



## AVALIAÇÃO MULTICRITÉRIO PARA SUPORTE A SELEÇÃO DE TÉCNICAS COMPENSATÓRIAS A SEREM IMPLANTADAS: UMA FERRAMENTA VOLTADA AOS TOMADORES DE DECISÃO

*Lineker Max Goulart Coelho*<sup>1</sup>

**RESUMO** – Atualmente existem diversas técnicas compensatórias que podem ser utilizadas como solução para o manejo sustentável das águas pluviais. Entretanto a escolha da melhor opção pode ser uma tarefa complexa. Este estudo tem como objetivo apresentar um modelo de análise multicritério dedicado à seleção de técnicas compensatórias que seja de fácil entendimento com vistas a servir como ferramenta de suporte a decisão para gestores do setor. Foi adotado o processo analítico hierárquico (AHP) como modelo multicritério. Os critérios utilizados na seleção foram definidos com base em estudos prévios. O modelo multicritério proposto foi aplicado a um estudo de caso com 7 cenários de utilização de diferentes técnicas compensatórias. Observa-se que em primeiro lugar tem-se o cenário que utilizou as trincheiras de infiltração seguido pelo cenário baseado no uso de pavimento permeável. Estes cenários classificados nas primeiras posições de fato apresentam um bom compromisso entre os valores dos diversos critérios adotados apresentando um equilíbrio que resulta em uma melhor avaliação. Os resultados obtidos indicaram que a estrutura proposta atendeu ao objetivo deste estudo, sendo um modelo com indicadores simplificados e abordagem matemática de fácil entendimento, propiciando uma ferramenta amigável e intuitiva a ser aplicado mesmo por não especialistas em modelos multicritérios.

**ABSTRACT** – Currently, there are several compensatory techniques that can be used as a solution for the sustainable management of rainwater. However, choosing the best option can be a complex task. This study aims to present a multi-criteria analysis model dedicated to the selection of compensatory techniques that are easy to understand in order to serve as a decision support tool for sector managers. The analytical hierarchy process (AHP) was adopted as the multicriteria model. The criteria used in the selection were defined based on previous studies. The proposed multi-criteria model was applied to a case study with 7 scenarios for the use of different compensatory techniques. It is observed that in the first place there is the scenario that used the infiltration trenches followed by the scenario based on the use of permeable pavement. These scenarios classified in the first positions actually present a good compromise between the values of the various criteria adopted, presenting a balance that results in a better evaluation. The results obtained indicated that the proposed structure met the objective of this study, being a model with simplified indicators with an mathematical approach easy to understand, providing a friendly and intuitive tool to be applied even by non-specialists in multi-criteria models..

**Palavras-Chave** – Técnicas compensatórias. Modelo multicritério. Drenagem urbana.

1) Technical University of Denmark, Dept. of Engineering Technology, Lautrupvang 15, Ballerup, ZIP: 2750, Dinamarca, (+45) 61 27 64 29, [linekermail@gmail.com](mailto:linekermail@gmail.com)



## INTRODUÇÃO

Neste contexto uma solução interessante para manejo das águas pluviais são as técnicas compensatórias, as quais de acordo com Baptista *et al.* (2011) consistem em estratégias de controle capazes de propiciar o aumento das taxas de evapotranspiração, infiltração ou detenção de água, promovendo a desaceleração do escoamento superficial a jusante e beneficiando a qualidade da água escoada. O crescimento acelerado das áreas urbanas ocorrido normalmente sem planejamento fez com que predominasse uma abordagem de manejo das águas pluviais baseada no afastamento e condução da água pluvial para jusante.

Entretanto, com o passar do tempo a experiência revelou que esta lógica resultava em sistemas pouco sustentáveis com soluções imediatistas que resolviam o problema a montante, mas criavam ou pioravam problemas de manejo de águas pluviais nas porções a jusante da bacia, ou seja, tratava-se apenas de uma transferência do local do problema ao invés de uma solução propriamente dita.

Alternativamente a esta abordagem tem-se as denominadas medidas de baixo impacto ou técnicas compensatórias, as quais, conforme Canholi (2015) tem por objetivo minimizar os efeitos da urbanização sobre os processos hidrológicos beneficiando a qualidade de vida da população e a preservação ambiental. Atualmente existem uma infinidade de tipos de estruturas que podem ser utilizadas como técnicas compensatórias, tais como: trincheira de infiltração, telhado verde, jardim de chuva, bacia de detenção, reservatórios individuais e pavimentos permeáveis. Dessa forma, como há uma grande variedade de soluções que podem ser utilizadas, cada uma com aspectos positivos e negativos, a seleção dentre as alternativas disponíveis é uma tarefa complexa para o tomador de decisão que precisa considerar na sua escolha não apenas todas as possibilidades, mas também múltiplos critérios a serem atendidos.

Nesse contexto, o desenvolvimento de ferramentas de apoio a tomada de decisão que facilitem a tarefa de seleção da técnica compensatória a ser adotada torna-se fundamental para apoio a gestão das águas urbanas. Uma abordagem pertinente para esta situação são os modelos de análise multicritério os quais consistem em uma técnica já consolidada que pode apoiar tomadores de decisão a comparar soluções por meio de vários critérios, como afirmam Kou *et al.* (2011).

Coelho e Henriques (2017) apresentaram um modelo multicritério de apoio a escolha entre diferentes técnicas compensatórias. A ferramenta em questão mostrou-se interessante e efetiva



como ferramenta de apoio uma vez que utiliza o método Promethee II, abordagem robusta de decisão multicritério. Todavia, a utilização deste modelo requer conhecimentos prévios do usuário sobre abordagens multicritério, já que apresentam formulação matemática complexa.

Dessa forma, visando apresentar uma alternativa ao modelo multicritério supracitado, neste trabalho propõe-se um modelo complementar simplificado voltado a usuários que não sejam necessariamente especialistas em modelagem multicritério, mas que tenham interesse em utilizar uma ferramenta que lhes permitam ter uma visão holística dos diferentes aspectos das técnicas compensatórias durante o processo decisório. Para isso, ao invés de se utilizar o modelo Promethee II será empregado o modelo AHP (Processo Analítico Hierárquico) de formulação matemática mais simplificada, mas que permite realizar uma avaliação multicritério análoga ao método anterior, apresentando assim um bom compromisso entre facilidade de aplicação e funcionalidade.

Sendo assim, este estudo visa apresentar uma proposta de modelo de análise multicritério dedicado à seleção de técnicas compensatórias que seja de fácil entendimento com vistas a servir como ferramenta de suporte a decisão a gestores do setor.

## **MATERIAIS E MÉTODOS**

Conforme mencionado anteriormente neste estudo foi adotado o método AHP como modelo de análise multicritério. Esse método utiliza um procedimento para a obtenção do índice global baseado na comparação entre pares de alternativas. De acordo com Sangiorgio *et al.* (2017) o AHP é atualmente uma das metodologias multicritérios mais largamente utilizadas devido a sua facilidade de aplicação. Além disso, Pohekar e Ramachandran (2004) ressaltam que uma das principais vantagens do AHP é que ele possibilita determinar o índice de inconsistência, o qual estima o nível de contradição dos julgamentos das alternativas durante o processo comparativo par a par.

Conforme apresentado em Gilliams *et al.*, (2005), no modelo AHP, uma matriz de comparação é criada para cada critério utilizado. Essas matrizes possuem uma linha e uma coluna para cada cenário considerado. Em célula da matriz é indicado o grau de preferência da alternativa correspondente à linha da célula sobre a alternativa referente à coluna desta. Para cada matriz de comparação são calculados os respectivos autovetores os quais servem de base para formar as colunas de uma matriz final de avaliação. Uma apresentação detalhada do método de cálculo do modelo AHP é apresentada em Saaty (2008).



Quanto aos critérios de avaliação dos cenários adotados neste estudo, estes foram os mesmos utilizados no modelo multicritério proposto por Coelho e Henriques (2017) apresentados na Tabela 1, os quais foram definidos conforme os indicadores elaborados por Brito (2006). Informações detalhadas sobre o cálculo destes indicadores são apresentados em Brito (2006) e Coelho e Henriques (2017). Com relação aos pesos dos critérios, foi considerado que todos os critérios adotados possuem a mesma importância de modo que a todos foi atribuído o mesmo peso.

Tabela 1 – Critérios e indicadores de avaliação utilizados no modelo de análise multicritério conforme Coelho e Henriques (2017) e Brito (2006).

<b>Critérios</b>	<b>Indicadores</b>	<b>Código</b>
Alterações no meio físico	Áreas impermeáveis	S1
Impacto ao meio ambiente	Áreas verdes	S2
Qualidade da água	Poluentes na água	S3
Aumento do tempo de pico	Tempo de pico	S4
Redução da vazão de pico	Vazão de pico	S5
Aproveitamento de águas pluviais	Volume passível de aproveitamento	S6
Custos	Custos de implantação	S7

Fonte: Brito (2006) e Coelho e Henriques (2017)

Já o estudo de caso que foi utilizado para a aplicação do modelo multicritério consistiu em cenários de aplicação de técnicas compensatórias para a bacia hidrográfica do Córrego do Gregório, localizada na área urbana da cidade de São Carlos no Estado de São Paulo. Os cenários e respectivos dados considerados foram obtidos do estudo de Martins (2017) que realizou uma avaliação aprofundada de diversas possibilidades de implantação técnicas compensatórias na bacia supracitada.

Foram utilizados dados considerando os resultados de Martins (2017) para precipitações com período de retorno de 10 anos e duração de 120 min, os quais correspondem a uma chuva de projeto de intensidade igual a 26,46 mm/h, conforme equação de chuvas intensas definida por Barbassa (1991) para a cidade de São Carlos. Dessa forma, no presente estudo o modelo de análise multicritério avaliou 7 cenários de drenagem urbana, sendo 1 cenário de referência que considera a situação da bacia em questão (sem técnicas compensatórias) e 6 cenários com diferentes técnicas compensatórias. A Tabela 2 apresenta os dados de caracterização de cada cenário com base nos dados apresentados no estudo de Martins (2017).



Tabela 2 – Descrição dos cenários avaliados no estudo de caso.

Cenário	Descrição
Cenário 1	Sistema de drenagem atual sem técnicas compensatórias
Cenário 2	Inclusão de 5 bacias de retenção totalizando um volume de armazenamento de 403622 m <sup>3</sup>
Cenário 3	Uso de pavimento permeável como revestimento de vias em uma área de 128,69 ha
Cenário 4	Criação de jardins de chuva nas calçadas com 1 m de profundidade ocupando uma área de 3,5 ha
Cenário 5	Implantação de telhados verdes em edificações totalizando 118,4 ha
Cenário 6	Construção de trincheiras de infiltração de 1 m de profundidade ocupando uma área total de 19,05 ha
Cenário 7	Instalação de 7854 reservatórios individuais com capacidade de 1 m <sup>3</sup>

Fonte: Martins (2017)

Para a estimativa de custos de implantação foram utilizados os valores apresentados em Moura (2004) atualizados para 2022 utilizando o Índice de Preços de Obras Públicas (IPOP).

Os cálculos de comparação do modelo AHP foram realizados com o auxílio da ferramenta online AHP-OS, conforme descrito em Goepel (2018). No procedimento de comparação par a par foi adotado um índice de inconsistência máximo de 10% para garantir a coerência dos resultados.

## RESULTADOS E DISCUSSÕES

A Tabela 3 apresenta os valores calculados dos critérios de todos os 7 cenários avaliados. Os valores foram determinados tendo como base diferenças em relação ao cenário de referência (cenário 1). Salienta-se que valores negativos referem-se a uma situação em que o cenário possui uma condição pior do que a do cenário de referência.

Tabela 3 – Resultados dos indicadores para cada critério em cada cenário.

Cenário	Descrição unit	Critérios						
		S1 ha	S2 ha	S3 -	S4 min	S5 m <sup>3</sup> /s	S6 m <sup>3</sup>	S7 R\$
Cenário 1	Drenagem convencional	0,00	0,00	10	72	168	0	0,00
Cenário 2	Bacias de retenção	10,47	0,00	7	72	159	0	14.529.600,00
Cenário 3	Pavimento permeável	128,70	0,00	6	72	147	0	123.855.052,00
Cenário 4	Jardim de chuva	3,60	3,60	6	72	165	0	2.978.050,00
Cenário 5	Telhado verde	0,00	118,40	9	72	146	0	551.054.390,00
Cenário 6	Trincheiras de infiltração	19,00	19,00	6	75	143	0	36.708.000,00
Cenário 7	Micro reservatórios individuais	-0,78	0,00	8	75	165	7854	15.708.000,00

Fonte: Adaptado de Martins (2017) e Moura (2004)

Nota-se uma grande diversidade na ordem de grandeza dos valores, pois há grande variedade de técnicas compensatórias com demandas diferentes em termos de área requerida, custo e capacidade de armazenamento o que torna o uso de ferramentas de apoio a decisão essencial.

Particularmente nota-se que em termos de efetividade, os cenários 4 e 7 foram aqueles que resultaram no menor valor de atenuação do pico de vazão. Por outro lado, o cenário 4 é aquele que



apresentou o menor custo e o cenário 7 foi o único com potencial para aproveitamento da água armazenada. O cenário 5, por sua vez, apresentou o maior custo de implantação, mas em contrapartida foi o segundo com maior capacidade de redução do pico de vazões. Dessa forma, nota-se a complexidade de definição de qual seria a melhor alternativa tendo em vista a existência de critérios conflitantes, ou seja, o melhor cenário para um critério não necessariamente é o melhor cenário para os demais.

A matriz de decisão considerando os resultados de prioridade da escala AHP dos cenários com relação a cada critério é apresentada na Tabela 4. Estes resultados de maneira simplificada indicam qual a melhor alternativa em termos de cada um dos critérios.

Tabela 4 – Resultados da matriz de decisão com os valores de prioridade AHP dos cenários para cada critério.

Cenário	Descrição	Critérios						
		S1	S2	S3	S4	S5	S6	S7
Cenário 1	Drenagem convencional	0,039	0,044	0,035	0,091	0,029	0,067	0,312
Cenário 2	Bacias de retenção	0,122	0,044	0,160	0,091	0,077	0,067	0,246
Cenário 3	Pavimento permeável	0,534	0,044	0,216	0,091	0,242	0,067	0,038
Cenário 4	Jardim de chuva	0,056	0,075	0,233	0,091	0,043	0,067	0,227
Cenário 5	Telhado verde	0,031	0,530	0,043	0,091	0,224	0,067	0,019
Cenário 6	Trincheiras de infiltração	0,192	0,220	0,233	0,273	0,347	0,067	0,063
Cenário 7	Micro reservatórios individuais	0,027	0,044	0,080	0,273	0,039	0,600	0,095

A Tabela 5, por sua vez, apresenta a classificação final dos cenários obtida com base no método AHP, considerando todos os critérios.

Tabela 5 – Classificação dos cenários obtida pelo método AHP.

Classificação	Cenário	Resultado de prioridade AHP	Descrição
1	Cenário 6	19,9%	Trincheiras de infiltração
2	Cenário 3	17,6%	Pavimento permeável
3	Cenário 7	16,5%	Micro reservatórios individuais
4	Cenário 5	14,3%	Telhado verde
5	Cenário 2	11,5%	Bacias de retenção
6	Cenário 4	11,3%	Jardim de chuva
7	Cenário 1	8,8%	Drenagem convencional

Observa-se que em primeiro lugar tem-se o cenário que utiliza as trincheiras de infiltração (cenário 6) seguido pelo cenário baseado no uso de pavimento permeável (cenário 3). A posição de vencedor do cenário 6 está relacionada aos bons valores para os critérios S4 e S5 os quais refletem o aumento do tempo de pico e a redução do pico de vazão, conforme observado na matriz de



prioridades apresentada na Tabela 4. Nota-se que estes dois cenários classificados nas primeiras posições de fato apresentam um bom compromisso entre os valores dos diversos critérios adotados apresentando um equilíbrio que resulta em uma melhor avaliação conjunta do que os demais cenários.

Por outro lado, o cenário que ficou na última posição foi o cenário 1 ou cenário de referência que apresenta a situação atual da bacia sem uso de técnicas compensatórias. Este resultado era esperado e reforça a coerência e adequabilidade do modelo multicritério proposto, uma vez que este foi capaz de classificar como pior alternativa aquele cenário que não utilizava técnicas compensatórias, situação desejada em se tratando de um modelo voltado a escolher a técnica compensatória mais recomendada para determinada situação. Dentre os cenários que consideram o uso de técnica compensatória o que ficou na última posição foi o cenário 4, baseado no uso de jardins de chuva. Esse resultado se justifica pelo fato de neste caso a área destinada para aplicação desta técnica compensatória foi bem inferior a utilizada em outros cenários, o que resultou em uma baixa contribuição em termos de atenuação dos picos de vazão bem como de outros indicadores. Ou seja, a classificação desta técnica compensatória em última posição neste estudo de caso, não significa que essa solução em si é pior do que as demais, mas sim que a forma como ela foi aplicada no estudo de caso em questão resultou em um cenário menos efetivo do que os demais.

Sendo assim, é importante ressaltar que as discussões e constatações aqui apresentadas sobre as técnicas compensatórias avaliadas, não devem ser generalizadas, uma vez que cada cenário adotou premissas e restrições que não necessariamente representam um contexto geral ou panorama para determinada técnica compensatória. Dessa forma é essencial a verificação e utilização do presente modelo multicritério em cada contexto e estudo de caso de modo a se realizar um análise específica, evitando-se de incorrer em erros de tomada de decisão devido a realização de análises superficiais.

## CONCLUSÃO

Este trabalho avaliou uma proposta de modelo de análise multicritério dedicado à seleção de técnicas compensatórias de fácil utilização com vistas a servir como ferramenta de suporte a decisão por gestores do setor. Os resultados obtidos indicaram que a estrutura proposta atendeu ao objetivo deste estudo, sendo um modelo com indicadores simplificados e abordagem matemática de fácil entendimento, propiciando uma ferramenta amigável e intuitiva a ser aplicado mesmo por não especialistas em modelos multicritérios.



O estudo em questão reforça constatações apresentadas anteriormente em estudos prévios sobre a praticidade e funcionalidade de uma ferramenta de análise multicritério na escolha dentre os vários tipos de técnicas compensatórias. O modelo proposto demonstrou efetividade, contribuindo ao processo de tomada de decisão em meio a uma diversidade de critérios muitos dos quais conflitantes. Para o estudo de caso avaliado nesta pesquisa a alternativa que alcançou a melhor classificação foi a utilização de trincheiras de infiltração e a pior o cenário sem técnica compensatória, porém estes resultados devem ser analisados com parcimônia, sendo aplicáveis apenas a situação específica do presente estudo. Para dar continuidade a esta pesquisa recomenda-se a realização de estudos futuros com a incorporação de mais indicadores ao modelo, a realização de análise de sensibilidade e a aplicação do modelo multicritério a outros estudos de caso.

## REFERÊNCIAS

- BARBASSA, A. P. (1991). *Simulação do efeito de urbanização sobre a drenagem pluvial na cidade de São Carlos*. EESC–UUSP, 327p.
- BAPTISTA, M. B. NASCIMENTO, N. O. BARRAUD, S. (2011). *Técnicas compensatórias em drenagem urbana*. 2a ed., ABRH, Porto Alegre - RS, 318 p.
- BRITO, D. S. *Metodologia para definição de sistemas de drenagem*. UNB, Dissertação de Mestrado, 2006, 131p.
- CANHOLI, A. P. *Drenagem urbana e controle de enchentes*. Ed. Oficina de Textos, 2ª ed., 2015, 384p.
- COELHO, L. M. G. HENRIQUES, R. S. (2017). “*Proposta de modelo de análise multicritério aplicada ao apoio a seleção de técnicas compensatórias*”. XI Encontro Nacional de Águas Urbanas, Belo Horizonte.
- GILLIAMS, S. RAYMAEKERS, D. MUYS, B. ORSHOVEN, J. (2005). “*Comparing multiple criteria decision methods to extend a geographical information system on afforestation*”. *Computers and Electronics in Agriculture*, 49, 142–158.
- GOEPEL, K. D. (2018). “*Implementation of an Online Software Tool for the Analytic Hierarchy Process (AHP-OS)*”. *International Journal of the Analytic Hierarchy Process*, Vol. 10 (3) 2018, pp 469-487.
- KOU, G. MIETTINEN, K. SHI, Y. “*Multiple criteria decision making: challenges and advancements*”. *Journal of Multi-Criteria Decision Analysis*, 18(1-2), 1-4, 2011.
- MARTINS, L. G. B. (2016). *Avaliação do potencial de aplicação de técnicas compensatórias em áreas urbanas consolidadas*. USP. São Paulo – SP. 197p.



MOURA, P. M. (2004). *Contribuição para a Avaliação Global de Sistemas de Drenagem Urbana*. UFMG. Belo Horizonte – MG, 146p.

POHEKAR, S.D. RAMACHANDRAN, M. (2004). “*Application of multi-criteria decision making to sustainable energy planning - A review*”. *Renew. Sustain. Energy Rev.* 8 (4), 365–381.

SAATY T.L., (2008), Decision making with the analytic hierarchy process, *International Journal of Services Sciences*, 1, 83-98.

SANGIORGIO, V., UVA, G., FATIGUSO, F. (2017). “*Optimized AHP to overcome limits in weight calculation: Building performance application*”. *Journal of Construction Engineering and Management*, 144(2), 04017101.