

# Proposta metodológica de análise de benefício econômico em despoluição hídrica como instrumento de suporte à tomada de decisões: estudo de caso da Bacia do Alto Iguaçu

Maria Cristina Frisch Carvalho Marin  
Monica Ferreira do Amaral Porto  
Fabio Ramos  
Cristóvão Vicente Scapulatempo Fernandes

**RESUMO:** O processo decisório, no âmbito das Agências de Bacia Hidrográfica, deve se dar com base em instrumentos de suporte à tomada de decisões que considere maior objetividade nas decisões, mensure os objetivos pretendidos e aponte a alternativa mais viável de ser implementada, no âmbito das restrições orçamentária, tecnológica e física. É neste contexto, que se aborda a análise econômica de benefícios de despoluição hídrica, de tal forma auxiliar na hierarquização dos investimentos e na avaliação da capacidade de sustentação econômica desta atividade pela sociedade. A metodologia proposta baseia-se na quantificação dos benefícios a partir de um parâmetro de decisão, que relaciona o grau de redução de poluentes no corpo hídrico, a importância relativa dos usos dos recursos hídricos e dos parâmetros de qualidade da água. Esta metodologia foi empregada para avaliar os benefícios de cenários de medidas de despoluição em função da meta de despoluição, considerada igual à classe de uso estabelecida pelo atual enquadramento do corpo hídrico em questão. Os cenários avaliados foram: o proposto no âmbito do PROSAM – Programa de Saneamento Ambiental da Região Metropolitana de Curitiba, relativo ao programa PRA 03 – Esgoto Sanitário; e os propostos pelo Plano de Despoluição Hídrica da Bacia do Alto Iguaçu, realizado pela Superintendência de Desenvolvimento de Recursos Hídricos e Saneamento do Estado do Paraná – SUDERHSA.

**PALAVRAS-CHAVE:** benefício econômico, auxílio à decisão

**ABSTRACT:** The Water Resource Plan is an important tool to assist in the implementation of the water resources policy and management. The formulation of the Plan is a responsibility of the Water Agencies. The decision process must be based on decision support instruments which will enable greater objectivity, measure the intended objectives and point out the best alternative to be implemented under financial, technological and physical restrictions. In this context, this paper presents an analysis of the economic benefits of pollution control measures, which can act as an auxiliary instrument to formulate a Water Plan for a river basin. The proposed methodology is based upon the evaluation of benefits as a function of a decision parameter, which relates the degree of reduction of pollutants in the water body and the relative importance of the uses of the water resources and the water quality parameters. This methodology was used to evaluate the economic performance of the PROSAM project, where the economic benefits were estimated using the acceptable water pollution level with its limits defined by law, and its associated cost of achievement as a reference.

**KEY-WORDS:** economic benefits, auxiliary decision

## INTRODUÇÃO

O modelo institucional proposto pela Política Estadual de Recursos Hídricos do Paraná, disposta na Lei nº 12.726/99, é um modelo de responsabilidades

compartilhadas entre o Conselho Estadual de Recursos Hídricos, Comitês de Bacias Hidrográficas e as Agências de Água. Estes agentes, assumindo papel de tomadores de decisão, são responsáveis diretos para a viabilização da política de recursos hídricos.

A Agência de Água da Bacia do Alto Iguaçu é responsável pela elaboração do Plano Diretor dos Recursos Hídricos na sua área de atuação, através da elaboração dos estudos necessários para a gestão dos recursos hídricos, da proposição do enquadramento dos corpos de água nas classes de uso e nos valores a serem cobrados pelo direito do uso dos recursos hídricos, entre outras competências.

O Plano Diretor de Recursos Hídricos da Bacia do Alto Iguaçu, dentro do contexto do Plano de Despoluição Hídrica, deverá ser formulado e implementado para proporcionar o padrão de qualidade da água desejada pela sociedade, num determinado horizonte de projeto. O padrão de qualidade da água desejado deverá se constituir numa meta a ser perseguida por todas as medidas de despoluição hídrica implantadas na bacia em questão. Portanto, esta meta deverá ser factível e ter seus objetivos mensuráveis. O processo decisório quanto a definição da meta de despoluição hídrica, do caminho a ser percorrido para alcançá-la e do horizonte de projeto para implementá-la, é de responsabilidade dos representantes da sociedade que integram o Comitê da bacia, devendo estar pautado no consenso entre os interesses públicos e particulares, bem como, quanto aos benefícios que deverão ser rateados e os custos que deverão ser sustentados pela sociedade.

Portanto, o sucesso do Plano de Despoluição Hídrica está condicionado, entre outros aspectos, à existência de instrumento de tomada de decisão que auxilie na resolução de conflitos entre os múltiplos agentes, na construção da matriz de fontes de poluição hídrica, na quantificação dos benefícios e custos dos diversos cenários de despoluição hídrica passíveis de serem implantados na bacia hidrográfica, na seleção do cenário mais adequado à bacia em estudo e no fornecimento das bases para hierarquização dos investimentos.

Dentro deste contexto, realizou-se o projeto de pesquisa intitulado Análise da Sustentabilidade Econômica e Ambiental de Metas de Despoluição Hídrica: estudo caso da bacia do Alto Iguaçu. Alguns dos resultados deste projeto serão apresentados neste artigo, os quais se referem a: i) estruturação e construção da matriz de fontes de poluição hídrica da bacia do Alto Iguaçu; ii) construção de funções que relacionam custo de medidas de despoluição hídrica para diferentes graus de remoção de carga de esgoto e iii) avaliação dos benefícios econômicos de cenários de medidas de despoluição hídrica. Os cenários de medidas de despoluição hídrica avaliados foram os

propostos no Plano de Despoluição Hídrica da Bacia do Alto Iguaçu (Superintendência, 2000). Também foi quantificado o benefício proporcionado pelo Programa PRA 03 – Esgoto Sanitário, formulado e implementado pelo PROSAM (Programa, 1991).

Destaca-se, entretanto, que a principal contribuição deste artigo é o de propor uma metodologia de avaliação de benefícios devido à implementação de medidas de despoluição hídrica numa bacia hidrográfica. O benefício econômico é quantificado em função da redução da concentração de poluentes do corpo d'água dentro do contexto da importância relativa dos usos dos recursos hídricos e dos parâmetros de qualidade da água.

Cumprir destacar que, esta metodologia possui caráter pioneiro em estudos de enquadramento de corpos hídricos, não havendo resultados similares na literatura nacional.

## MATRIZ DE FONTES DE POLUIÇÃO HÍDRICA

A matriz de fontes de poluição hídrica da bacia do Alto Iguaçu foi construída a partir das informações constantes no Plano de Despoluição Hídrica da Bacia do Alto Iguaçu (Superintendência, 2000), no Cadastro dos Usuários de Recursos Hídricos da Região Metropolitana de Curitiba (Suderhsa, 1999) e no Projeto Experimental para Análise de Outorgas de Direito de Uso da Água (Superintendência, 2003).

A matriz apresenta as principais fontes de poluição hídrica de origem pontual e difusa, as quais foram caracterizadas espacialmente e temporalmente. Em termos espaciais, foram construídas matrizes de fontes de poluição para o rio Iguaçu e para cada um dos seus principais afluentes, que são num total de 26. Em termos temporais, as matrizes de fontes de poluição foram construídas para os anos de 2005, 2010, 2015 e 2020 (Fernandes et al., 2005).

A matriz de fontes de poluição hídrica é composta por quatro grandes blocos de informações. O primeiro bloco caracteriza o rio em termos de suas características físicas, hidráulicas e também em termos da população total situada na bacia, a população que possui coleta e tratamento de esgoto. O segundo bloco de informações apresenta os dados de vazões do rio para diferentes permanências, sendo elas a de 95% e 50% de permanência e para a vazão de 7 dias de estiagem e 10 anos de recorrência.

O terceiro grande bloco se refere as vazões e cargas de esgotos remanescentes, em termos da demanda

bioquímica de oxigênio - DBO. As vazões de esgoto e cargas remanescentes de DBO foram caracterizadas para as fontes doméstica, industrial e difusa. Para o caso das fontes doméstica e industrial, buscou-se identificar as cargas oriundas dos grandes usuários dos recursos hídricos. Na matriz é possível identificar o usuário através de sua denominação/razão social; localização; origem: doméstico ou industrial; tipo de uso: captação, reservatório e lançamento de efluente; vazão e carga remanescente e a eficiência do tratamento. Para o caso do efluente de fonte difusa, foram avaliados os diferentes tipos de usos do solo da bacia e o percentual em termos de área em que eles ocorrem. As cargas difusas foram obtidas a partir da concentração média de DBO, em função do tipo de uso do solo, definida em bibliografia.

E finalmente, o quarto e último grande bloco apresenta os valores de concentração da DBO em função das cargas de esgoto lançadas no rio. Estes valores de concentração de DBO são os dados de entrada no modelo da qualidade da água a ser simulado para cada bacia hidrográfica analisada. As matrizes em questão foram construídas de tal forma a alimentar o modelo de qualidade da água QUAL2E da U. S. *Environmental Protection Agency*.

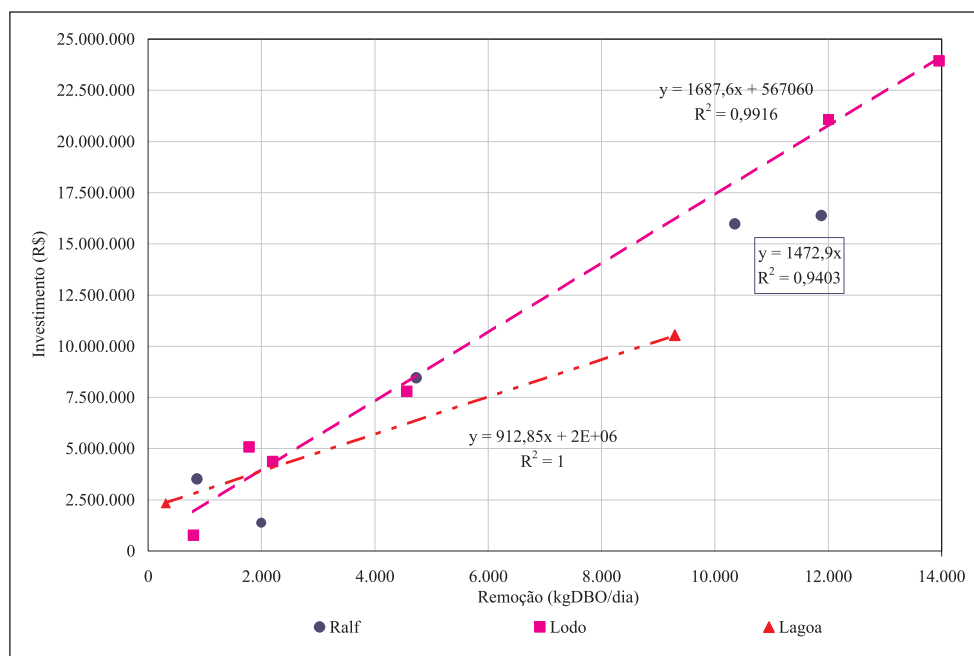
## FUNÇÕES QUE RELACIONAM REMOÇÃO DE CARGA DE ESGOTO E OS RESPECTIVOS CUSTOS

Adicionalmente, funções que relacionam, para uma determinada medida de despoluição hídrica, a remoção de carga e o seu respectivo custo de implementação foram aqui consolidadas. As funções construídas se referem as estações de tratamento de esgoto, através dos processos dos tipos: ralf, lodos ativados e lagoa aerada. As informações que serviram de base para a construção destas funções foram obtidas junto a Agência Nacional de Água, relativas ao ano de 2003, conforme apresentadas na tabela 1.

Uma forma simples das funções de custo, porém com impacto positivo em termos de generalização de resultados, é apresentada na figura 1. Os resultados indicam um ajuste razoável aos dados, apesar do caráter preliminar da análise. As funções mostram que, por exemplo, o investimento necessário para a remoção de carga de DBO da ordem de 8.000kg/dia, é de R\$14 milhões quando o tratamento é realizado via lodo, de R\$ 11,7 milhões através de ralf e de R\$ 9,3 milhões através de lagoa aerada.

TABELA 1  
Remoção e investimento total por ETE

| Nome da ETE              | Processo   | Prestador | Remoção (kgDBO/dia) | Investimento total (R\$) | Eficiência (%) |
|--------------------------|--|-----------|---------------------|--------------------------|----------------|
| São Luiz do Paratinga    | Lagoa aerada seguida lagoa de decantação e desinfecção | Sabesp    | 314                 | 2.343.657                | 85             |
| Hortolândia              |  |           | 9.295               | 10.541.942               | 85             |
| Lavapés/SJ dos Campos    | Lodo ativado por oxigênio puro                         |           | 12.000              | 21.049.200               | 80             |
| Sorocaba I               | Lodos ativados convencionais                           | SAAE      | 13.956              | 23.937.824               | 90             |
| Aterrado - Volta Redonda | Lodos ativados por aeração prolongada                  |           | 4.566               | 7.798.289                | 85             |
| Ribeirão dos Toledos     |  | DAE       | 2.203               | 4.357.521                | 85             |
| Pinheirinho              |  | -         | 1.783               | 5.074.102                | 90             |
| Araretama                | Lodos ativados por batelada                            | Sabesp    | 800                 | 770.000                  | 92,8           |
| Piracicamirim            | RALF seguido de reator aerado                          | Sabesp    | 1.996               | 1.380.674                | 85             |
| Cic/Xisto                | RALF seguido de reator anaeróbia                       | Sanepar   | 11.882              | 16.385.504               | 60             |
| Capuava                  | RALF seguido de reator aerado                          | DAEV      | 4.734               | 8.445.664                | 85,1           |
| Tamandaré                | RALF seguido por flotação por ar dissolvido            | Sanepar   | 863                 | 3.518.729                | 85             |
| Padilha Sul - Curitiba   | RALF seguido de reator anaeróbia                       |           | 10.355              | 15.972.474               | 60             |
| Santa Mônica             | UASB seguida de reator anaeróbio                       | Sanasa    | 1.456               | 5.945.927                | -              |



**FIGURA 1. Funções que relacionam remoção de efluente e investimento para ETE's com processos do tipo RALF, LODO e LAGOA**

### CONCEITOS BÁSICOS PARA A QUANTIFICAÇÃO DOS BENEFÍCIOS ECONÔMICO DE DESPOLUIÇÃO HÍDRICA

A avaliação de benefícios de medidas de despoluição hídrica proposta baseia-se nas considerações de que as intervenções de caráter público objetivam a provisão de bens e serviços que aumentam o bem-estar da sociedade e que a variação do nível de qualidade da água altera o nível de bem-estar das pessoas. Portanto, é possível identificar através de avaliações agregadas da sociedade as medidas de sua disposição a pagar ou aceitar em relação a estas variações. Por exemplo, poder-se-ia pesquisar junto à sociedade qual o acréscimo de impostos ou de tarifas que considerariam aceitável pagar para que um determinado rio atingisse nível aceitável de poluição, segundo o enquadramento proposto pela legislação.

Entretanto, para o emprego da metodologia de valores agregados é fundamental verificar a percepção

da sociedade como um todo do benefício pretendido. Todavia, a sociedade tem pouca sensibilidade em avaliar os benefícios em despoluição hídrica, devido, principalmente, pelo fato que a poluição ocorre em áreas distintas e frequentemente distantes de sua origem.

No entanto, segundo Ramos e Marin (2000) “considera-se que a decisão de recuperar a qualidade dos recursos hídricos é uma decisão de caráter global, de recuperação do ambiente global, decisão esta fundamental à espécie humana. É uma decisão da sociedade que os corpos d’água atinjam graus de qualidade que atendam o seu enquadramento, segundo legislação específica, decisão esta tomada pelos legítimos representantes desta sociedade, tanto a nível federal, estadual ou municipal.”

Ramos e Marin (2000) consideram ainda que a decisão de investir na melhoria da qualidade da água **já está tomada**. Toma-se, portanto, como absolutas as decisões legais no âmbito nacional, que estabelecem os

níveis críticos máximos aceitáveis para corpos d'água através de seu enquadramento em classes de uso. Esta hipótese de ter a sociedade decidido despoluir é apoiada na ausência de oposição, contestação ou dúvida. A questão principal é como fazer, e principalmente como pagar. Logo, segundo Ramos e Marin (2000) a questão de se ter um método de avaliação de benefícios se destina à hierarquização dos investimentos, ao seu cronograma de implantação e à capacidade de sustentação econômica desta atividade pela sociedade.

Pode-se afirmar que existe uma função de benefício de despoluição hídrica, não facilmente traduzida por uma expressão matemática, mas suficientemente compreendida pela sociedade que justifica os investimentos realizados e a realizar. Tal função poderia ter como base simplesmente a avaliação do benefício igual a remoção do poluente, ou seja:

$$\text{Benefício} = \Delta C_{\text{poluente } t} \quad (1)$$

onde  $\Delta C_{\text{poluente } t}$  representa a redução da concentração do poluente "t".

Uma extensão deste conceito é considerar as bases da análise custo-utilidade, empregando pesos relativos para avaliar os benefícios da despoluição hídrica ao longo da bacia hidrográfica. É válido considerar a redução de concentração do poluente no contexto da importância do uso do corpo hídrico em que a medida de despoluição é implantada. Por exemplo, a importância da redução da concentração de poluentes em um rio situado em área de manancial poderá ser distinta em relação à mesma redução ocorrendo em rios cuja atividade principal é a navegação. Com relação aos parâmetros de qualidade da água, utilizados na avaliação dos benefícios, pode-se também estabelecer graus relativos de importância da redução ou ganho de concentrações destes parâmetros. E ainda, as importâncias relativas, traduzidas em pesos relativos, poderão ser definidas pelos representantes dos usuários dos recursos hídricos, dentro do contexto dos Comitês de Bacias Hidrográficas, de tal forma a refletir as reais necessidades básicas e anseios da sociedade quanto aos recursos hídricos.

Desta maneira, considerou-se a avaliação de benefícios como função não só da redução da concentração de poluentes, mas também dos pesos relativos dos usos dos recursos hídricos e dos parâmetros de qualidade da água. Sendo assim, tem-se que:

$$\text{Benefício} = (\Delta C_{\text{poluente } t} \times \text{peso}) \quad (2)$$

## METODOLOGIA PARA QUANTIFICAÇÃO DOS BENEFÍCIOS ECONÔMICOS DE MEDIDAS DE DESPOLUIÇÃO HÍDRICA

A quantificação de benefícios de medidas de despoluição hídrica, proposta por Marin (2001), é realizada pela avaliação direta de benefícios em grandezas de redução das concentrações de poluentes. A medição das reduções de concentração de poluentes é realizada através de seções de controle situadas ao longo da bacia hidrográfica, as quais devem ser localizadas estrategicamente em função da vocação da bacia hidrográfica.

A ferramenta de tomada de decisões quanto à hierarquização de investimentos em despoluição hídrica, deve avaliar a redução da concentração de poluentes dentro do contexto da importância relativa dos usos dos recursos hídricos da bacia hidrográfica.

Após a identificação dos usos dos recursos hídricos predominantes na bacia hidrográfica, atribui-se pesos relativos a estes usos, com o objetivo de identificar o seu grau de importância em função das necessidades básicas e dos principais interesses dos usuários da bacia (Marin, 2001). A definição destes pesos deve ser obtida por consenso entre técnicos, especialistas e usuários dos recursos hídricos, considerando as peculiaridades de cada bacia hidrográfica em análise.

Dentro deste contexto, a importância relativa das seções de controle quanto ao uso dos recursos hídricos é função do grau de ocorrência de cada uso, na seção de controle estudada e do peso do uso do recurso hídrico (Marin, 2001).

Outro aspecto relevante na avaliação dos benefícios de despoluição hídrica é a escolha dos parâmetros de qualidade da água envolvidos na análise, os quais devem caracterizar todos os tipos de fontes de poluição e todos os tipos de poluentes que levam à degradação da qualidade da água. A metodologia de avaliação de benefícios prevê a alocação de pesos relativos aos parâmetros de qualidade da água, refletindo a importância relativa entre os parâmetros avaliados.

Os benefícios econômicos relativos às intervenções em despoluição hídrica, segundo proposto por Marin (2001) são quantificados através de um parâmetro de decisão, denominado de parâmetro Z, que tem como objetivo identificar o cenário de medidas de despoluição hídrica mais adequado à bacia em estudo, dentro de um horizonte de projeto estabelecido, e principalmente fornecer bases para a hierarquização dos investimentos. Esta metodologia está consolidada

num instrumento de auxílio à tomada de decisão, a partir de um algoritmo de avaliação de benefício.

O modelo matemático proposto por Marin (2001) para a quantificação do parâmetro de decisão Z é formado pela média ponderada entre as reduções de concentração de poluentes e a importância relativa dos parâmetros de qualidade da água e das seções de controle em função dos usos dos recursos hídricos. Portanto, o benefício econômico de intervenções em despoluição hídrica pode ser quantificado através da seguinte expressão:

$$Z_m = \frac{B_1 \cdot \text{peso}_1 + B_2 \cdot \text{peso}_2 + \dots + B_m \cdot \text{peso}_m}{\text{peso}_1 + \text{peso}_2 + \dots + \text{peso}_m} \quad (3)$$

Onde:

$Z_m$  = Parâmetro de decisão que representa o benefício quanto à implantação de medidas de despoluição hídrica que compõem um determinado cenário de despoluição. O parâmetro de decisão Z representa o benefício proporcionado por um determinado conjunto de medidas em relação à bacia hidrográfica como um todo;

m = seção de controle mais a jusante da área em estudo;

$\text{peso}_i$  = peso da seção de controle i de acordo com a utilização dos recursos hídricos, com i variando de 1 a m;

$B_i$  = este termo é função da variação da concentração dos parâmetros de qualidade de água e do peso relativo do parâmetro de qualidade da água, conforme mostra a equação a seguir.

$$B_i = \Delta C_{i1} \cdot q_1 + \Delta C_{i2} \cdot q_2 + \dots + \Delta C_{ip} \cdot q_p, \\ \text{para qualquer seção de controle } i \quad (4)$$

Onde:

$\Delta C_r$  = redução da concentração do parâmetro de qualidade da água r na seção de controle i, com r variando de 1 a p e i variando de 1 a m. O valor de m é o número total de seções de controle;

q = peso relativo do parâmetro de qualidade da água r.

Os pesos relativos dos parâmetros de qualidade da água considerados na formulação matemática acima devem necessariamente somar 1 numa mesma seção de controle i.

Os benefícios dos cenários de medidas de despoluição hídrica, implantados ao longo de toda a bacia hidrográfica, serão sempre quantificados em relação a seção de controle mais a jusante da bacia.,

Portanto, independente da região da bacia que está sendo proposta a implantação de medidas de despoluição, a avaliação dos benefícios deve considerar, não apenas o benefício local de despoluição, mas também os reflexos dessas medidas em relação a toda a bacia em estudo.

Segundo Marin (2001), o resultado do parâmetro de decisão Z representa o benefício econômico das medidas de despoluição hídrica ao final do horizonte de projeto. Sendo assim, para que se possa comparar os benefícios de despoluição entre os diversos cenários a serem analisados, é proposto que este parâmetro seja trazido ao valor presente (VP(Z)) através da equação abaixo.

$$VP(Z) = \sum_{t=1}^n \frac{Z_t}{(1+j)^t} \quad (5)$$

Onde: VP(Z) = valor presente do parâmetro de decisão Z;

j = taxa de desconto anual;

t = números de anos, com t variando de 1 a n.

### A QUANTIFICAÇÃO MONETÁRIA DO BENEFÍCIO DE DESPOLUIÇÃO HÍDRICA

Marin (2001) considera-se que a quantificação monetária dos benefícios proporcionados pela implantação de medidas de despoluição hídrica num corpo d'água seja função do parâmetro de decisão Z e de um coeficiente monetário k. O parâmetro Z está associado ao fato gerador da mudança das condições físico-química-biológica dos corpos d'água e do valor de uso dos recursos hídricos perante à sociedade. O coeficiente monetário introduz, por sua vez, a dimensão econômica da despoluição hídrica.

Com base nesta proposição, a tarefa, então, é determinar a forma da função Benefício que melhor represente monetariamente os benefícios proporcionados pela despoluição hídrica. Podemos supor que existe uma enorme gama de possibilidades de representação desta função de Benefício. Entretanto, Marin (2001) optou, por questão de simplicidade e como hipótese conservadora, adotar como uma função linear. Sendo assim, adotou-se a função Benefício B, em termos monetários, como sendo

$$B = k \cdot Z \quad (6)$$

Onde: B é o benefício da despoluição hídrica em termos monetários (R\$);

k é o coeficiente monetário (R\$/Z);

$Z$  é o parâmetro de decisão que representa o benefício da despoluição hídrica.

Definida, então, a forma da função Benefício  $B$ , resta quantificar o coeficiente monetário  $k$ . Adota-se, neste trabalho, a hipótese de que a quantificação do coeficiente monetário  $k$  se dá com base na meta relativa aos objetivos de qualidade pretendida pelo Plano de Despoluição Hídrica de uma bacia hidrográfica.

Sendo assim, Marin (2001) coloca que, uma vez atingida a meta proposta, com a implantação do cenário ideal de medidas de despoluição, não haverá mais incentivo a investir em despoluição hídrica. Logo, nesta situação, o parâmetro de decisão  $Z$  é definido como o parâmetro  $Z_{ideal}$  e a relação Benefício/Custo ( $B/C$ ) do cenário ideal é igual a um.

O coeficiente monetário  $k$ , segundo a metodologia proposta, é obtido considerando a implantação do cenário ideal para o atendimento da meta de despoluição hídrica proposta, o que acarreta na seguinte relação:

$$B/C = 1 \therefore B = C; \quad (7)$$

$$B = C = k.Z, \text{ logo para a situação da implantação do cenário ideal, tem-se} \quad (8)$$

$$k = (C/Z)_{ideal} \quad (9)$$

Onde:  $k$  é o coeficiente monetário ( $R\$/Z$ );

$C$  é o custo do cenário ideal de despoluição hídrica ( $R\%$ );

$Z_{ideal}$  é o parâmetro  $Z$  para o cenário ideal de despoluição hídrica.

Portanto, com o coeficiente monetário definido é possível quantificar o benefício proporcionado pela implantação de qualquer medida de despoluição hídrica numa bacia hidrográfica em termos monetários.

Destaca-se, entretanto, que a metodologia proposta para a quantificação monetária dos benefícios é extremamente simplista, uma vez que se supôs a linearidade da função Benefício em relação ao parâmetro de decisão  $Z$  e o coeficiente monetário  $k$ .

No entanto, uma vez aceita a simplificação da linearidade da função  $B = k.Z$ , a questão primordial, a hierarquização dos investimentos, fica resolvida, independentemente do valor de  $k$ . Definindo a questão da hierarquização como a maximização da diferença entre o benefício e o custo, por exemplo, e assumindo que o conjunto de restrições sobre

as variáveis de decisão é convexo, as decisões não mudam com o parâmetro  $k$ , na sua forma absoluta, mas apenas variam com o peso relativo das variáveis de decisão. Ou seja, a solução para a otimização de uma função:

$$\text{MAX } G_1 = k_1.x_1 + k_2.x_2 + k_3.x_3 \quad (10)$$

é igual à solução para

$$\text{MAX } G_2 = 100.k_1.x_1 + 100.k_2.x_2 + 100.k_3.x_3 \quad (11)$$

dado que o conjunto de restrições é convexo e o mesmo para os dois casos.

Assim, a aceitação da linearidade, ou quase-linearidade da função de benefício  $B = k.Z$ , faz com que o algoritmo proposto de decisão dos investimentos seja adequado à solução do problema.

## ESTUDO DE CASO: BACIA DO ALTO IGUAÇU

Este estudo de caso se refere a quantificação dos benefícios da implantação das medidas que compõe o programa PRA 03 – Esgoto Sanitário, formulado e já implementado no âmbito do PROSAM. Este programa é composto pela ampliação da rede de coleta e do tratamento do esgoto sanitário na RMC. Este cenário será denominado ao longo deste estudo de caso de **cenário A**, cujo custo de implantação é de 54,49 milhões de dólares (Programa, 1991).

A Suderhsa, no âmbito do Plano de Despoluição Hídrica da Bacia do Alto Iguaçu, propôs inicialmente dois cenários de medidas de despoluição hídrica, atuando nas três principais fontes de poluição da Bacia do Alto Iguaçu: doméstica, industrial e difusa. Estes cenários, denominados por **cenários C e D**, também terão seus benefícios avaliados. Uma breve descrição dos cenários **C e D** é apresentada a seguir.

As medidas de despoluição, propostas pela Superintendência (2000) para compor os cenários **C e D**, relativas às cargas domésticas são eliminação de ligações irregulares de esgoto e implantação de sistema de coleta, transporte, tratamento e disposição final de esgoto urbano. Com relação às cargas industriais, as medidas se referem ao sistema de tratamento de efluentes industriais e para o caso das cargas difusas, as medidas contemplam ampliação e melhoria dos serviços de varrição de áreas urbanas. As medidas de gestão consideradas no Plano de Despoluição englobam a disciplina, fiscalização e controle do uso

do solo, controle e fiscalização das fontes doméstica, industrial e difusa de poluição hídrica, definição de medidas de segurança para reduzir os riscos com descargas acidentais e programa de educação ambiental (Superintendência, 2000).

O **cenário C**, segundo Superintendência (2000), foi construído considerando a implantação de um **conjunto razoável de medidas**, compatível com a tecnologia existente no país, sem a preocupação com a ordem de magnitude dos custos que o conjunto destas medidas acarretaria. O custo de implantação deste cenário foi estimado em R\$ 750 milhões. Com este cenário implantado é possível avaliar se as medidas propostas, dentro do horizonte de projeto de 20 anos, proporcionam reduções de concentrações de poluentes suficientes para atender ao enquadramento das classes dos rios da Bacia do Alto Iguaçu, conforme disposto na Portaria SUREHMA nº 20/92.

O **cenário D** foi criado a partir do cenário anterior, onde se considerou a reprogramação das medidas propostas neste cenário de acordo com as necessidades prioritárias quanto às **questões ambientais** e com base em **restrições orçamentárias**. Este cenário foi construído de tal forma que o custo total de implantação seja igual as estimativas de recursos orçamentários a serem destinados a implantação do Plano de Despoluição Hídrica da Bacia do Alto Iguaçu. Estes recursos compõem-se da parcela do valor arrecadado pela cobrança pelo direito de uso dos recursos hídricos na Bacia do Alto Iguaçu, destinada ao Plano de Despoluição Hídrica, somada aos recursos provenientes do convênio firmado entre o Instituto Ambiental do Paraná, a SANEPAR e o Programa de Saneamento Básico - PARANASAN financiado pelo Estado do Paraná. Segundo Superintendência (2000), estima-se que o valor a ser arrecadado pela cobrança do direito de uso dos recursos hídricos, destinado ao Plano de Despoluição Hídrica, ao longo dos 20 anos de projeto, é cerca de 516 milhões de reais e os recursos provenientes do convênio IAP, da SANEPAR e do PARANASAN totalizam da ordem de 181 milhões de reais. Portanto, o cenário em questão será aquele formado por um conjunto de medidas de despoluição hídrica cujo custo total é de 697 milhões de reais. Os valores citados referem-se ao ano 2000.

As medidas de gestão, serviços e obras a serem implantadas no cenário em questão, são basicamente as mesmas que as do cenário anterior, porém com a postergação das datas de implantação de algumas obras, ou de partes delas, em decorrência das restrições orçamentárias. Como consequência deste

critério, algumas obras ficaram fora do plano, tendo sua implantação adiada para após o período de planejamento, ou seja, após o ano 2020.

Para compatibilização dos custos de implantação dos cenários avaliados, fez-se a correção dos custos dos cenários **C** e **D** para o dólar, utilizando a taxa de US\$1,00 igual a R\$2,00. Logo, o custo de implantação do cenário **C** é de US\$ 429,49 milhões e do cenário **D** é de US\$ 402,99 milhões.

### Aplicação do Algoritmo de Avaliação de Benefício de Despoluição Hídrica na Bacia do Alto Iguaçu

Para a avaliação dos benefícios proporcionados pelas medidas de despoluição hídrica foram selecionadas nove seções de controle, ao longo do rio Iguaçu. A localização das seções de controle e sua nomenclatura são apresentadas na figura 2.

Para o cálculo do benefício em despoluição hídrica, através do parâmetro *Z*, é necessário conhecer a importância relativa das seções de controle em função dos usos dos recursos hídricos e o grau de redução do poluente em função da medida de despoluição hídrica.

A importância relativa de cada seção de controle foi quantificada através do grau de ocorrência de cada tipo de uso situado na área incremental que drena a seção de controle estudada e da importância relativa destes usos em relação aos demais.

O grau de ocorrência de cada uso situado na área que drena uma determinada seção de controle, em relação a toda a bacia do Alto Iguaçu, foi quantificado em Superintendência (2000). Os pesos relativos dos usos dos recursos hídricos predominantes nesta bacia foram propostos, em caráter preliminar, pelos técnicos da Suderhsa, envolvidos na construção do Plano de Despoluição Hídrica da Bacia do Alto Iguaçu (Superintendência, 2000). A tabela 2 apresenta o resultado deste exercício.

Os benefícios econômicos do programa PRA 03 – Esgoto Sanitário - **cenário A**, já implementado, e dos **cenários futuros C** e **D** foram avaliados em relação ao **cenário base**. No **cenário base** não se considerou a implementação de qualquer medida de despoluição hídrica ao longo da bacia do Alto Iguaçu.

O parâmetro de qualidade da água considerado na avaliação de benefícios em despoluição hídrica é o DBO. Este parâmetro caracteriza exclusivamente a matéria orgânica, encontrada predominantemente

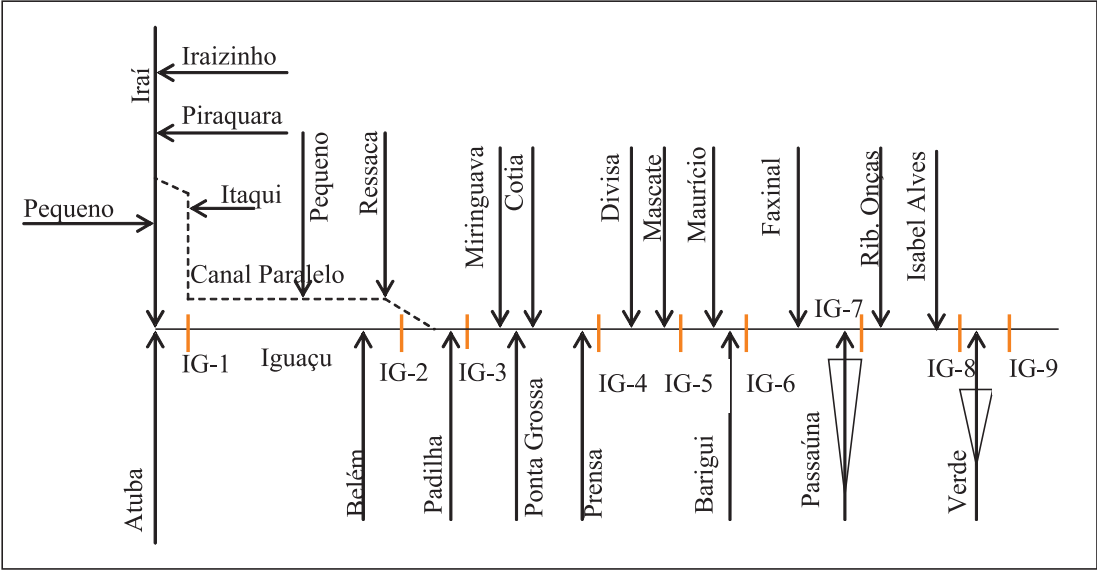


FIGURA 2. Diagrama topológico da Bacia do Alto Iguaçu (Superintendência, 2000)

TABELA 2  
Importância relativa dos usos dos recursos hídricos (Suderhsa,2000)

| Usos dos recursos hídricos       | Importância relativa (Peso) |
|----------------------------------|-----------------------------|
| Abastecimento Urbano             | 10                          |
| Usos ecológicos*                 | 8                           |
| Abastecimento Industrial         | 5                           |
| Recreação e lazer                | 3                           |
| Assimilação de esgoto doméstico  | 2                           |
| Assimilação de esgoto industrial | 2                           |
| Assimilação de esgoto difuso     | 2                           |
| Irrigação                        | 2                           |
| Dessedentação de animais         | 2                           |
| Piscicultura                     | 2                           |

(\*) destinados à preservação do equilíbrio natural das comunidades aquáticas

TABELA 3  
Concentrações de DBO (mg/l) relativo a vazão de 95% de permanência

| Seção de controle | Importância relativa dos usos dos recursos hídricos acumulada (%) | Concentração de DBO por cenários de despoluição (mg/l) |                  |                  |                  |
|-------------------|---|--|------------------|------------------|------------------|
|                   |   | BASE <sup>(1)</sup>                                    | A <sup>(2)</sup> | C <sup>(3)</sup> | D <sup>(3)</sup> |
| IG-1              | 12,28   | 57,2   | 28,8             | 15,9             | 19,8             |
| IG-2              | 17,34   | 46,1   | 30,9             | 18,4             | 24,2             |
| IG-3              | 53,50   | 51,6   | 31,2             | 16,6             | 22,5             |
| IG-4              | 62,78   | 32,0   | 21,9             | 11,4             | 16,3             |
| IG-5              | 63,72   | 34,3   | 21,8             | 10,8             | 16,4             |
| IG-6              | 79,26   | 33,9   | 27,6             | 11,9             | 17,9             |
| IG-7              | 94,73   | 29,4   | 25,1             | 10,7             | 16,4             |
| IG-8              | 95,12   | 22,7   | 22,7             | 9,5              | 14,8             |
| IG-9              | 100,00  | 22,2   | 20,9             | 8,9              | 13,8             |

Fonte: (1) Concentração de DBO antes da intervenção, Prosam (1991); (2) Concentração de DBO após a intervenção relativa ao ano de 1999, Superintendência (2000); (3) Concentração de DBO após a intervenção relativa ao ano de 2005, Superintendência (2000)

nos efluentes domésticos. Não obstante, as fontes predominantes de poluição são de origem doméstica, industrial e difusa. As concentrações do poluente para cada cenário avaliado, relativas a vazão de 95% de permanência são apresentadas na tabela 3. As concentrações dos cenários **A** e de **base** se referem ao ano de 1999 e dos cenários **C** e **D** ao ano de 2005.

Os resultados da avaliação de benefício, em termos do parâmetro de decisão **Z**, são apresentados na tabela 4. Os resultados constantes nesta tabela são relativos ao valor presente (ano de 1999), obtidos admitindo-se a taxa de desconto de 12% ao ano.

TABELA 4  
Resultados da avaliação dos benefícios de despoluição hídrica dos cenários A, C e D, em termos do parâmetro **Z**, no valor presente

| Ano  | Cenário A | Cenário C | Cenário D |
|------|-----------|-----------|-----------|
| 2005 | 0,91      | 2,5       | 1,8       |

Os resultados da modelagem de qualidade da água mostraram que as concentrações finais dos poluentes, ao longo de quase toda Bacia do Alto Iguaçu, após a implementação das intervenções propostas tanto nos

cenários **A**, **C** e **D**, não atendem a meta de qualidade da água relativa a classe 2, conforme o enquadramento disposto na Portaria SUREHMA nº 20/92. Esta assertiva pode ser constatada na figura 3.

Verificou-se, então, qual é o grau de atendimento de cada cenário em relação a meta proposta. Para consubstanciar esta análise, criou-se um cenário hipotético denominado de **cenário Ideal**, composto por todas as medidas de despoluição hídrica necessárias para atingir a meta legal. Aplicou-se o algoritmo de avaliação de benefício ao **cenário Ideal** em relação ao **cenário base**, em que **não** se considera implementação de intervenções ao longo da bacia.

Admitiu-se que as medidas de despoluição que compõem o **cenário Ideal** proporcionam redução de poluentes de tal forma que, já no ano 2005, as concentrações dos parâmetros de qualidade da água, em toda a Bacia do Alto Iguaçu, atendam os níveis de concentração segundo o enquadramento proposto.

O resultado da avaliação de benefício do **cenário Ideal**, para o ano 2005, em termos do parâmetro **Z** é de 6,9. Este resultado refere-se ao valor presente (ano 1999), admitindo-se a taxa de desconto de 12% ao ano. O valor do parâmetro **Z** do **cenário Ideal** traduz o máximo benefício a ser alcançado dentro do contexto da meta estabelecida, sendo este o valor base

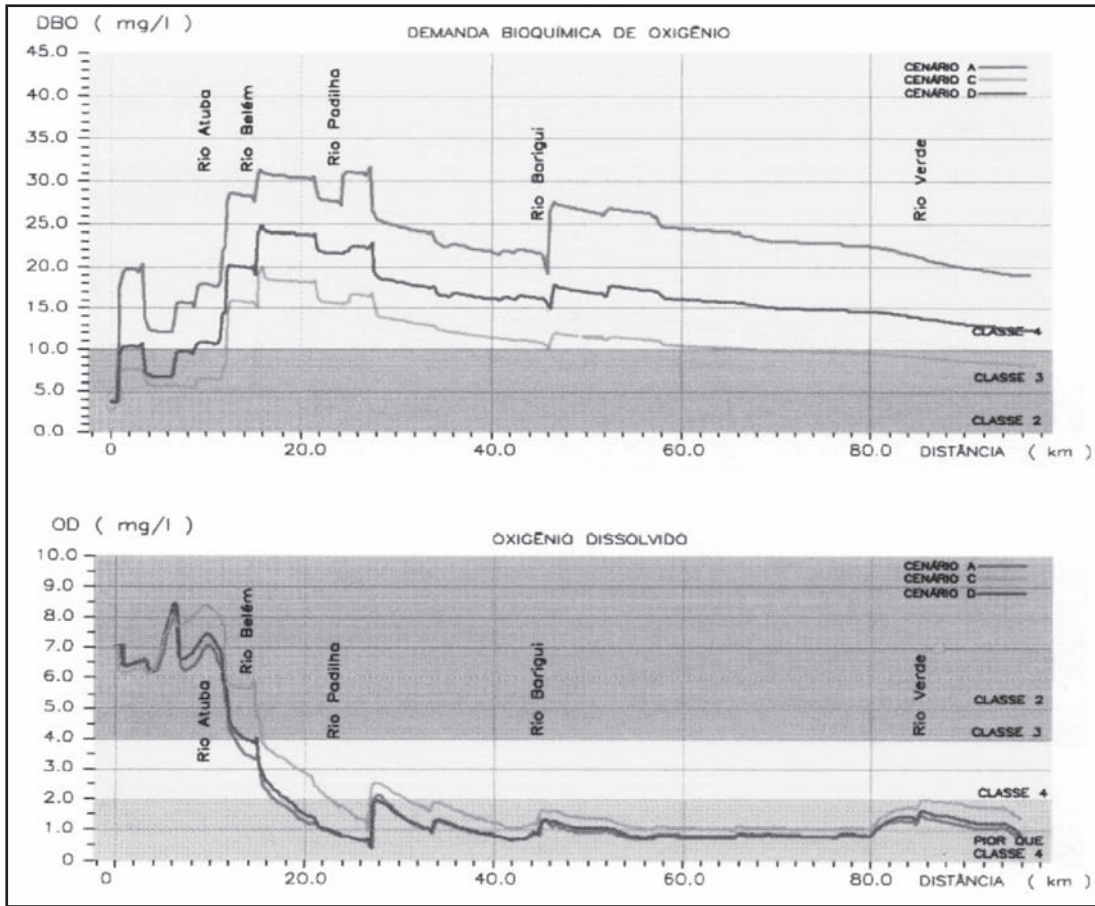


FIGURA 3. Concentração dos parâmetros de qualidade da água para os cenários A, C e D - ano 2005 (Fonte: Superintendência, 2000)

de comparação dos benefícios proporcionados pelos demais cenários de despoluição hídrica.

Confrontando os resultados do parâmetro de decisão –  $Z$ , entre o **cenário Ideal** e os cenários propostos **A**, **C** e **D**, verifica-se que a relação  $Z/Z_{ideal}$  das medidas que compõem os cenários citados, em relação ao ano 2005, são respectivamente 13%, 36% e 26%. Ou seja, o cenário **C**, que é aquele com a maior relação  $Z_C/Z_{ideal}$ , possui benefício da ordem de 36% em relação ao benefício proporcionado pelo **cenário Ideal**.

### QUANTIFICAÇÃO MONETÁRIA DOS BENEFÍCIOS ECONÔMICOS E DA RELAÇÃO B/C DOS CENÁRIOS DE DESPOLUIÇÃO HÍDRICA

Segundo a metodologia proposta para quantificação monetária de benefícios em despoluição hídrica, tem-se que o benefício do cenário de despoluição em termos monetário é obtido pela seguinte relação:

$$B = Z \cdot (C/Z)_{ideal}$$

FIGURA 4. Relação entre Z/Zideal e o custo de implantação do cenário de despoluição

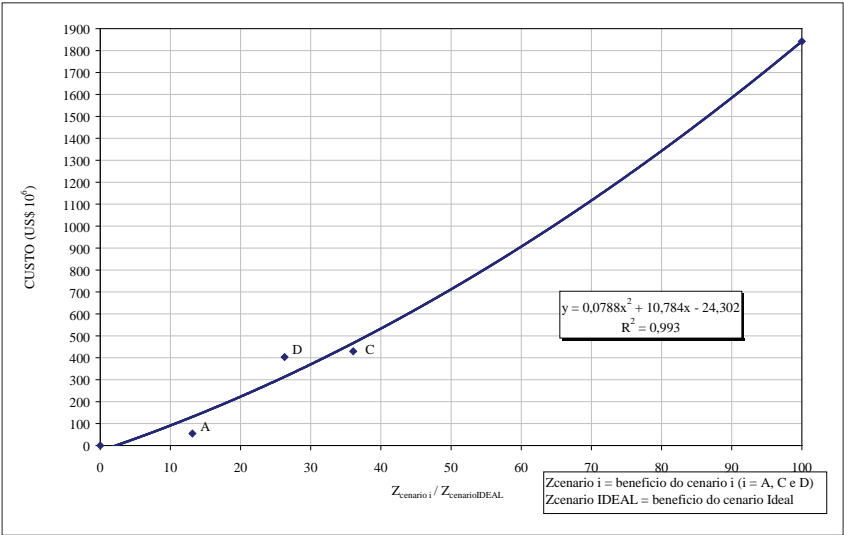
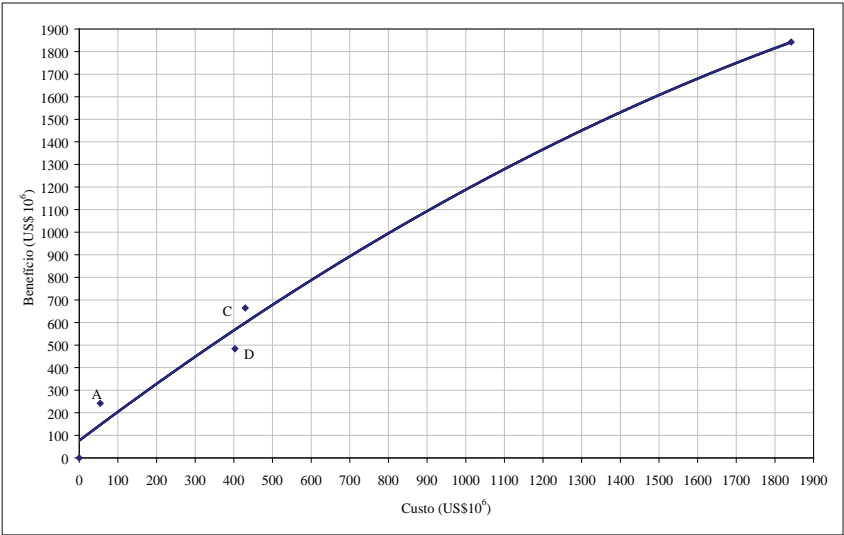


TABELA 5  
Benefício econômico e a relação B/C dos cenários avaliados

| Cenário | Custo (US\$10 <sup>6</sup> ) | Custo acumulado com o cenário A (US\$10 <sup>6</sup> ) | Benefício (US\$10 <sup>6</sup> ) | B/C |
|---------|------------------------------|--|----------------------------------|-----|
| A       | 54,49                        | 54,49  | 242,06                           | 4,4 |
| C       | 375,00                       | 429,49   | 664,15                           | 1,5 |
| D       | 348,50                       | 402,99   | 483,91                           | 1,2 |
| Ideal   | 1.842,20                     | 1.842,20   | 1.842,20                         | 1,0 |

FIGURA 5. Relação entre benefício e custo dos cenários de medidas de despoluição



Portanto, para a quantificação monetária dos benefícios econômicos proporcionados pelo Programa PRA03 – **cenário A** e dos **cenários C e D** é necessário, primeiramente, estimar o custo de implantação do **cenário Ideal**.

O custo do **cenário Ideal** foi estimado considerando a relação entre os parâmetros de decisão  $Z$  dos cenários avaliados em função do **cenário Ideal**,  $Z/Z_{ideal}$ , e de seus custos de implantação, conforme ilustra a figura 4. A partir do conjunto de pontos apresentado na figura 4, identificou-se a curva de melhor ajuste aos pontos, resultando num polinômio de segundo grau. Conhecida, então, a curva que melhor relaciona as variáveis  $Z/Z_{ideal}$  e custo, e dado que o **cenário Ideal** possui a relação  $Z/Z_{ideal}$  igual a 1, foi possível estimar seu custo de implantação, que é da ordem de 1,84 bilhões de dólares.

Estimado o custo do **cenário Ideal**, passa-se então, para a quantificação dos benefícios monetários dos cenários avaliados, conforme a metodologia proposta. Os benefícios monetários dos cenários **A**, **C** e **D** e as respectivas relações  $B/C$  são apresentados na tabela 5 a seguir. A relação do benefício e custo dos cenários avaliados é apresentada na figura 5.

Os resultados mostraram que apesar dos cenários **A**, **C** e **D** estarem muito aquém dos benefícios gerados pelo **cenário ideal**, as suas relações de benefício/custo mostraram-se viáveis. O **cenário A**, já implementado pelo PROSAM, apresentou a relação de  $B/C$  igual a 4,4 e os cenários **C** e **D**, propostos no âmbito do Plano de Despoluição Hídrica, obtiveram relações de  $B/C$  iguais a 1,5 e 1,2 respectivamente.

Isto posto, a metodologia proposta permite que outros cenários de medidas de despoluição hídrica possam ser avaliados em termos de benefício econômico, o qual em conjunto com os custos das intervenções, nortearão o processo decisório, de forma objetiva e clara, quanto a seleção do melhor cenário, levando em consideração a vocação da bacia hidrográfica, a eficiência das medidas de despoluição hídrica e as restrições orçamentárias.

## CONCLUSÕES

Este trabalho foi desenvolvido admitindo que a decisão de investir na melhoria da qualidade da água **já está tomada pela sociedade**. Toma-se, portanto, como absolutas as decisões legais no âmbito nacional, que estabelecem os níveis críticos máximos aceitáveis para corpos d'água através de seu enquadramento em classes de uso. Logo, segundo Ramos e Marin (2000), a questão de se ter um método de avaliação de benefícios se destina à hierarquização

dos investimentos, ao seu cronograma de implantação e à capacidade de sustentação econômica desta atividade pela sociedade. É neste contexto que se construiu a metodologia de quantificação de benefícios econômicos da despoluição hídrica através do parâmetro  $Z$ .

O parâmetro  $Z$  é quantificado levando em consideração três aspectos: i) a eficiência da medida de despoluição hídrica proposta, através do grau de redução da concentração dos poluentes ( $\Delta C$ ); ii) o trecho do rio beneficiado pelo impacto da despoluição hídrica, através da consideração da importância relativa dos usos dos recursos hídricos do trecho em questão (peso da seção de controle) e iii) a importância relativa dos parâmetros de qualidade da água considerados (peso do parâmetro de qualidade da água), estabelecendo assim quais parâmetros são prioritários em termos de sua recuperação. Vale destacar que a importância relativa dos usos dos recursos hídricos e dos parâmetros de qualidade da água deve ser definida pelos representantes da sociedade que integram o Comitê da Bacia Hidrográfica em questão. Um aspecto conceitual relevante de concepção matemática do mencionado parâmetro é a sua flexibilidade de adicionar mais atributos dos que aqui testados. Claramente, reflete um grande potencial de evolução para sua aplicação. Uma estratégia potencial é de aplicação dentro do contexto da análise de multi-critérios.

Com o parâmetro  $Z$  quantificado é possível avaliar a que distância, em termos de benefício, um determinado cenário de medidas de despoluição hídrica está em relação ao **cenário ideal**. No estudo de caso apresentado, foi possível também quantificar a relação entre o parâmetro  $Z$  e os custos de implantação das medidas de despoluição hídrica. Esta relação poderá contribuir significativamente na proposição das metas progressivas de enquadramento e na construção de um Plano de Despoluição Hídrica da bacia hidrográfica, segundo a vocação da bacia hidrográfica e as restrições orçamentárias.

## DEDICATÓRIA (*in memoriam*)

Este artigo é dedicado ao grande amigo e Professor Fabio Ramos, idealizador deste trabalho e pelo reconhecimento de seu importante papel na construção e na partilha de seus conhecimentos e de suas experiências nas áreas de recursos hídricos e energia.

## AGRADECIMENTOS

Esta pesquisa é fruto do apoio de diversas instituições que direta ou indiretamente contribuíram para sua execução, a saber: SUDERHSA, FINEP, CT-Hidro, CNPq.

## Referências

- AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS (Brasil). 2003. **Programa Despoluição de Bacias Hidrográficas**. Brasília.
- FERNANDES, C.V.S.; MARIN, M.C.F.C.; BAUMLE, A.M.B.; GROXKO, P.G.; MACHADO, E.S. 2005. **Análise de sustentabilidade econômica e ambiental de metas de despoluição hídrica: relatório final do Projeto Iguaçu**. Curitiba: Universidade Federal do Paraná, Programa Engenharia de Recursos Hídricos e Ambiental.
- MARIN, M.C.F.C. 2001. **Análise de benefício econômico em despoluição hídrica como instrumento de suporte à tomada de decisões em gestão de recursos hídricos**. 240 f. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal do Paraná. Setor de Ciências Exatas. Curso de Pós-Graduação em Engenharia Hidráulica.
- PROGRAMA DE SANEAMENTO AMBIENTAL DA REGIÃO METROPOLITANA DE CURITIBA. 1991. **Detalhamento dos componentes e sub componentes**. Curitiba.
- RAMOS, F.; MARIN, M.C.F.C. 2000. **Metodologia de avaliação de benefícios de medidas de despoluição hídrica**. Curitiba: Suderhsa. 30 p.
- SUPERINTENDÊNCIA DE DESENVOLVIMENTO DE RECURSOS HÍDRICOS E SANEAMENTO (Paraná). 1999. **Cadastro de usuários dos recursos hídricos da região metropolitana de Curitiba**. Curitiba: Montgomery Watson Brasil. Disponível em: <<http://www.pr.gov.br/meioambiente/Suderhsa>>.
- SUPERINTENDÊNCIA DE DESENVOLVIMENTO DE RECURSOS HÍDRICOS E SANEAMENTO (Paraná). 2000. **Plano de despoluição hídrica da bacia do Alto Iguaçu**. Curitiba.
- SUPERINTENDÊNCIA DE DESENVOLVIMENTO DE RECURSOS HÍDRICOS E SANEAMENTO (Paraná). 2003. **Projeto experimental para análise de outorgas**. Curitiba: Companhia Brasileira de Projetos e Empreendimentos. Disponível em: <<http://www.pr.gov.br/meio-ambiente/Suderhsa>>.
- SUPERINTENDÊNCIA DOS RECURSOS HÍDRICOS E MEIO AMBIENTE (Paraná). 1995. Portaria SUREHMA n. 20 de 12 de maio de 1992. Enquadrar os cursos d'água da Bacia do Alto Iguaçu de domínio do estado do Paraná. In: PARANÁ. Secretaria Municipal de Meio Ambiente. **Coletânea de legislação ambiental**. Curitiba: EAP.

**Maria Cristina Frisch Carvalho Marin** Aluna do curso de doutorado – Departamento de Hidráulica e Saneamento – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo – Brasil ([crismarin.dhs@ufpr.br](mailto:crismarin.dhs@ufpr.br))

**Monica Ferreira do Amaral Porto** Professora Titular – Departamento de Hidráulica e Saneamento – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo – Brasil ([mporto@usp.br](mailto:mporto@usp.br))

**Fabio Ramos** Professor – Departamento de Hidráulica e Saneamento – Universidade Federal do Paraná – Brasil

**Cristovão Vicente Scapulatempo Fernandes** Professor Adjunto – Departamento de Hidráulica e Saneamento – Universidade Federal do Paraná – Brasil ([cris.dhs@ufpr.br](mailto:cris.dhs@ufpr.br))