da regularização dos cursos d'água mostrou variações expressivas nos valores de cobrança, sendo que a adoção do fator manancial de captação aumentou o valor da água em até 2,7 vezes em relação à legislação vigente e a adoção do fator de regularização reduziu o valor a um terço.

6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Os objetivos propostos no presente trabalho foram atingidos e constituem um importante avanço no âmbito da cobrança pelo uso da água, contudo, algumas considerações devem ser feitas:

- em função de uma busca mais racional da utilização dos recursos hídricos, considera-se importante o aprimoramento dos valores do fator manancial de captação referentes aos meses de novembro e dezembro. Essa consideração deve-se ao fato de os valores obtidos para esses meses não serem representativos dos anos em que ocorre um prolongamento do período de estiagem, envolvendo a tomada de decisão com relação ao aumento da disponibilidade hídrica certo nível de subjetividade nas situações em que não se tem um sistema de monitoramento constante.

- a construção de reservatórios de regularização de vazão, assim como toda prática tecnológica, está associada a impactos positivos e negativos. Para o presente trabalho, foram avaliados apenas os termos quantitativos em relação ao incremento da disponibilidade hídrica com base na regularização de vazões. Contudo, é importante considerar o custo da construção desses reservatórios e, principalmente, os impactos ambientais e sociais advindos da sua construção, assim como as consequências provenientes de uma eventual ruptura.

REFERÊNCIAS

ALBUQUERQUE, J. P. T., 2007- Água Subterrânea no Planeta Água. **In: Estudos Geológicos**. v. 17 n. 1, Recife, Universidade Federal de Pernambuco. Centro de Tecnologia e Geociência, Ed. Bagaço, 2007, p. 23-39.

ANA – AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS. **Cobrança pelo uso de recursos hídricos**. 2015. Disponível em: <<http://www2.ana.gov.br/Paginas/servicos/cobrancaearrecadacao/cobrancaearrecadacao.aspx>>. Acesso em: 15 de abril de 2015.

ANA - AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS. HidroWeb: ANA. **Dados Hidrológicos - Séries históricas**. Brasília, DF, 2015. Base de Dados em MDB do Microsoft Office Access.

ANA – AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS. Conjuntura dos recursos hídricos no Brasil. Brasília, 2013. Disponível em: <http://conjuntura.ana.gov.br/docs/conj2013_rel.pdf>. Acesso em: 11 de março de 2016.

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. **Atualização dos estudos hidrológicos na bacia do rio Paracatu**. 2007. Disponível em: <http://www.atlasdasaguas.ufv.br/paracatu/resumo_paracatu.html>. Acesso em: 01 jun. 2015.

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

BRAGA, B.P.F.; DOMINGUES, A.F. **Gestão de Recursos Hídricos no Brasil**. II Simpósio Internacional de Savanas Tropicais e IX Simpósio Nacional do Cerrado. Brasília. Out. 2008.

BRASIL. **Decreto nº 24.643, de 10 de julho de 1934**. Decreta o Código de Águas. Disponível em: <

https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/decreto/d24643.htm>. Acesso em: 10 de abril de 2015.

BRASIL. **Lei nº 9433, de 8 de janeiro de 1997**. Institui a Política Nacional de Recursos Hídricos, cria o Sistema Nacional de Gerenciamento de Recursos Hídricos, regulamenta o inciso XIX do art. 21 da Constituição Federal, e altera o art. I da Lei nº 8001, de 13 de março de 1990, que modificou a Lei nº 7990, de 28 de dezembro de 1989. Diário Oficial da República Federativa do Brasil, Brasília, 9 jan. 1997. Disponível em: <http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/leis/L9433.htm>. Acesso em: 10 de abril de 2015.

BRASIL. Ministério do Meio Ambiente. **Plano Diretor de Recursos Hídricos da Bacia do Rio Paracatu**. Brasília: PLANPAR, 1996. v.1, t.1. CD-ROM.

BRODIE, R. S.; HOSTETLER, S. A review of techniques for analysing baseflow from stream hydrographs. Bureau of Rural Sciences; Australian Government; Department of Agriculture, Fisheries and Forestry. **International Association of Hydrogeologist Conference**. Camberra, 2005, 13 p.

BRUINSMA, J. **The Resource Outlook to 2050**: by how much do land, water and crop yields need to increase by 2050? Prepared for the FAO Expert Meeting on 'How to Feed the World in 2050', Rome, 24-26 Jun. 2009.

CAO, H.; CHEN, W.; JIA, L.; ZHANG, Y.; LU, Y. Cluster analysis based on attractor particle swarm optimization with boundary zoomed for working conditions classification of power plant pulverizing system. **Neurocomputing**. v. 117, p. 54–63, 2013.

CARVALHO, A. M. R.; LEE, F.; AGUIAR, M. A. A cobrança pelo uso dos recursos hídricos no Brasil. **Revista Anhangüera**. v.6, n.1, p.57-74, 2005.

CBHSF. Comitê da Bacia Hidrográfica do Rio São Francisco. Deliberação CBHSF nº 40, de 31 de outubro de 2008. **Estabelece mecanismos e sugere valores de cobrança pelo uso de recursos hídricos na bacia hidrográfica do rio São Francisco**. Disponível em: <http://cbhsaofrancisco.org.br/?wpfb_dl=583>. Acesso em: 20 de maio de 2015.

CBHSF. Comitê da Bacia Hidrográfica do Rio São Francisco. Deliberação CBHSF Nº 56 de 02 de dezembro de 2010. **Dispõe sobre critério complementar de cobrança para os usos externos das águas da bacia do Rio São Francisco, e revoga a Deliberação CBHSF 51, de 14 de maio de 2010**. Disponível em: <http://cbhsaofrancisco.org.br/?wpfb_dl=576>. Acesso em: 20 de maio de 2015.

CEIVAP - Comitê para Integração da Bacia Hidrográfica do Rio Paraíba do Sul. **Cobrança pelo uso da água**. 2015. Disponível em: <<http://www.ceivap.org.br/instgestao.php>>. Acesso em: 17 de maio de 2015.

CEIVAP. Comitê para Integração da Bacia Hidrográfica do Rio Paraíba do Sul. Deliberação CEIVAP N.º 65, de 28 de setembro de 2006. **Estabelece mecanismos e propõe valores para a cobrança pelo uso de recursos**

hídricos na bacia hidrográfica do rio Paraíba do Sul, a partir de 2007. Disponível em: <
<http://www.ceivap.org.br/downloads/Deliberacao%20CEIVAP%2065%20%202006%20Cobranca%20%20aprovada%20Plenaria%20CEIVAP%20Resende%20-%2028-09-06.pdf>>. Acesso em: 17 de maio de 2015.

CEIVAP. Comitê para Integração da Bacia Hidrográfica do Rio Paraíba do Sul. Deliberação CEIVAP N.º 52, de 16 de setembro de 2005. **Define metodologia e critérios para a cobrança pelo uso das águas captadas, derivadas e transpostas da bacia do rio Paraíba do Sul para a bacia do rio Guandu e dá outras providências.** Disponível em: <
http://arquivos.ana.gov.br/institucional/sag/CobrancaUso/Cobranca/DeliberacaoCEIVAP_nr_65-06e70-06e52-05.pdf>. Acesso em 17 de maio de 2015.

CEIVAP. Comitê para Integração da Bacia Hidrográfica do Rio Paraíba do Sul. Deliberação CEIVAP. Deliberação CEIVAP N° 218/2014 de 25 de setembro de 2014. **Estabelece mecanismos e propõe valores para a cobrança pelo uso de recursos hídricos na bacia hidrográfica do rio Paraíba do Sul, a partir de 2015.** Disponível em: <<http://ceivap.org.br/deliberacao/2014/deliberacao-ceivap-218.pdf>>. Acesso em: 17 de abril de 2015.

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, n.4, p. 119-133, 2011.

COMITÊ DE BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO SOROCABA E MÉDIO TIETÊ - CBH-SMT. **Fundamentos da Cobrança pelo Uso dos Recursos Hídricos na Bacia do Sorocaba e Médio Tietê.** 49p. Sorocaba, 2008.

COMITÊS PCJ. COMITÊS DAS BACIAS HIDROGRÁFICAS DOS RIOS PIRACICABA, CAPIVARI E JUNDIAÍ. Deliberação Conjunta dos Comitês PCJ n° 078/07 de 05 de outubro de 2007. **Aprova propostas de revisão dos mecanismos e de ratificação dos valores para a cobrança pelo uso dos recursos hídricos de domínio da União nas bacias hidrográficas dos rios Piracicaba, Capivari e Jundiaí e dá outras providências.** Disponível em: <
<http://arquivos.ana.gov.br/institucional/sag/CobrancaUso/BaciaPCJ/PCJ/DelibC onj078-07.pdf>>. Acesso em: 17 de maio de 2015.

COMITÊS PCJ. COMITÊS DAS BACIAS HIDROGRÁFICAS DOS RIOS PIRACICABA, CAPIVARI E JUNDIAÍ. Deliberação dos Comitês PCJ n° 021/08, de 12/12/2008. **Estabelece mecanismos e valores para a cobrança pelo uso dos recursos hídricos de domínio do Estado de Minas Gerais na bacia hidrográfica dos rios Piracicaba e Jaguari e dá outras providências.** Disponível em: <
<http://www.comitepcj.sp.gov.br/download/DelibComitesPCJ021-08.pdf>>. Acesso em: 17 de maio de 2015.

CORCORAN, E., NELLEMAN, C., BAKER, E., BOS, R., OSBORN, D. AND SAVELLI, H. (eds). 2010. **Sick Water? The Central Role of Wastewater**

Management in Sustainable Development. A Rapid Response Assessment. UN-Habitat/UNEP/ GRID-Arendal.

CORTNER, H. J.; MOOTE, M. A. Trends and issues in land and water resources management: setting the agenda for change. **Environmental Management**. v. 18, 167-173. 1994.

CRUZ, N. R.; MENDIONDO, E. M. **A situação atual da cobrança pelo uso dos recursos hídricos no Estado de São Paulo.** In: Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, 20, 2013, Bento Gonçalves. Anais: ABRH.

EUROPEAN COMMUNITIES. **Proteção das águas subterrâneas na Europa.** A nova directiva da água subterrânea – Consolidando o Quadro Regulamentar da União Européia. Comissão Européia. 2008.

FETTER, C. W. **Applied Hydrogeology.** 4 ed. Prentice Hall, Inc. Upper Saddle River, New Jersey, 2001, 598 p.

FILHO, J. L. A.; BARBOSA, M. C.; AZEVEDO, S. G.; CARVALHO, A. M. O papel das águas subterrâneas como reserva estratégica de água e diretrizes para a sua gestão sustentável. **Revista Recursos Hídricos**, v. 32, n. 2, p.53-61, 2011.

FREIRE, C. C. **Modelo de gestão para a água subterrânea.** 2002. 140 f. Tese (Doutorado em Engenharia de Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2002.

GARRIDO, R. A. **Cobrança pelo uso da água.** In: THAME, A. C. M. (Org.). Comitês de Bacias Hidrográficas. São Paulo: IQUAL, 2000. p. 57-87

GLEICK, P. H. 2003. Global freshwater resources: soft-path solutions for the 21st century. **Science** v.302:524-528.

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.

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.

HIRATA, R.; ZOBY, J.L.G.; OLIVEIRA, F.R. **Água subterrânea: reserva estratégica ou emergencial.** In: **Águas do Brasil: análises estratégicas** - Carlos E. de M. Bicudo; José G. Tundisi; Marcos C. Barnsley Scheuenstuhl – São Paulo, Instituto de Botânica, 224 p. 2010.

HOSKING, J. R. M., WALLIS, J. R. **Regional Frequency Analysis - an approach based on L-moments.** Cambridge University Press, P.224, 1997.

HOSKING, J.R.M. WALLIS, J.R., 1993. Some statistics useful in regional frequency analysis. **Water Resource Research**, v.29, p.271–281.

IBIO - INSTITUTO BIOATLÂNTICA / FUNARBE – FUNDAÇÃO DE APOIO A UNIVERSIDADE FEDERAL DE VIÇOSA. Relatório técnico: **Estudos de aprimoramento dos mecanismos de cobrança da bacia hidrográfica do Rio Doce**, Viçosa, 2013. Disponível em: <<http://arquivos.ana.gov.br/institucional/sag/CobrancaUso/Estudos/EstudosDeAprimoramentoDosMecanismosDeCobrancaDaBaciaHidrograficaDoRioDoce.pdf>>. Acesso em: 17 jun 2015.

IGAM - INSTITUTO MINEIRO DE GESTÃO DAS ÁGUAS - Comitê da Sub-Bacia Hidrográfica do Rio Paracatu. **Plano diretor de recursos hídricos da Bacia Hidrográfica do Rio Paracatu**: resumo executivo. Belo Horizonte: IGAM, 384 p, 2006.

IGAM - INSTITUTO MINEIRO DE GESTÃO DAS ÁGUAS. Resolução Conjunta SEMAD-IGAM nº 1548, de 29 de março 2012. **Dispõe sobre a vazão de referência para o cálculo da disponibilidade hídrica superficial nas bacias hidrográficas do Estado de Minas Gerais**. Disponível em: <<http://www.igam.mg.gov.br/images/stories/CTIG/4-r-c-semad-igam-no-1548-versao-publicada.pdf>>. Acesso em: 18 de abril de 2015.

IVKOVIC, K. M. A top–down approach to characterise aquifer–river interaction processes. **Journal of Hydrology**. v. 365, p. 145–155, 2009.

LINSLEY, R. K., KOHLER, M. A., PAULHUS, J. L. **Hydrology for engineers** (3rd.). McGraw-Hill, New York, 1982, 508 p.

LIU, P.; GUO, S.L.; XIONG, L.H.; LI, W.; ZHANG, H. G. **Deriving reservoir refill operating rules by using the proposed DPNS model**. *Water Resour. Manage.*, v.20, n.3, 2006, pp. 337–357, 2006

MAGALHÃES, N. M.; THOMAS, P.; THOMAZ, F.; CAMPOS, J. D. **Estudo comparativo de quatro metodologias para a cobrança pelo uso da água**. In: Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, 15, 2003, Curitiba. Anais: ABRH

MIRANDA, A. C. R.; PRUSKI, F. F.; MARTINEZ, M. A.; CECON, P. R. Métodos de Separação dos Escoamentos Superficial Direto e Subterrâneo: Estudo de Caso para a Bacia do Rio das Velhas. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**. v.19, n.2, p.169-181, 2014.

MOURA, A. N. Recarga artificial de aquíferos: os desafios e riscos para garantir o suprimento futuro de água subterrânea. In: XIII Congresso Brasileiro de Águas Subterrâneas, 2004, Cuiabá. **Livro de Resumos** - A gestão integrada e dinâmica de aquíferos: eficiência e agronegócio, 2004. v. único. p. 245-245.

NAGHETTINI, M.; PINTO, É. J. de A. **Hidrologia estatística**. Belo Horizonte, CPRM, 2007. 552p.

NATHAN. R. J.; MCMAHON, T. Identification of homogeneous regions for the purpose of regionalization. **Journal of Hydrology**, V. 121, p. 217-238, 1990.

NOVAES, L.F.; PRUSKI, F.F.; QUEIROZ, D.O.; RODRIGUEZ, R. del G.; SILVA, D.D.; RAMOS, M.M. Modelo para a quantificação da disponibilidade hídrica: Parte 1 — obtenção da equação de recessão. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 14, n. 1, p. 15-26, 2009.

NUNES, A. A.; PRUSKI, F. F. The effect of reservoirs on water availability. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 20, n.1, p. 7 – 15,. 2015

OLIVEIRA, F. A. **Procedimentos para aprimorar a regionalização de vazões: estudo de caso da Bacia do Rio Grande**. 2008. 173f. Dissertação (Engenharia Agrícola). Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG, 2008.

OLIVEIRA, J. R.; PRUSKI, F. F.; NUNES, A. A.; Otimização do aproveitamento da disponibilidade de águas superficiais na Bacia do Ribeirão Entre Ribeiros. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**. v. 18, n.4, p. 157-172, 2013.

ONS - OPERADOR NACIONAL DO SISTEMA ELÉTRICO. **Estimativa das vazões para atividades de uso consuntivo da água nas principais bacias do Sistema Integrado Nacional - SIN**. Brasília, 2005.

PEREIRA, S. B.; PRUSKI, F. F.; SILVA, D. D. da e RAMOS, M. M.. Estudo do comportamento hidrológico do Rio São Francisco e seus principais afluentes. **Rev. bras. eng. agríc. ambient.** [online]. 2007, vol.11, n.6, pp. 615-622. ISSN 1807-1929.

PRUSKI, F. F., BOF, L. H. N., SILVA, L. M. C., SILVA, J. M. A., REGO, F. S., JUSTINO, F. B. Impact of the substitution of reference annual streamflow by monthly streamflow on the potential use of water resources. **Engenharia Agrícola**, v. 34, n. 3, p. 496-509. 2014.

PRUSKI, F. F; RODRIGUEZ, R. D. G.; SOUZA, J. F.; SILVA, B. M. B.; SARAIVA, I. S. Conhecimento da disponibilidade hídrica natural para a gestão dos recursos hídricos. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v. 31, n. 1, p. 67 - 77, 2011.

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**, Campina Grande, v. 11, n. 2, 2007

RAMOS, M.C.A. **Critérios de valoração da água com base na sazonalidade das vazões e na efetiva demanda hídrica das culturas**. 2016. X f. Dissertação (Meteorologia Aplicada). Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG, 2016.

RAO, A. R.; SRINIVAS; V.V. Regionalization of watersheds by hybrid-cluster analysis. **Journal of Hydrology**. V. 318, p 37–56, 2006.

REIS, E.A. & REIS, I.A. **Análise descritiva dos dados: Síntese numérica**. Belo Horizonte: UFMG, 2002. Relatório Técnico.

RODRIGUEZ, R. G. **Metodologia para a estimativa das demandas e disponibilidades hídricas: estudo de caso da bacia do Paracatu**. 2004. 94f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa - MG. 2004.

SANTOS, M. O. R. M. **O impacto da cobrança pelo uso da água no comportamento do usuário**. 2002. 241f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) - Coordenação dos Programas de Pós - Graduação de Engenharia da Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro - RJ. 2002.

SASIDHARANA, L.; WUB, , K.; MENENDEZA, M. Exploring the application of latent class cluster analysis for investigating pedestrian crash injury severities in Switzerland. **Accident Analysis and Prevention**. v. 85, p. 219–228, 2015.

SILVA, M. M. A. O. **Simulação da cobrança pelo uso da água subterrânea**. 2011. 134 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia: Recursos Hídricos e Saneamento) – Universidade Federal de Alagoas. Maceió - Al, 2011.

SILVA, C. H. R. T. Recursos hídricos e desenvolvimento sustentável no Brasil. Brasília: Senado Federal, Consultoria Legislativa, 2012. (**Boletim do Legislativo**, n. 23).

SILVA, M. V. **Adequação da disponibilidade hídrica com a demanda de água na agricultura**. 2014. 104 f. Tese (Doutorado em Meteorologia Agrícola) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG, 2014.

SOUSA, M. R. C. **Estudo da cobrança como instrumento de gestão social de bacias hidrográficas: uma Aplicação à Bacia Hidrográfica do Rio Cubatão do Sul**. 2006. 119f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis – SC. 2006.

THOMAS, P. T.; MAGALHÃES, P. C; AZEVEDO, J. P. S. **Proposta de uma metodologia de cobrança pelo uso da água vinculada à escassez**. In: Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, 15., 2005, Curitiba. Anais: ABRH.

UNESCO - ORGANIZAÇÃO DAS NAÇÕES UNIDAS PARA A EDUCAÇÃO, A CIÊNCIA E A CULTURA. **Relatório mundial das Nações Unidas sobre o desenvolvimento dos recursos hídricos**. O manejo dos recursos hídricos em condições de incerteza e risco. Visão geral das mensagens centrais - WWRD4, 17 p., 2012.

UN-WATER. **Coping with water scarcity: Challenge of the twenty-first century**. 29p. 2007.

UN-WATER. **Climate Change Adaptation: The Pivotal Role of Water**. 18p. 2010

VASCONCELOS, V. V. **Recarga de aquíferos subsídios à gestão hídrica e ambiental bacia do rio Paracatu - SF7**. 2014. 276f. Tese (Doutorado em Evolução Crustal e Recursos Naturais) - Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2014.

VASCONCELOS, V. V.; MARTINSJUNIOR, P. P.; HADAD, R. M. **Caracterização Ambiental da Bacia do Rio Paracatu**. In: Martins Junior, P. P. (coord.) Projeto SACD–Sistemas de Arquitetura de Conhecimentos e de Auxílio à Decisão na Gestão Geo-Ambiental e Econômica de Bacias Hidrográficas e Propriedades Rurais. 2012. 84p.

WANG, X.; HUANG, G.; LIN, Q.; NIE, X.; CHENG, G.; FAN, Y.; LI, Z.; YAO, Y. SUO, M. A stepwise cluster analysis approach for downscaled climate projection – A Canadian case study. **Environmental Modelling & Software**. v. 49, p. 141–151, 2013.

WARD, R. C. Special issue on integrated watershed management; a new paradigm for water management. **Journal of Contemporary Water Research and Education** v. 100. 1995.

WOLF, W. **Avaliação e nova proposta de regionalização hidrológica para o Estado de São Paulo**. 2013. 113 f. Dissertação (Mestre em Ciências) – Universidade de São Paulo, Piracicaba, SP, 2013.

WWAP (World Water Assessment Programme). 2012. The United Nations World Water Development Report 4: Managing Water under Uncertainty and Risk. Paris, UNESCO."

WWAP (United Nations World Water Assessment Programme). 2015. **The United Nations World Water Development Report 2015: Water for a Sustainable World**. Paris, UNESCO.

APÊNDICES

APÊNDICE A

Quadro 1.A. Estações fluviométricas utilizadas no estudo.

Código	Estação	Latitude	Longitude	Área (km²)
42250000	Fazenda Limoeiro	17° 54' 56"	47° 00' 38"	464
42251000	Fazenda córrego do Ouro	17° 36' 48"	46° 51' 31"	1870
42255000	Fazenda Nolasco	17° 13' 48"	47° 01' 20"	248
42257000	Barra do Escurinho	17° 30' 45"	46° 38' 46"	2000
42290000	Ponte da BR-040	17° 30' 10"	46° 34' 18"	7750
42395000	Santa Rosa	17° 15' 19"	46° 28' 26"	12800
42435000	Fazenda Barra da Égua	16° 52' 28"	46° 35' 12"	1590
42440000	Fazenda Poções	17° 02' 31"	46° 49' 04"	551
42460000	Fazenda Limeira	16° 12' 35"	47° 13' 58"	3890
42490000	Unaí	16° 20' 58"	46° 52' 48"	5360
42540000	Santo A. Boqueirão	16° 31' 47"	46° 43' 16"	5910
42545500	Fazenda o Resfriado	16° 30' 10"	46° 39' 46"	680
42546000	Fazenda Santa Cruz	16° 08' 06"	46° 44' 52"	553
42600000	Porto dos Poções	16° 50' 23"	46° 21' 26"	9400
42690001	Porto da Extrema	17° 01' 49"	46° 00' 49"	30100
42750000	Caatinga	17° 08' 45"	45° 52' 49"	33500
42840000	Veredas	18° 08' 19"	45° 45' 32"	210
42850000	Cachoeira das Almas	17° 21' 02"	45° 31' 57"	4390
42860000	Cachoeira do Paredão	17° 7' 16"	45° 26' 8"	520
42930000	Porto do Cavalo	17° 01' 50"	45° 32' 22"	40900
42980000	Porto Alegre	16° 46' 29"	45° 22' 55"	41300

APÊNDICE B

Quadro 2.A. Lâmina média anual e relação entre escoamento subterrâneo e escoamento superficial total.

Estação	LESub (mm)	LES (mm)	LETotál (mm)	LESub/LETotál (%)
42435000 - Fazenda Barra da Égua	240,33	102,01	342,34	70%
42440000 Fazenda Poções	309,49	182,73	492,23	63%
42460000 Fazenda Limeira	421,94	114,33	536,26	79%
42490000 Unaí	277,66	140,02	417,68	66%
42540000 Santo Antônio do Boqueirão	320,42	138,63	459,05	70%
42545500 Fazenda o Resfriado	187,77	196,29	384,06	49%
42546000 Fazenda Santa Cruz	198,51	212,25	410,76	48%
42600000 Porto dos Poções	238,11	139,73	377,84	63%
42250000 Fazenda Limoeiro	371,81	151,99	523,80	71%
42255000 Fazenda Nolasco	273,16	114,90	388,06	70%
42257000 Barra do Escurinho	279,33	114,74	394,08	71%
42290000 Ponte da BR-040 (Paracatu)	241,70	154,72	396,43	61%
42395000 Santa Rosa	245,29	154,48	399,78	61%
42251000 Fazenda Córrego do Ouro	360,43	120,35	480,78	75%
42690001 Porto da Extrema	203,19	127,73	330,93	61%
42750000 Caatinga	191,93	121,27	313,20	61%
42850000 Cachoeira das Almas	193,26	175,42	368,68	52%
42860000 Cachoeira do Paredão	137,60	187,30	324,90	42%
42930000 Porto do Cavalo	202,71	133,22	335,93	60%
42980000 Porto Alegre	203,34	119,82	323,16	63%
42840000 Veredas	338,25	165,38	503,64	67%

*LES = Lâmina de escoamento superficial direto