

XI SIMPÓSIO DE RECURSOS HÍDRICOS DO NORDESTE

CONSIDERAÇÕES SOBRE A DETERMINAÇÃO DE VAZÃO ECOLÓGICA EM RIOS

*Glenda Cordeiro de Oliveira Lima*¹; *Denise Mary Santana Marcelino*²; *Vajapeyam Srirangachar Srinivasan*³; *Sávia Gavazza*⁴ & *Sylvana Melo dos Santos*⁵

RESUMO – Com o acelerado crescimento populacional, os recursos hídricos apresentam, cada vez mais, importância no desenvolvimento socioeconômico do planeta. Neste contexto, conflitos de uso e danos ambientais são constantes devido ao aumento do consumo de água pela sociedade. O aumento da procura de água faz com que os corpos hídricos atinjam a sua capacidade máxima de exploração, resultando em danos permanentes para o sistema ecológico. Sendo assim, é de grande importância o estudo das vazões de rios para não somente quantificar o volume necessário para suprir as necessidades da população, mas também, estabelecer as vazões mínimas para evitar e/ou mitigar os impactos negativos ambientais. O objetivo do presente trabalho é apresentar os conceitos essenciais e aspectos relacionados ao tema de vazões ecológicas em rios como, métodos hidrológicos, métodos de classificação hidráulica e métodos de classificação de *habitats*, utilizados para a determinação dessas vazões, visando a proteção ambiental dos recursos hídricos. A partir destes preceitos, conclui-se que, para estabelecer a vazão ecológica, é necessário realizar uma avaliação comparativa das diversas técnicas disponíveis para decidir o melhor método a ser empregado.

ABSTRACT– Due to the increase of population, water resources have, more and more, importance to the social and economic aspects of human development. In this context, conflicts of water use and environmental damages are both frequent because of the ever increasing demands for water. This has resulted in many cases, overexploitation of surface waters and damage to the ecological systems. Hence, it is very important to determine the minimum flow of the river to be maintained to avoid negative environmental impacts. This paper describes the essential concepts and the different approaches such as, hydrologic methods, hydraulic classification methods and habitats classification methods, which are used for the determination of ecological flow, needed for the environmental protection of water resources. Based on these considerations, it follows that it is necessary to make a comparative evaluation of the different methodologies, in order to establish the required ecological flow in the river.

Palavras-Chave – Vazão ecológica; Metodologias de vazão ecológica.

1) Mestranda do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil e Ambiental – PPGECAAM, Centro Acadêmico do Agreste – CAA, Universidade Federal de Pernambuco - UFPE, Rodovia BR-104, Km 59, s/n, Sítio Juriti, Zona Rural, 55002-970, Caruaru-PE. Fone/Fax: 55 81 2126 7774. E-mail: glenda_bio@hotmail.com.

2) Mestranda do PPGECAAM, CAA, UFPE. E-mail: denise_msm@yahoo.com.br.

3) Professor Visitante Nacional Sênior do PPGECAAM, CAA, UFPE. E-mail: vajapeyam@yahoo.com.

4) Professora de Engenharia Civil, Área de Saneamento, PPGECAAM, CAA, UFPE. E-mail: savia@ufpe.br

5) Professora de Engenharia Civil, Área de Recursos Hídricos, PPGECAAM, CAA, UFPE. E-mail: sylvana.ufpe@gmail.com

INTRODUÇÃO

Ao longo dos anos, com o acelerado crescimento populacional, os recursos hídricos apresentam relevante importância no desenvolvimento socioeconômico do planeta. As sociedades modernas encontram-se cada vez mais pressionadas pelo dilema de atender suas crescentes demandas dadas pelo crescimento populacional e aumento do consumo *per capita* (CHRISTOFIDIS, 2001), além de preservar condições mínimas naturais para a sobrevivência dos ecossistemas aquáticos, ribeirinhos e dos bancos de areia (RICHTER *et al.*, 1997). O aumento da procura de água faz com que os corpos hídricos atinjam a sua capacidade máxima de exploração, resultando em danos permanentes para o sistema ecológico. Sendo assim, é de grande importância o estudo das vazões de rios para não somente, quantificar o volume necessário para suprir as necessidades da população, mas também, estabelecer as vazões mínimas para evitar e/ou mitigar impactos negativos ambientais.

Os rios possuem características hidrológicas, morfológicas, químicas e ecológicas. As primeiras são representadas pela velocidade de escoamento e profundidade da lâmina d'água. As características morfológicas são relacionadas aos minerais que formam os leitos e margens, que resultam do transporte de sedimentos. As características químicas são representadas pela temperatura, pH, oxigênio disponível e alcalinidade. E as últimas são a caracterização, classificação e quantificação de espécies aquáticas (PAULO, 2007), que, de acordo com Benetti *et al.* (2003), são características dinâmicas, algumas de difícil medição, influenciadas pela sazonalidade climática e localização geográfica.

Os possíveis usos dados aos recursos hídricos dependem da manutenção das suas características hidrológicas, morfológicas, químicas e ecológicas. Uma das exigências para possibilitar a continuidade de seu uso elevado é a manutenção das vazões ecológicas. As vazões ecológicas são também denominadas de vazões mínimas, remanescentes, residuais e ambientais, e são definidas através de valores numéricos que representam a quantidade de água que permanece no leito do rio após sua retirada para atender os diversos usos externos, estando mais associada aos rios perenes, visto que estes apresentam escoamento superficial durante todo ano.

O objetivo do presente trabalho é apresentar conceitos básicos relacionados ao tema de vazões ecológicas em rios, e apresentar de uma forma sucinta as diversas metodologias para determinar a vazão ecológica, sendo a finalidade principal, para essa determinação, a proteção ambiental dos recursos hídricos e a preservação do sistema ecológico.

CONCEITOS BÁSICOS

Características da vazão ecológica

Para maior conhecimento das características das vazões ecológicas é necessária a determinação das curvas de duração e de recessão do escoamento básico e principalmente da distribuição temporal das vazões ecológicas ou mínimas anuais (TUCCI, 1984). Entretanto, para que estas curvas sejam significativas são necessárias longas séries de dados, para que, segundo Curado e Steffen (2002), seja possível a correlação positiva entre valores anuais de vazões de recessão e ecológicas ou mínimas. Neste contexto, para determinar a vazão mínima é necessário saber a quantidade de água e a sua duração através da análise de curvas de frequência, curvas de permanência e depleção.

A análise de frequência de vazões mínimas é estabelecida para os menores valores médios de um período escolhido de “t” dias. As séries amostrais de mínimos podem ser formadas por séries anuais, baseadas no evento mínimo em cada ano civil. De acordo com Curado e Steffen (2002), os procedimentos para ajustar uma distribuição de frequência à amostra de vazão com uma dada duração podem ser: empíricos ou por distribuição teórica. A curva de permanência representa a relação entre a magnitude e a frequência de vazões diárias, semanais, mensais (ou qualquer outra duração) de uma determinada bacia hidrográfica, indicando a porcentagem no tempo em que um determinado valor de vazão foi igualado ou superado durante o período de observação (TUCCI, 1984), e permitindo visualizar de imediato a potencialidade natural do rio, destacando a vazão mínima e o grau de permanência de qualquer vazão.

De acordo com Tucci (1984), a análise de frequência baseia-se nas seguintes condições:

- Os valores amostrais de vazão devem ser independentes, sendo que dois eventos são considerados independentes quando a ocorrência de qualquer um deles não afetar a ocorrência do outro. Para vazões mínimas sugere-se que sejam escolhidos os valores entre períodos chuvosos.
- O processo natural de ocorrência das vazões é estacionário, ou seja, não ocorrem modificações nas características estatísticas da sua população ao longo do tempo. As causas para uma série não ser estacionária podem estar relacionadas com as modificações da bacia hidrográfica.
- A amostra é representativa da população, e a confiabilidade dos parâmetros estatísticos calculados com base na série histórica depende do número de valores da série e sua representatividade. A diferença entre os parâmetros estatísticos da amostra e os da população é definida como incerteza.

Curado e Steffen (2002) indicam que a análise de frequência seja baseada nas seguintes condições:

- A utilização de qualquer dado hidrológico requer uma análise prévia de consistência, visto que os valores de vazão são, normalmente, obtidos através da curva de descarga ou curva chave e poucos valores são obtidos de medições realizadas.
- Modificações na bacia podem alterar significativamente a magnitude e distribuição das vazões, sendo que as modificações mais frequentes são: modificação da vegetação, urbanização, regularização e desvio de vazão, canalização, bombeamento e retorno de vazão. Os registros devem ser homogêneos e para utilizá-los é necessário examinar a influência dessas alterações artificiais.
- O tamanho do registro depende essencialmente da representatividade da amostra com relação à população desconhecida. Normalmente, para análise de períodos secos, são necessários muito mais anos que para a análise de frequência de cheias. Na realidade, o tamanho e a representatividade da série de vazões podem ser as restrições básicas.

Importância dos fatores físicos

Em ambientes aquáticos, processos que determinam a heterogeneidade de populações no ecossistema, estão intimamente ligados ao regime fluvial, que determinam variáveis como profundidade, velocidade da corrente, tipo de substrato e forma do canal (ANGERMEIER, 1997). Para a aplicação das metodologias hidrológicas é necessário estudar os fatores físicos que influenciam nas diversas etapas de desenvolvimento de organismos aquáticos. Neste contexto, os mais importantes são: corrente, substrato, temperatura e oxigênio (ALLAN, 1995).

De acordo com Benetti *et al.* (2003), as correntes afetam os organismos de diversas maneiras, como por exemplo, transportando nutrientes e removendo dejetos; muitos organismos estão adaptados para viver em correntes lentas ou agitadas, mas não em ambas; também afetam na distribuição das algas, já que estas aderidas a substratos rígidos predominam em águas velozes, enquanto que plantas vasculares com raízes são encontradas em locais de velocidades baixas.

Para substrato, Benetti *et al.* (2003) ressaltaram que este é composto pelos materiais minerais formadores do leito e laterais de rios. A composição desses minerais é determinada, em grande parte, pela velocidade da correnteza e pelo material componente da rocha matriz. Muitos organismos aquáticos apresentam afinidades com tipos específicos de substratos, por exemplo, muitos peixes selecionam (pedras e pedregulhos) para reprodução e desova, já que nesses locais eles podem formar ninhos e estes não serem varridos pelas corredeiras, garantindo também o suprimento de oxigênio através da circulação da água pelos interstícios.

Segundo Benetti *et al.* (2003), o fator temperatura, afeta o metabolismo dos organismos, regulando atividades do ciclo de vida, tais como acasalamento, reprodução e desenvolvimento de ovos e crescimento. Em rios de pequena largura, as sombras providas pela mata ciliar alteram as temperaturas de verão. E o contrário ocorre com a derrubada da vegetação ocasionando aumento de temperatura. De acordo com Doppelt *et al.* (1993), a derrubada de matas ciliares por atividade humana tem sido uma importante causa da extinção e decréscimo na variedade e abundância de peixes em rios norte-americanos.

De acordo com Benetti *et al.* (2003), a solubilidade de oxigênio na água decresce com o aumento de temperatura, porém as atividades metabólicas, com o conseqüente consumo de oxigênio, incrementam com a temperatura, fazendo com que os organismos encontrem maior stress em águas com temperaturas elevadas. Os autores afirmam que essa situação piora quando a estação de temperaturas mais altas coincide com a época de estiagem e com a época de maior demanda de água para atendimento das necessidades humanas, e que tal condição configura uma situação crítica na qual, muitos organismos não conseguem satisfazer suas necessidades de oxigênio. Outro fator importante na disponibilidade de oxigênio para os peixes é a interação com as correntes, visto que o oxigênio é transportado pelas estruturas respiratórias destes por difusão. A difusão depende do gradiente de concentração. Dessa forma, a corrente tem o papel fundamental na renovação da água em contato com os peixes, provendo o gradiente necessário de concentração de oxigênio dissolvido requerido para respiração.

O regime fluvial também está relacionado ao ciclo sazonal de inundações, que também exerce considerável efeito sobre o fluxo de matéria orgânica, sedimento e produção de biomassa (JUNK e WELCOME, 1990). A vazão mínima para proteção ambiental deve ser necessária para que sejam preservadas as condições de pulso hidrológico, transporte de sedimentos e nutrientes, sincronidade com o ciclo das espécies silvestres da fauna e da flora e a taxa de perturbação necessária à renovação e funcionamento dos ecossistemas associados ao curso da água (PAULO, 2007).

Observa-se então, que a vazão desempenha um papel relevante na ecologia dos ecossistemas lóticos, constituindo-se um fator determinante na estrutura e diversidade das comunidades bióticas. Segundo Alves e Henriques (1994), a modificação do regime hidrológico conduz à alteração da velocidade e da profundidade do escoamento, do regime de transporte sólido e da morfologia do leito, da temperatura e da qualidade da água.

Legislação ambiental

A Instrução Normativa N° 04 (BRASIL, 2000a) que aprovou os procedimentos de outorga de direitos de uso de água em corpos sob o domínio da União define vazão ecológica como sendo "a vazão mínima necessária para garantir a preservação do equilíbrio natural e a sustentabilidade dos ecossistemas aquáticos". A vazão ecológica é geralmente adotada como um percentual fixo da vazão referencial que é estabelecida como o limite para o total das outorgas.

A Lei Federal N° 9.433 (BRASIL, 1997), que institui a Política Nacional de Recursos Hídricos - PNRH, cria o Sistema Nacional de Gerenciamento de Recursos Hídricos e regulamenta o inciso XIX do art. 21 da Constituição Federal e altera o art. 1º da Lei 8.001, de 13 de março de 1990, que modificou a Lei 7.990, de 28 de dezembro de 1989. No artigo 1º, a Lei Federal N° 9.433 afirma que a PNRH baseia-se nos seguintes fundamentos: a água é um bem de domínio público; a água é um recurso natural limitado, dotado de valor econômico; em situações de escassez, o uso prioritário dos recursos hídricos é o consumo humano e a dessedentação de animais; a gestão dos recursos hídricos deve sempre proporcionar o uso múltiplo das águas; a bacia hidrográfica é a unidade territorial para implementação da Política Nacional de Recursos Hídricos e atuação do Sistema Nacional de Gerenciamento de Recursos Hídricos; e a gestão dos recursos hídricos deve ser descentralizada e contar com a participação do Poder Público, dos usuários e das comunidades.

A Seção III desta mesma Lei trata da outorga de direitos de uso de recursos hídricos, com destaque para os artigos:

Art. 11. O regime de outorga de direitos de uso de recursos hídricos tem como objetivos assegurar o controle quantitativo e qualitativo dos usos da água e o efetivo exercício dos direitos de acesso à água.

Art. 12. Estão sujeitos a outorga pelo Poder Público os direitos dos seguintes usos de recursos hídricos:

I - derivação ou captação de parcela da água existente em um corpo de água para consumo final, inclusive abastecimento público, ou insumo de processo produtivo;

II - extração de água de aquífero subterrâneo para consumo final ou insumo de processo produtivo;

III - lançamento em corpo de água de esgotos e demais resíduos líquidos ou gasosos, tratados ou não, com o fim de sua diluição, transporte ou disposição final;

IV - aproveitamento dos potenciais hidrelétricos;

V - outros usos que alterem o regime, a quantidade ou a qualidade da água existente em um corpo de água.

§ 1º Independem de outorga pelo Poder Público, conforme definido em regulamento:

I - o uso de recursos hídricos para a satisfação das necessidades de pequenos núcleos populacionais, distribuídos no meio rural;

II - as derivações, captações e lançamentos considerados insignificantes;

III - as acumulações de volumes de água consideradas insignificantes.

§ 2º A outorga e a utilização de recursos hídricos para fins de geração de energia elétrica estará subordinada ao Plano Nacional de Recursos Hídricos, aprovado na forma do disposto no inciso VIII do art. 35 desta Lei, obedecida a disciplina da legislação setorial específica.

Art. 13. Toda outorga estará condicionada às prioridades de uso estabelecidas nos Planos de Recursos Hídricos e deverá respeitar a classe em que o corpo de água estiver enquadrado e a manutenção de condições adequadas ao transporte aquaviário, quando for o caso.

Parágrafo único. A outorga de uso dos recursos hídricos deverá preservar o uso múltiplo destes.

Art. 18. A outorga não implica a alienação parcial das águas, que são inalienáveis, mas o simples direito de seu uso.

A Lei Federal Nº 9.984 (BRASIL, 2000b) dispõe sobre a criação da Agência Nacional de Água - ANA, entidade Federal de implementação da Política Nacional de Recursos Hídricos e de coordenação do Sistema Nacional de Gerenciamento de Recursos Hídricos, e dá outras providências. Esta lei apresentou a regulamentação de alguns itens no tocante à outorga, dentre as atribuições foi determinada a ANA outorgar, por intermédio de autorização, o direito de uso dos recursos hídricos em corpos d'água de domínio da União.

Diante dos instrumentos explicitados, fica evidente a preocupação quanto à captação de água para os usos múltiplos, bem como o lançamento de esgotos e demais resíduos líquidos ou gasosos em corpos hídricos.

MÉTODOS PARA DETERMINAÇÃO DE VAZÕES ECOLÓGICAS

Sarmiento (2007) aponta que existem mais de 200 metodologias utilizadas em 44 países diferentes para a avaliação da vazão ecológica, e o mesmo classifica estas metodologias em quatro tipos: hidrológicas, hidráulicas, *habitat* e holísticas. Ele descreve as metodologias hidrológicas como àquelas que utilizam dados hidrológicos (séries temporais de vazões diárias ou mensais) para fazer recomendações sobre a vazão ecológica, sendo que, em geral, um percentual ou proporção da vazão natural é utilizado para representar a vazão ecológica. As metodologias hidráulicas, segundo Sarmiento (2007), consideram as mudanças em variáveis hidráulicas simples como perímetro molhado ou profundidade máxima, medidas numa única seção transversal dos rios e as vazões

ecológicas são obtidas através de um gráfico no qual é representado a variável escolhida e a vazão. Com relação aos métodos que empregam o uso do *habitat*, o autor relaciona os mesmos com as condições disponíveis para sobrevivência das espécies em análise e descreve-os como um processo de desenvolvimento de uma política de vazão ecológica que incorpora regras variáveis ou múltiplas, para uso em negociação com base na vazão para atender as necessidades de um ecossistema aquático, consideradas as demandas de abastecimento de água e de outros usos da água. As metodologias holísticas, de acordo com Sarmiento (2007), identificam os eventos críticos de vazão em função do critério estabelecido para variabilidade da vazão, para alguns ou principais componentes ou parâmetros do ecossistema do rio, o que pode incluir alguns dos métodos já descritos.

Tharme (2003 apud LONGHI e FORMIGA, 2011) apresentou um estudo com dados estatísticos sobre as tendências, em todo o mundo, de uso de metodologias para a avaliação de vazões ecológicas, e observou que, considerando as 207 metodologias existentes para a determinação da vazão ecológica, em 29,5% dos casos utiliza-se um dos métodos hidrológicos, em 11,1%, os métodos hidráulicos, em 28%, os métodos *habitats*, em 7,7%, os métodos holísticos, e em 23,7% outros métodos e combinações dos métodos existentes. Com base nestas informações, serão abordados no presente trabalho os métodos mais empregados segundo as informações mundiais, correspondendo a 68,6% do total: métodos hidrológicos, métodos de classificação hidráulica e métodos de classificação de *habitats*. A Tabela 1 apresenta de uma forma geral, os métodos utilizados para a determinação da vazão ecológica e os respectivos grupos aos quais pertencem, conforme Collischonn *et al.* (2005).

Tabela 1- Métodos para determinação da vazão ecológica.

Grupo	Método
Métodos Hidrológicos	Vazão Q7,10
	Curva de Permanência de Vazões
	Vazão mínima anual de 7 dias
	Método Tennant//Montana
	Método da Vazão Aquática de Base
	Método da Mediana das Vazões Mensais
Métodos Hidráulicos	Método da Área de Drenagem
	Método do Perímetro Molhado
Métodos de Classificação de Habitats	Método das Regressões Múltiplas
	Método Idaho
	Método do Dep. de Pesca de Washington
Métodos Holísticos	Método IFIM
Outros Métodos	Método de construção de blocos (BBM)
	Vazão de Pulso e de enchentes

Métodos hidrológicos

De forma geral os métodos hidrológicos não analisam o aspecto ambiental, apenas prevêm que a manutenção de uma vazão ecológica, calculada com base em algumas estatísticas da série

histórica, possa resultar em benefício para o ecossistema. A principal vantagem desses métodos está na pequena quantidade de informações requeridas para os cálculos, necessitando apenas de séries históricas de vazões.

- a) Método da vazão média mínima de sete dias com período de retorno de 10 anos ($Q_{7,10}$): neste método são utilizadas informações de vazões históricas para requerimento de vazões mínimas em rios. Esta vazão é obtida computando-se as médias móveis das vazões diárias para um período de sete dias ao longo de um ano hidrológico. A mínima destas médias móveis é retida e o processo é repetido para cada ano da série histórica, obtendo-se uma série de valores mínimos de vazões médias em sete dias consecutivos. Estas vazões são tabeladas em ordem crescente de magnitude juntamente com a frequência de ocorrência e o tempo de retorno. Para isso, Tucci (1984) apresenta a fórmula de Weibull:

$$f = \frac{m}{n-1} \quad (1)$$

Onde: m é a ordem da vazão amostral, e n é o tamanho da amostra.

Das informações tabeladas, ou de um gráfico (tempo de retorno x logaritmo das vazões), é possível determinar a vazão mínima de sete dias com período de retorno de 10 anos, sendo o tempo de retorno obtido pela relação:

$$T = \frac{1}{P} \quad (2)$$

Sendo:

$$P = \frac{c - \alpha}{N + 1 - 2\alpha} \quad (3)$$

Onde: P é a probabilidade de não excedência, referente à função de distribuição empírica $F(x) = P$; $\alpha = 0,4$, corresponde ao coeficiente de posição de plotagem de Weibull; c é o número de valores acumulados por classe; N é o número de total de dados.

De acordo com Thomann e Mueller (1987), esta vazão tem sido utilizada em estudos de qualidade da água para determinar a eficiência com que os poluentes devem ser removidos em estações de tratamento de águas residuárias, para que não ocorra violação dos padrões de qualidade da água em corpos receptores. Este método possui como principal vantagem não ser necessário realizar qualquer trabalho de campo, a não ser a medida sistemática da vazão, mas, por outro lado, para Stalnaker *et al.* (1995) essa vazão é extremamente baixa para a manutenção de *habitats* aquáticos.

- b) Método da análise da curva de permanência: este método relaciona a vazão com a sua probabilidade de ocorrência ao longo do tempo, com base na curva de permanência, ou seja, utiliza valores de curva de permanência para estabelecer vazões ecológicas em base

diária, mensal ou anual. A curva de permanência é calculada através dos dados históricos de vazões, os quais são ordenados de forma crescente, e a permanência de cada vazão observada é o percentual de vezes em que ela foi igualada ou superada. A permanência de um valor de ordem i na série de vazões ordenada de forma crescente é $100 \cdot (1 - i/N)$, sendo o número de valores da série. O procedimento consta das seguintes etapas: determina-se o maior e o menor valor da série de vazões $Q(t)$; determina-se intervalos de classe entre o maior e menor valor; determina-se quantas vazões estão contidas em cada intervalo; obtém a distribuição de frequência, Figura 1a; acumula-se os valores do intervalo maior para o menor; plota-se os valores num gráfico com o valor do limite inferior do intervalo obtendo-se, dessa forma, a curva de permanência, Figura 1b.

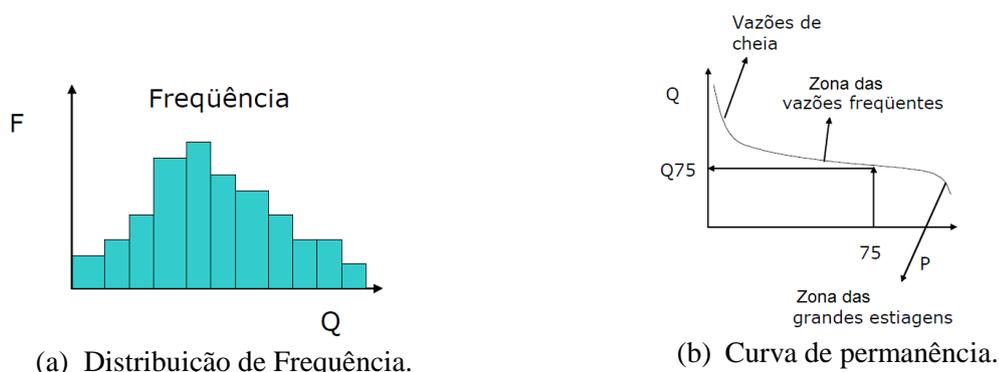


Figura 1 – Gráficos utilizados no Método da Análise da Curva de Permanência.

- c) Método de Tennant ou Montana: neste método a vazão ecológica é calculada com base na vazão média de longo tempo – QMLT, para o local do aproveitamento hidráulico, em que são utilizadas diferentes percentagens para o período de seca e para o período de chuva, Tabela 2. Ele foi desenvolvido a partir de observações sobre *habitats* e vazões durante 10 anos nas regiões de Montana, Nebraska e Wyoming nos Estados Unidos da América, EUA.

Tabela 2- Recomendação de vazões pelo Método de Tennant. Fonte: Paulo (2007).

Condição do Rio	Vazão Recomendada (% de Q _{MLT})	
	Período seco	Período chuvoso
Excepcional	40	60
Excelente	30	50
Boa	20	40
Regular ou em degradação	10	30
Má ou mínima	10	10

Este método baseia-se no histórico de vazões médias anuais, nas estações do ano e na condição dos *habitats*, e supõe-se que vazões superiores a 30% da QMLT são suficientes

para manter condições satisfatórias de profundidade, largura e velocidades para os organismos aquáticos. Os valores inferiores a 10% da QMLT caracterizam uma situação crítica de degradação severa, onde ocorreria dificuldade de passagem ou concentração de peixes em alguns trechos específicos. Segundo Malota e Lesstemaker (2000 apud Benetti *et al.*, 2003), este método tem sido o segundo mais utilizado para determinações de vazões mínimas em países desenvolvidos. Uma das principais limitações à aplicação desse método é que só deve ser aplicado a cursos d'água morfologicamente semelhantes àqueles a partir dos quais foram desenvolvidos, apresentando relação semelhante entre a vazão e o *habitat*. Porém, de acordo com ANA (2004), o método de Tennant tem sofrido diversas modificações que visam adaptar melhor o regime de vazões ecológicas calculado ao regime natural de vazões nas regiões diferentes daquela para a qual o método foi desenvolvido.

- d) Método da mediana das vazões mensais: este método, segundo Benetti *et al.* (2003) determina os valores de vazões residuais correspondentes aos valores das medianas das vazões para cada mês do ano. De acordo com Stalnaker *et al.* (1995), os valores residuais simulam os padrões naturais de variação de vazões que ocorrem ao longo do ano.
- e) Método da vazão aquática de base: esta técnica, segundo Kulik (1990), utiliza a vazão mediana do mês de menores vazões do ano como o valor mínimo de vazão residual a ser estabelecido e, para Benetti *et al.* (2003), esta vazão corresponderia ao fluxo de base do rio. Os autores afirmam ainda que, além de fixar o valor mínimo, a técnica estabelece que sejam necessárias vazões adicionais para atender as necessidades de desova e incubação de peixes.
- f) Método da área de drenagem: neste método as vazões residuais são determinadas em função da área de drenagem da bacia hidrográfica e é utilizado em casos em que a vazão não é medida, utilizando-se, nesse caso, uma variável que a substitua. Tal procedimento foi aplicado em um estudo realizado na região de New England, nos Estados Unidos da América, EUA, onde segundo Larson (1981, *apud* Stalnaker *et al.*, 1995), foram propostas vazões residuais de 5,5 l/s por km² de área de drenagem.

Métodos hidráulicos

Os métodos hidráulicos relacionam características de escoamento com necessidades da biota aquática e necessitam de relações específicas para a região em estudo.

- a) Método do perímetro molhado: este método consiste no estabelecimento de uma relação entre a vazão e as características físicas de um curso d'água, o perímetro molhado, a velocidade e a profundidade do escoamento, com base em uma ou mais seções transversais

do curso de água. De acordo com Alves e Henriques (1994), um dos aspectos mais importantes deste tipo de método é a seleção das variáveis que sejam diretamente afetadas pela variação da vazão e que constituam um fator limitante para as espécies piscícolas ou outras espécies aquáticas. Segundo Benetti e Lanna (2000), este método assume que a necessidade de desova e passagem de peixe em um rio são garantidas quando é mantida uma vazão mínima que é determinada através da curva relacionando perímetro molhado e vazão. Neste contexto, os critérios para definição da vazão mínima apresentados por Paulo (2007) são:

Critério 1: Manutenção das características físicas do *habitat* - levando-se em consideração as diferenças existentes entre as características do mesmo para a vazão em análise e para a vazão de referência (aquela em que se considera existirem condições favoráveis para as espécies aquáticas);

Critério 2: Ponto de inflexão - que consiste em encontrar o ponto na curva de resposta da variável hidráulica em função da vazão onde se verifica uma variação acentuada da inclinação da curva obtida no gráfico. De acordo com Sale e Loar (1981 apud ALVES e HENRIQUES, 1994), a vazão correspondente a este ponto é considerada como a vazão abaixo da qual a qualidade do *habitat* é significativamente degradada.

Segundo a ANA (2004), o método do Perímetro Molhado é o terceiro método mais utilizado nos EUA para quantificar vazões ecológicas para os rios e está sendo aplicado principalmente em rios que apresentam seções transversais relativamente largas, retangulares e pouco profundas.

b) Método das regressões múltiplas: este método utiliza regressões múltiplas para correlacionar variáveis ambientais. De acordo com Petts e Maddock (1994), tais variáveis incluem características da bacia hidrográfica (altitude, área de drenagem, ordem do rio), do regime de vazões (vazões médias diárias, vazões médias sazonais e vazões de base), dos parâmetros de qualidade da água (temperatura, pH, alcalinidade, dureza, condutividade, concentração de nitratos) e estrutura do canal (profundidade média, profundidade máxima, largura, velocidade, substrato dominante, percentagem da cobertura, partes profundas e corredeiras). Benetti *et al.* (2003) apresenta a Equação 4 como sendo uma regressão múltipla relacionando um índice, representando a população de invertebrados e variáveis de *habitats*.

$$BLWP = a + b \cdot CS + c \cdot Q + d \cdot M + e \cdot H \quad (4)$$

Onde: BLWP corresponde a um escore baseado na população de invertebrados; *a, b, c, d, e* são coeficientes de regressão; CS corresponde a um escore baseado nas concentrações de

amônia e oxigênio dissolvido; Q é vazão por unidade de largura do canal com a probabilidade de excedência de 95%; M é o índice de cobertura; e H é o índice hidráulico.

Métodos de classificação de *habitats*

Os métodos de classificação de *habitats* possuem como características: identificação das características físicas e ambientais do local em estudo; plano de estudo elaborado por uma equipe multidisciplinar; podem considerar os aspectos econômicos, valorando a disposição a pagar pela preservação ambiental e os benefícios gerados pelo uso da água. Estes métodos estabelecem uma relação entre as variações de vazão e o *habitat* disponível para uma espécie específica, levando em consideração as diferentes fases do seu ciclo de vida.

- a) Método IFIM (*Instream Flow Incremental Method*): incorpora, segundo Paulo (2007), o conceito de espécies-alvo e os valores finais são produzidos a partir de um modelo de simulação biológica (curvas de preferência para cada espécie em função de variáveis como velocidade, profundidade e substrato) e de um modelo de simulação hidráulica. De acordo com Benetti *et al.* (2003), o objetivo principal é conhecer a variação do *habitat* disponível para cada espécie (de modo específico para cada fase do seu desenvolvimento) em função da variação de vazão, permitindo a obtenção de um regime de vazões ecológicas apropriadas as espécies selecionadas, que assegure a sua sustentabilidade

O método consiste de cinco fases:

Fase 1 - Identificação do problema através de reunião entre órgãos de manejo e de regulação, a partir da qual se estabelece uma série hidrológica de base, representando a situação atual ou outra situação que seja mutuamente aceitável;

Fase 2 – Identificação das escalas temporais e espaciais das avaliações para as variáveis mais importantes na obtenção das informações desejadas e como as mesmas serão obtidas se não existirem;

Fase 3 - Implementação do estudo, em que se obtém uma série temporal de *habitat* de referência, a qual determina a quantidade total de *habitats* que estaria disponível para cada etapa de vida de cada espécie ao longo do tempo. Nesta fase é aplicado o modelo de simulação *Physical Habitat Simulation System* – PHABSIM;

Fase 4 - Análise de alternativas, onde ocorre um processo de negociação buscando um valor de vazão ecológica que atenda aos múltiplos interesses. As alternativas analisadas referem-se à efetividade, viabilidade física, riscos e economia;

Fase 5 - Resolução do problema.

ALGUNS ESTUDOS NO BRASIL SOBRE VAZÃO ECOLÓGICA

Apesar de ser um conceito relativamente novo, existem vários estudos no Brasil sobre a vazão ecológica e seu cálculo. Segue uma descrição sucinta de alguns estudos realizados nos últimos anos, fazendo uso dos diversos métodos citados anteriormente.

Curado e Steffen (2002) desenvolveram o trabalho, Proposta para a Definição de Vazão Mínima (Ecológica) no Rio Aquidauana, em Campo Grande, Mato Grosso do Sul, onde a área em estudo dispõe de riquezas naturais, constituindo um grande potencial turístico e pesqueiro para a região. O objetivo do trabalho foi aplicar métodos hidrológicos utilizados no Brasil para o estabelecimento das vazões mínimas e sugerir critérios a serem adotados em curto prazo para a definição da vazão ecológica para a bacia do rio em estudo, tendo como finalidade principal a proteção dos recursos ambientais e do ecossistema local, garantindo assim, o potencial turístico e pesqueiro da bacia.

Paulo (2007) desenvolveu alguns critérios específicos para determinar a vazão ecológica em trechos de rio em que a vazão é bastante reduzida, destacando o método do perímetro molhado. O trabalho foi desenvolvido na Bacia do Rio Araguari de Minas Gerais que abastece alguns municípios da região, e apresenta um potencial energético que já está sendo explorado, com a construção das Usinas Hidrelétricas de Nova Ponte e de Miranda. O trabalho teve como objetivo definir qual deve ser a vazão ecológica a ser mantida em um trecho de rio com base nas características disponíveis do mesmo bem como, avaliar a aplicação do Método do Perímetro Molhado em um trecho de rio com a abundância de peixes, onde se tinham dados de batimetria em várias seções e a variação temporal da vazão.

Souza (2010) realizou um estudo comparativo de determinação da vazão ecológica (ambiental) em Belo Monte, no Rio Xingú. O trabalho desenvolvido teve como objetivos, apresentar análises do Estudo de Impacto Ambiental (EIA) do projeto de Belo Monte e discutir métodos de cálculos de vazão ecológica. Neste contexto, apresenta-se na Figura 2, um gráfico que relaciona as características de avaliação para cada método (demanda por séries hidrológicas; consideração de variáveis hidráulicas aferidas; consideração de variáveis bióticas aferidas; nível de completude metodológica e; nível de popularização) nas abcissas e o nível de abordagem dessas características por cada método (nível alto à baixo de abordagem) nas ordenadas. Neste gráfico é possível identificar as diferenças e aptidões de cada método, ou seja, faz-se uma análise comparativa entre as metodologias em estudo, ressaltando as diferenças e a necessidade de critérios adicionais para definir a vazão ecológica.

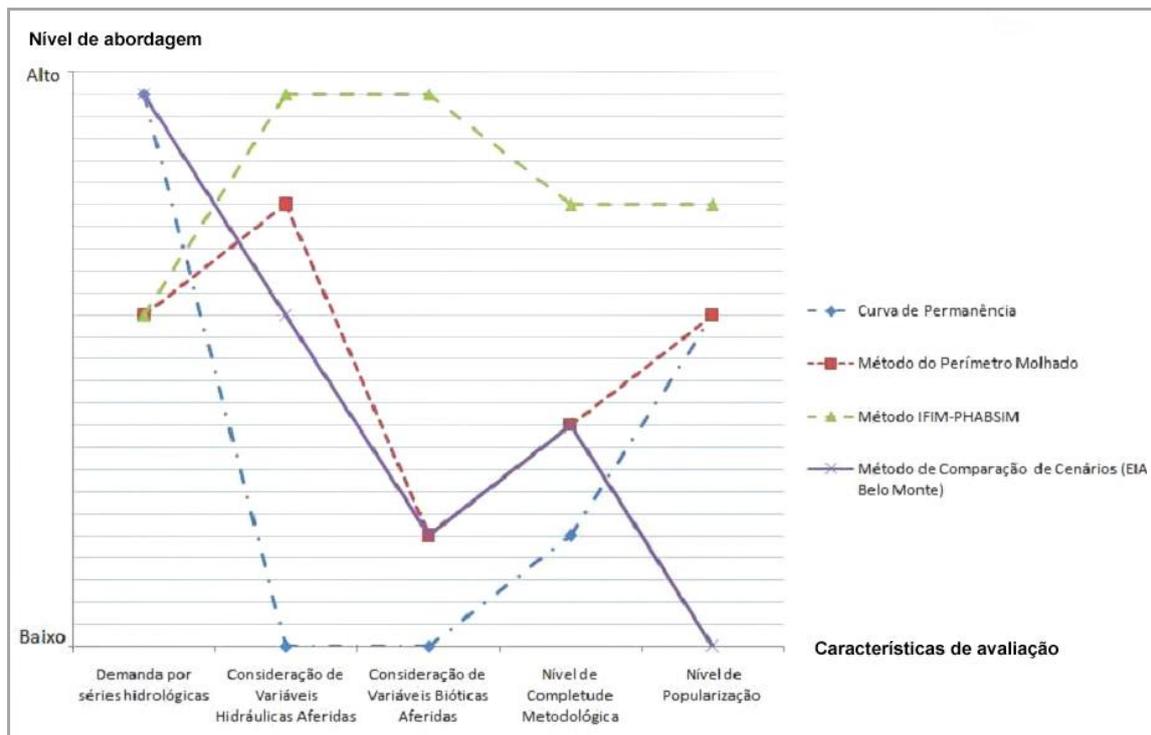


Figura 2 – Gráfico comparativo dos métodos de determinação de vazão ecológica utilizados.
Fonte: Souza (2010).

CONSIDERAÇÕES FINAIS

Vazão ecológica é um conceito relativamente novo e é importante nos processos de planejamento e gestão de recursos hídricos, sendo a vazão que deve permanecer no curso d'água, independentes das outras demandas hídricas para manter as condições mínimas necessárias para preservar o sistema ecológico.

O conceito de vazão surgiu devido aos problemas associados ao uso excessivo da água, com consequente prejuízo ao meio ambiente. A redução da vazão do rio está associada à redução da diversidade de espécies ou da população de uma espécie específica, sendo assim, não seria possível estabelecer uma única vazão como sendo adequada para todas as situações e é necessário investigar diversas metodologias para determinar a vazão ecológica necessária para manutenção da diversidade da vida naquele ambiente.

As metodologias abordadas apresentam vantagens e dificuldades nas suas aplicações e sempre que for possível, devem ser consideradas as diversas alternativas e aquela vazão que representa o menor dano ambiental com o melhor custo benefício deve ser adotado. O método hidrológico que utiliza a Curva de Permanência de Vazões analisa hidrogramas e consequentemente, permite o detalhamento do ano hidrológico da bacia hidrográfica onde o rio se localiza. O método do Perímetro Molhado é relativamente simples de uso, e é a técnica mais comumente utilizada entre os métodos de classificação hidráulica (sendo a terceira mais utilizada nos EUA), trabalha com mais

variáveis ambientais do que os métodos hidrológicos, mas, tem como desvantagem a aplicabilidade de apenas para um local específico.

Os métodos de Tennant, Curva de Permanência de Vazões e Vazão Aquática de Base são métodos que necessitam de apenas da área de drenagem e das vazões diárias. O método IFIM (*Instream Flow Incremental Method*), pertencente ao grupo de classificação de *habitats*, apresenta a maior complexidade para aplicação, necessitando de muitas informações, como por exemplo, substratos, cobertura e profundidades. Apesar disto, seu uso é bastante amplo nos EUA, talvez devido à Legislação Ambiental rigorosa. As principais vantagens do método IFMI são: permitir levar em consideração as variáveis ambientais e a vazão obtida através de um indicador para cada espécie e seu ciclo de vida e permitir que a avaliação da vazão ecológica seja feita independentemente do fluxo natural. As desvantagens são: possuir um custo elevado e levar um tempo consideravelmente longo para ser finalizado e geralmente aplicada em nível de micro e meso-*habitats*. Também, para sua implementação é necessária uma equipe multidisciplinar com experiência em hidrologia, morfologia de rios, qualidade de água, ecologia terrestre e aquática, englobando os campos de biologia e a engenharia hidráulica.

Conclui-se então, que para estabelecer a vazão ecológica é necessário avaliar criteriosamente, as diversas técnicas disponíveis com as condições necessárias para sua aplicação e assim, decidir o melhor método ou o melhor valor da vazão ecológica entre as metodologias para alcançar os objetivos práticos.

AGRADECIMENTOS

As duas primeiras autoras agradecem à CAPES e a FACEPE pelas respectivas bolsas de mestrado concedidas no âmbito do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil e Ambiental da Universidade Federal de Pernambuco e ao CNPq (Projeto Telhados Verdes Aplicado ao Semi-árido Pernambucano, processo 478583/2009-5) pelo apoio.

BIBLIOGRAFIA

ALVES, M. H.; A. G. HENRIQUES (1994). *O caudal ecológico como medida de minimização dos impactos nos ecossistemas lóticos. Métodos para a sua determinação e aplicações*. Actas do 6º SILUSB/1º SILUSBA, Simpósio de Hidráulica e Recursos Hídricos dos Países de Língua Oficial Portuguesa. Lisboa, 11 a 14 de Abril de 1994. APRH/ABRH, pp. 177-190.

ALLAN, J. D. (1995). “*Stream Ecology*”, in *Structure and Function of Running Waters*. Chapman & Hall, London.

ANA - Agência Nacional de Águas (2004). *Plano Decenal de Recursos Hídricos da Bacia Hidrográfica do Rio São Francisco - PBHSF (2004-2013) - Estudo Técnico de Apoio ao PBHSF – Nº 16: Alocação de Água*. Brasília – Distrito Federal.

ANGERMEIER, P. L. (1997). *Conceptua integrity and diversity*. In: Willians, J. E; Wood, C.A. & Dombeck, M. P. *Watersh iples and practices*. Bethesda, Maryland. American Fisheries Society. 49-65.

BENETTI, A. D.; LANNA, A. E.; CABALCHINI, M. S. (2003). “*Metodologias para Determinação de Vazões Ecológicas em Rios*”. Revista Brasileira de Recursos Hídricos, Volume 8, pp. 149 – 160, 2003.

BENETTI, A. D.; LANNA, A. E. (2000). “Estabelecimentos de Critérios para a Determinação da Vazão Ecológica no Rio Grande do Sul”. IPH - UFRGS, Porto Alegre: Fundação Estadual de Proteção Ambiental. 82 p. (Relatório Técnico).

BRASIL (1997). *Lei Federal Nº 9.433*, de 8 de janeiro de 1997.

BRASIL (2000a). Ministério do Meio Ambiente. *Instrução Normativa Nº 04*, de 21 de junho de 2000 .

BRASIL (2000b). *Lei Federal Nº 9.984*, de 17 de julho de 2000.

CHRISTOFIDIS, D. (2001). *Olhares sobre a política de recursos hídricos no Brasil: O caso da Bacia do Rio São Francisco*. 430 p. Tese (Doutorado em Gestão e Política Ambiental) – Centro de Desenvolvimento Sustentável, Universidade de Brasília.

COLLISCHONN, W. AGRA, S.G., FREITAS, G.K., PRIANTE, G.R., TASSI, R., SOUZA, C.F. (2005) “*Em busca do Hidrograma Ecológico*”, in Anais do XVI Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, João Pessoa, Nov. 2005, CD-ROM.

CURADO, L. C. e STEFFEN, J. L. (2002). *Proposta para a definição de vazão mínima (ecológica) no Rio Aquidauana, MS*. II Simpósio de Recursos Hídricos do Centro Oeste Campo Grande.

DOPPELT, B.; SCURLOCK, M.; FRISSEL, C. e KARR, J. (1993). “*Entering the Watershed*”, in *A New Approach to Save America’s River Ecosystems*. Island Press, Washington, D. C.

JUNK, W.J.; WELCOMME, R.L. (1990). “*Floodplains*”, in *PATTEN, B. C. Wetlands and shalow continental waters bodies*. Vol 1. SPB Academic Publishing, The Netherlands. p. 491- 524.

KULIK, B. H. (1990). “*A method to refine the New England aquatic base flow policy*”, in *Rivers 1*, p. 8-22.

LONGHI, E.L., FORMIGA, K.T.M (2011) “*Metodologias para determinar vazão ecológica em rios*”. Revista Brasileira de Ciências Ambientais, Número 20, p. 33-48.

PAULO, R. G. F. (2007). *Ferramentas para a Determinação de Vazões Ecológicas em Trechos de Vazão Reduzida: Destaque para Avaliação do Método do Perímetro Molhado no caso de Capim Branco I*. Dissertação de Mestrado. Escola de Engenharia/ UFMG, Belo Horizonte, MG, Brasil.

- PETTS, G. E. e MADDOCK, I. (1994). “*Flow allocation for in-river needs*”, in: *The Rivers Handbook*, P. Calow & G. Petts (eds.). Blackwell Science. Oxford, p. 289-307.
- RICHTER, B. D.; BAUMGARTNER, J.V., WIGINGTON, R., BRAUN, D.P. (1997). *How much water does a river need*. *Freshwater Biology* 37: 231-249.
- SARMENTO, R. (2007) “*Estado da arte da vazão ecológica no Brasil e no mundo*”, in: *Produto 2*. Unesco/Ana/CBHSF junho de 2007
- STALNAKER, C.; LAMB, B.L.; HENRIKSEN, J.; BOVEE, K. e BARTHOLOW, J. 1(995). *The Instream Flow Incremental Methodology: A Primer for IFIM*. Washington, D.C.: U.S. Department of Interior/ National Biological Service. Biological Report 29. 44 p.
- SOUSA, D. V. R. (2010) *Vazão Ambiental em Belo Monte: Análise do Estudo de Impactos Ambientais e Aplicação do Método do Perímetro Molhado para Comparação Crítica*. Rio de Janeiro: UFRJ / Escola Politécnica.
- THOMANN, R. V; MUELLER, J.A. (1987) *Principles of Surface Water Quality Modeling and Control*, Harper Collins, Publisher, New York - USA. 493p.
- TUCCI, C. E. M. (1984) *Metodologia para regionalização de vazões*. Vol II: Regionalização de vazões do Alto Paraguai. Porto Alegre: IPH/UFRGS.