

## **Estabelecimento de Vazões Ambientais Efluentes de Barragens Sugestão Metodológica**

**Luís Antonio Villaça de Garcia, Aída Maria Pereira Andreazza**

*hidrosis@uol.com.br, aidaandreazza@terra.com.br*

*Recebido: 17/12/03 - revisado: 01/04/04 - aceito: 20/05/04*

---

### **RESUMO**

*Com base na consideração dos impactos que a manutenção de vazões constantes a jusante de aproveitamentos de recursos hídricos causa ao ecossistema fluvial, este trabalho apresenta e avalia os critérios usualmente adotados no Brasil, e propõe um método para determinação de vazões mínimas relacionado com a real disponibilidade hídrica local e com as variações intra e inter-anuais do regime hidrológico natural do curso d'água. Apresentam-se alguns estudos de casos que ilustram os benefícios ambientais da aplicação do método sugerido em relação aos usualmente praticados no País, que preconizam a manutenção de vazões mínimas constantes.*

**Palavras-chave:** *vazões mínimas, vazões ecológicas, hidrologia, ecossistemas fluviais*

---

### **INTRODUÇÃO**

A regularização de cursos d'água através da construção de barragens promove diversos benefícios sociais, destacando-se o controle de cheias, o suprimento garantido de água de abastecimento para usos múltiplos e a geração de energia hidroelétrica. Atualmente, a maioria dos grandes rios do planeta se encontra regularizada ou planejada para tal. O mesmo ocorre com cursos d'água de menor porte, distribuídos ao longo de centenas de bacias hidrográficas em inúmeros países.

A par dos benefícios sociais referidos, é amplamente reconhecido que a regularização de vazões através de barragens impacta negativamente o ecossistema fluvial – tanto a montante do barramento, devido à formação de ambientes lânticos no lugar de lóticos, com conseqüências mais evidentes para a alteração da qualidade das águas e para o que ela representa ao conjunto da biota aquática – quanto a jusante, pela modificação do regime natural do curso d'água e seus desdobramentos sobre os ambientes de margens e da calha principal.

Sob uma perspectiva sistêmica, os impactos negativos sobre o ambiente aquático acabam por se refletir em atributos ecológicos que também são fundamentais ao ser humano, entre os quais, a qualidade da água e as populações de peixes, fazendo-se sentir diretamente sobre o meio socioeconômico, num processo que se dá em sentido de mão-dupla.

Os impactos sofridos pelos trechos de jusante de cursos d'água regularizados vêm sendo acompanhados com interesse crescente pela comunidade científica inter-

nacional, havendo projetos em andamento em diversos países, tais como os EUA (Bayley, 1995; Middleton, 2002; Gray et al., 2002), a Espanha (Yuste et al., 2001), a Nigéria e o Senegal (Ramsar Convention, 2002), a Suíça (Peter, 2002; Scheurer e Molinari, 2003), a Inglaterra, a França, a Alemanha e a Suécia (River Restoration Centre, 2002), para restauração das condições naturais dos regimes hidrológicos alterados por barramentos e para “renaturalização” dos cursos d'água.

Ao mesmo tempo, inúmeros estudos têm sido desenvolvidos para o estabelecimento de vazões mínimas a jusante de barragens, ditas “vazões ecológicas”, com auxílio de ferramentas metodológicas baseadas em diferentes conceitos.

Segundo Sarmento e Pelissari (1999), a maioria das metodologias se fundamenta no princípio da vazão mínima aceitável, restringindo-se à avaliação dos requisitos para sobrevivência de algumas espécies de peixes, e utilizando, alternativamente, parâmetros da bacia hidrográfica, informações de descarga média, curvas de permanência, perímetro molhado ou variável similar, diversas variáveis hidráulicas e estruturais, ou ainda um grande número de variáveis.

Benetti et al. (2003) analisam e agrupam essas metodologias em seis categorias: métodos hidrológicos, métodos de classificação hidráulica, métodos utilizando regressões múltiplas, métodos de classificação de habitats, métodos holísticos e métodos informais.

Independentemente do método utilizado – cujos resultados práticos em geral são diferentes –, o que vem se consolidando cada vez mais em nível internacional é a compreensão de que uma “vazão ecológica” é aquela que

**Tabela 1 - Vazões ecológicas indiretamente estabelecidas pelos critérios de outorga de direitos de uso da água adotados em alguns Estados brasileiros (adaptado de Benetti et al., 2003)**

Estado	Vazão referencial para emissão da outorga	Vazão ecológica indiretamente estabelecida
Paraná	$Q_{7,10}$	50% da $Q_{7,10}$
Minas Gerais	$Q_{7,10}$	70% da $Q_{7,10}$ (exceções, quando de interesse público)
Pernambuco	$Q_{90}$ diário	20% da $Q_{90}$ (sem barramento ou com barramento em curso d'água perene) 5% da $Q_{90}$ (com barramento em curso d'água intermitente)
Bahia	$Q_{90}$ diário	20% da $Q_{90}$ (sem barramento ou com barramento em curso d'água perene) 5% da $Q_{90}$ (com barramento em curso d'água intermitente)
Paraíba	Vazão regularizada com 90% de garantia	10% da $Q_{90}$
Rio Grande do Norte	Vazão regularizada com 90% de garantia	10% da $Q_{90}$
Ceará	Vazão regularizada com 90% de garantia	10% ou 67% da $Q_{90}$

possibilite ao ambiente hídrico manter a integridade dos processos naturais que se dão entre o meio físico e a biota, valorizando especialmente as inter-relações vinculadas às variações do regime hidrológico natural.

Segundo Criado et al. (2000), termos mais adequados seriam “vazões de manutenção” ou ainda “vazões ambientais”, tendo em vista que as únicas vazões que se poderiam efetivamente chamar de “ecológicas” seriam aquelas derivadas do regime natural do próprio rio.

A partir desses breves comentários, o presente trabalho relaciona os critérios comumente utilizados no Brasil para estabelecimento de vazões mínimas a jusante de barragens, analisa sucintamente os principais impactos decorrentes da regularização de vazões por barramentos e tem o objetivo básico de propor um método para estabelecimento de vazões remanescentes que apresenta algumas vantagens ambientais em relação aos critérios usualmente adotados no País.

## PRINCIPAIS CRITÉRIOS PARA ESTABELECIMENTO DE VAZÕES MÍNIMAS ADOTADOS NO BRASIL

No Brasil, não há ainda uma legislação específica para determinação de vazões residuais a jusante de estruturas para aproveitamento de recursos hídricos.

Em geral, os critérios que têm sido adotados definem um valor mínimo constante, via de regra, com apoio apenas em parâmetros hidrológicos. Tais critérios, além de potencializar conflitos entre múltiplos usuários dos recursos hídricos, não consideram variáveis ecológicas e não se apoiam em estudos posteriores que permitam legitimar a

decisão tomada, especialmente no que se refere ao acompanhamento da conservação das comunidades e populações bióticas do ecossistema fluvial ao longo do tempo.

O extinto Departamento Nacional de Águas e Energia Elétrica (DNAEE), ainda em 1984, definia, através da Portaria nº 02, já revogada, a obrigatoriedade de manutenção de uma vazão remanescente, a jusante do barramento, não inferior a 80% da vazão mínima média mensal, caracterizada com base na série histórica de vazões naturais com extensão de pelo menos 10 anos. Mais recentemente, a Eletrobrás, em suas Diretrizes para Projetos de Pequenas Centrais Hidroelétricas (Eletrobrás, 1999), apesar de citar estudos ambientais como ponto de partida para a definição de vazões mínimas, apresenta como balizamento a adoção do menor valor entre 50% da vazão de 95% de permanência no tempo e 80% da vazão de abastecimento  $Q_{7,10}$  (menor média em sete dias consecutivos com recorrência de 10 anos).

Alguns Estados brasileiros adotam critérios de outorga de direitos de uso da água, pelos quais, indiretamente, demonstram suas respectivas concepções sobre vazões ecológicas (Benetti et al., 2003), como mostra a Tabela 1. Contudo, na realidade, as vazões definidas como as mínimas a serem mantidas no curso d'água após a outorga referem-se àquelas necessárias à diluição de esgotos, constituindo, portanto, mais um critério sanitário do que efetivamente ambiental.

Em geral, os órgãos estaduais de meio ambiente têm aceito a  $Q_{7,10}$  ou uma parcela desta como a vazão mínima a ser mantida a jusante de aproveitamentos de recursos hídricos. É importante registrar que a  $Q_{7,10}$  não tem relações técnicas com qualidade ambiental. Para aten

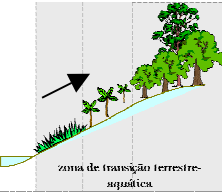
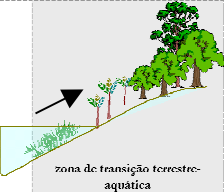

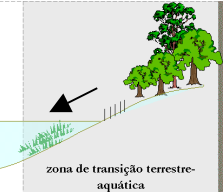

NA.					
Vegetação	Presença de herbáceas terrestres anuais, arbustos e árvores tolerantes a inundação.	Máxima produção aquática. Decomposição de espécies aquáticas e terrestres.	Máxima biomassa aquática	Geminação nos solos úmidos. Decomposição de espécies aquáticas e terrestres.	Regeneração terrestre. Decomposição de espécies aquáticas e terrestres remanescentes.
Peixes	Início da desova das espécies que se reproduzem no rio.	Desova nos rios e lagoas marginais. Espécies deslocam-se pelo litoral móvel. Alta produtividade.	Dispersão de jovens e adultos pela área inundada buscando alimento onde os níveis de OD são adequados.	Várias espécies procuram por águas mais profundas.	Migração para o canal principal, lagoas permanentes e tributários.
Pesca		Dos migrantes ascendentes (destrutiva).	Dificuldades: peixes dispersos e muita cobertura.	Intensiva, conforme os peixes retomam ao rio.	Em poças (refugiados na estação seca).
Nutrientes e sedimentos		Solos enriquecidos pela inundação. Liberação de nutrientes a partir dos solos recém inundados.		Aporte de nutrientes ao rio. Mineralização de nutrientes.	Concentração de nutrientes no rio. Consolidação de sedimentos na área de inundação.

Figura 1 - Processos ecológicos associados ao “pulso de vazões” na Zona de Transição Terrestre-Aquática de um curso d’água (adaptado de Bayley, 1995, e Lowe-McConnell, 1999)

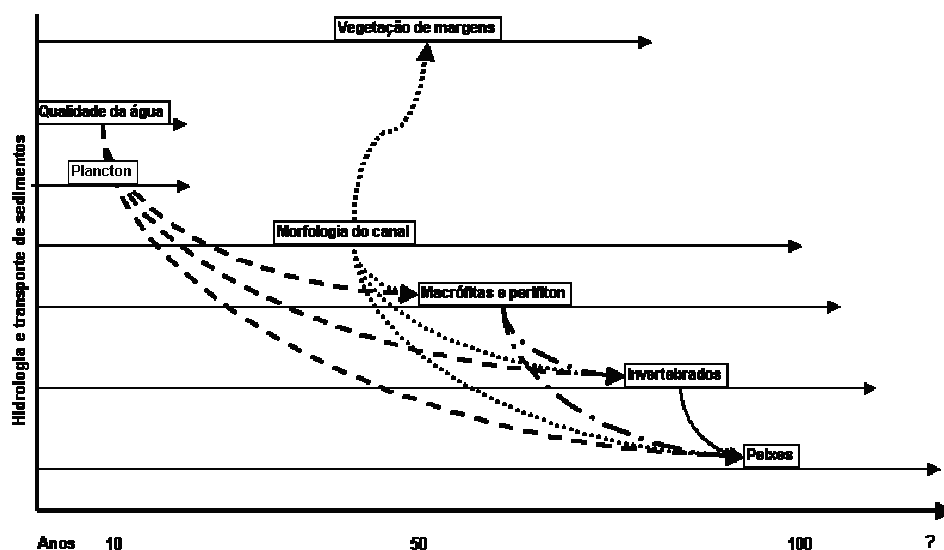


Figura 2 - Inter-relações entre variáveis e tempo necessário para ajuste do ecossistema fluvial a condições de vazões regularizadas (Gore e Petts, 1989)

der às premissas estatísticas, a  $Q_{7,10}$  deve ser determinada para condições naturais do curso d’água, o que em muitos casos é de difícil reconstituição. Além disso, a exigência da  $Q_{7,10}$  será inconsistente quando a afluência for inferior a este valor, o que ocorrerá, em média e em condições naturais, uma vez a cada 11 anos. No caso de haverem usos consumptivos significativos a montante, a afluência poderá ser inferior à  $Q_{7,10}$  com uma frequência ainda menor.

Observa-se que os critérios usualmente adotados no País para estabelecimentos de vazões mínimas a jusante

de barragens não consideram as especificidades dos ecossistemas aquáticos regionais/locais, reduzindo essa questão, tão relevante para a manutenção das condições ecológicas dos cursos d’água que sofrem as intervenções, a uma decisão praticamente arbitrária e generalizada.

Também são questionáveis as normas que regulamentam padrões de qualidade da água em função de usos preestabelecidos (um deles justamente a proteção da vida aquática), sem considerar aspectos quantitativos relacionados ao regime hidrológico do curso d’água e aspectos da

hidrodinâmica do ecossistema fluvial. Vale salientar que, do ponto de vista ecológico, um ambiente aquático estará “contaminado” quando as características bióticas (condição das comunidades biológicas e diversidade de espécies) e abióticas (fatores físicos e concentração de substâncias solúveis e insolúveis) se encontrarem num estado de desequilíbrio crítico em relação ao seu estado natural (Agirre e Bikuña, 2000).

A ausência de normas disciplinadoras a respeito do estabelecimento de vazões mínimas a jusante de aproveitamentos de recursos hídricos no Brasil resulta, assim, numa gama variada de opções, a maioria delas subjetiva, por parte dos projetistas, dos investidores e até mesmo das entidades responsáveis pela aprovação dos projetos e pelo seu licenciamento ambiental.

Por vezes, extensos levantamentos multidisciplinares exigidos para elaboração de estudos de impacto ambiental simplesmente ignoram o tema, aceitando-se a adoção de uma vazão mínima constante a jusante dos aproveitamentos, definida aleatoriamente, com base nos critérios empregados por determinados setores usuários ou por outros estudos, pela falta de melhor alternativa.

Alguns impactos decorrentes da manutenção de vazões constantes a jusante de barragens são analisados a seguir.

## **A IMPORTÂNCIA DE ESTABELECEER CORRETAMENTE VAZÕES EFLUENTES DE BARRAGENS**

Conforme Schwarzbold (2001), um rio é um sistema pulsátil, regulado pelo regime hidrológico de sua bacia hidrográfica. Isso quer dizer que, trecho a trecho, as condições do ambiente fluvial se alteram, em função do regime de escoamento do curso d'água.

Em países de clima tropical, como a grande parte do território brasileiro, a sazonalidade das vazões fluviais é a variável que atua de modo mais decisivo no comportamento do ecossistema aquático, e da denominada zona de transição terrestre/aquática (Aquatic Terrestrial Transition Zone – ATTZ), conforme apresentado por Junk et al. (1989). Nessa zona, que se apresenta ora inundada, ora emersa, por força dos “pulsos de inundação”, conceito este primeiramente discutido pelos mesmos autores, dá-se a conexão entre o rio propriamente dito e as ricas fontes de recursos biológicos localizadas nas margens e várzeas, produzindo-se uma rápida ciclagem de matéria orgânica e nutrientes, do que resulta uma produção primária maior do que a que ocorre na calha principal de cursos d'água regularizados.

Os principais agentes associados a esse processo sazonal são a vegetação, os nutrientes, os detritos e os sedimentos (Bayley, 1995).

Quando os pulsos de inundação são de duração e frequência previsíveis, por ocorrerem dentro de uma escala temporal predefinida, os organismos aquáticos possuem “memória” do fenômeno (Schwarzbold, op. cit.), estando adaptados a ele e dependentes dos processos a ele associados para manutenção da estrutura das suas populações e comunidades (Middleton, 2000).

De acordo com Lowe-McConnell (1999), em águas doces tropicais, os peixes respondem à elevação do nível d'água mais que às chuvas locais, movendo-se para habitats aquáticos recentemente alagados em planícies que antes estavam secas. O aumento da velocidade da água pode ser sucedido por uma queda suave da sua temperatura e elevação da turbidez, juntamente com alterações químicas (concentração de íons conservativos, níveis de oxigênio dissolvido, de compostos nitrogenados, de fósforo e de ácidos húmicos, entre outras). Onde esses efeitos flutuam sazonalmente, eles são geralmente não-catastróficos e a vida aquática está adaptada a tirar vantagem das condições de cheias.

Com efeito, como mostra a Figura 1, observa-se que as estratégias do ciclo de vida da ictiofauna de rios tropicais estão intimamente relacionadas às flutuações dos níveis d'água do ambiente, que afetam todos os aspectos da biologia dos peixes – seu alimento, movimentações, crescimento e épocas de reprodução.

Conforme Lowe-McConnell (1999), quanto maior for a sazonalidade do ambiente, mais marcantes são algumas das características da ictiofauna: as populações flutuam grandemente por migrações (alta mobilidade) e por multiplicação rápida; os ciclos de vida são curtos, a maturação é precoce e a longevidade é baixa; as taxas de crescimento são rápidas; a desova, sazonal, se dá em resposta rápida ao suprimento de nutrientes; a razão produção/biomassa é alta; a seleção predominante dá-se por agentes abióticos e bióticos (tipo “r”, ou seja, por maturação muito rápida e por alta fecundidade para a produção do número máximo de jovens).

Segundo Middleton (2002), a fase seca do pulso de vazões é crítica, porque até as espécies mais adaptadas, em geral morrem em condições anaeróbicas, mesmo que possuam mecanismos para resistir a períodos de inundação.

A interrupção da dinâmica natural de transporte de sedimentos ao longo da rede de drenagem é mais um impacto decorrente da regularização de cursos d'água (Gore e Petts, 1989; Ligon, 1995; Middleton, op. cit.). A retenção de sedimentos a montante, junto à barragem, provoca: simplificação do leito de jusante do curso d'água barrado, pela redução progressiva de ilhas marginais; aprofundamento da calha e desaparecimento de várzeas úmi

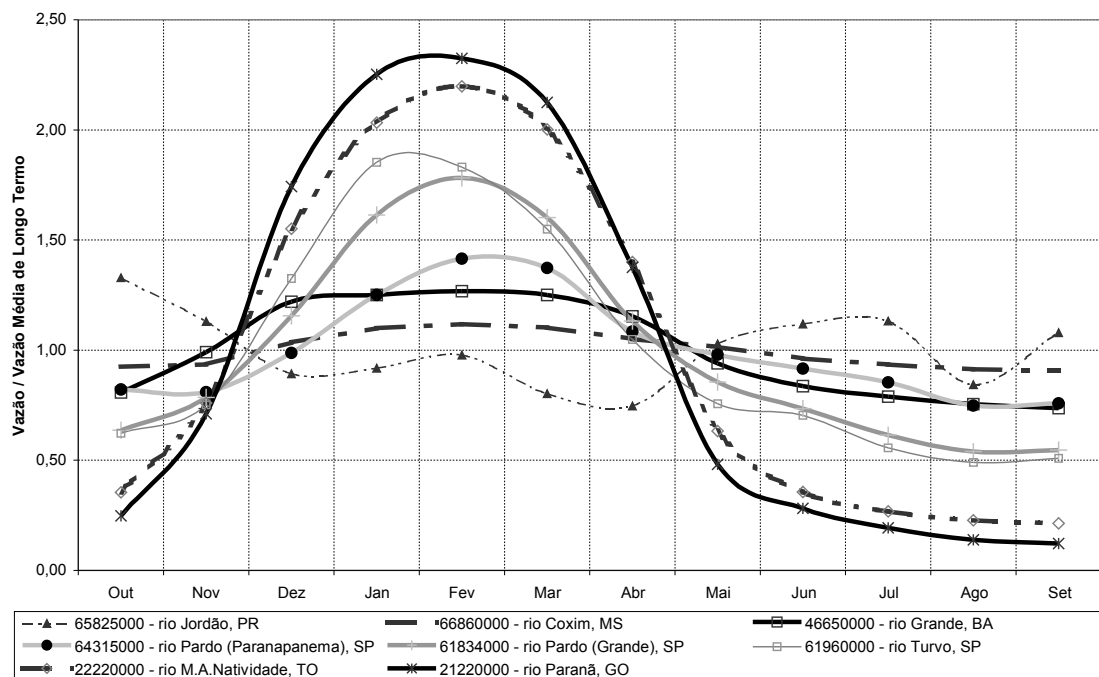


Figura 3 - Distribuição intra-anual das vazões médias mensais adimensionalizadas pela média de longo termo de postos fluviométricos selecionados

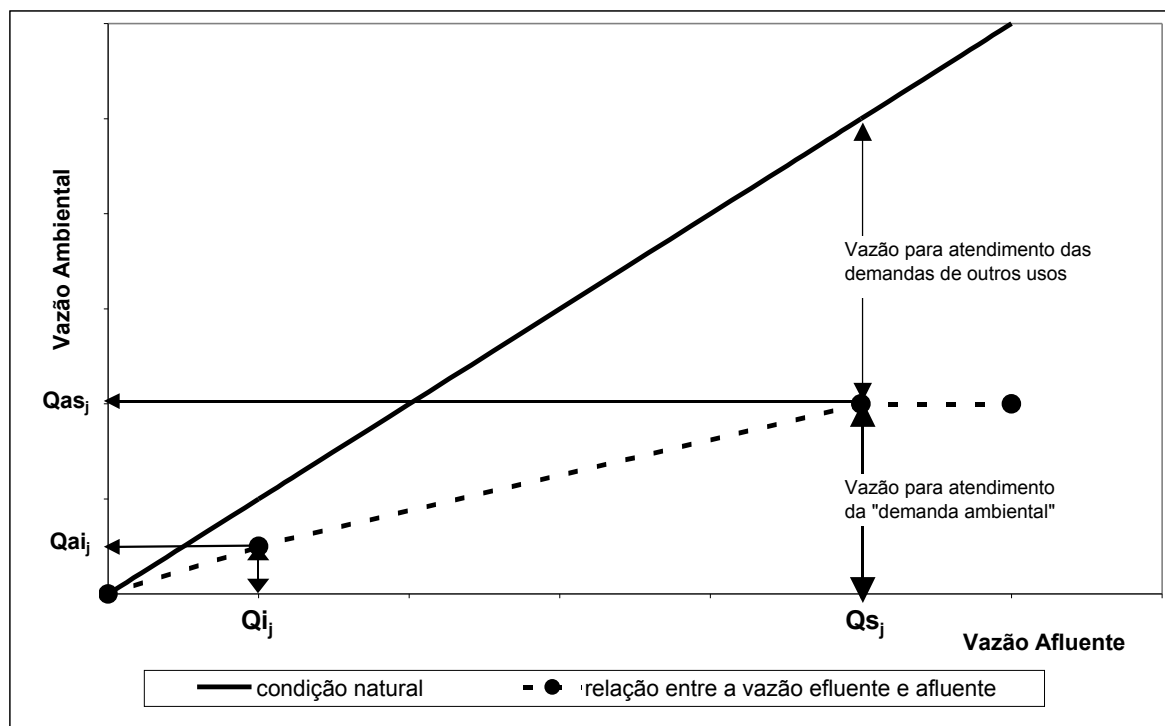


Figura 4 - Representação gráfica da relação proposta entre a vazão ambiental e a vazão afluente em um mês  $j$

das; perda da vegetação ripária. Esses efeitos, combinados, resultam numa drástica alteração de habitats, com consequências negativas para a biodiversidade global do ambiente hídrico.

Em resumo, de acordo com Gore e Petts (op. cit.), a regularização de cursos d'água induz uma sucessão de impactos no ecossistema fluvial, caracterizados por uma hierarquia de respostas assim sumarizadas: impactos de primeira ordem ocorrem simultaneamente ou logo após o fechamento da barragem e afetam a transferência de energia e materiais para ou no próprio curso de jusante; impactos de segunda ordem relacionam-se a modificações na calha fluvial, na estrutura e dinâmica de margens e na produção primária, e são resultado de efeitos locais dos impactos de primeira ordem; impactos de terceira ordem sobre as comunidades bentônicas, os peixes e a fauna das áreas de várzeas ocorrem como resultado de uma combinação das alterações de primeira e segunda ordem, refletindo-se nas interações bióticas entre populações.

Os mesmos autores referem que o ajuste do ecossistema às condições impostas pela regularização do curso d'água, para atingir um novo estado de equilíbrio, envolvendo todas as inter-relações entre os diferentes componentes requer dezenas ou mesmo centenas de anos (Figura 2).

A interrupção da sazonalidade natural dos regimes de escoamento dos cursos d'água pela execução de barramentos tem sido sistematicamente avaliada em termos dos impactos causados ao ambiente fluvial em vários países, razão pela qual algumas políticas de recursos hídricos e leis de águas têm inserido nas suas diretrizes a obrigatoriedade de estabelecimento de vazões ecológicas que levem em conta a preservação do regime hidrológico dos cursos d'água, por ocasião da elaboração de planos de bacia e do planejamento de uso dos recursos hídricos. Esse é o caso, por exemplo, da Espanha (Criado et al., 2000), da África do Sul (Jordanova et al., 2002) e da Austrália (Maheswaran e Deen, 2000).

## METODOLOGIA PROPOSTA

Segundo Agirre e Bikuña (2000), uma vazão ambiental deve atender aos seguintes requisitos, à luz das funções básicas de um rio:

- ser representativa de um percentual importante dos volumes de água circulantes;
- ser coerente com as variações sazonais de vazões em cada trecho, ou seja, não deve se restringir a um valor fixo, devendo consistir de um regime de vazões que se dá segundo os distintos períodos do ano;
- ter como meta a conservação das comunidades naturais do ecossistema fluvial no trecho em estudo;
- assegurar a conservação da diversidade ecológica mediante o estabelecimento de uma vazão que atue como nível de base, abaixo da qual as populações das espécies mais exigentes experimentarão risco de extinção; e
- permitir nos trechos fluviais degradados uma melhora da composição físico-química da água, bem como das condições de habitats.

O cumprimento de todos esses requisitos exige a disponibilidade de um grande número de dados, além da implementação de princípios abrangentes de gestão sustentável dos recursos hídricos, alicerçados num monitoramento sistemático dos resultados obtidos. Tais aspectos implicam grandes esforços em termos de recursos financeiros e humanos, para validação dos critérios adotados.

No Brasil, a carência de dados de observação das inúmeras bacias hidrográficas existentes, a amplitude do território e a diversidade de ecossistemas constituem obstáculos relevantes para a definição de vazões ambientais de um tão diversificado universo de cursos d'água.

O método aqui proposto procura superar tais obstáculos, mediante o entendimento de que uma opção que mantenha, o quanto for possível, o comportamento sazonal de vazões do curso d'água, sempre será mais vantajosa que qualquer outra que proponha vazões mínimas constantes.

Para propor uma metodologia, os autores selecionaram 37 postos fluviométricos em rios perenes do território nacional, garantindo a representatividade dos diversos regimes hídricos da maior parte das bacias hidrográficas brasileiras. Esses postos foram cuidadosamente selecionados utilizando como critérios: relações cota x descarga bem estabelecidas, séries consistentes de cotas e vazões, poucas falhas de observação, período mínimo de 30 anos e localização que garanta que, no período de observações selecionado, não exista influência no regime hídrico da operação de reservatórios ou usos consumptivos significativos. Para cada um desses postos fluviométricos foi definida a série de vazões médias diárias e mensais e determinados os principais parâmetros hidrológicos e estatísticos, incluindo as curvas de permanência e a vazão  $Q_{7,10}$ .

A Figura 3 apresenta a distribuição sazonal das vazões médias mensais adimensionais de diferentes cursos d'água em oito postos fluviométricos distribuídos no território nacional, cuidadosamente selecionados de forma a incluir a diversidade encontrada em outros locais. É evidente a diversidade de regimes hídricos, destacando-se os extremos representados pelo rio Paranã no posto Flores de Goiás (21220000), em cuja bacia predomina o substrato cristalino do Cerrado, e pelo rio Coxim, no posto São

Gabriel do Oeste (66860000), com substrato em arenito, responsável por uma maior regularização natural do curso d'água.

A metodologia proposta parte dos seguintes pressupostos básicos:

- a) a vazão ambiental deve ser um valor variável no tempo, que permita manter o pulso natural do rio, com suas variações intra e inter-anuais;
- b) a vazão ambiental deve ser menor ou igual à vazão afluente, de forma a preservar os usos múltiplos previstos para o aproveitamento, bem como sua viabilidade técnico-econômica;
- c) a vazão ambiental deve ser proporcional à vazão afluente, ou seja, quanto maior a disponibilidade hídrica maior a vazão que pode ser direcionada para atender à “demanda ambiental”;
- d) a relação entre a vazão ambiental e a vazão afluente deve ser tanto maior quanto menor a disponibilidade hídrica, ou seja, em períodos de seca a parcela relativa direcionada para atender à “demanda ambiental” será maior que em períodos de cheias; e
- e) existe um limite superior de vazão para cada período ou mês do ano, acima do qual os incrementos de vazões não trazem benefícios ambientais incrementais significativos.

A forma mais simples de representar as premissas a), b) e c) é através de uma relação linear, expressa matematicamente pela seguinte equação:

$$Q_{amb} = \alpha_j \cdot Q_{afl} + Q_{o_j} \quad (1)$$

onde:  $Q_{amb}$  é a vazão ambiental ou vazão efluente mínima;  $Q_{afl}$  é a vazão afluente;  $\alpha_j$  e  $Q_{o_j}$  são, respectivamente, a inclinação e a interceptação da equação da reta para o mês  $j$ .

Esta equação é representada graficamente na Figura 4.

A equação tem uma faixa de aplicação, delimitada pelas vazões afluentes inferior ( $Q_{i_j}$ ) e superior ( $Q_{s_j}$ ) do mês  $j$ , para as quais estabelecem-se as respectivas vazões ambientais inferior ( $Q_{ai_j}$ ) e superior ( $Q_{as_j}$ ). As relações entre as vazões afluentes e efluentes, com valores não superiores à unidade, podem ser representadas pelos coeficientes de sustentabilidade hídrico-ambiental:

$$K_i = Q_{ai_j} / Q_{i_j} \text{ e } K_s = Q_{as_j} / Q_{s_j},$$

onde:  $K_i \leq 1$  e  $K_s \leq 1$ .

Por sua vez, para garantir as premissas c) e d), deve-se atender às seguintes restrições:

$$Q_{ai_j} \leq Q_{as_j} \text{ ou } K_i \cdot Q_{i_j} \leq K_s \cdot Q_{s_j} \quad (2)$$

$$K_i \geq K_s \quad (3)$$

A modelagem representada pela Figura 4 ainda atende às premissas c), d) e e), uma vez que:

- quando a vazão afluente for menor que o limite inferior de validade da relação linear ( $Q_{ai_j}$ ), a relação entre a vazão ambiental e a vazão afluente ( $K_i$ ) deve ser mantida para preservar as condições ambientais em períodos extremos de estiagem. Assim, em termos matemáticos, tem-se:

$$Q_{afl} \leq Q_{i_j} \Rightarrow Q_{amb} = K_i \cdot Q_{afl} \quad (4)$$

- quando a vazão afluente for maior que o limite superior de validade da relação linear, a vazão ambiental assume um valor fixo correspondente ao limite superior da vazão ambiental. Assim, em termos matemáticos, tem-se:

$$Q_{afl} \geq Q_{s_j} \Rightarrow Q_{amb} = K_s \cdot Q_{s_j} = Q_{as_j} \quad (5)$$

É importante notar na representação da Figura 4 que as vazões abaixo da reta que representa o modelo indicam a parcela que seria direcionada para o atendimento da “demanda ambiental”, enquanto a porção superior servirá para o atendimento dos demais usos múltiplos.

A metodologia proposta sintetizada nas premissas ambientais descritas é representada matematicamente pela equação (1) e pelas restrições indicadas nas equações (2) a (5). Os valores dos parâmetros da equação da reta podem ser obtidos através das seguintes relações:

$$\alpha_j = \frac{Q_{as_j} - Q_{ai_j}}{Q_{s_j} - Q_{i_j}} = \frac{K_s Q_{s_j} - K_i Q_{i_j}}{Q_{s_j} - Q_{i_j}} \quad (6)$$

$$Q_{o_j} = (K_i - \alpha_j) \cdot Q_{i_j} \quad (7)$$

Os valores dos coeficientes de sustentabilidade hídrico-ambiental  $K_i$  e  $K_s$  e as vazões afluentes inferior ( $Q_{i_j}$ ) e superior ( $Q_{s_j}$ ) de cada mês  $j$  devem ser estabelecidos em função das características locais, como a extensão do trecho a ser impactado, o grau de resiliência do ecossistema aquático, a morfologia fluvial, a qualidade da água e os hábitos da ictiofauna, entre outras variáveis representativas do ambiente hídrico.

Quanto maiores os valores dos coeficientes de sustentabilidade hídrico-ambiental  $K_i$  e  $K_s$ , maiores serão

as parcelas das vazões afluentes alocadas para a “demanda ambiental”. Conseqüentemente, neste caso, as parcelas das vazões afluentes alocadas para outros usos serão menores. Como os coeficientes são valores percentuais, facilitam as decisões e permitem generalização, uma vez que são automaticamente atendidas as premissas mencionadas.

Durante a elaboração do projeto de engenharia do empreendimento e dos estudos ambientais necessários ao seu licenciamento, as equipes técnicas envolvidas devem estudar em conjunto os valores a serem atribuídos aos coeficientes  $K_i$  e  $K_s$ . Esses valores deverão ser aprovados pelo órgão ambiental responsável pela emissão da licença e validados através de monitoramento continuado das variáveis consideradas para sua definição, a ser iniciado antes mesmo da operação do empreendimento. Após analisados e sistematizados os resultados do monitoramento, optar-se-á por manter ou alterar os valores, considerando, simultaneamente, a garantia da viabilidade técnico-econômica do projeto. A este respeito, cabe assinalar que estudo desenvolvido por Marques et al. (2003) indica que a aplicação de métodos para determinação de vazões ecológicas que consideram características ambientais do ecossistema fluvial, tais como o de Tennant/Montana e o Idaho não implicam a inviabilidade de Pequenas Centrais Hidrelétricas com custo de implantação na faixa de US\$ 900 / kW.

Com o passar do tempo, e a partir dos resultados alcançados, os coeficientes poderão ser estabelecidos em definitivo, para cada bacia hidrográfica, por norma específica, vindo a ser, inclusive, incorporados como parâmetros a serem respeitados em planos de bacia. De todo modo, em qualquer hipótese, e à luz do que foi exposto no tópico precedente, a estratégia de “imitar” o comportamento natural do regime de escoamento do curso d’água deverá se mostrar mais vantajosa do que a manutenção de uma vazão mínima constante.

As vazões afluentes inferior ( $Q_{ij}$ ) e superior ( $Q_{sj}$ ) deverão ser estatísticas da série de vazões afluentes do curso d’água no local. Por exemplo, pode-se utilizar como balizadores as vazões afluentes mínimas médias mensais para estabelecer o limite inferior  $Q_{ij}$  e as vazões afluentes médias mensais de longo termo para definir o limite superior da vazão ambiental  $Q_{sj}$ . Estabelecidas as estatísticas representativas, pode-se generalizar sua aplicação.

As séries de vazões afluentes são usualmente obtidas durante os estudos hidrológicos dos aproveitamentos, fundamentais para as análises de viabilidade técnico-econômico-ambiental, bem como para atender a exigências legais, como a Resolução ANEEL Nº 169 de 03 de maio de 2001. As vazões afluentes aos aproveitamentos durante a operação também são facilmente obtidas a partir de postos fluviométricos, das relações cota x descarga das estruturas hidráulicas e/ou em função da energia gerada no caso de usinas hidrelétricas. Ressalta-se que a concessão de aproveitamentos hidrelétricos exige o monitoramento

através da implantação de estações fluviométricas e pluviométricas, conforme estabelecido na Resolução ANEEL Nº 396 de 04 de dezembro de 1998.

A metodologia proposta permite que as vazões ambientais sejam definidas na fase de projeto e licenciamento de forma racional e objetiva e atendam às premissas ambientais básicas. Na fase de operação, a determinação da vazão ambiental requererá a utilização de uma equação linear, que resultará em manobras das estruturas hidráulicas, como a abertura ou fechamento de comportas.

É importante observar que a característica genérica da metodologia proposta permite que sejam representados os critérios atualmente praticados de fixação de um valor único para a vazão ambiental. Neste caso, ter-se-ia  $Q_{aij} = Q_{asj}$  ou  $K_i \cdot Q_{ij} = K_s \cdot Q_{sj}$ . Embora nessa forma não sejam atendidos os preceitos ambientais sugeridos neste trabalho, o método serviria para uma eventual transição progressiva das regras operacionais atuais para uma melhor condição ambiental dos trechos fluviais localizados a jusante dos barramentos.

## CASOS DE ESTUDO

Para os casos de estudo foi considerado um aproveitamento hipotético cuja barragem estaria localizada na seção do rio Pardo no posto fluviométrico Clube de Regatas (618340000), afluente da margem esquerda do rio Grande, no município de Ribeirão Preto, no Estado de São Paulo. Este local foi escolhido por representar um regime hidrológico intermediário dentre os diversos postos fluviométricos analisados (Figura 3), evitando-se a opção por casos extremos que resultariam em benefícios ambientais mais expressivos ou casos particulares em que a aplicação da metodologia traria poucos benefícios em relação à prática usual de manter uma vazão constante. A área de drenagem do rio Pardo neste local é de 10.679 km<sup>2</sup>, com uma vazão média de longo termo de 163,8 m<sup>3</sup>/s. As análises de frequência das vazões mínimas médias de 7 dias em cada ano hidrológico permitiram obter uma vazão  $Q_{7,10}$  de 35,92 m<sup>3</sup>/s.

### Caso 1

O primeiro caso é representativo de cursos d’água onde existem reservatórios de regularização, que resultam em vazões efluentes constantes a jusante, planejados para abastecimento humano, para irrigação ou para controle de cheias. Foi considerado que no local hipotético existiria um reservatório com 1,1 x 10<sup>9</sup> m<sup>3</sup> de volume útil. A série de vazões afluentes médias mensais utilizada corresponde àquela do posto fluviométrico Clube de Regatas, estendendo-se de janeiro de 1941 a dezembro de 1996. A modelagem matemática e computacional do reservatório e a simulação da sua operação permitiram obter uma vazão garan



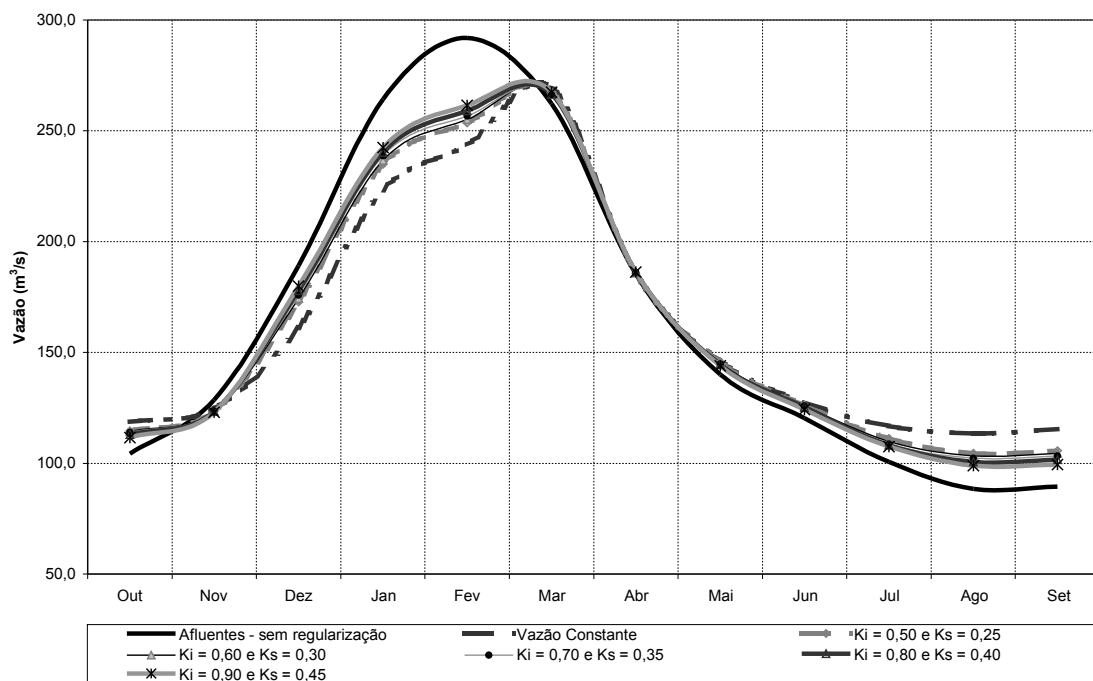


Figura 5 - Distribuição sazonal das vazões afluentes e efluentes de um aproveitamento hipotético do rio Pardo, SP, planejado para regularização de vazões

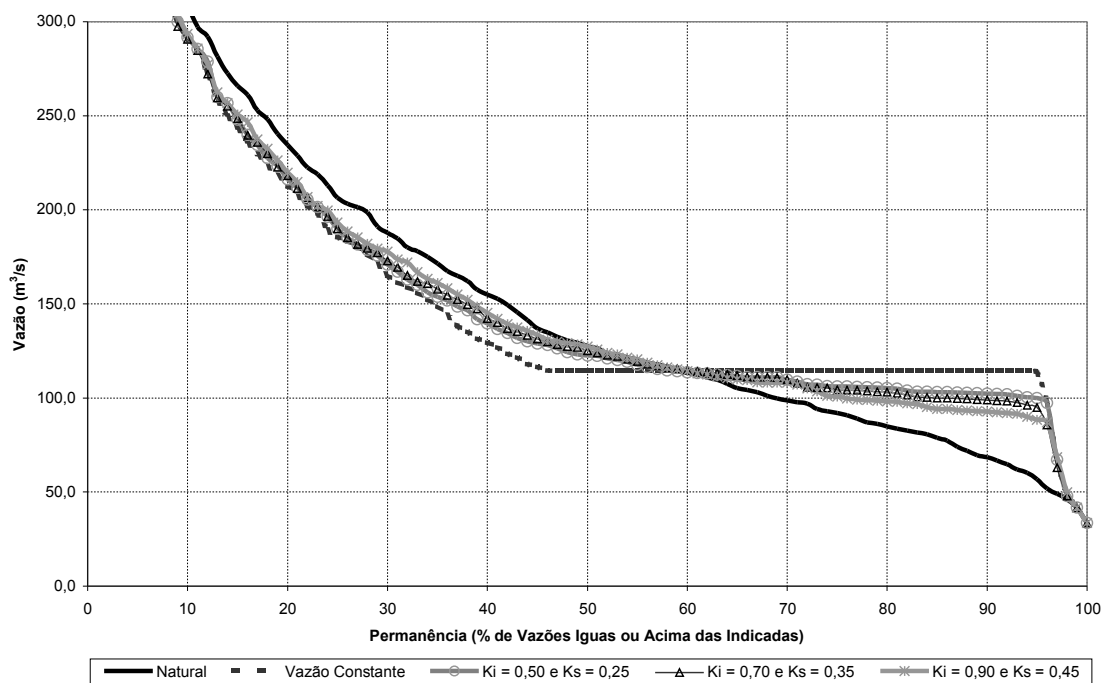


Figura 6 - Permanência de vazões afluentes e efluentes de um aproveitamento hipotético do rio Pardo, SP, planejado para regularização de vazões

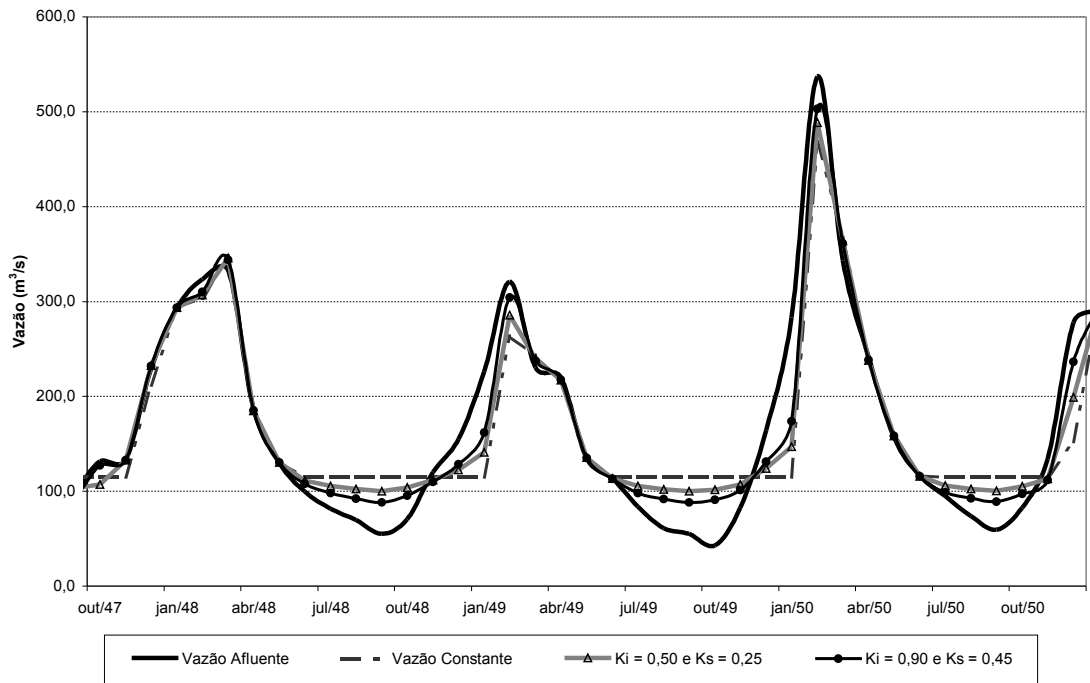


Figura 7 - Hidrogramas das vazões afluentes e efluentes de um aproveitamento hipotético do rio Pardo, SP, planejado para regularização de vazões

tida com 95% de 114,7 m³/s. A metodologia proposta foi aplicada utilizando como vazões afluentes inferior ( $Q_i$ ) e superior ( $Q_s$ ) de cada mês  $j$  as respectivas vazões mínimas e médias mensais da série. Os coeficientes  $K_i$  e  $K_s$  variaram dentro de faixas que permitiram atender às restrições antes apresentadas. A simulação da operação do reservatório utilizando a metodologia proposta permitiu obter as vazões garantidas com 95%, apresentadas na Tabela 2.

As vazões garantidas com 95% para as hipóteses de aplicação da metodologia proposta correspondem às vazões efluentes médias anuais nos períodos sem déficit. Assim, os ganhos de vazão garantida, embora não muito expressivos, devem-se à variação intra e inter-anual da demanda ambiental, que requer menores vazões no período seco do que as que seriam obtidas pela adoção de um valor constante

As Figuras 5 e 6 apresentam a distribuição sazonal e as curvas de permanência das vazões afluentes e efluentes médias mensais, onde se nota que a metodologia proposta permite uma maior aproximação da condição natural. A Figura 7 apresenta os hidrogramas das vazões afluentes e efluentes médias mensais para o período de outubro de 1947 a dezembro de 1950. A análise da Figura 7 permite verificar que a metodologia proposta resulta em hidrogramas mais próximos da condição natural sem, no entanto, comprometer os benefícios da regularização.

Tabela 2 - Vazões garantidas com 95% por um aproveitamento hipotético do rio Pardo, SP, planejado para regularização de vazões

Vazão Ecológica	Vazão Garantida com 95% (m³/s)	Ganho de Vazão Garantida (m³/s)	%
Constante	114,7	0,0	0,0
$K_i = 0,50$ e $K_s = 0,25$	119,0	4,3	3,7
$K_i = 0,60$ e $K_s = 0,30$	120,5	5,9	5,1
$K_i = 0,70$ e $K_s = 0,35$	122,1	7,5	6,5
$K_i = 0,80$ e $K_s = 0,40$	122,2	7,5	6,6
$K_i = 0,90$ e $K_s = 0,45$	122,3	7,6	6,7

As vazões mínimas resultantes da metodologia proposta resultaram entre 90,0 e 98,4 m³/s, desconsiderando os períodos de déficits. Verifica-se que, embora menores que a vazão constante de 114,7 m³/s, esses valores, além de se aproximarem do regime hídrico natural do rio, não prejudicam os benefícios da regularização.

### Caso 2

O segundo caso representa os cursos d'água onde existem aproveitamentos hidrelétricos com arranjo em derivação, ou seja, com a casa de força (canal de fuga)

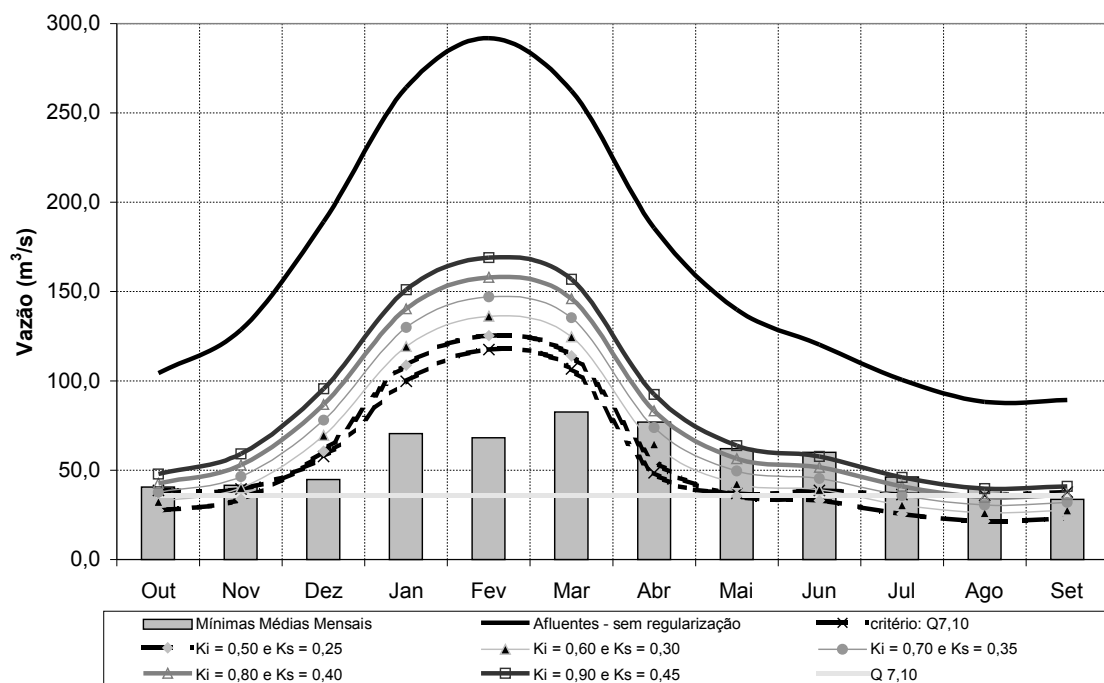


Figura 8 - Distribuição sazonal das vazões afluentes e efluentes de uma hidrelétrica hipotética do rio Pardo, SP

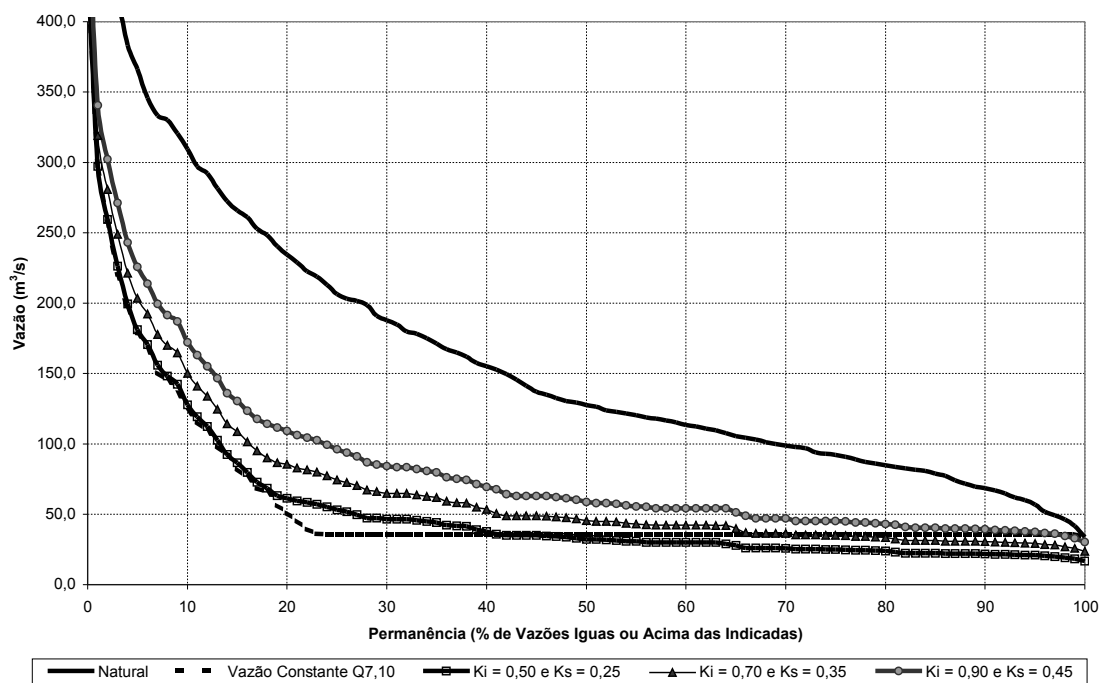


Figura 9 - Permanência das vazões afluentes e efluentes de uma hidrelétrica hipotética do rio Pardo, SP

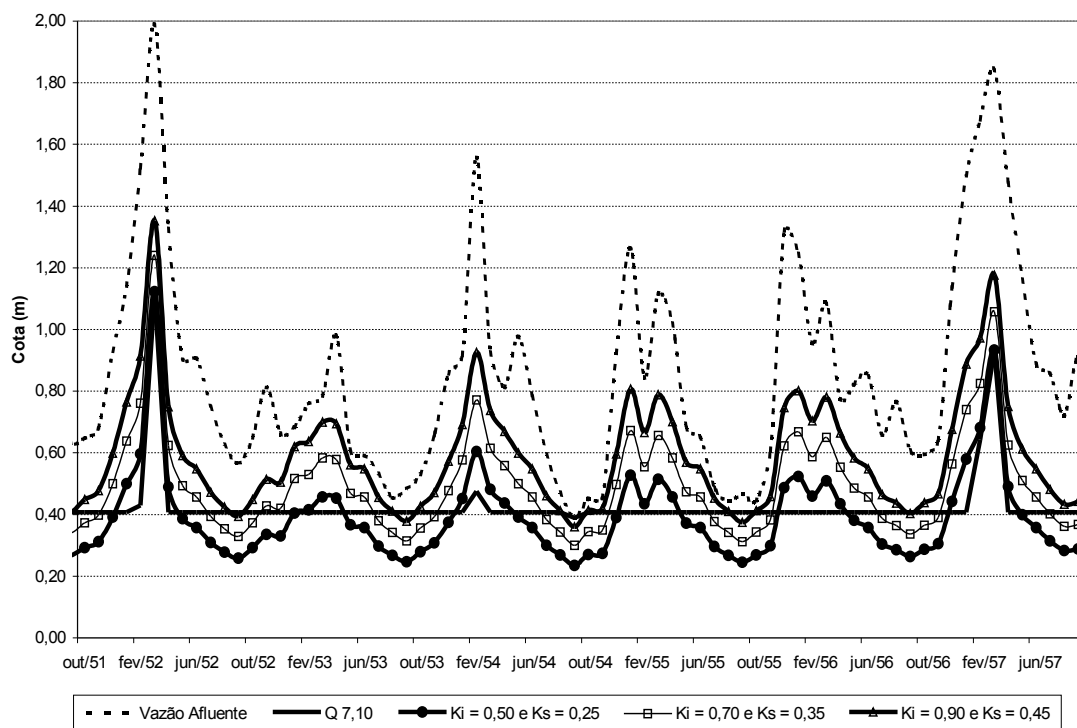


Figura 10 - Hidrogramas das vazões afluentes e efluentes de uma hidrelétrica hipotética do rio Pardo, SP

Tabela 3 - Síntese dos resultados da simulação do aproveitamento hidrelétrico hipotético do rio Pardo, SP

Vazão Ambiental	Engolimento Máximo (m <sup>3</sup> /s)	Perda de Engo- limento (%)	Energia Média Gerada por Unidade de Queda Bruta (MWmédio/m)	Perda de Energia (%)
$Q_{7,10} = 35,92 \text{ m}^3/\text{s}$	182,8	0,0	0,83	0,0
$K_i = 0,50$ e $K_s = 0,25$	179,9	1,6	0,85	0,0
$K_i = 0,60$ e $K_s = 0,30$	169,0	7,5	0,79	4,6
$K_i = 0,70$ e $K_s = 0,35$	158,2	13,5	0,73	11,7
$K_i = 0,80$ e $K_s = 0,40$	147,3	19,4	0,67	18,8
$K_i = 0,90$ e $K_s = 0,45$	136,4	25,4	0,62	25,9

localizada a jusante da barragem. Neste caso, deve-se manter uma vazão ambiental no trecho entre a barragem e a casa de força do aproveitamento. Considerou-se, como é usual para esses casos, que o aproveitamento hidrelétrico hipotético é a fio d'água, ou seja, sem volume de regularização.

Para um pré-dimensionamento do aproveitamento hidrelétrico, foram adotados um fator de capacidade de 0,70, comum para pequenas centrais hidrelétricas, e uma perda de carga no circuito de adução igual a 5% da queda bruta, enquanto o rendimento do conjunto turbina-gerador foi fixado em 85%.

A vazão ambiental inicialmente considerada foi a  $Q_{7,10}$ , um dos parâmetros que vêm sendo arbitrariamente empregados no Brasil. A metodologia proposta utilizou os mesmos critérios apresentados no primeiro caso. A modelagem matemática e computacional do aproveitamento permitiu as simulações da sua operação, considerando uma vazão ecológica constante  $Q_{7,10}$  e as vazões resultantes da aplicação da metodologia proposta neste trabalho. A síntese dos resultados obtidos é apresentada na Tabela 3.

Verifica-se que, utilizando a metodologia proposta, as perdas energéticas não superam 12% para valores do coeficiente  $K_i$  até 0,70, indicando que existem alternativas

que permitem conciliar uma melhora nas condições ambientais sem perdas significativas na produção energética.

As Figuras 8 e 9 apresentam a distribuição sazonal e as curvas de permanência das vazões afluentes e efluentes médias mensais. Verifica-se que na alternativa usual a vazão ecológica  $Q_{7,10}$  é descarregada, praticamente, durante o período contínuo de 7 meses (maio a novembro) e em 77 % dos meses simulados. Já no caso da metodologia ora proposta, as vazões variam durante os meses do ano, seguindo o pulso natural do curso d'água. Esta afirmativa torna-se mais evidente na Figura 10, que apresenta os hidrogramas das vazões afluentes e efluentes médias mensais para o período de outubro de 1951 a dezembro de 1957.

Verifica-se que para a alternativa de vazão constante, no período seco de abril de 1952 a janeiro de 1957, a descarga mantém-se igual à  $Q_{7,10}$ . Através da metodologia proposta, com  $K_i = 0,70$  e  $K_s = 0,35$ , as vazões seguem o pulso sazonal do curso d'água.

## CONSIDERAÇÕES FINAIS

Embora apresente as vantagens discutidas, o método proposto neste trabalho constitui uma primeira aproximação da condição ideal necessária para o correto estabelecimento de uma vazão ambiental a ser mantida a jusante de uma barragem, podendo ser interpretado mais como um “modo de entender o problema”. Não é, pois, mandatório e definitivo, representando tão somente critérios básicos a serem seguidos para nortear uma decisão.

Por ser genérico, pode ser aplicado, “a priori”, a qualquer rio perene, prescindindo de levantamentos exaustivos e de dados prévios muito detalhados.

Entretanto, cabe assinalar que, tomando como ponto de partida a adoção dos conceitos subjacentes ao método proposto, o mais importante será comprovar se o ecossistema fluvial se manterá íntegro após a sua aplicação prática. Isso quer dizer que as condições bióticas e abióticas devam se encontrar em equilíbrio, o que pode ser atestado por indicadores tais como: comportamento das descargas fluviais; alterações morfológicas ao longo do curso d'água e na conectividade longitudinal da rede de drenagem; manutenção de habitats; presença e espécies de algas e de macroinvertebrados; índices de abundância de macrófitas; condições de preservação da vegetação ripária; índices de abundância e diversidade de espécies da ictiofauna, verificando-se, ainda, presença de espécies ameaçadas e de espécies exóticas; qualidade da água, incluindo investigações ecotoxicológicas.

Desta forma, torna-se imprescindível o monitoramento das afluições e efluências no mesmo intervalo de tempo, o que requer pelo menos duas leituras diárias das réguas limnimétricas, norma utilizada para postos fluvio-métricos. No entanto, seria desejável um registro contínuo

através da utilização de limnógrafos, cabendo ao órgão fiscalizador exigir o monitoramento adequado durante o processo de licenciamento ambiental.

Além disso, devem ser implementados mecanismos de gestão da bacia hidrográfica, através de ferramentas que considerem o atendimento sustentável das demandas hídricas antrópicas, o engajamento das instituições e da sociedade nos objetivos e metas sociais e ambientais, e a garantia de que outro sistema hídrico não esteja sendo prejudicado.

## AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem a colaboração do Prof. Dr. Albano Schwarzbold no fornecimento de bibliografia.

## REFERÊNCIAS

- AGIRRE, A. e BIKUÑA, B. G. de (2000). Conceptos básicos para la aplicación del caudal ecológico en los ríos ibéricos. In: *Anales del II Congreso Ibérico sobre Planificación y Gestión de Aguas*. Sevilla, nov. 2000.
- BAYLEY, P. B. (1995). Understanding large river-floodplain ecosystems. *Bioscience*, vol. 45(3), p. 153-158.
- BENETTI, A. D.; LANNA, A. E.; COBALCHINI, M., S. (2003). Metodologias para determinação de vazões ecológicas em rios. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, vol. 8, n. 2., p. 161-171.
- CRIADO, M. C. G.; PÉREZ, P. P. L.; CABAÑES, J. L. C. (2000). El régimen de caudales medioambientales. Su cálculo en la cuenca de Guadiana. *Revista del Colegio de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos*, n. 51, año 2000, La Gestión del Agua, vol. II, p. 70-81.
- GORE, J. A. e PETTS, G. E. (1989). *Alternatives in Regulated River Management*. Boca Raton: CRC Press, Inc. 344 p.
- GRAY, S. F.; SCHUETZ, J. F.; MOLLES, M. C. Jr. (2002). Hydrological connectivity of native riparian forests along the middle Rio Grande, New Mexico. *North American Benthological Society Meeting*. Poster presentation. Disponível no site [www.sevilleta.unm.edu](http://www.sevilleta.unm.edu).
- ELETROBRAS, (1999). Diretrizes para projetos de pequenas centrais hidrelétricas.
- JORDANOWA, A. A.; ROWLSTON, W. S.; BIRKHEAD, A. L.; JAMES, C. S. (2002). The role of hydraulics in holistic instream flow requirement assessment. In: *Proceedings of the International Conference on Fluvial Hydraulics*, Netherlands. Disponível no site [www.gc.ucl.ac.be/riverflow/paper.html](http://www.gc.ucl.ac.be/riverflow/paper.html)
- JUNK, W. J.; BAYLEY, P. B.; SPARKS, R. E. (1989). The flood pulse concept in river-floodplain systems. *Canadian Special Publication of Fisheries and Aquatic Sciences*, vol. 106, p. 110-127.

- LIGON, F. K.; DIETRICH, W. E.; TRUSH, W. J. (1995). Downstream ecological effects of dams. *Bioscience*, vol. 45(3), p. 183-192.
- LOWE-McCONNEL, R. H. 1999. *Estudos Ecológicos de Comunidades de Peixes Tropicais*. São Paulo: EDUSP, 535 p.
- MAHESWARAN, S. e DEEN, A. (2000). Environmental flow hydrology studies on the Hawkesbury-Nepean river. In: *Proceedings of IWRA's X<sup>th</sup> World Water Congress* (CD-Rom). Melbourne, Australia.
- MARQUES, M. G.; MARTINEZ, C.B.; CANELLAS, A. V. B.; PANTE, A. R.; TEIXEIRA, E. D. (2003). Influência dos métodos de determinação de vazão ecológica nos custos de geração de energia em aproveitamentos hidrelétricos – estudo de caso. In: *Anais do XV Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos* (CD-Rom). Curitiba, Nov de 2003.
- MIDDLETON, B. A. (2002). The Flood Pulse Concept in Wetland Restoration. In: *Flood Pulsing in Wetlands: Restoring the Natural Hydrological Balance*. B. A. Middleton (ed.). John Wiley & Sons, Inc., New Jersey, p. 1-10.
- PETER, A. (2002). The swiss modular concept. *EAWAGnews*, n. 51, p. 7-9.
- RAMSAR CONVENTION ON WETLANDS. (2002). The Scientific and Technical Review Panel. *Restoration approach: prescribed flooding*. Disponível no site [www.ramsar.org/srtp\\_rest\\_appr\\_flooding.htm](http://www.ramsar.org/srtp_rest_appr_flooding.htm).
- RIVER RESTORATION CENTRE, 2002. River Restoration News – Newsletter of the River Restoration Centre, Issue 12, July 2002. Disponível no site [www.therrc.co.uk](http://www.therrc.co.uk).
- SARMENTO, R. e PELISSARI, V. B. (1999). Determinação da vazão residual dos rios: estado da arte. In: *Anais do Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos* (CD-Rom). Belo Horizonte.
- SCHEURER, T. e MOLINARI, P. (2003). Experimental floods in the river Spöl, Swiss National Park: framework, objectives and design. *Aquatic Sciences – Research Across Boundaries*, vol. 65, n. 3, p. 183-190.
- SCHWARZBOLD, A. (2000). O que é um rio? uma abordagem sistêmica. *Ciência e Ambiente*, vol. 21, p. 57-68.
- YUSTE, J. A. F.; SANTA-MARIA, C. M.; CAPEL, F. M. (2002). Régimen ambiental de caudales en el tramo inmediato aguas abajo del embalse de “El Vado” (Guadalajara). In: *Anais do III Congreso Ibérico sobre Gestión y Planificación del Agua*, Sevilla, 13-17 de novembro. Disponível no site [www.us.es/ciberico/sevillaarea3.html](http://www.us.es/ciberico/sevillaarea3.html).

## Establishing Environmental Outflows From reservoirs – Methodological Suggestion

### ABSTRACT

*Considering the impacts on the aquatic ecosystem from the use of a constant discharge downstream from water resources projects, this paper presents and analyses the usual Brazilian criteria and suggest a method to established the instream-flow based on the actual water resources availability and its natural in and inter year variations. Presents study cases that shows the environmental benefits of the proposed method in comparison with the usual methods used in Brazil that suggests a constant discharge.*

*Key Words : minimum flows, ecological flows, fluvial ecosystems*