

Avaliação multicritério de sistemas de drenagem urbana

Priscilla Macedo Moura
Márcio Benedito Baptista
Sylvie Barraud

RESUMO: O processo de concepção dos sistemas de drenagem urbana após o desenvolvimento das denominadas técnicas compensatórias tornou-se mais complexo, envolvendo questões ambientais, sociais e sanitários, além dos aspectos técnicos e de custos usualmente considerados. Esta complexidade leva, cada vez mais, ao uso da análise multicritério como suporte à decisão. Neste contexto, o presente trabalho tem como objetivo a definição de indicadores econômico-financeiros e a integração destes com indicadores de desempenho, de forma a possibilitar a avaliação a priori de sistemas de drenagem urbana, constituindo assim uma ferramenta de auxílio à decisão para avaliação de alternativas de arranjos de projetos. Os indicadores de desempenho, previamente propostos, traduzem os aspectos de eficiência técnica, os impactos ambientais e a inserção social; os Índices de Custos são construídos por meio da composição dos custos de implantação, manutenção e operação das diferentes técnicas de drenagem, atualizados com base na sua vida útil. A integração dos dois tipos de indicadores, realizada por meio de um gráfico de Pareto, permite a avaliação desempenho-custo dos sistemas estudados. A metodologia foi aplicada a um estudo de caso, abrangendo ampla gama de utilização de técnicas, tendo sido realizada, em seguida, a análise de sensibilidade e robustez. Pode-se concluir, a partir do conjunto dos trabalhos desenvolvidos, que a metodologia proposta apresenta praticidade e consistência, subsidiando assim o processo decisório.

PALAVRAS-CHAVE: drenagem urbana, indicadores, análise multicritério.

ABSTRACT: The process of conceiving stormwater systems, within the framework of the best management practices, became more complex, involving not only the technical and cost aspects, but also the environmental, social and sanitary ones. Due to the complexity of conceiving the stormwater systems, the multicriteria analysis seems even more convenient as a decision making tool. In this context, the present work has the objective of defining economic-financial indicators and integrating these indicators with performance indicators, of a priori evaluation of stormwater systems, creating a decision aid tool to the choice of convenient projects alternatives. The performance indicators, previously proposed, represent technical efficiency as well as the environmental and social aspects. The cost index was obtained by the implementation, maintenance and operation costs, as well as life cycle of the studied stormwater systems.

The aggregation of these two kinds of indicators, by means of a Pareto Graph, permits the accomplishment of the performance-cost analysis of the studied systems. This methodology was applied to one case study presenting various techniques, after the case study, sensibility and robustness analyses were carried out. From the complete study, it may be concluded that the proposed methodology is useful and consistent, thus helping the decision making process.

KEY WORDS: urban drainage, indicators, multicriteria analysis.

CONTEXTO DA DRENAGEM URBANA

Ao longo da história da humanidade, sempre houve uma profunda ligação entre as cidades e os cursos d'água, sendo estes determinantes para a sua própria existência. A proximidade das aglomerações urbanas e dos rios era importante fator de desenvolvimento, na medida em que estes proviam água para abastecimento, possibilidades para despejo de resíduos, asseguravam o transporte, a energia, pro-

teção militar, etc. O risco de inundações periódicas era relativamente bem aceito até meados do século XIX, sendo considerado como “um preço a pagar” pela disponibilidade da água junto à cidade (Baptista, Barraud e Nascimento, 2005).

A intensificação do crescimento das aglomerações urbanas a partir do século XIX trouxe dificuldades e desconforto, resultantes da precariedade da infraestrutura relativa às águas pluviais e servidas. No inte-

rior das cidades, a água freqüentemente estagnava-se, uma vez que toda a evacuação das cidades se fazia pelas vias de circulação.

As condições insalubres propiciaram grandes epidemias de cólera e tifo, que assolaram a Europa nesta época. Este fato, potencializado pelos avanços científicos e preceitos positivistas, levaram ao *higienismo*, que preconizava a evacuação, para mais longe e o mais rapidamente possível, das águas de qualquer natureza presentes nas áreas urbanas. Assim, com vistas à melhoria das condições de circulação e conforto e à prevenção de doenças de veiculação hídrica, sistemas de drenagem de águas pluviais e de esgotamento sanitário foram construídos, com a canalização quase generalizada de cursos d'água em meio urbano, na forma de redes subterrâneas de condutos. No Brasil, estes princípios foram adotados efetivamente a partir do final do século XIX (Silveira, 1998), constituindo a base dos chamados “sistemas clássicos de drenagem”.

Os impactos hidrológicos da urbanização, potencializados pelas concepções higienistas, já foram amplamente descritos na literatura técnica: a redução da infiltração e a aceleração do escoamento. Em um quadro de urbanização crescente, como observado a partir de meados do Século XX, chega-se à obsolescência gradual e inexorável das redes de drenagem, com inundações cada vez mais freqüentes em áreas urbanas, acarretando pesadas implicações sociais, econômicas e políticas. Agravando este quadro, as águas pluviais, até recentemente supostas relativamente limpas, mostram-se com cargas de poluição bastante expressivas.

De forma a responder a esta problemática, a partir dos anos 1970 vêm sendo desenvolvidas e utilizadas as chamadas *tecnologias alternativas* ou *compensatórias* de drenagem, centradas na neutralização dos efeitos da urbanização sobre os processos hidrológicos. Busca-se controlar na fonte a produção de excedentes de água, decorrentes da impermeabilização, e evitar a sua transferência rápida para jusante. Estas soluções permitem a continuidade do desenvolvimento urbano, facilitando a modulação do sistema de drenagem em função do crescimento e possibilitando o seu tratamento combinado com outras questões urbanísticas. Quando bem concebidas, estas técnicas contribuem também para a melhoria da qualidade de vida e a recuperação e a preservação do meio ambiente, possibilitando atribuir características de sustentabilidade aos sistemas de drenagem urbana.

A difusão destas tecnologias, apesar de crescente, ainda se apresenta aquém do seu potencial. Dentre os fatores determinantes para esta limitação de uso mais sistemático, destacam-se as dificuldades para a escolha das técnicas adequadas e a avaliação dos diferentes sistemas viáveis, incorporando as diversas técnicas. A multiplicidade dos aspectos envolvidos leva à impossibilidade de identificação clara das vantagens associadas às diferentes alternativas estudadas, dificultando a comparação e a hierarquização das alternativas de projeto (Baptista, 2004).

Neste contexto, insere-se o presente trabalho, que tem como objetivo a proposição de uma sistemática de análise multicritério, fundada em indicadores de desempenho e indicadores econômico-financeiros, com vistas à avaliação *a priori* de sistemas de drenagem urbana. Os dois tipos de indicadores – desempenho e custo – levados a um gráfico de Pareto permitem uma análise simples, subsidiando a decisão quanto à escolha de arranjos adequados de projeto de drenagem urbana.

O PROCESSO DE CONCEPÇÃO DOS SISTEMAS DE DRENAGEM

No quadro de diversidade de técnicas de drenagem hoje disponíveis e de multiplicidade de arranjos combinando estas técnicas, o processo de concepção dos sistemas compensatórios de drenagem apresenta duas fases distintas, de acordo com Baptista *et al.* (2005), conforme pode ser visualizado na Figura 1.

A primeira etapa do processo de concepção corresponde à *fase de eliminação* das técnicas inviáveis para uma determinada área, por motivos hidrológicos, geotécnicos, ambientais, sociais, etc. A segunda etapa consiste na *fase de decisão*, que compreende a elaboração dos possíveis arranjos das alternativas de projetos, identificando-se, em seguida, os arranjos satisfatórios e insatisfatórios. Finalmente, com base em critérios definidos pelo decisor, a efetua-se a escolha do melhor dentre eles.

Assim, dentro do contexto decisório da drenagem urbana, torna-se essencial a definição de critérios para que seja feita a avaliação dos sistemas possíveis, à luz dos diferentes aspectos intervenientes, e de uma metodologia que subsidie a identificação dos arranjos viáveis e o processo de escolha.

A avaliação dos sistemas de drenagem urbana apresenta, portanto, características de complexidade que leva ao uso de métodos de auxílio à decisão. Como definido por Roy & Bouyssou (1993), estes consistem

FIGURA 1. Processo de concepção de sistemas de drenagem incorporando técnicas compensatórias (Adaptado de Barraud et al., 1999)

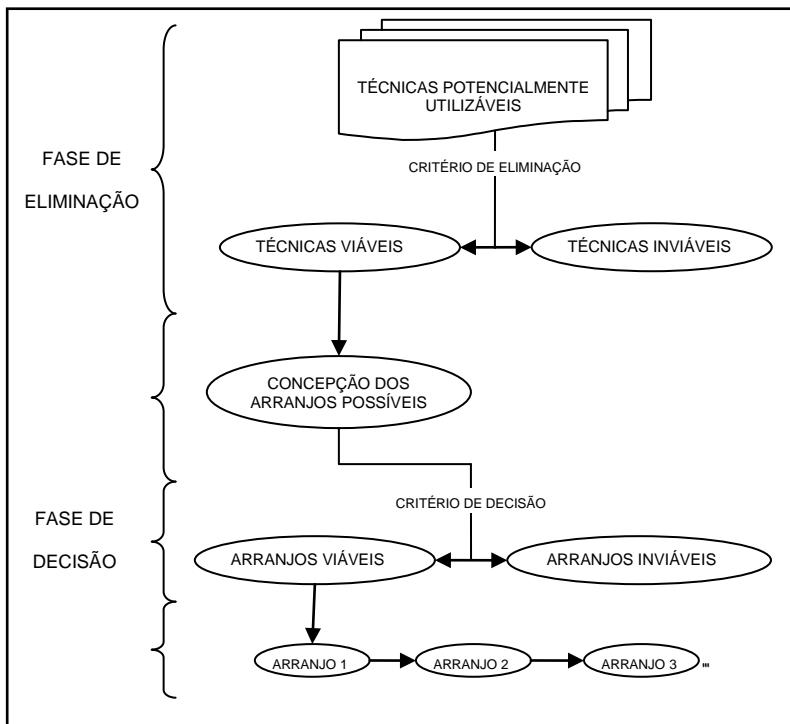


FIGURA 2. Critérios e indicadores



na obtenção dos elementos de decisão com base em indicadores, definidos, em síntese, como parâmetros, ou valores derivados de parâmetros, que permitem caracterizar uma ação, ou seu estado, em diferentes períodos. Os indicadores simplificam a informação proveniente de fenômenos complexos, quantificando-os de maneira significativa, à escala desejada.

34

Castro, em 2002, efetuou a proposição de indicadores de desempenho contemplando os diversos aspectos envolvidos nos sistemas de drenagem urbana; Moura, em 2004, complementou o trabalho com a proposição de indicadores de custos. Os dois tipos de indicadores, ilustrados na Figura 2 e descritos ulteriormente, combinados em um Gráfico de Pareto, possibilitam a análise desempenho-custo dos sistemas de drenagem de forma mais completa e consistente, como será visto ao longo do presente documento.

AVALIAÇÃO DE DESEMPENHO

A avaliação do desempenho é realizada por meio de um *Índice de Desempenho*, fundado em indicadores relativos aos diversos critérios pertinentes, detalhadamente apresentados em Castro *et al.* (2004) e descritos sucintamente a seguir:

- Critério “*Objetivo*”, relativo ao atendimento dos objetivos de drenagem;
- Critério “*Impactos*”: concernente aos diferentes impactos da obra, no que diz respeito às vazões a jusante, à recarga do aquífero, à possibilidade de transmissão de doenças, à possibilidade de proliferação de insetos, à qualidade das águas superficiais e das águas subterrâneas;
- Critério “*Inserção*”: referente à integração da obra no tocante à criação e preservação de *habitats*, composição e integração no quadro cênico, criação de áreas de recreação, lazer e outros equipamentos urbanos, condições de circulação, possibilidade da utilização para o desempenho de outras funções técnicas e necessidades fundiárias.

Sempre que possível, os indicadores tiveram um caráter quantitativo. Para aqueles fundamentalmente qualitativos, foi estabelecida uma escala com sete níveis e, em seguida, efetuado o ajuste a uma escala numérica.

A escolha do método multicritério de agregação buscou a simplicidade e facilidade de aplicação, sem inconvenientes quanto da ocorrência de mudanças de escala dos valores dos indicadores. Baseado nestas

premissas, o procedimento escolhido fundou-se no princípio da distância a uma ação ideal e antiideal, sendo adotada a *Distância de Minkovski*, a mais usual, no caso de análise multicritério (Pomerol & Barba-Romero, 1993). Define-se a distância entre dois pontos x e y pela Equação 1, considerando-se a importância relativa dos diversos critérios de análise:

$$m_p = \left[\sum_j w_j^p |x_j - y_j|^p \right]^{\frac{1}{p}} \text{ para } p \geq 1; \quad (1)$$

onde:

m_p : distância de Minkovski entre os pontos x e y ;

j : critério analisado;

x_j : ponto de coordenada x para o critério j ;

y_j : ponto de coordenada y para o critério j ;

p : valor relativo ao tipo de distância;

w_j : peso do critério j .

O método TOPSIS (*Technique for Order Preference by Similarity to Ideal Solution*), descrito por Hwang & Yoon (1981), apud Pomerol & Barba-Romero (1993), foi escolhido para a agregação dos indicadores de desempenho. Assim, a distância ao ideal é calculada por meio da Equação 2:

$$d_{p_i}^M = \left[\sum_j w_j^p |a_j^M - a_{ij}|^p \right]^{\frac{1}{p}} \text{ para } p \geq 1; \quad (2)$$

Onde:

$d_{p_i}^M$: distância de Minkovski entre os pontos a_j^M e a_{ij} ;

a_j^M : ponto de ideal para o critério j ;

a_{ij} : ponto de coordenada da alternativa considerada para o critério j ;

A distância ao antiideal ($d_{p_i}^m$) é calculada pela mesma Equação 2 substituindo os valores do pontos ideais pelos valores dos pontos antiideais.

A partir das equações dos cálculos das distâncias ao ideal ($d_{p_i}^M$) e ao antiideal ($d_{p_i}^m$), pode ser calculada a *taxa de similaridade*:

$$m_p = \left[\sum_j w_j^p |x_j - y_j|^p \right]^{\frac{1}{p}}, \text{ para } p \geq 1; \quad (3)$$

Onde:

$D_p(a_i)$: taxa de similaridade;

$d_p^M(a_i)$: distância de Minkovski ao ideal

$d_p^m(a_i)$: distância de Minkovski ao antiideal;

No presente estudo foi utilizado o tipo de distância Euclidiana, com $p=2$, por apresentar a vantagem de se distanciar dos métodos de soma ponderada, fazendo com que o valor da escala do indicador tenha menor influência no resultado final.

O valor de $D_p(a_i)$ varia de 0, para o ponto antiideal a 1, para o ponto ideal. Ele leva, portanto, a um *Índice de Desempenho* de cada sistema, à luz dos diferentes indicadores, assumindo o valor da própria taxa de similaridade.

A atribuição de pesos por especialistas e pela população, ou seja, agregação dos indicadores de desempenho, será descrita ulteriormente neste documento (ver Tabela 2).

AVALIAÇÃO DE CUSTOS

A avaliação dos custos é efetuada a partir da simples integração, em um dado intervalo de tempo, dos custos de implantação, manutenção e operação dos sistemas de drenagem, por meio da Equação 4:

$$C_k = Ci_k + Cm_k + Co_k \quad (4)$$

Onde:

C_k : Custo integrado da alternativa k;

Ci_k : Custo de implantação da alternativa k;

Cm_k : Custo de manutenção da alternativa k;

Co_k : Custo de operação da alternativa k.

Os dois últimos custos são devidamente referenciados, em termos de Valor Presente Líquido (VPL), através de uma taxa de desconto, considerando ainda a vida útil dos diversos componentes do sistema de drenagem em análise.

Os custos associados aos diferentes componentes dos sistemas foram obtidos, sempre que possível, junto aos serviços técnicos de drenagem do município de Belo Horizonte. Nos casos em que estes não estavam disponíveis (caso das técnicas compensatórias ainda não utilizadas), os mesmos foram obtidos por meio de composição de custos, complementados pela consulta à bibliografia técnica internacional. A Tabela 1 exibe os valores dos custos de implantação, manutenção e operação dos diversos tipos de dispositivos estudados, bem como a respectiva vida útil a eles associada. No que diz respeito aos custos dos pavimentos, apresenta-se, na realidade, o sobrecusto relativo ao pavimento clássico de CBUQ.

Os custos dos sistemas de drenagem foram atualizados através do *Índice Nacional de Custos da Construção* (Fundação Getúlio Vargas, 2003), referenciados em dólares americanos segundo a cotação do dia 2 de janeiro de 2006.

É importante ressaltar que os valores obtidos no quadro do presente trabalho e apresentados na Tabela 1, possuem incertezas associadas, tanto no que diz respeito aos custos quanto à vida útil.

Os custos aqui discutidos são integrados em um Índice de Custos, discutido quando da sua análise em conjunto com o Índice de Desempenho.

Finalmente, no tocante à análise comparativa, deverão ser consideradas vidas úteis dos projetos compatíveis com as vidas úteis dos componentes dos sistemas de drenagem, de forma que na análise não restem valores residuais. Eventuais simplificações inerentes à esta condição podem ser consideradas pertinentes tendo em vista as incertezas significativas relativas às vidas úteis das técnicas estudadas.

TABELA 1
Custos dos dispositivos de drenagem

Estrutura	Custo de Implantação	Custos de Operação e Manutenção (em U\$ / ano)	Vida útil
Redes tubulares	[0,4459 x diâmetro (mm)-59,7770] U\$/m	109,49 / metro linear	30 anos
Galerias	[117,5378 x área da seção (m ²)+556,7782] U\$/m	32,0923/metro linear + 0,2575/m ²	30 anos
Canal revestido em concreto	95,87 U\$/ m ² /m	2,34 / m ²	30 anos
Canal com revestimento vegetal	21,36 U\$/ m ² /m	1,38 / m ²	30 anos
Canal revestido em enrocamento	27,75 U\$/ m ² /m	1,49 / m ²	30 anos
Canal em gabião tipo caixa	59,39 U\$/ m ² /m	2,83 / m ²	30 anos
Canal em gabião tipo colchão	31,09 U\$/ m ² /m	1,56 / m ²	30 anos
Bacias de detenção gramadas	21,90 U\$/ m ³	143,91 / ha + 9,51 / m ³	15 anos
Bacias de detenção em concreto	27,03 U\$/ m ³	143,91 / ha + 9,16 / m ³	30 anos
Bacias de detenção enterradas	90,61 U\$/ m ³	143,91 / ha + 16,79 / m ³ + 0,70 / m ³	30 anos
Bacias de infiltração	17,42 U\$/ m ³	8,08 / m ³	10 anos
Micro reservatórios individuais	95,87 U\$/ m ³	3,86 / m ³	30 anos
Pavimentos de CBUQ	0,00 U\$/ m ²	0,00 / m ²	15 anos
Pavimentos de concreto permeável	20,00 U\$/ m ²	1,09 / m ²	15 anos
Pavimentos de asfalto permeável	14,67 U\$/ m ²	0,56 / m ²	15 anos
Pavimentos de blocos vazados	26,56 U\$/ m ²	1,48 / m ²	15 anos
Pavimentos intertravados	8,89 U\$/ m ²	3,17 / m ²	15 anos
Pavimentos de alvenaria poliédrica	-0,14 U\$/ m ²	2,03 / m ²	15 anos
Poços	88,15 U\$/ m ³	9,33 / unidade	15 anos
Trincheiras	40,31 U\$/ m	12,13 / m	10 anos
Valas e valetas	40,00 U\$/ m	7,87 / m	15 anos
Valas e valetas com canaleta	52,44 U\$/ m	7,87 / m	15 anos

PESQUISAS PARA A PONDERAÇÃO DOS INDICADORES

Para exprimir a importância relativa de cada critério efetua-se a sua *ponderação*, ou seja, associa-se um peso a cada um dos indicadores de desempenho, com base nas visões dos *atores* dos processos decisórios, ou *decisores*, que têm interesse nas decisões ou serão diretamente afetados por elas (Roy, 1996). No quadro do presente trabalho foram identificados quatro grupos de decisores: os órgãos e agências ambientais, os serviços técnicos municipais, as empresas de consultoria e a população afetada.

A ponderação dos indicadores pelos decisores foi efetuada em duas fases distintas, por meio de entrevistas. A primeira, realizada em 2001 junto a profissionais (Castro *et al.*, 2004), contemplou os pesos apenas dos indicadores de desempenho. A segunda fase de consulta complementou a pesquisa com a introdução dos aspectos de custos e a integração da percepção da população (Moura, 2004). Sua finalidade principal consistiu na obtenção de dados de disposição a pagar por soluções de drenagem ambiental e socialmente mais favoráveis, além da consolidação dos pesos dos indicadores de desempenho.

As entrevistas com os profissionais tiveram a finalidade de se avaliar, com uma visão de caráter mais técnico, a importância relativa dos indicadores de desempenho e custo. Conforme explicitado anteriormente, as entrevistas foram realizadas com três grupos de decisores: cinco representantes de órgãos e agências ambientais, cinco representantes dos serviços técnicos municipais e quatro representantes de empresas de consultoria. A Tabela 2 apresenta a ponderação média para os indicadores de desempenho atribuídos pelos profissionais.

A população afetada, correspondente ao município de Belo Horizonte, considerada como participante do processo decisório, teve sua percepção avaliada por meio de entrevistas realizadas porta-a-porta, nos meses de fevereiro e março de 2004, conforme descrito em Moura *et al.* (2005a). A amostra calculada foi de 364 pessoas, classificadas por meio do *Critério de Classificação Econômica Brasil* (ANEP, 2004). Foram procedidas as entrevistas de acordo com classificação social realizada, de forma a manter a representatividade. Os resultados da pesquisa realizada com a população para a ponderação dos indicadores de desempenho encontram-se exibidos na Tabela 2.

TABELA 2
Valores dos fatores de ponderação – resultados finais apresentados em negrito

Indicador	Ponderação		
	População	Profissionais	Final
Atendimento ao objetivo	7,80%	16,77%	15,44%
Impacto hidrológico nas vazões de jusante	7,63%	13,33%	12,66%
Impacto na recarga do aquífero	4,47%	4,77%	6,17%
Impacto na possibilidade de transmissão de doenças	10,35%	6,97%	7,82%
Impacto na possibilidade de proliferação de insetos	10,45%	6,30%	6,86%
Impacto na qualidade das águas superficiais	11,42%	7,90%	7,89%
Impacto na qualidade das águas subterrâneas	8,60%	6,43%	6,84%
Criação e preservação de habitats	7,90%	7,47%	7,53%
Impacto paisagístico	8,03%	6,77%	6,99%
Criação de áreas de preservação e lazer	6,18%	6,50%	6,42%
Impacto nas condições de circulação	4,20%	6,57%	6,03%
Possibilidade de utilização para outras funções técnicas	10,65%	3,83%	3,93%
Desapropriação de áreas	2,32%	6,43%	5,41%

Os resultados da ponderação final utilizados na análise correspondem à média dos resultados dos quatro grupos de decisores, conforme apresentado em negrito na Tabela 2. Assumiu-se que a indiferença, em termos de desempenho, pode ser representada pela diferença média das avaliações dos diversos entrevistados, segundo os diferentes indicadores, com o valor de 8,8%.

No tocante aos custos, nas entrevistas realizadas questionou-se quanto o entrevistado estaria disposto a pagar a mais por uma alternativa de projeto ambientalmente mais favorável em relação à outra com desempenho similar, mas sem enfoque ambiental. Este valor representa a indiferença entre os custos das soluções na comparação das alternativas. Na opinião dos profissionais, esta indiferença assume o valor médio de 37,3%; junto à população, o valor médio é de 8,6%. Admitiu-se então, no presente trabalho, o valor global de 30%, ou seja 15% para mais ou para menos.

Análise desempenho-custo - Gráfico de Pareto

A avaliação das alternativas de projetos dos sistemas de drenagem é realizada por meio de um gráfico *Gráfico de Pareto* a partir dos dois índices discutidos anteriormente, relativos ao desempenho e aos custos.

O Índice de Desempenho é o próprio valor da taxa de similaridade ($D_p(a_i)$) do método TOPSIS.

$$Id_k = D_p(a_i) \quad (5)$$

Onde:

Id_k : Índice de Desempenho da alternativa k;

$D_p(a_i)$: taxa de similaridade da alternativa k .

O Índice de Custos é calculado a partir do Custo integrado da alternativa de projeto, de acordo com a Equação 6:

$$Ic_k = \frac{\sum_{k=1}^{n_T} C_k}{C_k} \quad (6)$$

Onde:

Ic_k : Índice de Custos referente à alternativa k;

k : alternativa em análise;

C_k : Custo integrado da alternativa k;

n_T : número total de alternativas.

No Gráfico de Pareto plota-se, no eixo das ordenadas, o valor do Índice de Desempenho para cada uma das alternativas de projeto e, no eixo das abscissas, o valor do Índice de Custos. Convencionou-se que os pontos assim plotados correspondem ao centro de elipses com dimensões compatíveis com as indiferenças de desempenho e custo, definidas quando da pesquisa relativa à ponderação dos indicadores.

Os melhores valores dos índices – maior desempenho e menor custo – são crescentes nos eixos x e y, sendo plotados, portanto, acima e à direita no gráfico. Cada alternativa de projeto é então representada por pares ordenados (Ic_k, Id_k) de forma tal que os pontos localizados mais próximos ao canto superior direito representam as soluções mais adequadas, enquanto que os pontos localizados junto ao canto inferior esquerdo representam as soluções menos adequadas.

ESTUDO DE CASO

Aplicação da metodologia

Foi selecionada para estudo de caso a área *Technopolis Bordeaux-Montesquieu*, localizada no sudoeste da França, tendo em vista a ampla gama de sistemas drenagem estudada. Com efeito, Baptista e Barraud (2001) estudaram quatro cenários de projetos de drenagem para a área, de uso industrial, com 22,6 hectares, desde sistemas puramente clássicos até sistemas totalmente alternativos, com severas restrições legais quanto às vazões máximas à saída do empreendimento, para três níveis de risco hidrológico – 10, 30 e 100 anos – configurando assim doze diferentes alternativas de sistemas, conforme descrito a seguir:

- Cenário I - Sistema clássico de drenagem, sem considerar a regulamentação relativa da vazão máxima de saída;
- Cenário II - Cenário intermediário, com a incorporação de uma bacia de detenção ao sistema clássico de drenagem, respeitando as condições de vazão máxima de saída;
- Cenário III - Cenário alternativo, com a utilização de pavimentos com estruturas de reservação, valas e uma bacia de detenção, assegurando uma proteção em cascata do empreendimento e respeitando a regulamentação de vazão máxima de saída;
- Cenário IV - Cenário alternativo, similar ao cenário III, com a consideração de que as estruturas projetadas permitem a infiltração.

A aplicação da metodologia aqui proposta possibilita a análise desempenho-custo por meio do gráfico de Pareto apresentado na Figura 3.

O gráfico mostra que as alternativas III-100 e IV-100 apresentam os melhores desempenhos, ao passo que as alternativas III-10 e IV-10 possuem os custos mais satisfatórios, porém com índices de desempenho inferiores às alternativas II-100, III-100 e IV-100. A escolha do sistema a ser adotado pode, então, ser realizada pelo decisor, à luz da importância relativa, segundo seu discernimento, dos fatores custo e desempenho.

É notável que os cenários que envolvem técnicas clássicas com presença ou não de bacia de detenção (I-10, I-30, I-100, II-10, II-30 e II-100) apresentam menores índices de desempenho e de custo. A escolha do sistema mais adequado parece residir entre as alternativas III-10, IV-10, III-100 e IV-100, que utilizam técnicas compensatórias de forma mais extensiva.

Análise de sensibilidade e robustez

A avaliação da sensibilidade e robustez em análise multicritério reveste-se de importância essencial, possibilitando verificar o impacto das variações de cada critério no resultado final. A análise tem a finalidade de verificar a instabilidade das posições relativas

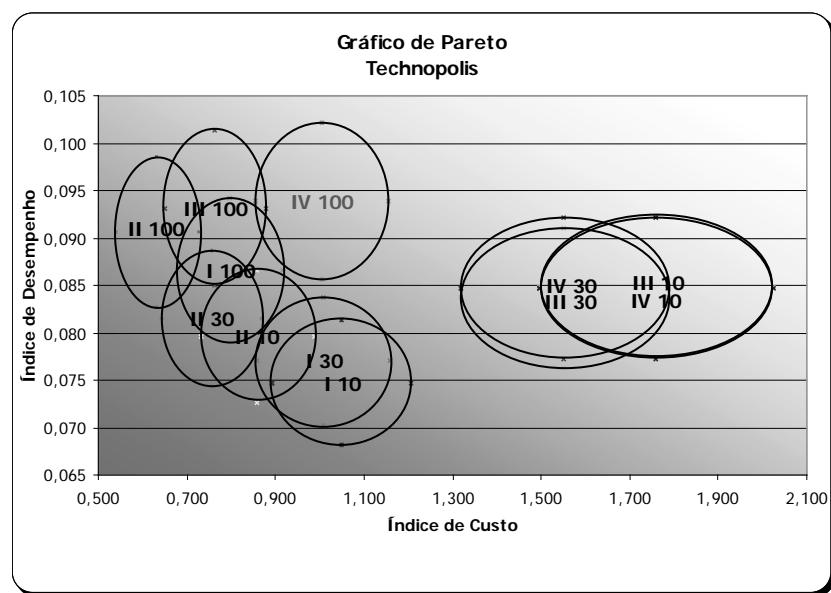
de cada solução no Gráfico de Pareto e observar modificações na ordenação inicial das alternativas, denominada *solução de base*.

Para a análise de sensibilidade e robustez do estudo de caso cinco diferentes abordagens foram consideradas nas 12 alternativas de projeto, sendo que apenas o Cenário III será aqui apresentado. O cenário foi escolhido pelo fato de ter sido aquele efetivamente implantado no local.

A primeira abordagem consistiu na variação da indiferença relativa ao Índice de Custos, com a adoção do valor de 30% para mais ou para menos sobre o valor calculado, em substituição ao valor de 15% utilizado na solução de base. O gráfico de Pareto para essa análise encontra-se exibido na Figura 4a, podendo-se observar que embora as regiões de indiferença dos cenários se tornam maiores em termos de custos, conforme esperado, não houve alteração na solução de base.

A segunda abordagem fundou-se na modificação da taxa de juros aplicada para o cálculo do VPL dos custos de manutenção e operação. Adotou-se um valor superior, 16,87% ao ano, calculado por Cançado *et al.* (2004) para um estudo de projetos de sistemas de drenagem, e um valor inferior, de 6% ao ano, mínimo aceitável encontrado na literatura para as condições brasileiras. Os gráficos de Pareto destas

FIGURA 3.
Resultado da análise
dos cenários para a
Technopolis



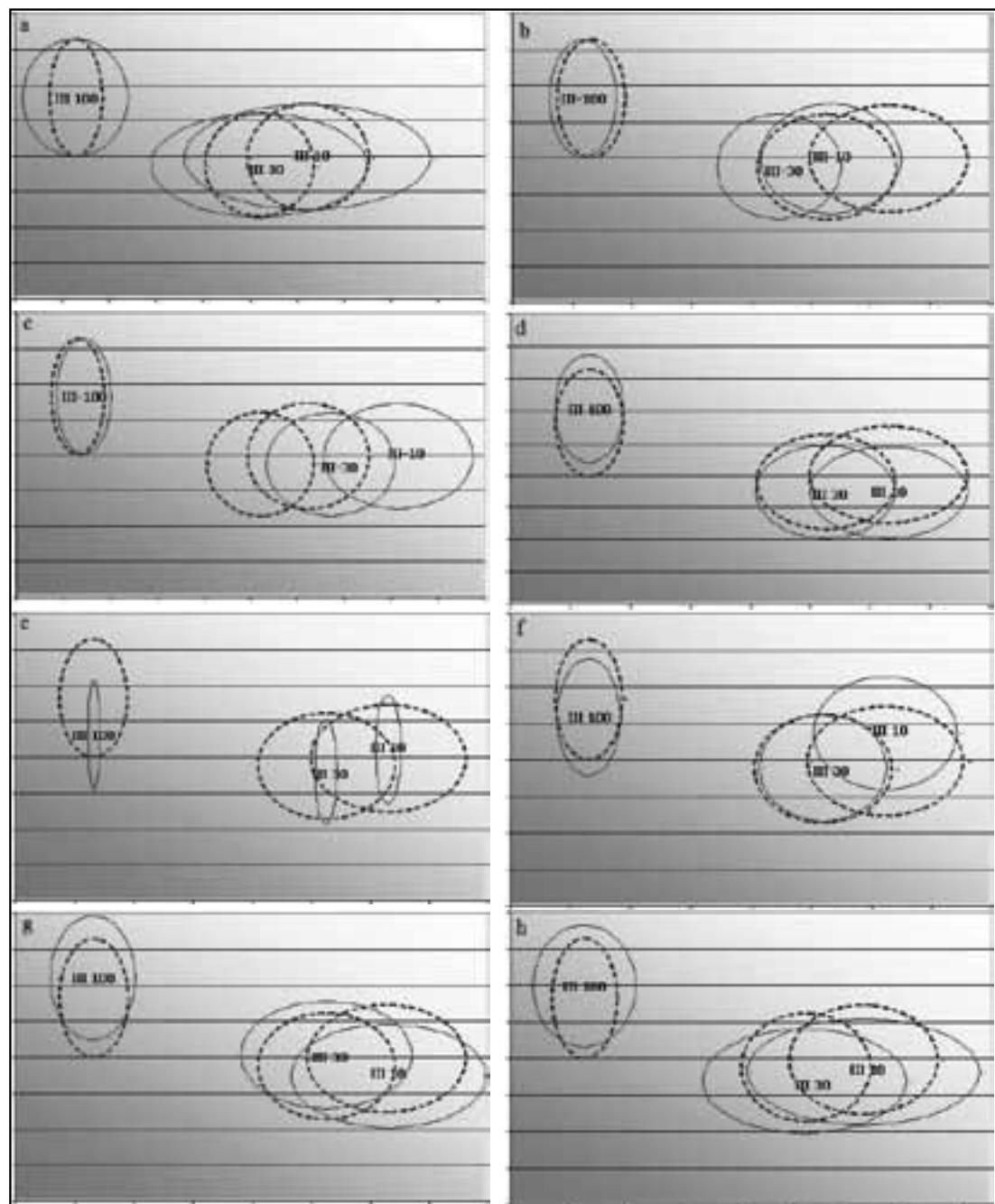


FIGURA 4. Gráficos de Pareto das análises de sensibilidade realizadas

soluções, apresentados nas figuras 4b e 4c, respectivamente, demonstram apenas um deslocamento em relação à solução de base, que é mantida.

Além dessas variações relativas no Índice de Custos, os indicadores de desempenho tiveram sua ponderação modificada, uma a uma, para os valores máximos e mínimos encontrados na pesquisa com os decisores. Na Figura 4d encontra-se o Gráfico de Pareto para a modificação na ponderação do indicador *Atendimento ao objetivo* para o valor máximo, mostrando uma mudança pouco significativa na plotagem final. De fato, todas as modificações de ponderação testadas apresentaram resultados similares, sem alteração na solução de base.

A quarta abordagem para análise de sensibilidade concerne os valores dos próprios indicadores para os quais não foram propostas expressões de cálculo objetivas. Assim, admitindo-se um erro associado à avaliação, efetuada na escala de 1 a 7, os valores foram alterados para um ponto acima e um ponto abaixo do valor inicial, para os casos em que seus valores variaram de um cenário para outro. Esta análise, não representada nos gráficos, não modificou a solução de base para nenhum dos indicadores testados.

Outra verificação realizada correspondeu à plotagem do Gráfico de Pareto, com a ponderação dos Índices de Custos e de Índices de desempenho relativos a cada um dos quatro grupos de decisores, de forma a considerar uma possível influência das diferentes visões na solução de base. Os resultados, exibidos na Figura 4e – população; 4f – órgãos e agências ambientais –; 4g – serviços técnicos municipais; 4h – empresas de consultoria, ilustram a ocorrência de modificações nos Gráficos de Pareto, com deslocamentos das regiões de indiferença decorrentes de alterações nas ponderações dos indicadores de desempenho. A solução de base, entretanto, foi sempre mantida.

Em suma, os resultados obtidos com a análise de robustez e sensibilidade, sucintamente descrita anteriormente e detalhadamente apresentada em Moura (2004), permitem evidenciar a robustez da metodologia e sua baixa sensibilidade no tocante às alterações da solução de base.

CONCLUSÕES

Conforme apresentado ao longo do trabalho, a metodologia proposta permite a avaliação multicritério de sistemas de drenagem urbana com base em um *Índice de Desempenho*, fundado em indicadores de

desempenho, e um *Índice de Custos*. Diversos aspectos na construção da metodologia e na definição do seu alcance efetivo são discutidos a seguir.

No tocante aos indicadores de desempenho, os trabalhos aqui descritos representam uma consolidação de estudos anteriores, revalidando a ponderação de profissionais e incluindo a percepção da população. A metodologia de agregação dos indicadores de desempenho utilizada, fundada em ponderação baseada em entrevistas junto à população e a profissionais, se mostrou consistente e realista para contemplar a complexidade da questão.

A avaliação de custos dos sistemas de drenagem consubstanciou-se como a parte mais crítica da pesquisa, evidenciando a dificuldade de obtenção de dados. Constata-se tanto a indisponibilidade efetiva de informações, como também dificuldade de coleta dados, quando existentes, uma vez que se encontram, normalmente, organizados precariamente. Assim, diversas inferências e simplificações com relação aos custos de implantação foram necessárias, implicando até no desenvolvimento de projetos-tipo e composição de custos de técnicas ainda incipientes no Brasil. No que diz respeito aos custos de manutenção, dados brasileiros inexistem, à exceção da retirada dos resíduos das bacias de detenção. A estimativa de tais custos foi efetuada com base em custos de outros serviços similares. As diversas inferências, simplificações e estimativas realizadas prejudicam a qualidade e a confiabilidade dos custos obtidos, mas acredita-se que não prejudicaram, de forma significativa, os resultados obtidos, notadamente em termos da análise comparativa, objetivo final da metodologia aqui proposta.

Ainda no tocante aos custos, outra dificuldade concerne a escolha da taxa de desconto adequada. Pode ser observado, entretanto, na análise de sensibilidade e robustez, que ela apresenta pouca influência no resultado final, em termos de comparação de alternativas.

Apesar das dificuldades citadas, acredita-se que o Índice de Custos proposto reflete de forma realista e pertinente os aspectos financeiros envolvidos na análise dos sistemas de drenagem urbana.

A consideração conjunta dos Índices de Custos e dos Índices de Desempenho aqui efetuada não permite a ordenação dos cenários em estudo, não tendo sido este o objetivo do presente trabalho. Propõe-se, por outro lado, a construção de um Gráfico de Pareto, que subsidia o decisior na tomada de decisão com base

na análise clássica de desempenho-custo, de forma realista. O gráfico possibilita a escolha de priorização consciente dos aspectos custo ou desempenho de acordo com a disponibilidade orçamentária e com outras restrições e condicionantes, de ordem técnica ou não.

Finalmente, a análise de sensibilidade e robustez realizada para o estudo de caso demonstrou que a metodologia proposta apresenta consistência, com a manutenção da solução de base em todas as análises realizadas, permitindo, assim, sua consideração como uma ferramenta adequada para apoio à decisão.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) e à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pelo apoio ao desenvolvimento deste trabalho. Agradecem, ainda, aos especialistas que contribuíram na construção dos indicadores propostos.

Referências

- ANEPE – ASSOCIAÇÃO NACIONAL DE EMPRESAS DE PESQUISA. Critério de Classificação Econômica Brasil. Disponível em: <www.anep.org.br>. Acesso em: 23 jan. 2004.
- BAPTISTA, M. B. Sistemas de auxílio à decisão em drenagem urbana. In: III Simpósio de Recursos Hídricos do Centro Oeste, 2004, Goiânia.
- BAPTISTA, M. B.; BARRAUD, S. Évaluation économique de l'utilisation de techniques alternatives en assainissement pluvial. Lyon: Institut National de Sciences Appliqués, 2001. 72 p. Rapport Final.
- BAPTISTA M., BARRAUD S.; ALFAKIH E., NASCIMENTO N., FERNANDES W., MOURA P., CASTRO L. Performance-costs evaluation for urban storm drainage. Water Science & Technology 51(2) – 2005, 99-107.
- BAPTISTA, M. B.; BARRAUD, NASCIMENTO, N. O. Técnicas Compensatórias em Drenagem Urbana. Ed. ABRH, Porto Alegre, 266 p., 2005.
- BARRAUD, S.; AZZOUT, Y.O.; CRES, F.N; CHOCAT, B. Selection aid of alternative techniques in urban storm drainage – Proposition of an expert system. Water Sciences Technology, Vol. 39, No. 4, pp 241-248, 1999.
- CANÇADO, V.L.; CABRAL, J.R.; NASCIMENTO, N.O. Taxing for urban stormwater drainage systems. In Third Word Wild Workshop for Younger Environmental Scientists, 2004 – Discharged urban waters: resources or risk? Paris, 2004.
- CASTRO, L.A.M. Proposição de indicadores para a avaliação de sistemas de drenagem urbana. 2002. 118 f. (Dissertação de Mestrado em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos) – Escola de Engenharia, Universidade Federal de Minas Gerais. Belo Horizonte, 2002.
- CASTRO, L.A.M.; BAPTISTA, M. B.; CORDEIRO NETTO, O. M. Análise multicritério para a avaliação de sistemas de drenagem urbana - Proposição de indicadores e de sistemática de estudo. Revista Brasileira de Recursos Hídricos, Porto Alegre, v. 9, n. 4, p. 05-19, 2004.
- FUNDAÇÃO GETÚLIO VARGAS. Índice Nacional de Custos da Construção. Disponível em: <http://fgvdados.fgv.br/dsp_frs_pai_ferramentas.asp>. Acesso em: 20 dez. 2003.
- HWANG, C.; YOON, K. Multiple attribute decision making: methods and applications survey. Springer. 1981.
- MOURA, P. M. Avaliação global de sistemas de drenagem urbana. 2004. 146 f. (Dissertação de Mestrado em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos) — Escola de Engenharia, Universidade Federal de Minas Gerais. Belo Horizonte, 2004.
- MOURA P., BAPTISTAM., BARRAUD S., MOURAT V. Ponderação de indicadores para a avaliação de sistemas de drenagem. XVI Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, João Pessoa/Brasil, 20-24 novembro 2005a. 20p em [CD-ROM].
- MOURA P., BAPTISTA M., BARRAUD S. Comparison between two methodologies for urban drainage decision aid. *10th International Conference on Urban Drainage*, Copenhagen/Denmark, 2005b.
- POMEROL, J.C.; BARBA-ROMERO, S. Choix multicritère dans l'entreprise: principe et pratique. Paris: Hermès, 1993. 390 p.
- ROY, B. Multicriteria methodology for decision aiding. Dordrecht, The Netherlands: Kluwer Academic Publishers, 1996.
- ROY, B.; BOUYSSE, D. Aide multicritère à la décision: méthodes et cas. Paris: Economica, 1993. 695p.
- SILVEIRA, A.L.L. Hidrologia urbana no Brasil. In: BRAGA, B.; TUCCI, C.E.M.; TOZZI, C. (org.). Drenagem urbana: gerenciamento, simulação e controle. Coleção ABRH de Recursos Hídricos. Porto Alegre: ABRH/Editora da Universidade/UFRGS, 1998. nº3, cap.1, p. 7-25.