



COMPARAÇÃO ENTRE VAZÕES MÍNIMAS DE REFERÊNCIA PARA O RIO FORMOSO – MG

Julio Cesar Borges Belico¹; Luana Lisboa²; Hugo Soares Guedes³; Demetrius David da Silva⁴

1. Engenheiro Ambiental pela Universidade Federal de Viçosa, Viçosa – MG, Brasil (juliobelico@gmail.com)
2. Pós-Graduanda em Engenharia Agrícola do Departamento de Engenharia Agrícola da Universidade Federal de Viçosa
3. Professor Doutor da Universidade Federal de Pelotas
4. Professor Doutor da Universidade Federal de Viçosa

Recebido em: 30/09/2013 – Aprovado em: 08/11/2013 – Publicado em: 01/12/2013

RESUMO

Os critérios no Brasil para determinação da vazão residual mínima a ser mantida em cursos d'água são baseados em hidrologia estatística, não levando em consideração as reais necessidades do ecossistema. No presente trabalho foi realizada uma comparação das vazões mínimas remanescentes, em dois trechos distintos do Rio Formoso (MG), entre valores exigidos pela legislação vigente com os obtidos por metodologias utilizadas principalmente nos EUA e Europa: Método de Tennant, Método do Perímetro Molhado e Metodologia IFIM. Para o trecho mais preservado, os valores obtidos pelos métodos foram superiores ao exigido pela legislação local, sendo próximo ao valor obtido para o período seco da faixa Boa do Método de Tennant e ao obtido pelo Método do Perímetro Molhado. O IFIM se mostrou expressivamente superior, com valores refletindo uma sazonalidade similar ao Método de Tennant e ao regime hidrológico natural do rio. No trecho mais degradado, o valor de vazão residual exigido por lei se mostrou superior apenas ao Método do Perímetro Molhado, se assemelhando novamente ao relativo à estação seca da faixa Boa do Método de Tennant. Esta obteve uma sazonalidade mais bem definida ao longo do ano e no período chuvoso apresentou resultados semelhantes ao IFIM, o qual novamente forneceu resultados superiores a todas metodologias.

PALAVRAS-CHAVE: Hidrologia; Ecologia; Método de Tennant; Método do Perímetro Molhado; Metodologia IFIM.

COMPARISON BETWEEN INSTREAM FLOW MINIMUM REQUIREMENTS FOR FORMOSO RIVER – MG

ABSTRACT

The Brazilian criteria of instream flow minimum requirement is based in hydrologic statistics, applied without considering the real necessity of the ecosystem. In this work, a comparison in two distinct patches of Formoso river was made, between the minimum instream flow required by law with results obtained by methodologies most used in USA and Europe: Tennant Method, Wetted Perimeter Method and

IFIM. In the most preserved stretch, the values obtained by the methods were higher than the demanded by law, which was similar to the dry season value of the Tennant Method and Wetted Perimeter one. The IFIM revealed been expressively superior, with values reflecting a seasonality similar to the Tennant Method and the natural hydrograph of the river. In the most degraded stretch, the minimum stream flow required by law showed yourself superior only to the Wetted Perimeter Method, been similar again to the dry season value of the Good band of the Tennant Method. This one obtained a better defined seasonality through the year and present in the wet season results similar to the IFIM, which had the highest values again.

KEYWORDS: Hydrology; Ecology; Tennant Method; Wetted Perimeter Method; IFIM.

INTRODUÇÃO

Em todo o século XX foram construídas inúmeras barragens e represas ao redor do mundo, com o objetivo de regularizar a vazão natural dos rios e assim reduzir o impacto de situações extremas como cheias e estiagens prolongadas. Desse fato surgiu a questão de qual seria a vazão residual mínima que deveria ser mantida a jusante, de forma que não se comprometesse os processos ecológicos (COLLISCHONN et al., 2005).

Segundo SILVA (2010), o estabelecimento de um regime de vazões ecológicas é uma das questões mais relevantes para o adequado gerenciamento ambiental de um curso d'água, pois envolve o tratamento de demandas geralmente conflitantes e está associado a um contexto de causas e efeitos que envolvem praticamente todo o ecossistema da região.

Na Conferência Internacional de Dublin sobre Águas e Meio Ambiente (1992) foi destacada a ineficiência de práticas tradicionais de manejo hídrico em alcançar a sustentabilidade, ressaltando a necessidade de novas soluções. Desse contexto surgiu a Ecohidrologia, uma ciência multidisciplinar que buscava entender a dupla regulação existente entre os processos ecológicos e hidrológicos, sendo assim capaz de propor soluções eficazes para o problema da degradação em bacias hidrográficas (ZALEWSKI et al., 1997).

Hoje em dia, a Ecohidrologia passou a ser uma sub-área da Hidrologia que se dedica ao estudo das influências dos processos ecológicos que ocorrem dentro do ciclo hidrológico, fornecendo assim uma estrutura sistematizada de como utilizar as propriedades do ecossistema como uma nova ferramenta para a gestão integrada dos recursos hídricos, complementando as soluções hidrotécnicas já aplicadas (ZALEWSKI, 2010).

Assim, após o surgimento das reflexões sustentadas pela Ecohidrologia, a determinação de vazões remanescentes focada exclusivamente em uma vazão mínima passou a ser encarada como superficial e limitada (POSTEL & RICHTER., 2003), não se apresentando como ferramenta eficaz na manutenção da qualidade dos ecossistemas aquáticos (OLIVEIRA, 2013). As vazões remanescentes nos rios mostram-se, em sua maioria, inferiores às vazões necessárias à preservação das funções ecossistêmicas dos mesmos, fornecendo a falsa impressão de que os ecossistemas aquáticos estão de fato sendo preservados (GUEDES, 2013).

Atualmente há um consenso entre diversos pesquisadores que a vazão ecológica deve variar de acordo com o hidrograma natural do rio. Segundo CHANG (2008), a qualidade ambiental de um rio e dos ecossistemas associados é

fortemente dependente do comportamento natural do regime hidrológico, incluindo a magnitude das vazões mínimas, médias e máximas, o tempo de duração das estiagens, o tempo de ocorrência das cheias, entre outros.

No Brasil, a obrigatoriedade de manter uma vazão que permita a conservação e manutenção dos ecossistemas aquáticos está prevista na legislação (BRASIL, 1997). No entanto, a definição de vazão ecológica a ser mantida tem-se baseado apenas em métodos de hidrologia estatística, com pouco significado biológico (PAULO, 2007), não utilizando uma metodologia científica para sua definição (SILVA, 2010).

Existem diversas abordagens para determinação da vazão remanescente a ser mantida no curso d'água, as quais podem ser estabelecidas considerando diversos graus de proteção aos organismos aquáticos (BENETTI & LANNA, 2003). É consenso geral agrupá-las em quatro grandes categorias, as quais variam de acordo com sua complexidade em: métodos hidrológicos (Vazão $Q_{7,10}$, Curva de Permanência de Vazões e Método de Tennant/Montana), métodos hidráulicos (Método do Perímetro Molhado, Métodos das Regressões Múltiplas), métodos de classificação de habitats (Método Idaho, Método IFIM), e métodos holísticos (Método de Construção de Blocos, Método de Benchmark e Método Drift) .

Os métodos hidrológicos são baseados em registros históricos de vazão, utilizando séries temporais de vazões diárias ou mensais para fazer recomendações sobre a vazão ecológica (SARMENTO, 2007). Eles não analisam o aspecto ambiental, apenas presumem que a manutenção de uma vazão de referência, calculada com base em alguma estatística da série histórica, possa acarretar em benefício ao ecossistema. A principal vantagem destes métodos está na pequena quantidade de informações necessárias para sua implementação, em geral apenas a série histórica de vazões (COLLISCHONN et al., 2005).

No Brasil, os métodos hidrológicos mais utilizadas são a $Q_{7,10}$, Q_{90} e Q_{95} . A $Q_{7,10}$ é baseada na série histórica de vazões mínimas médias com sete dias de duração e período de retorno de 10 anos, e a Q_{90} e Q_{95} utilizam valores da curva de permanência para estabelecer vazões ecológicas em uma base diária, mensal ou anual.

Já o método de Tennant, a vazão ecológica recomendada é calculada com base na vazão média de longo termo (Q_{MLT}), calculada para o local do aproveitamento hidráulico, em que são utilizadas diferentes percentagens para o período de seco e para o período de chuvoso. No Brasil há registros de sua aplicação na elaboração dos planos diretores de recursos hídricos das bacias dos rios das Velhas e Paracatu (MG) e para a execução do Plano Decenal (2004-2013) de Recursos Hídricos da Bacia do Rio São Francisco, realizado pela Agência Nacional das Águas (SARMENTO, 2007).

Os métodos hidráulicos são baseados na relação entre parâmetros hidráulicos e vazão, considerando mudanças em variáveis como perímetro molhado ou profundidade máxima (SARMENTO, 2007). O Método do Perímetro Molhado foi elaborado em 1983 e é utilizado com algum sucesso em Montana (EUA) e outros locais (REIS, 2007) e está fundamentado na existência de uma relação direta entre o perímetro molhado e a disponibilidade de habitats para a ictiofauna (BENETTI & LANNA, 2003).

Os métodos de habitat são técnicas que objetivam avaliar a vazão ecológica

quanto ao habitat físico disponível para as espécies piscícolas consideradas bioindicadoras (SARMENTO, 2007; GUEDES, 2013). Assim, busca-se relacionar as diversas características de um trecho de rio, tais como velocidade, profundidade, cobertura vegetal, substrato, oxigênio dissolvido e temperatura, com as preferências de habitat para uma espécie ou para um grupo de espécies (REIS, 2007). Segundo BENNETI & LANNA (2003), o que ocorre com frequência é a interseção de valores de vazão que suportam diferentes usos da água dentro de leitos de rios. Neste caso, o atendimento das necessidades de vazão para um uso mais restritivo possibilitará atender também as necessidades de outros usos, sendo esta uma das razões pela qual a necessidade de vazões para peixes é tão utilizada em estudos para determinação de vazões mínimas.

O Instream Flow Incremental Methodology (IFIM) foi desenvolvido pelo grupo de estudos de descargas mínimas, do U.S. Fish and Wildlife Service, na Colorado University. Os valores finais são produzidos a partir de um modelo de simulação biológica (curvas de preferência para cada espécie em função de variáveis como a velocidade, profundidade e substrato) e de um modelo de simulação hidráulica. A ideia é determinar como varia o habitat disponível para cada espécie (de modo específico para cada fase do seu desenvolvimento) em função da variação da vazão, permitindo a obtenção de um regime de vazões ecológicas apropriadas as espécies selecionadas (BENNETTI & LANNA, 2003).

Porém o IFIM é considerado um dos métodos mais difíceis e onerosos de ser utilizado. Segundo SARMENTO (2007), sua aplicação necessita de uma equipe multidisciplinar para trabalhar os seus módulos, cuja interpretação das análises requer biólogos muito experientes. PAULO (2007) relata que os inconvenientes mais evidentes estão relacionados aos custos inerentes a um trabalho de campo muito intenso, a uma perda de precisão na modelagem hidráulica para baixas vazões, ao fato de se destinarem apenas a espécies estritamente aquáticas e a não poderem ser extrapoláveis para condições ambientais distintas.

Pelo exposto, o objetivo do trabalho é comparar os valores de vazões mínimas de referência obtidas pelo Método de Tennant, Método do Perímetro Molhado e Metodologia IFIM com os valores exigidos pela legislação vigente, utilizando-se dois trechos com condições ambientais distintas no Rio Formoso – MG.

MATERIAL E MÉTODOS

Caracterização da Área de Estudo

O Rio Formoso, afluente da margem direita do rio Pomba, está localizado na região oeste da bacia hidrográfica do rio Paraíba do Sul, entre os paralelos 21°18' e 21°27' Sul e os meridianos 43°10' e 43°38' Oeste. A bacia do rio Formoso abrange parte dos municípios mineiros de Oliveira Fortes, Aracitaba, Tabuleiro e Santos Dumont, ocupando uma área aproximada de 398 km² (GOMES, 2011).

As áreas de estudo são dois trechos de 1 km de extensão do rio Formoso (Figura 1), os quais possuem características hidráulicas e de preservação bastante distintas.

O Trecho 1, mais a montante, possui uma área de contribuição de aproximadamente 181 km² e se situa próximo à nascente do rio Formoso, em uma área de relevo mais acentuado. Este possui áreas mais preservadas

com a presença de mata ciliar e sem a presença de urbanização. O Trecho 2 possui uma área de contribuição maior (312 km²), se situando na porção inferior da bacia, em uma região plana e com curso de água meândrico. Este trecho representa uma porção mais degradada da bacia, onde a vegetação nativa foi suprimida e deu espaço ao uso intensivo de pastagem, possui completa ausência de mata ciliar e encontra-se em avançado processo de assoreamento e degradação da qualidade da água, sofrendo ainda forte influência urbana do município de Tabuleiro.

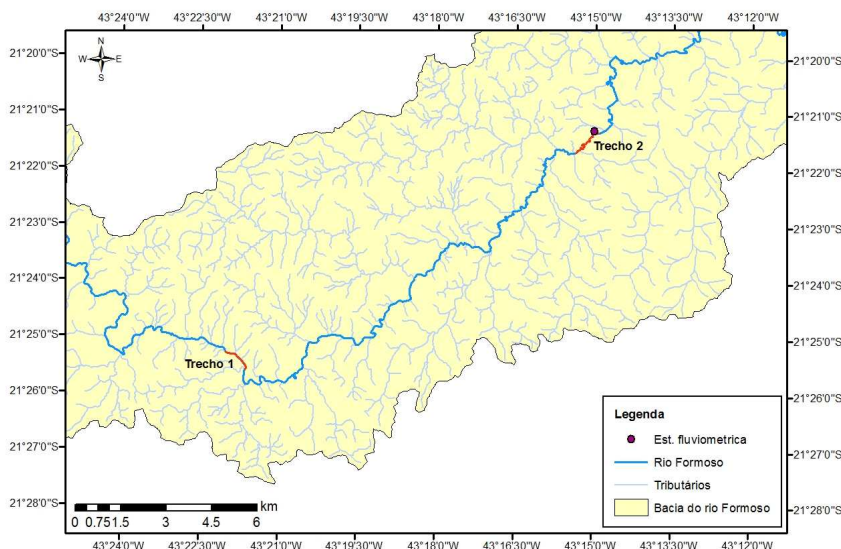


FIGURA 1. Localização dos trechos de monitoramento no rio Formoso.
Fonte: GUEDES (2013)

Para a análise do regime de vazões do Rio Formoso utilizou-se a série histórica de dados fluviométricos da estação Tabuleiro (código 58720000), localizada à jusante do Trecho 2. A estação pertence à rede hidro meteorológica da Agência Nacional de Águas (ANA) e é operada pela Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais (CPRM). Foram utilizados os dados correspondentes a 23 anos, compreendendo o período de 1983 a 2005. O hidrograma mensal do Rio Formoso é apresentado na Figura 2, onde percebe-se que o ano hidrológico tem início em novembro, e a estação chuvosa estende-se até abril.

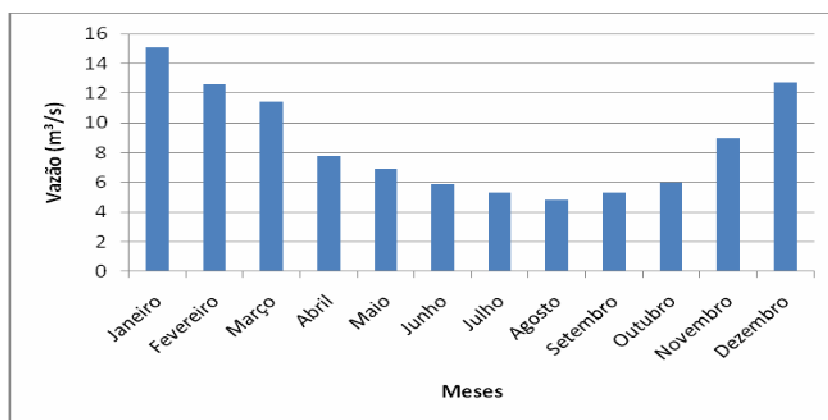


FIGURA 2. Regime de vazões médias mensais no Rio Formoso.

Porcentagens da $Q_{7,10}$ e das vazões associadas à 90 e 95% do tempo (Q_{90} e Q_{95})

A vazão mínima de referência $Q_{7,10}$ e as vazões mínimas associadas à permanência de 90 e 95% no tempo foram determinadas utilizando-se o software SisCAH, versão 1.0. O mesmo foi desenvolvido pelo Grupo de Pesquisa em Recursos Hídricos (GPRH) do Departamento de Engenharia Agrícola (DEA) da Universidade Federal de Viçosa (UFV).

Para fins de obtenção das vazões mínimas de referência, para o Trecho 2, localizado logo a montante da Estação Tabuleiro, os próprios dados da estação foram utilizados na determinação das vazões. Para o Trecho 1, que se encontra em uma região hidrologicamente semelhante, seu regime de vazões foi determinado através da espacialização de vazões, utilizando o critério da vazão específica com base na área de drenagem. Para efeito de comparação, aos valores finais obtidos, foram aplicadas as porcentagens da vazão de referência previstas em lei no Brasil.

Método de Tennant

O método de Tennant ou de Montana foi desenvolvido por TENNANT (1976), em Montana (EUA), e é um dos métodos hidrológicos mais utilizados em todo o mundo (BENETTI & LANNA, 2003; REIS, 2007). Nele a vazão ecológica recomendada é calculada com base na vazão média de longo termo (Q_{MLT}), calculada para o local do aproveitamento hidráulico, em que são utilizadas diferentes porcentagens para o período seco e para o período chuvoso (TENNANT, 1976). As recomendações de vazão são baseadas apenas em valores obtidos pelo autor do método (Tabela 1).

TABELA 1. Regime de vazões recomendados pelo Método de Tennant

Condição do rio	Vazão recomendada (porcentagem da Q_{MLT})	
	Outubro - Março (seco)	Abril - Setembro (chuvoso)
Lavagem ou Máxima	200%	
Faixa Ótima	60 - 100 %	
Excepcional	40%	60%
Excelente	30%	50%
Boa	20%	40%
Regular ou com degradação	10%	30%
Má ou mínima	10%	10%
Degradação Elevada	0 - 10%	

Fonte: TENNANT (1976).

O Método de Tennant tem sofrido diversas modificações que visam adaptar melhor o regime de vazões ecológicas calculado ao regime natural de vazões em diversas regiões diferentes daquela para a qual o método foi desenvolvido (BENETTI & LANNA, 2003; REIS, 2007; SARMENTO, 2007).

A vazão média de longo termo, ou Q_{MLT} , foi determinada para o Trecho 2 através do software SisCAH, versão 1.0. A partir dos dados obtidos no software e da tabela desenvolvida por TENNANT (1976) determinou-se os valores de vazão remanescente pelo método. No trabalho, adotou-se a sugestão de REIS (2007), onde o autor salienta que na tabela elaborada por TENNANT (1976), os períodos seco e chuvoso do ano são sazonalmente opostos em relação aos da região Sudeste do Brasil. Portanto, na aplicação desse método para rios dessa região brasileira, deve-se atentar para essa inversão sazonal.

Método do Perímetro Molhado

Para a realização do Método do Perímetro Molhado (MPM) foi utilizado o software HEC-RAS versão 4.1.0, o qual foi desenvolvido pelo Hydrologic Engineering Center, departamento do U.S. Army Corps of Engineers. O software permite realizar simulações 1D para regimes de vazão permanentes e transitórios, transporte de sedimentos, leito móvel do rio e modelagem de temperatura da água (HEC-RAS, 2010).

O software armazena os dados em arquivos de forma independente. São criados arquivos como geometria do canal, vazões para análise, condições de contorno, sedimentos, dentre outros, sendo possível a simulação por diferentes combinações e criando-se diferentes planos de análise (HEC-RAS, 2010). No caso em relação ao escoamento permanente, CAMPOS (2011) ressalta que o modelo se utiliza da equação da energia, creditada à Bernoulli, onde os perfis da superfície líquida são calculados de uma seção para a próxima por um processo iterativo conhecido como Método Passo Padrão.

Para o trabalho, o método foi aplicado utilizando-se dados de profundidade e substrato coletados em campanhas de campo realizadas por GOMES (2011) e GUEDES (2013). Através deles foi possível o traçado das seções transversais para as regiões de estudo e a determinação dos coeficientes de rugosidade de Manning no canal.

Para a análise é necessário informar uma condição de contorno do trecho em análise. Na simulação foi utilizada a declividade da linha de energia, sendo $S = 0,01 \text{ mm}^{-1}$ para o primeiro trecho e $S = 0,005 \text{ mm}^{-1}$ para o segundo, sendo simulados eventos com valores de vazão variando de $0,1 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ até $10 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$. Essa amplitude engloba todos os valores encontrados por outros métodos, assim como é superior aos valores de vazão encontrados no Rio Formoso.

Metodologia IFIM

Os valores de vazão obtidos pela Metodologia IFIM foram desenvolvidos por GUEDES (2013), onde o mesmo propôs um hidrograma ecológico para o Rio Formoso através do software de análise hidráulica bidimensional RIVER 2D. O software é baseado no conceito de Superfície Ponderável Utilizável (SPU), onde são geradas curvas de habitat disponível em função da vazão para as espécies da ictiofauna analisadas.

O trabalho foi desenvolvido em quatro campanhas de campo, duas no período seco (julho de 2011 e julho de 2012) e duas no chuvoso (março de 2011 e fevereiro de 2012). Em cada trecho foram demarcadas seções equidistantes de 500 m, nas quais foram coletados dados como profundidade, velocidade, vazão, substrato e

cobertura, assim como inventariada a composição taxonômica da ictiofauna no rio em cada seção. Para a calibração do modelo foi realizado o georreferenciamento das seções transversais e um levantamento topobatimétrico a cada 10 m nos trechos de estudo.

A partir das condições presentes nos locais onde foram colocadas as redes, foram elaboradas Curvas de Aptidão de Habitat para cada espécie, relacionando sua frequência de aparição com a profundidade, velocidade e substrato no local. A partir dessas curvas e da calibragem hidráulica do modelo, conseguiu-se gerar um gráfico de SPU x Vazão para cada trecho em análise (Figura 3).

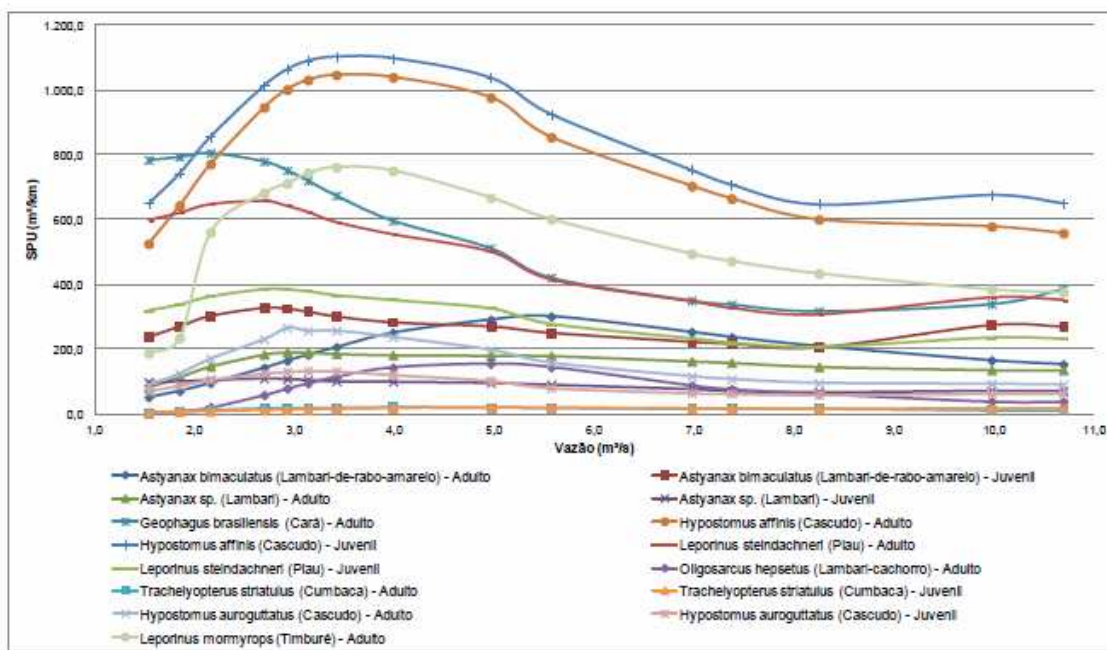


FIGURA 3. SPU versus vazão para o primeiro trecho de monitoramento. Fonte: GUEDES (2013).

Para a definição das espécies consideradas bioindicadoras realizou-se uma análise com a presença de uma equipe multidisciplinar. Foram selecionadas para o estudo as espécies consideradas médio-tolerantes, ou seja, aquelas cujas populações flutuarão conforme os valores de vazão, e que podem aparecer ou desaparecer se as vazões forem incompatíveis com a sua biologia.

Ao final, na determinação das vazões ecológicas mensais, foram elaboradas tabelas contendo os dados referentes a SPU das espécies bioindicadoras de acordo com uma porcentagem da vazão média mensal. A vazão ecológica necessária foi determinada selecionando-se a mínima SPU, para cada porcentagem da vazão média e em seguida selecionado o maior valor entre as mínimas (Tabela 2).

TABELA 2. Valores de vazão ecológica pelo método IFIM

Mês	Vazão Ecológica (m³ s ⁻¹)											
	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Ou	Nov	Dez
Trecho 1	4,99	4,43	4,19	4,46	3,99	3,14	2,95	2,70	2,93	3,42	4,46	4,95
Trecho 2	3,45	3,83	3,62	3,43	4,13	3,79	3,57	3,73	3,54	3,55	3,85	2,85

Fonte: GUEDES (2013).

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Porcentagens da $Q_{7,10}$ e das vazões associadas à 90 e 95% do tempo (Q_{90} e Q_{95})

Para o cálculo da $Q_{7,10}$, a distribuição estatística que mais se adequou à análise foi Logpearson tipo 3, apresentando um erro padrão de 0,13. Os resultados obtidos encontram-se na Tabela 3.

TABELA 3. Valores de Q_{90} , Q_{95} e $Q_{7,10}$ (m^3s^{-1}) para os dois trechos de monitoramento

Trecho de Monitoramento	Vazão de Referência ($m^3 s^{-1}$)		
	Q_{90}	Q_{95}	$Q_{7,10}$
Trecho 1	2,27	2,01	1,72
Trecho 2	3,92	3,47	2,97

Para efeito de comparação, foram utilizados alguns critérios empregados no Brasil para fins de outorga, ou seja, considerou-se que a vazão remanescente é aquela que permanece no curso d'água, descontando o percentual máximo da vazão mínima de referência para outorga (Tabela 4).

TABELA 4. Vazões remanescentes (m^3s^{-1}), com base em órgãos ambientais

Trecho de Monitoramento	Vazões remanescentes ($m^3 s^{-1}$)		
	50% da $Q_{7,10}$ ⁽¹⁾	20% da Q_{90} ⁽²⁾	30% da Q_{95} ⁽³⁾
Trecho 1	0,86	0,45	0,60
Trecho 2	1,49	1,04	0,93

(1) IGAM (MG), IEMA (ES), INEA (RJ), DAAE (SP).

(2) INEMA (BA).

(3) ANA.

Percebe-se que os valores obtidos pela legislação local (50% da $Q_{7,10}$) são expressivamente superiores aos utilizados por outros órgãos gestores, correspondendo à aproximadamente 38% da Q_{90} e 43% da Q_{95} . No estudo, para efeito de comparação com as outras metodologias foram utilizados como base os valores exigidos pela legislação local.

Método de Tennant

Na Tabela 5 são apresentados os valores da Q_{MLT} obtidos para os dois trechos, e na Tabela 6 e 7 os valores de vazão propostos pelo Método de Tennant para os trechos 1 e 2, respectivamente.

TABELA 5. Q_{MLT} para os trechos de monitoramento do rio Formoso

Trecho de Monitoramento	Q_{MLT} ($m^3 s^{-1}$)
Trecho 1	5,05
Trecho 2	8,73

TABELA 6. Valores de vazão, em $m^3 s^{-1}$, pelo Método de Tennant para o Trecho 1

Condição do rio	Vazão recomendada (percentagem da Q_{MLT})	
	Maio - Outubro (seco)	Novembro - Abril (chuvoso)
Lavagem ou Máxima	10,10	
Faixa Ótima	3,03 - 5,05	
Excepcional	2,02	3,03
Excelente	1,52	2,53
Boa	1,01	2,02
Regular ou com degradação	0,51	1,52
Má ou mínima	0,51	0,51
Degradação Elevada	0 - 0,51	

TABELA 7. Valores de vazão, em $m^3 s^{-1}$, pelo Método de Tennant para o Trecho 2

Condição do rio	Vazão recomendada (percentagem da Q_{MLT})	
	Maio - Outubro (seco)	Novembro - Abril (chuvoso)
Lavagem ou Máxima	17,46	
Faixa Ótima	5,24 - 8,73	
Excepcional	3,49	5,24
Excelente	2,62	4,37
Boa	1,75	3,49
Regular ou com degradação	0,87	2,62
Má ou mínima	0,87	0,87
Degradação Elevada	0 - 0,87	

Para efeito de comparação foi utilizado como base o critério: Boa (30% da Q_{MLT}). Essa faixa é considerada por muitos autores como suficiente para manter níveis adequados de sobrevivência (BENNETI & LANNA, 2003), onde a redução de habitat não é tão considerável, os parâmetros físico-químicos são mantidos em níveis satisfatórios para a maioria das espécies, a população de macroinvertebrados é levemente afetada, mas não pondo em risco a produção de peixes, e a vegetação ripícola não é afetada (REIS, 2007). Além disso, foi utilizado como critério de suficiência pela ANA no Plano Decenal (2004-2013) de Recursos Hídricos da Bacia do Rio São Francisco (SARMENTO, 2007).

Método do Perímetro Molhado

As Figuras 4 e 5 ilustram a aplicação do método para o trecho 2, demonstrando uma seção transversal e seu respectivo gráfico de perímetro molhado

x vazão. Atentar para o fato de que o ponto de inflexão não é analisado pelo software, sendo determinado pelo próprio usuário.

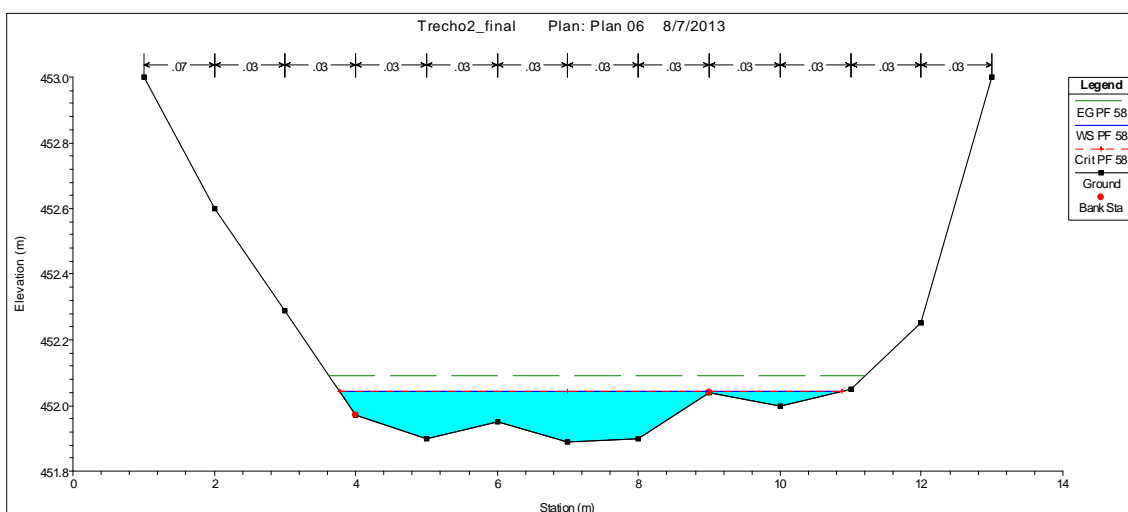


FIGURA 4. Segunda seção transversal do Trecho 2, com a vazão indicada pelo MPM.

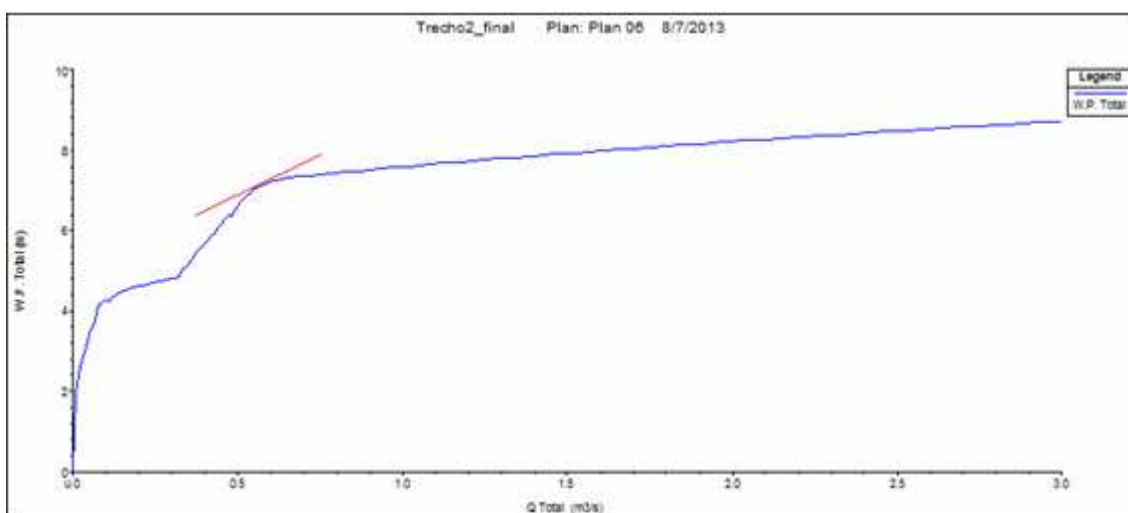


FIGURA 5. Curva perímetro molhado X vazão na segunda seção transversal do Trecho 2.

As Tabelas 8 e 9 contêm os valores encontrados pela aplicação do método em três campanhas de campo realizadas para três seções distintas.

TABELA 8. Valores de vazão ($m^3 s^{-1}$), pelo MPM no Trecho 1

Campanha de Campo	Vazão na seção transversal ($m^3 s^{-1}$)			
	Seção 1	Seção 2	Seção 3	Média
Março/2011	1,33	0,54	2,24	1,37
Junho/2011	0,68	1,01	1,28	0,99
Fevereiro/2012	0,58	1,38	0,22	0,73
Média Geral			1,03	

TABELA 9. Valores de vazão ($\text{m}^3 \text{s}^{-1}$), pelo MPM no Trecho 2

Campanha de Campo	Vazão na seção transversal			
	Seção 1	Seção 2	Seção 3	Média
Março/2011	1,01	1,11	0,18	0,77
Junho/2011	0,58	1,15	0,34	0,69
Fevereiro/2012	0,09	1,78	0,28	0,72
Média Geral			0,73	

Apesar do Trecho 1 possuir uma vazão menor que o Trecho 2, seus valores de vazão encontrados pelo MPM foram maiores. A razão disso se encontra na diferença entre as calhas do rio em ambos os trechos, existindo no primeiro, condições mais propícias para um ponto de inflexão do gráfico em uma vazão maior. O mesmo pertence a uma região mais preservada e de formação mais recente, possuindo uma declividade mais acentuada e um canal menos profundo. Seu leito possui uma rugosidade maior, sendo encontrados muitos trechos pedregosos e irregulares (Figura 6).

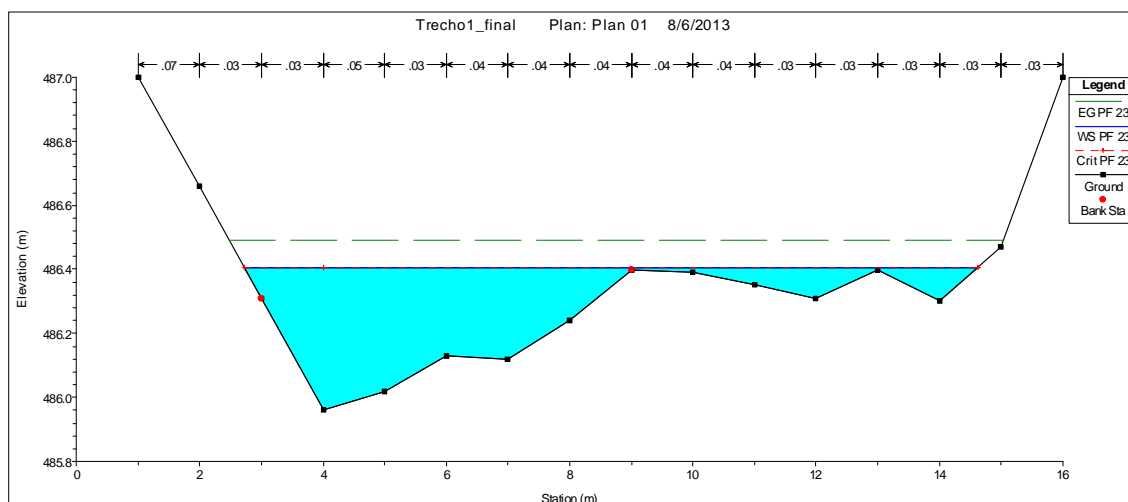


FIGURA 6. Primeira seção transversal do Trecho 1 com a vazão indicada pelo MPM.

Já o trecho 2 possui uma formação mais antiga, cuja declividade é menor, seu leito é meândrico e o canal mais profundo e arenoso, com sua calha retangular e pouco acidentada. Segundo PAULO (2007), a relação perímetro molhado x vazão é função da geometria do canal e da forma com que a vazão aumenta com a profundidade. Em canais retangulares e trapezoidais, com o fundo plano, o perímetro molhado aumenta rapidamente com o aumento da profundidade da água a partir de zero. Depois que o fundo é inundado, a profundidade e o perímetro molhado aumentam em menor proporção.

Comparação entre os valores obtidos pelos métodos

A Figura 7 contém os resultados encontrados pelos métodos para o Trecho 1.

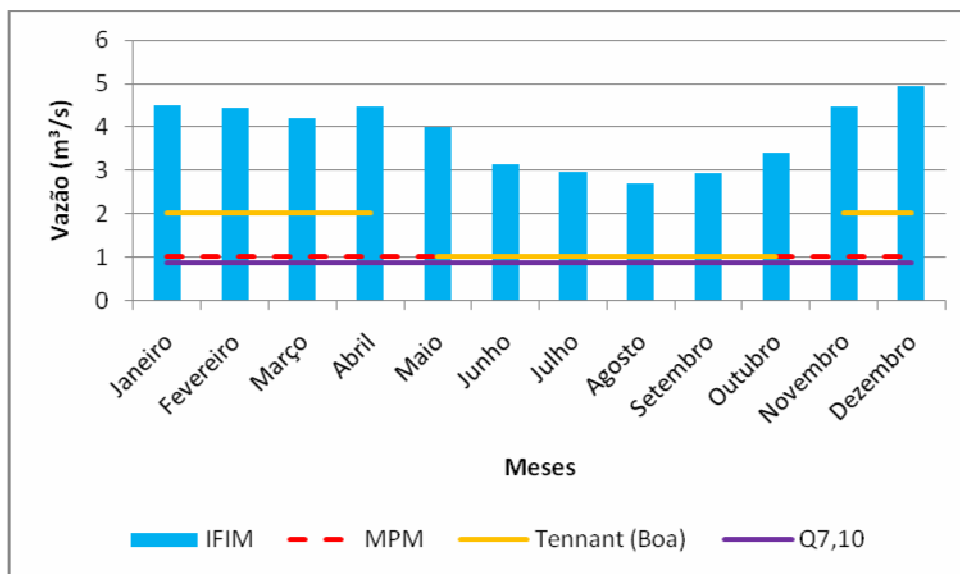


FIGURA 7. Comparação entre os valores de vazão remanescente para o Trecho 1.

Observa-se que os valores de vazão residual encontrados pelo Método do Perímetro Molhado (MPM) e pela faixa Boa do Método de Tennant durante o período seco são próximos aos exigidos pela legislação local, sendo pouco superiores. Com relação aos obtidos pela metodologia IFIM, estes são expressivamente superiores a todas as metodologias analisadas, correspondendo a faixa Ótima do Método de Tennant ($3,03 - 5,05 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$). Seu menor valor é 3,1 vezes maior que o percentual da $Q_{7,10}$ exigido pela legislação.

Com respeito a sazonalidade das vazões, esta foi bem representada pelo Método de Tennant e pelo IFIM, assemelhando-se ao regime natural do rio. Nota-se apenas uma diferença, com relação ao mês de maio, o primeiro mês da estação seca que ainda apresenta um valor de vazão mensal médio elevado.

A Figura 8 apresenta os valores de vazão remanescente pelos diferentes métodos no segundo trecho.

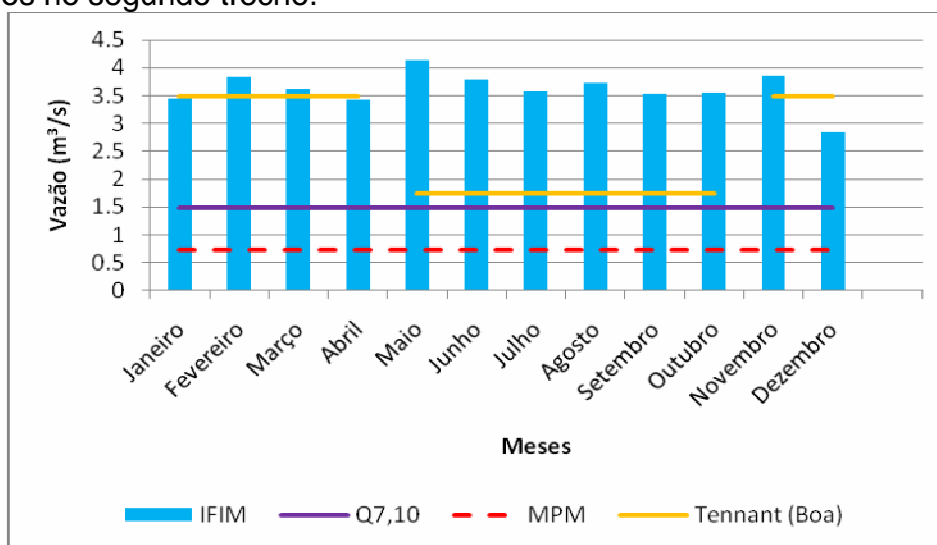


FIGURA 8. Comparação entre os valores de vazão residual mínima para o Trecho 2.

Novamente percebe-se uma aproximação entre os valores obtidos pela faixa Boa do Método de Tennant, para o período seco, em relação aos exigidos pela legislação vigente, apresentando a mesma proporcionalidade que no primeiro trecho. Isso pode ser explicado pelo fato de que ambas as metodologias são baseadas em critérios hidrológicos, onde valores encontrados para o Trecho 1 são derivados dos encontrados para o Trecho 2. A vazão remanescente mínima obtida pelo Método de Tennant é em ambos os casos 17,5% maior que a vigente no local.

Com relação ao MPM, este apresentou resultados bem inferiores à legislação vigente e às metodologias analisadas, se enquadrando na faixa Degradação Elevada do Método de Tennant. Como já foi comentado, o segundo trecho é relativamente uniforme, com um canal de calha retangular, o que faz com que o perímetro molhado cresça rapidamente com um pequeno aumento de vazão, o que torna baixos os valores encontrados pelo método.

Nos meses de maior escassez, onde a condição do ecossistema merece maior atenção, o menor valor obtido pela metodologia IFIM é 2,4 vezes maior que o exigido pela legislação local. Percebe-se que os valores de vazão ecológica necessária nos meses de estiagem são maiores no segundo trecho que no primeiro, revelando uma importância maior desse trecho para o ecossistema do rio nesse período (GUEDES, 2013).

Nesse trecho, a sazonalidade das vazões foi mais bem representada pela faixa Boa do Método de Tennant, onde a mesma se assemelha mais ao regime natural de vazões do lugar. O Trecho 2 encontra-se em uma zona fortemente antropizada, possuindo uma calha relativamente uniforme, de formato retangular, sem cobertura e com substrato arenoso, refletindo uma área mais pobre em habitat aquático quando comparada ao primeiro trecho. Essas condições homogêneas quando aplicadas ao modelo RIVER2D não geram uma variação expressiva de habitat com a mudança de vazão, motivo pelo qual o hidrograma ecológico determinado pelo IFIM não apresentou uma sazonalidade bem definida ao longo do ano.

CONCLUSÃO

De acordo com os resultados obtidos, conclui-se que:

Para o trecho 1, mais preservado, os valores de vazão residual mínima utilizados em legislação no Brasil se mostraram inferiores à todas as metodologias analisadas. A faixa considerada Boa do Método de Tennant nos meses de estiagem e o Método do Perímetro Molhado se revelaram pouco superiores ao critério vigente por lei. Já a metodologia IFIM apresentou resultados expressivamente maiores, com uma sazonalidade similar ao Método de Tennant e ao regime hidrológico natural do rio.

No trecho 2, mais antropizado, os valores exigidos pela legislação se revelaram novamente inferiores às metodologias estudadas, com exceção do Método do Perímetro Molhado, o qual se revelou pouco conservador. A faixa Boa do Método de Tennant se mostrou próxima à vazão mínima exigida pela legislação nos meses de menor disponibilidade hídrica e aos valores encontrados pela metodologia IFIM no período chuvoso, sendo o método que apresentou a sazonalidade mais parecida com a natural do rio. Os resultados obtidos pelo IFIM novamente se mostraram expressivamente superiores com os exigidos pela legislação local.

AGRADECIMENTOS

Ao CNPq pelo auxílio financeiro e a CAPES pela concessão da bolsa.

REFERÊNCIAS

BENETTI, A. D.; LANNA, A. E. **Metodologias para determinação de vazões ecológicas em rios**. Revista Brasileira de Recursos Hídricos, v. 8, n. 2, p. 149-160, 2003.

BRASIL. **Lei n.º 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. 1º da Lei nº 8.001, de 13 de março de 1990, que modificou a Lei nº 7.990, de 28 de dezembro de 1989. Brasília, DF, 1997.

CAMPOS, R.G.D. **Curso básico HEC-RAS**. Disponível em http://xa.yimg.com/kq/groups/14705211/1771095015/name/Apostila_curso_HEC-RAS.pdf. Acesso em maio, 2013. Belo Horizonte, MG, 2011.

CHANG, F.-J.; TSAI, M.-J.; TSAI, W.-P.; HERRICKS, E. E. **Assessing the ecological hydrology of natural flow conditions in Taiwan**. Journal of Hydrology, v. 354, p. 75-89, 2008.

COLLISCHONN, W.; AGRA, S. G.; FREITAS, G. K.; PRIANTE, G. R.; TASSI, R.; SOUZA, C. F. **Em busca do hidrograma ecológico. 2005. Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos**. Anais do XVI Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos. João Pessoa. ABRH, 2005.

GOMES, C. R. **Modelagem ecohidrológica usando o PHABSIM como suporte para a gestão de recursos hídricos, com foco na outorga de uso da água. 2011**. Dissertação (Mestrado em Recursos Hídricos e Ambientais). Universidade Federal de Viçosa. Viçosa, MG, 2011.

GUEDES, H. A. S. **Modelagem hidrodinâmica do ecossistema aquático visando à determinação do hidrograma ecológico no rio Formoso – MG. 2013**. Tese (Doutorado em Recursos Hídricos e Ambientais). Universidade Federal de Viçosa. Viçosa, MG, 2013.

HEC-RAS. **HEC-RAS v.4.1 Users Manual**. US Army Corps of Engineers. Hydrologic Engineering Center. Janeiro, 2010.

OLIVEIRA, I. C. **Modelagem ecohidrológica uni e bidimensional do Rio Formoso – MG. 2013**. Dissertação (Mestrado em Recursos Hídricos e Ambientais). Universidade Federal de Viçosa. Viçosa, MG, 2013.

PAULO, R. G. F. **Ferramentas para a determinação de vazões ecológicas em trechos de vazão reduzida: destaque para aplicação do método do Perímetro Molhado no caso de Capim Branco I.** 2007. 114 f. Dissertação (Mestrado em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos). Universidade Federal de Minas Gerais. Belo Horizonte, MG, 2007.

POSTEL, S.; RICHTER, B. **Rivers for life: Managing Water for People and Nature.** 2003. Washington, D.C.: Island Press, 253 p., 2003.

REIS, A. A. **Estudo comparativo, aplicação e definição de metodologias apropriadas para a determinação da vazão ecológica na bacia do rio Pará, em Minas Gerais.** 2007. Dissertação (Mestrado em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos). Universidade Federal de Minas Gerais. Belo Horizonte, MG, 2007.

SARMENTO, R. **Termo de Referência para a elaboração de estudos sobre a vazão ecológica na bacia do rio São Francisco.** Edital n. 05 do ano de 2006, PROJETO 704BRA2041 da Organização das Nações Unidas para a Educação, a Ciência e a Cultura. UNESCO. 2007.

SILVA, E. R. **Abordagem multicriterial difusa como apoio ao processo decisório para a identificação de um regime de vazões ecológicas no baixo curso do Rio São Francisco.** 2010. Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental Urbana). Universidade Federal da Bahia. Salvador, BA, 2010.

TENNANT, D. L.; **Instream Flow Regimes for Fish, Wildlife, Recreation and Related Environmental Resources.** Fisheries 1, p. 6-10. 1976.

ZALEWSKI, M., JANAUER, G. A., JOLÁNKAI, G. **Ecohydrology – A New Paradigm for the Sustainable Use of Aquatic Resources.** International Hydrological Programme - IHP. UNESCO. Paris, 1997.

ZALEWSKI, M. **Ecohydrology for compensation of Global Change.** Brazilian Journal of Biology, v.70, n.3, p.689-695. 2010.