

## Proposição de Metodologia para a Avaliação dos Efeitos da Urbanização nos Corpos de Água

**Leonardo Mitre Alvim de Castro**

Agência Nacional de Águas – ANA  
mitre@ana.gov.br

**Márcio Benedito Baptista**

Departamento de Engenharia Hidráulica e Recursos Hídricos – EE-UFMG  
marcio.baptista@ehr.ufmg.br

**Sylvie Barraud**

Laboratoire de Génie Civil et d'Ingénierie Environnementale – LGCIE  
Institut National des Sciences Appliquées de Lyon – INSA/Lyon  
sylvie.barraud@insa-lyon.fr

Recebido : 05/11/08 - revisado : 05/09/09 - aceito : 01/12/09

---

### RESUMO

*O desenvolvimento urbano, com a implantação das estruturas necessárias à captação de águas para abastecimento público, drenagem urbana e coleta e lançamento de efluentes, pode causar modificações sensíveis no ciclo hidrológico em sua área de influência. Esses efeitos podem tratar de aspectos concernentes à quantidade de água, em função das vazões captadas ou da modificação das condições de infiltração, à qualidade, quando se referirem aos efluentes gerados pelo meio urbano ou podem versar, ainda, sobre o regime dos corpos de água, em função das alterações do desenvolvimento temporal dos hidrogramas acarretadas pelos sistemas de drenagem.*

*Este artigo apresenta proposição de metodologia consolidada para a avaliação dos efeitos da urbanização na quantidade, qualidade e regime dos corpos de água. A metodologia fundada no uso de indicadores e métodos de análise multicritério, objetiva proporcionar a análise global do desenvolvimento urbano.*

*Uma vez aplicada sistemática de análise crítica, a metodologia foi avaliada e ajustada, sendo considerada adequada para utilização corrente tendo em vista a abrangência e a facilidade de determinação dos indicadores propostos, bem como a aplicabilidade do procedimento multicriterial pelos técnicos de órgãos gestores, apresentando resultados significativos para a análise e decisão quanto à possibilidade de implantação de empreendimentos de desenvolvimento urbano.*

*Palavras-chave: drenagem urbana, indicadores, gestão de recursos hídricos.*

---

### INTRODUÇÃO

Diversos estudos têm sido realizados nos últimos anos visando a caracterização dos efeitos da urbanização nos corpos de água em sua área de influência.

De forma geral, esses estudos têm mostrado que o desenvolvimento urbano provoca alterações na quantidade, qualidade e regime dos corpos de água em meio urbano, conforme apresentado na Figura 1.

Alguns estudos como os de Silveira (2000), Campana e Tucci (2000), Detwiler (1970), Changnon (1976) e US-EPA (1999) tratam dos aspectos

quantitativos do ciclo hidrológico alterados pela urbanização.

No que se refere às alterações na qualidade, as principais fontes de poluição em meio urbano são, além do esgotamento sanitário, a circulação de veículos, as indústrias, os dejetos de animais, os resíduos sólidos, os canteiros de obras, a erosão dos solos, a vegetação e a poluição atmosférica.

Especificamente sobre a caracterização da qualidade das águas pluviais, os principais estudos foram realizados nos Estados Unidos e Europa, podendo ser citados: Maglionico e Pollicino (2004), Chebbo *et al.* (1995), Chocat (1997) e US-EPA (1999) e Rossi (1998), sendo que os dois últimos apresentam a concentração média de alguns parâ-

metros poluentes nas águas pluviais dos Estados Unidos e Suíça, respectivamente. Seus estudos mostraram valores consideráveis de sólidos em suspensão e DBO, com altos coeficientes de variação.

Em síntese, Baptista *et al.* (2005a) caracterizam, de forma geral, a poluição das águas urbanas:

- As cargas médias anuais provenientes de sistemas de esgotamento sanitário são, em geral, superiores àquelas de origem pluvial para sólidos totais, DBO, DQO e NTK;
- As cargas de origem pluvial são superiores às de esgotamento sanitário em escala horária de tempo, notadamente quanto aos metais pesados e sólidos totais.

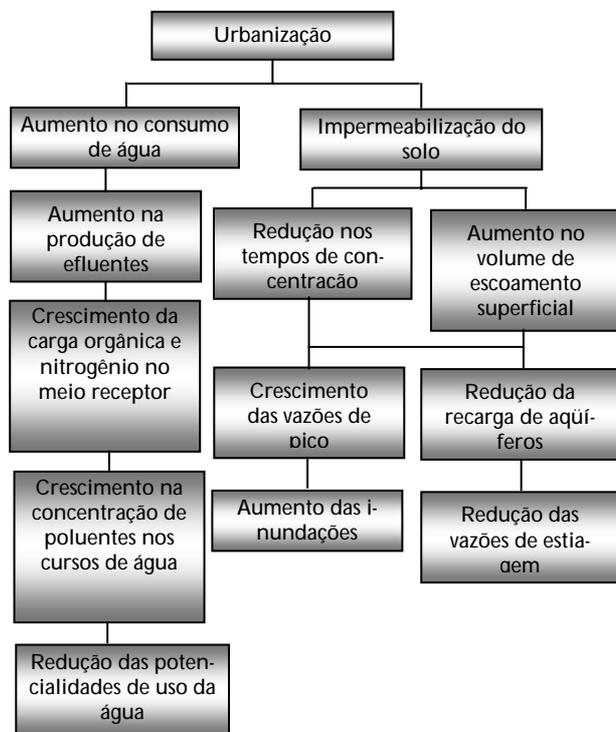


Figura 1 – Impactos da urbanização nos corpos de água

As técnicas escolhidas para a drenagem urbana em determinada área também podem interferir nos corpos de água em sua área de influência, notadamente no seu regime de escoamento. Nesse sentido, normalmente, os sistemas clássicos tendem a ampliar os efeitos da urbanização nos corpos de água, enquanto as técnicas compensatórias de drenagem têm sido desenvolvidas de forma a neutralizá-los.

Quanto às funções e características dessas técnicas, podem ser verificados diversos estudos na Europa: Azzout *et al.* (1994), Butler e Davies (2000), Daywater (2003) e Dechesne (2002); nos Estados Unidos: Urbonas e Stahre (1993) e US-EPA (1999); e no Brasil: Baptista *et al.* (2005a), Souza (2002), Araújo *et al.* (2000) e Milograna (2001). Castro (2007) apresenta uma síntese das técnicas compensatórias de drenagem urbana e seus efeitos na qualidade, quantidade e regime dos corpos de água na área urbana.

Conforme o tipo de urbanização e a técnica de drenagem escolhida, podem ser esperados diferentes impactos nos corpos de água. Esses impactos podem ser benéficos ou prejudiciais, indicando, no segundo caso, aumento de inundações e problemas relacionados à redução das potencialidades de uso da água.

O presente artigo apresenta os resultados de um estudo de doutorado em que foi proposta uma metodologia para a avaliação dos efeitos da urbanização nos corpos de água.

Essa metodologia foi validada com base em sistemática de análise crítica, baseada em comparação de sua aplicação com aquelas utilizadas atualmente, consulta a especialistas, estudos de caso para áreas já urbanizadas e ainda em projeto, comparação dos resultados obtidos por outros especialistas, comparação com resultados de outros estudos de avaliação de alternativas de implantação de sistemas de drenagem, bem como a avaliação da possibilidade de aplicação da metodologia para outros fins. A sistemática de análise crítica e seus resultados completos são apresentados em Castro (2007).

Os dois estudos de caso realizados trataram de áreas em situações de projeto distintas. O primeiro tratou do loteamento “Vale dos Cristais”, localizado na Região Metropolitana de Belo Horizonte. Trata-se de uma área na situação natural com uma alternativa de projeto de urbanização em um condomínio aplicando sistemas compensatórios de drenagem. As informações originais do projeto são apresentadas em CONSOL (2004) e Baptista *et al.* (2005b). O estudo de caso é apresentado na íntegra em Castro (2007) e em outro artigo dos mesmos autores nesta publicação. Nesse mesmo estudo a metodologia foi aplicada, ainda, por três outros doutorandos de universidades distintas para comparação de resultados.

O segundo estudo de caso considerou uma área já urbanizada da cidade de Goiânia, com três alternativas de sistemas de drenagem para a situação futura. Nesse caso, Milograna (2001) desenvolveu três cenários futuros considerando um sistema clás-

sico de drenagem, bacias de detenção em áreas públicas e bacias de detenção na saída de cada parcela. Nessa situação puderam ser comparadas as alternativas de projeto entre si e os resultados foram cotejados com aqueles obtidos por meio de outras metodologias propostas em outros estudos. Os resultados completos da avaliação do estudo de caso são apresentados em Castro (2007).

A partir dos próximos itens, é apresentada a metodologia já validada e consolidada a partir dos resultados da análise crítica realizada.

## METODOLOGIA PROPOSTA

A metodologia proposta é baseada no cálculo de oito indicadores para a avaliação das alterações na quantidade, qualidade e regime dos corpos de água.

A Figura 2 apresenta o esquema da metodologia proposta, que será apresentada, a seguir, em detalhe.

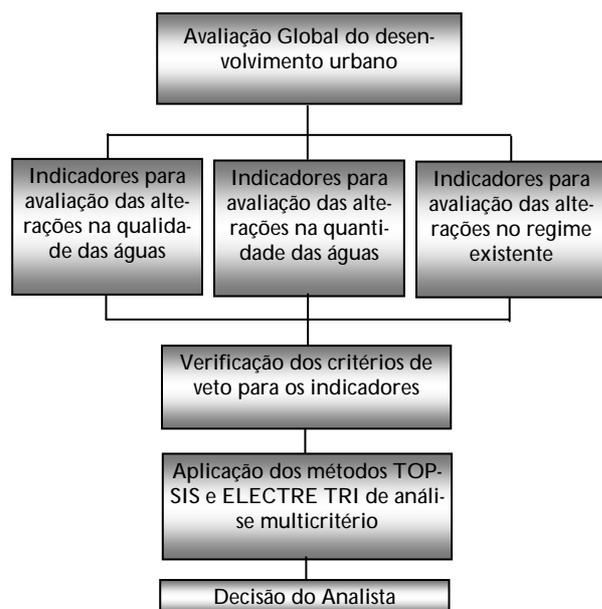


Figura 2 – Esquema simplificado da metodologia proposta

A primeira etapa trata do cálculo dos indicadores, que foram propostos com base em expressões matemáticas, com resultados variando de 0 a 1, de forma a facilitar a sua compreensão e a aplicação de métodos de análise multicritério. Esses indicadores são verificados quanto a critérios individuais de veto e, posteriormente, são aplicados dois métodos multicritério para a sua agregação. Com base nos resultados dessa análise e na avaliação quanto aos

critérios de veto, pode ser realizada a decisão do analista quanto aos efeitos provocados pela urbanização nos corpos de água.

## Indicadores Propostos

### Avaliação das alterações na quantidade

O primeiro indicador proposto ( $I_{qt1}$ ) faz a comparação do volume de infiltração de projeto em relação à situação natural ou atual, caso a área esteja, inicialmente em situação natural ou já urbanizada. Considerando a área, inicialmente, em seu estado natural, a melhor situação ocorrerá caso o volume de infiltração médio anual de projeto ( $V_{inf\_med}$ ) seja semelhante ao volume de infiltração em sua situação natural ( $V_{inf\_nat}$ ). Com essa idéia, o cálculo do indicador foi proposto da seguinte forma:

- Se  $V_{inf\_med} = 0$ ;  $I_{qt1} = 0$ .
- Se  $V_{inf\_med} = V_{inf\_nat}$ ;  $I_{qt1} = 1$ .
- Se  $V_{inf\_med} < V_{inf\_nat}$ ; utiliza-se a relação entre os dois termos, ou seja:

$$I_{qt1} = \frac{V_{inf\_med}}{V_{inf\_nat}} \quad (1)$$

Caso o  $V_{inf\_med} > V_{inf\_nat}$ , são previstas duas situações. Se o aquífero na área urbanizada tiver seu nível máximo a uma profundidade mínima de 1,0m, considera-se não ser vulnerável à infiltração de grandes volumes de água pluvial. Nesse caso, o indicador mantém o valor unitário. Nos outros casos, o aquífero pode ser considerado vulnerável à poluição quando da infiltração de volumes superiores ao natural. Dessa forma, o valor do indicador  $I_{qt1}$  cai de forma direta, até o valor 0,5, na situação em que 70% do volume total precipitado na área é infiltrado.

A Figura 3 apresenta os resultados possíveis do indicador, sendo,  $V_{prec\_med}$  o volume total correspondente à precipitação média anual na área de projeto ( $m^3$ ).

O segundo indicador ( $I_{qt2}$ ) trata da comparação entre as vazões mínimas escoadas a jusante da área de projeto ( $Q_{min}$ ) e as demandas para usos consuntivos ( $Q_{dem}$ ) e vazão mínima remanescente ( $Q_{rem\_min}$ ). Seu objetivo é o de analisar o projeto quanto à disponibilidade de vazões mínimas para atendimento aos usos consuntivos na área e, ainda, para manutenção da vazão remanescente mínima, incluindo as demandas de vazão ecológica e aquela comprometida para outros usos a jusante.

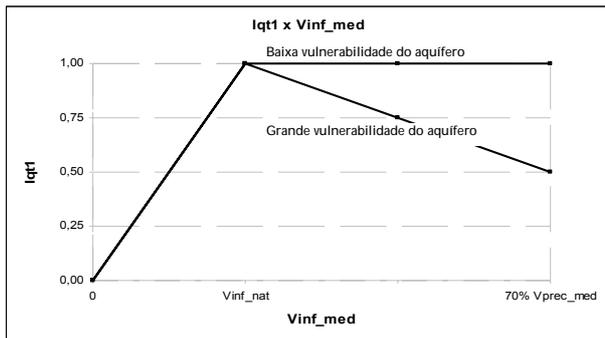


Figura 3 – Valores previstos para  $I_{qt1}$

Seu cálculo é realizado com as seguintes expressões:

- Se  $Q_{min} \geq Q_{dem} + Q_{rem\_min}$ ;  $I_{qt2} = 1,0$ .
- Se  $Q_{min} < Q_{rem\_min}$ ;  $I_{qt2} = 0$ .
- Na situação intermediária, em que
- $Q_{dem} + Q_{rem\_min} > Q_{min} \geq Q_{rem\_min}$ , utiliza-se a seguinte expressão:

$$I_{qt2} = 1 - \frac{(Q_{dem} + Q_{rem\_min}) - Q_{min}}{Q_{dem}} \quad (2)$$

A Figura 4 apresenta os resultados para este indicador.

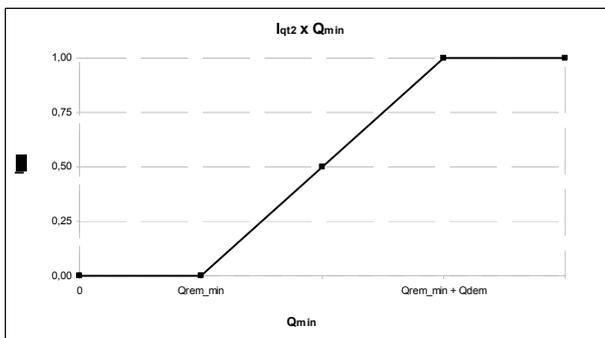


Figura 4 – Valores previstos para  $I_{qt2}$

A análise das expressões propostas e da Figura 4 mostra que o indicador assume valor máximo quando a vazão mínima ( $Q_{min}$ ) for superior à soma das vazões de demandas ( $Q_{dem}$ ) com a remanescente mínima ( $Q_{rem\_min}$ ). Quando a vazão  $Q_{min}$  for inferior à vazão  $Q_{rem\_min}$  significa que a vazão mínima escoada a jusante é inferior à vazão remanescente mínima considerada pelo órgão gestor de recursos hídricos, devendo, nesse caso, o indicador  $I_{qt2}$  assumir o valor igual a 0.

O último indicador proposto para a avaliação dos aspectos quantitativos ( $I_{qt3}$ ) trata da verificação da previsão de um volume de águas de reúso ou recuperação de águas na área de projeto ( $V_{re}$ ) em relação ao volume médio anual de demanda para os usos múltiplos previstos na área de projeto ( $V_{tot\_dem}$ ).

O re-uso ou recuperação de águas pode ocorrer das seguintes formas:

- Recuperação e utilização de águas pluviais diretamente em nível de parcela, para fins menos nobres, como rega de jardim ou limpeza de pátios ou mesmo seu tratamento para utilização nos usos domésticos;
- Re-uso de águas tratadas de esgotamento sanitário para fins diversos nos casos de áreas industriais;
- Re-uso de águas, tratadas ou não, advindas de usos domiciliares para fins menos nobres como limpeza de pátios, lavagem de veículos, reserva de incêndio ou rega de jardim;
- Re-uso, pela prefeitura ou pelo responsável pela área em projeto, de águas de esgotamento sanitário tratadas para fins de limpeza de áreas públicas como praças, parques ou áreas de lazer.

Esse indicador apresenta, na realidade, uma bonificação para o desenvolvimento urbano que prevê re-uso ou recuperação de águas. Dessa forma, os valores previstos em seu cálculo variam de 0,5 a 1,0, aplicando-se a seguinte expressão:

$$I_{qt3} = -0,50 \cdot \left( \frac{V_{re}}{V_{tot\_dem}} \right)^2 + \left( \frac{V_{re}}{V_{tot\_dem}} \right) + 0,50 \quad (3)$$

Os resultados possíveis para o indicador são mostrados na Figura 5.

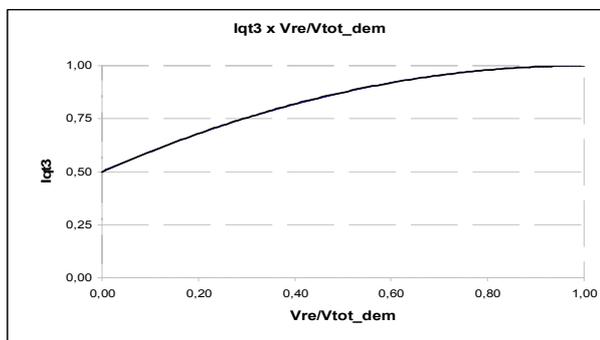


Figura 5 – Valores previstos para  $I_{qt3}$

**Avaliação das alterações no regime existente dos corpos de água**

O primeiro indicador proposto ( $I_{r1}$ ) avalia a vazão de pico a jusante da área de projeto ( $Q_{pico\_alt}$ ) em relação à situação natural e à vazão que poderia causar inundação em área a jusante. Para o cálculo desse indicador foram consideradas duas situações. A primeira ocorre na maior parte dos casos, em que a vazão que pode causar inundação em área a jusante ( $Q_{inund}$ ) é superior à vazão de pico da área em sua situação natural ( $Q_{pico\_nat}$ ). Nesse caso, o indicador é calculado da seguinte forma:

Se  $Q_{pico\_alt} = 0$ ;  $I_{r1} = 0,50$   
 Se  $Q_{pico\_alt} < Q_{pico\_nat}$ ; utiliza-se a expressão

$$I_{r1} = 1 - \frac{Q_{pico\_nat} - Q_{pico\_alt}}{2 \cdot Q_{pico\_nat}} \quad (4)$$

Se  $Q_{pico\_alt} = Q_{pico\_nat}$ ; considera-se o valor máximo para o indicador.

Se  $Q_{pico\_nat} < Q_{pico\_alt} \leq Q_{inund}$ ; aplica-se:

$$I_{r1} = 1 - \frac{Q_{pico\_alt} - Q_{pico\_nat}}{2 \cdot (Q_{inund} - Q_{pico\_nat})} \quad (5)$$

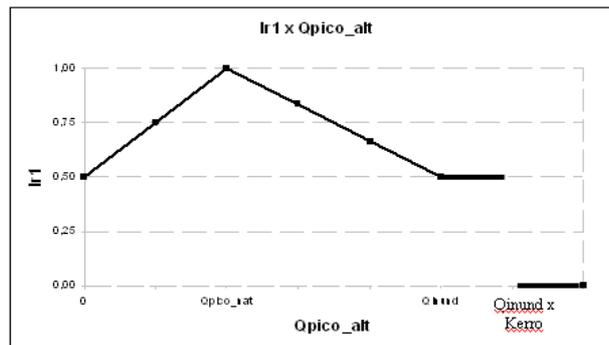
Se  $Q_{inund} < Q_{pico\_alt} \leq Q_{inund} \times K_{erro}$ ; tem-se  $I_{r1} = 0,50$ .

Se  $Q_{pico\_alt} > Q_{inund} \times K_{erro}$ ;  $I_{r1} = 0$ .

Em que  $K_{erro}$  é um coeficiente referente a uma tolerância nos valores das vazões de cheia, a ser estimado pelo analista. O motivo do uso desse coeficiente é para que haja uma tolerância no caso de valores de vazões de pico estimadas com valores pouco superiores às vazões de inundação, de forma a evitar grandes variações no indicador, de 0,5 a 0.

Os valores previstos para este indicador constam da Figura 6.

Como pode ser verificado na Figura 6, o valor máximo do indicador ocorrerá quando a vazão de jusante da área de projeto for igual à natural e, ainda assim, inferior à vazão que poderia causar inundação em área a jusante.



**Figura 6 – Valores previstos para  $I_{r1}$  quando  $Q_{inund} > Q_{pico\_nat}$**

A segunda situação possível para o cálculo desse indicador ocorre quando a vazão  $Q_{inund} \leq Q_{pico\_nat}$ . Essa situação não deveria, em princípio, ocorrer, mas podem ser verificados casos em áreas já urbanizadas. Nesse caso, a idéia para o indicador é que o empreendimento a ser proposto não deve incrementar as inundações a jusante. Dessa forma, a vazão limite máxima a jusante deve ser a vazão de pico da área em sua situação natural. Utilizando os mesmos parâmetros já apresentados, propõe-se o cálculo da seguinte forma:

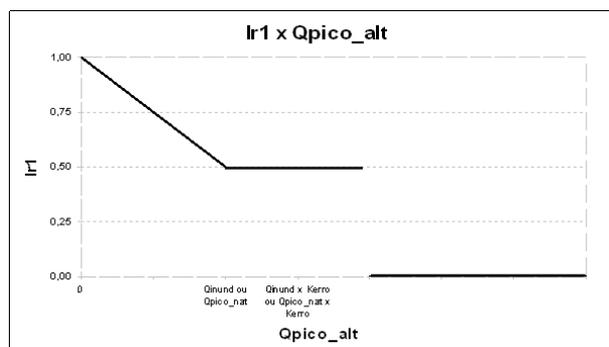
Se  $Q_{pico\_alt} = 0$ ;  $I_{r1} = 1,0$ .

$$\text{Se } Q_{pico\_alt} \leq Q_{pico\_nat}; I_{r1} = 1 - \frac{Q_{pico\_alt}}{2 \cdot Q_{pico\_nat}} \quad (6)$$

Se  $Q_{pico\_nat} < Q_{pico\_alt} \leq Q_{pico\_nat} \times K_{erro}$ ; tem-se  $I_{r1} = 0,50$ .

Se  $Q_{pico\_alt} > Q_{pico\_nat} \times K_{erro}$ ;  $I_{r1} = 0$ .

A Figura 7 apresenta os resultados possíveis para este indicador.



**Figura 7 - Valores previstos para  $I_{r1}$  quando  $Q_{inund} \leq Q_{pico\_nat}$**

Além de não incrementar processos de inundação a jusante, o desenvolvimento urbano deve proteger a área de projeto quanto às inundações previstas para determinado período de retorno. Para isso, as estruturas previstas devem ser adequadamente dimensionadas, conforme um período de retorno desejável ( $T_{ret\_des}$ ). Nesse sentido, o segundo indicador proposto ( $I_{r2}$ ) trata da verificação do período de retorno previsto para inundações dentro da área de projeto ( $T_{ret\_proj}$ ). A proposição para seu cálculo é a que segue:

$$\begin{aligned} &\text{Se } T_{ret\_proj} \geq T_{ret\_des}; I_{r2} = 1,0. \\ &\text{Se } T_{ret\_proj} < T_{ret\_des}; I_{r2} = \frac{T_{ret\_proj}}{T_{ret\_des}} \end{aligned} \quad (7)$$

Os valores obtidos para este indicador são apresentados na Figura 8.

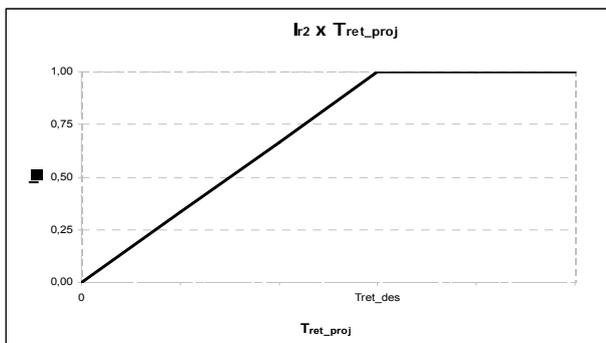


Figura 8 – Valores previstos para  $I_{r2}$

### Avaliação das alterações na qualidade

O primeiro indicador proposto para avaliação das alterações na qualidade das águas ( $I_{qL1}$ ) trata da verificação do atendimento ao padrão de lançamento das águas de esgotamento sanitário. Entre os efeitos previstos do desenvolvimento urbano está a necessidade de utilização de águas superficiais ou subterrâneas para abastecimento dos seus habitantes. Após esse uso, as águas coletadas pelo sistema de esgotamento sanitário têm seu lançamento final em corpos de água superficiais.

Propõe-se, para esse indicador, a verificação das águas de esgotamento sanitário quanto à concentração do parâmetro Demanda Bioquímica de Oxigênio – DBO no efluente tratado ( $C_{DBO}$ ) e sua relação com o limite legal permitido de lançamento no corpo receptor ( $C_{perm\_DBO}$ ) e o limite de DBO em sua situação natural ( $C_{DBO\_nat}$ ). A DBO nos efluentes

a serem lançados deve ser estimada em função da previsão de sistemas de tratamento de efluentes e sua eficiência média. Dessa forma, são propostos os seguintes cálculos.

Se  $C_{DBO} \leq C_{DBO\_nat}$ ;  $I_{qL1} = 1,0$ .  
 Se  $C_{DBO\_nat} < C_{DBO} < C_{perm\_DBO}$ ; tem-se:

$$I_{qL1} = 0,5 - \frac{(C_{DBO} - C_{perm\_DBO})}{2 \cdot C_{perm\_DBO}} \quad (8)$$

Se  $C_{DBO} = C_{perm\_DBO}$ ; considera-se o valor médio para esse indicador, ou seja,  $I_{qL1} = 0,5$ .

Se  $C_{perm\_DBO} < C_{DBO} \leq K_{erro\_DBO} \times C_{perm\_DBO}$ ; tem-se  $I_{qL1} = 0,5$ .

Se  $C_{DBO} > K_{erro\_DBO} \times C_{perm\_DBO}$ ;  $I_{qL1} = 0$ .

Em que  $K_{erro\_DBO}$  é um coeficiente referente à tolerância ou ao erro da estimativa de  $DBO_{5,20}$  no efluente a ser lançado.

O gráfico da Figura 9 apresenta os resultados possíveis para este indicador.

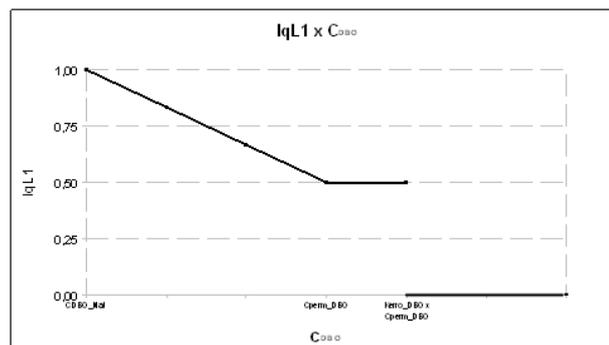


Figura 9 – Valores previstos para  $I_{qL1}$

O segundo indicador ( $I_{qL2}$ ) trata da verificação quanto à disponibilidade de vazão de diluição para as águas de esgotamento sanitário.

Para isso, deve ser, inicialmente, estimada a vazão de diluição necessária para as águas de esgotamento sanitário de forma a manter a classe de enquadramento do corpo de água receptor ( $Q_{dil}$ ). O cálculo dessa vazão pode ser realizado por meio da abordagem apresentada por Kelman (1997):

$$Q_{dil} = Q_{efl} \cdot \frac{(C_{efl} - C_{perm\_man})}{(C_{perm\_man} - C_{man\_nat})} \quad (9)$$

Em que:

$Q_{\text{efl}}$  = Vazão do efluente a ser lançado nos corpos de água ( $\text{m}^3/\text{s}$ );  
 $C_{\text{efl}}$  = Concentração do poluente considerado no efluente lançado ( $\text{mg}/\text{L}$ );  
 $C_{\text{perm\_man}}$  = Concentração do poluente considerado permitida no manancial, conforme enquadramento do curso de água e parâmetros estabelecidos na Resolução CONAMA n.º357/2005 ( $\text{mg}/\text{L}$ ).  
 $C_{\text{man\_nat}}$  = Concentração natural do poluente considerado no manancial ( $\text{mg}/\text{L}$ ).

Posteriormente, deve ser verificada a disponibilidade hídrica nos mananciais da região para a vazão de diluição calculada como necessária. Essa verificação deve ser realizada com base em vazões de referência mínimas desses cursos de água, já utilizadas para os critérios de outorga para captações de águas superficiais. Com base nesses parâmetros, a obtenção desse indicador deve ser realizada da seguinte forma:

Se  $Q_{\text{dil\_DBO}} = 0$ ;  $I_{\text{qL2}} = 1,0$ ;  
 Se  $Q_{\text{dil\_DBO}} \leq Q_{\text{rem\_min}}$ ; tem-se:

$$I_{\text{qL2}} = 0,5 - \frac{(Q_{\text{dil\_DBO}} - Q_{\text{rem\_min}})}{2 \cdot Q_{\text{rem\_min}}} \quad (10)$$

Se  $Q_{\text{dil\_DBO}} = Q_{\text{rem\_min}}$ ; considera-se o valor médio para o indicador, ou seja:  $I_{\text{qL2}} = 0,5$ ;

Se  $Q_{\text{rem\_min}} < Q_{\text{dil\_DBO}} \leq K_{\text{erro\_DBO}} \times Q_{\text{rem\_min}}$ ; tem-se:  $I_{\text{qL2}} = 0,5$ ;

Se  $Q_{\text{dil\_DBO}} > K_{\text{erro\_DBO}} \times Q_{\text{rem\_min}}$ ;  $I_{\text{qL2}} = 0$

Em que:

$Q_{\text{dil\_DBO}}$  = Vazão de diluição necessária para manter o curso de água em sua classe de enquadramento após o lançamento do esgotamento sanitário da área urbanizada, considerando-se o parâmetro DBO ( $\text{m}^3/\text{s}$ ).

$Q_{\text{rem\_min}}$  = Vazão mínima remanescente, considerando a vazão ecológica de referência utilizada pela autoridade outorgante e as demandas comprometidas a montante e a jusante da área de projeto ( $\text{m}^3/\text{s}$ ).

$K_{\text{erro\_DBO}}$  = Coeficiente referente à tolerância ou ao erro da estimativa de DBO no efluente a ser lançado (Adimensional).

Os resultados possíveis para o indicador em relação à vazão de diluição são apresentados na Figura 10.

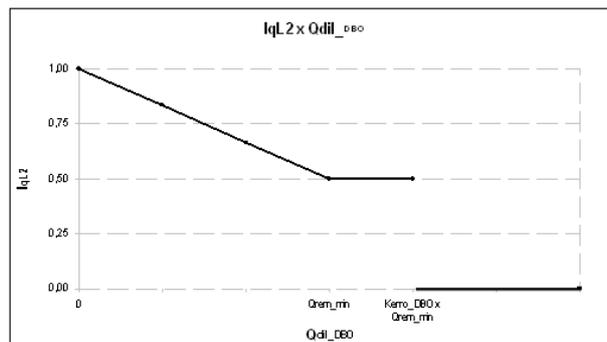


Figura 10 – Valores previstos para  $I_{\text{qL2}}$

Conforme pode ser verificado na Figura 10, o valor máximo para o indicador ocorrerá quando não houver necessidade de vazão de diluição para o efluente doméstico da área urbanizada em análise. Caso a vazão de diluição necessária corresponda exatamente à vazão mínima remanescente dos corpos a serem utilizados como receptores, o indicador assume o valor 0,5. Para valores de vazão de diluição superiores à vazão de referência mínima, considerando-se a tolerância do valor estimado de DBO, o valor previsto para o indicador é nulo.

Finalmente, o terceiro indicador proposto ( $I_{\text{qL3}}$ ) para avaliar os aspectos qualitativos trata do percentual médio de remoção de poluentes pelo sistema de drenagem. Inicialmente foi pensada a possibilidade de verificação de vazão de diluição para o lançamento das águas de escoamento pluvial. Entretanto, em função da ausência de informações que pudessem auxiliar a estimativa da qualidade das águas pluviais no momento de projeto, a idéia desse indicador teve de ser alterada.

A remoção média de poluentes constantes nas águas pluviais foi considerada como 50% no caso de técnicas que prevêm seu armazenamento e detenção, 100% para as técnicas de infiltração, sendo retida toda a poluição nas camadas superficiais do solo, e 70% para as técnicas que utilizam de forma conjunta o armazenamento e a infiltração das águas pluviais. Por fim, os sistemas clássicos de drenagem, correspondentes às redes e galerias transportam, diretamente, as águas pluviais para seu ponto de lançamento nos corpos de água superficiais, não proporcionando tratamento algum dos poluentes. Esses valores são médios e foram estimados conforme extensa bibliografia apresentada em Castro (2007). Dessa forma, para cálculo deste indicador, propõe-se a seguinte expressão:

$$I_{qL5} = \frac{(A_{\text{armaz}} \times 0,5) + (A_{\text{armaz+infiltr}} \times 0,7) + (A_{\text{inf}} \times 1,0)}{A_{\text{Total}}} \quad (11)$$

Em que:

$A_{\text{armaz}}$  = Área de projeto cuja drenagem é realizada por meio de técnicas que prevêm o armazenamento/detenção das águas pluviais;

$A_{\text{armaz+infiltr}}$  = Área de projeto cuja drenagem é realizada por meio de técnicas que prevêm a atuação conjunta da detenção e infiltração das águas pluviais;

$A_{\text{inf}}$  = Área de projeto cuja drenagem é realizada por meio de técnicas que prevêm a infiltração das águas pluviais;

$A_{\text{Total}}$  = Área total do projeto.

### Análise Multicritério

Em estudos em que são utilizados indicadores, há a necessidade da agregação, objetivando um resultado de análise global. Para isso, no presente estudo, foram aplicados dois métodos multicritério, possíveis de agregar indicadores com interesses divergentes e pesos variáveis em função da importância de cada aspecto na análise global. Foram escolhidos os seguintes métodos:

- TOPSIS – *Technique for Order Preference by Similarity to Ideal Solution* (Hwang e Yoon, 1981);
- Electre TRI - *Elimination Et Choix Traduisant Réalité* (Yu, 1992).

A escolha dos métodos ocorreu em função do interesse efetivo de aplicação de duas famílias diferentes de forma a poder ter seus resultados comparados, da experiência existente entre os principais trabalhos desenvolvidos na área e da viabilidade da obtenção de meios para a sua aplicação.

O TOPSIS faz a avaliação de alternativas de projeto por meio da consideração da distância de cada alternativa à solução ideal e à inversa, denominada *anti-ideal*. Para isso, são definidas as soluções ideal e *anti-ideal* para cada indicador, com vistas à comparação individual e global do projeto.

O Electre TRI realiza a triagem de alternativas de projeto, determinando aquelas que atendem a requisitos apresentados pelo analista. Dessa forma, o analista pode apresentar, como requisitos, os limites legais estabelecidos para cada indicador e a alternativa de projeto pode ser avaliada dentro dessas faixas.

Tratam-se de dois métodos de famílias distintas e cujos resultados são apresentados de formas diferentes. A análise de sua aplicação em estudos de caso mostrou que sua utilização conjunta pode indicar resultados mais claros e objetivos para o decisor. Dessa forma, a metodologia proposta considera a aplicação dos dois métodos de forma conjunta nas análises, que levarão à indicação da decisão a ser tomada.

A ponderação adotada entre os indicadores deve ser atribuída pelo analista e pode levar à consideração de determinado projeto como aceitável ou não, em função de privilegiar aspectos em que ele tem melhor pontuação. Castro (2007) realizou consulta a técnicos de órgãos gestores de recursos hídricos e pesquisadores para a atribuição dos pesos. Quanto aos outros parâmetros do TOPSIS e do Electre TRI, também devem ser atribuídos pelo analista, em função de sua experiência e interesse na análise realizada.

### Decisão - Definição dos resultados possíveis

A aplicação dos indicadores nos métodos de análise multicritério objetiva a geração de um resultado que será usado como subsídio à decisão quanto à aceitação do projeto de desenvolvimento urbano.

Para isso, foi proposta a utilização de uma alternativa fictícia, para efeito de comparação, cujos valores de referência para os indicadores são os médios considerados para cada critério de análise. Essa alternativa fictícia é comparada por meio da aplicação dos métodos multicritério e sua avaliação em relação a cada alternativa de projeto avaliada. Dessa forma, a consideração de um projeto como aceitável é ser realizada com base em sua análise e na comparação de seus resultados com a alternativa fictícia.

Nesse sentido, a avaliação de cada alternativa de projeto para o empreendimento é realizada de forma global, sendo cada uma delas comparada, individualmente, com a alternativa fictícia, por meio da agregação dos indicadores com os dois métodos multicritério. Esse ponto representa aspecto importante da metodologia, possibilitando a avaliação de um projeto mesmo que seja desenvolvida apenas uma alternativa de arranjo.

Após a aplicação dos métodos multicritério à alternativa avaliada e também à fictícia, podem ser observadas três situações possíveis para a decisão quanto ao projeto avaliado:

1. Alternativa é considerada aceitável;

2. Alternativa pode ser considerada aceitável, mas necessita alterações no projeto ou a mitigação de impactos;
3. Alternativa é considerada inaceitável.

A primeira situação ocorre quando a alternativa em análise tiver resultado igual ou superior à fictícia na ordenação definida pelo método multicritério e, ainda, atender, individualmente, a todos os critérios técnicos de veto, referentes às alterações de qualidade, quantidade e regime dos corpos de água. Nesse caso, em um sistema de tomada de decisão, recomenda-se a autorização dessa alternativa de projeto.

Em outra situação pode ocorrer que, na ordenação resultante do método de análise multicritério, a alternativa seja verificada superior à fictícia, mas, individualmente, não atenda a todos os critérios técnicos. Esses casos podem ser subdivididos em duas situações em função da possibilidade de alteração no projeto para que todos os critérios sejam individualmente atendidos.

Caso a alternativa de projeto possa ser alterada para atendimento a todos os critérios, ela seria considerada no segundo caso proposto. Isso significa que em um processo de tomada de decisão, ela seria aprovada com indicação de pontos em que o projeto deverá ser alterado para atendimento a todos os critérios. Ainda nesse segundo caso, o empreendimento pode propor obras para mitigar seus impactos causados nos usos múltiplos, nos usuários afetados com inundações ou nos ecossistemas.

A última situação possível refere às alternativas que forem pior classificadas em relação à alternativa fictícia. Essas alternativas seriam consideradas como inaceitáveis, devendo ser demandados novos estudos a serem realizados pelo empreendedor. Podem ser incluídas nesse caso, ainda, as alternativas que forem melhor classificadas em relação à alternativa fictícia, mas que não atenderem, individualmente, a todos os critérios e não puderem ser alteradas ou ter seus impactos mitigados.

## CONCLUSÕES E CONSIDERAÇÕES FINAIS

O presente estudo apresenta a metodologia proposta para a avaliação dos efeitos da urbanização nos corpos de água.

Para isso, foram apresentados os indicadores propostos para avaliar as alterações provocadas pelo desenvolvimento urbano na quantidade, qualidade e regime dos corpos de água. A análise crítica realiza-

da dos indicadores concluiu que permitem a consideração dos principais aspectos de interesse em uma análise global do empreendimento a ser implantado, no que se refere aos seus efeitos sobre os corpos de água.

Além disso, na mesma análise realizada, a utilização de indicadores foi concluída como relevante em função de permitir a definição de índices de veto e valores de referência considerados aceitáveis por bacia hidrográfica. Esses limites podem ser atribuídos pelos órgãos gestores de recursos hídricos ou por regulamentação específica, advinda de comitês de bacia ou conselhos de recursos hídricos (Castro, 2007).

A agregação dos indicadores foi realizada por meio de dois métodos de análise multicritério, TOPSIS e Electre TRI. A avaliação da aplicação desses dois métodos em estudos de caso concluiu pela sua pertinência, uma vez que sua formulação, compreendendo as ferramentas e os parâmetros necessários ao seu cálculo, mostrou-se viável e compreensível para uso em procedimentos correntes de órgãos gestores de recursos hídricos.

A sua aplicação em estudos de caso na análise crítica realizada foi relevante para permitir a conclusão pelo interesse da aplicação conjunta dos dois métodos, em função da maior objetividade do resultado obtido com TOPSIS poder ser complementada com a robustez daquele apresentado pelo Electre TRI, permitindo ao analista a recomendação de uma decisão mais segura.

Quanto aos três resultados possíveis para a avaliação do empreendimento, a análise realizada concluiu que indica uma flexibilidade ao órgão gestor de recursos hídricos sem, entretanto, que haja necessidade de infração quanto à legislação de recursos hídricos ou que o empreendedor cause impacto inaceitável.

Finalmente, as avaliações realizadas da metodologia verificaram a possibilidade de sua aplicação nos procedimentos de outorga correntes dos órgãos gestores de recursos hídricos e para outras finalidades como:

- Comparar diferentes projetos de desenvolvimento para a mesma área, possibilitando a escolha do melhor a ser implantado;
- Comparar projetos de desenvolvimento urbano para áreas diferentes quanto às suas interferências nos corpos de água objetivando auxiliar a tomada de decisão daquele a ser implantado;

- Comparar as interferências atuais nos recursos hídricos em uma área já urbanizada e um projeto de melhoria do desenvolvimento urbano.

## REFERÊNCIAS

- ARAÚJO, P. R.; TUCCI, C. E. M.; GOLDENFUM, J. A. Análise da eficiência dos pavimentos permeáveis na redução do escoamento superficial. pp.351-362. In: TUCCI, C. E. M. e MARQUES, D. M. L. M. (Org) **Avaliação e controle da drenagem urbana**. ABRH. Porto Alegre, RS. 558p., 2000.
- AZZOUT, Y.; BARRAUD, S.; CRES, F. N. e ALFAKIH, E. **Techniques Alternatives en Assainissement Pluvial: choix, conception, réalisation et entretien**. Technique et Documentation. Lavoisier. Paris, França. 372 p., 1994.
- BAPTISTA, M. B.; NASCIMENTO, N. O.; BARRAUD, S. **Técnicas Compensatórias em Drenagem Urbana**. ABRH. Porto Alegre, RS. 266p., 2005a.
- BAPTISTA, M. B.; CABRAL, J. R.; NASCIMENTO, N. O.; PORTELA, R. Projeto de um sistema de drenagem urbana com utilização combinada de tecnologias compensatórias. XX Congresso Nacional Del Água. Mendoza, Argentina, anais eletrônicos, 2005b.
- BUTLER, D.; DAVIES, J. W. **Urban Drainage**. Londres: St Edmundsbury Press., 489p., 2000.
- CAMPANA, N. A.; TUCCI, C. E. M. Previsão da vazão em macrobacias urbanas: arroio Dilúvio em Porto Alegre. pp. 53-78. In: TUCCI, C. E. M. e MARQUES, D. M. L. M. (Org) **Avaliação e controle da drenagem urbana**. ABRH. Porto Alegre, RS. 558p, 2000.
- CASTRO, L. M. A. Proposição de metodologia para a avaliação dos efeitos da urbanização nos corpos de água. Tese de Doutorado. UFMG. Belo Horizonte, MG. 297p., 2007.
- CHANGNON, S. A. Inadvertent weather modification. Water Research Bulletin. N.12, pp.695-718, 1976.
- CHEBBO, G.; MOUCHEL, J. M.; SAGET, A.; GOUZAILLES, M. La pollution des rejets urbains par temps de pluie: flux, nature et impacts. TSM nº11. pp796-806. 1995.
- CHOCAT, B. (Coord.) **Encyclopédie de l'hydrologie urbaine et de l'assainissement**. Lavoisier. Paris, França. 1124 p, 1997.
- CONSOL Engenheiros Consultores. Projeto de urbanização do Condomínio Vale dos Cristais. Belo Horizonte, 2004.
- DAYWATER. Report 5.1. Review of the use of stormwater BMPs in Europe. Disponível em www.daywater.org, 98p., 2003.
- DECHESNE, M. Connaissance et modélisation du fonctionnement des bassins d'infiltration d'eaux de ruissellement urbain pour l'évaluation des performances technique et environnementale sur le long terme. Tese de doutorado. INSA de Lyon. Lyon, França. 275p. + anexos, 2002.
- DETWILLER, J. Incidence possible de l'activité industrielle sur les précipitations à Paris. The urban climates, WMO Tech. Note 108. pp.361-362, 1970.
- HWANG, C.; YOON, K. Multiple attribute decision making: methods and applications survey. Springer. 1981.
- KELMAN, J. Gerenciamento de recursos hídricos: Outorga e Cobrança. Anais do XII Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos. ABRH. Vitória, ES. 1997.
- MAGLIONICO, M.; POLLICINO, F. Experimental Analysis of the build-up of pollutants on an urban road surface. Lyon, França. Novatech 2004. Vol. 1. pp.745-752, 2004.
- MILOGRANA, J. Estudo de medidas de controle de cheias em ambientes urbanos. Dissertação de Mestrado em tecnologia ambiental e recursos hídricos. Departamento de Engenharia Civil, Faculdade de Tecnologia, Universidade de Brasília. Brasília, DF. 106p., 2001.
- ROSSI, L. Qualité des eaux de ruissellement urbaines. Tese de Doutorado. Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne. Lausanne, Suíça, 313p. + anexos, 1998.
- SILVEIRA, A. L. L. Impactos hidrológicos da urbanização em Porto Alegre. pp. 153-164. In: TUCCI, C. E. M. e MARQUES, D. M. L. M. (Org) **Avaliação e controle da drenagem urbana**. ABRH. Porto Alegre, RS. 558p., 2000.
- SOUZA, V. C. B. Estudo experimental de trincheiras de infiltração no controle da geração do escoamento superficial. Tese de Doutorado. UFRGS. Porto Alegre, 127p. + anexos, 2002.
- URBONAS, B.; STAHERE, P. **Stormwater: best management, practices and detention for water quality drainage, and CSO management**. Prentice Hall. Englewood Cliffs, Estados Unidos. 449 p. 1993.
- US-EPA. Preliminary data summary of urban storm water best management practices. US Environmental Protection Agency, EPA-821-R-99-012, 214p., 1999.
- YU, W. Aide multicritère a la décision dans le cadre de la problématique du tri : concepts, méthodes et applications. Tese de Doutorado. Université Paris-Dauphine. Paris, França. 1992.

*Proposal of a Methodology to Evaluate the Effects of Urbanization on Watercourses*

**ABSTRACT**

*Urban development, requiring the implementation of water supply, drainage and sanitation systems, may cause major modifications in the hydrological cycle. These effects are related to water quantity (water demands, infiltration conditions), water quality and watercourse flow conditions.*

*This paper presents the proposed and consolidated methodology to evaluate the effects of urbanization on the quantity, quality and regime of watercourses. The methodology considers the use of indicators and multicriteria methods for the purpose of global analysis of urban development.*

*After consolidation, the methodology was considered adapted for use by government institutions for water management, due to the feasibility of indicator assessment and the applicability of the multicriteria procedure. The results also show that the methodology provides useful results to analyze and help authorize discharges from urban development.*

*Keywords: urban drainage, indicators, water resources management*