UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA
FACULDADE DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL

CONTROLE NA FONTE DO ESCOAMENTO PLUVIAL URBANO: DIMENSIONAMENTO E SELEÇÃO DE ALTERNATIVAS DE SISTEMAS DE DRENAGEM SUSTENTÁVEL

GLENDA ROCHA FLORES

ORIENTADOR: NÉSTOR ALDO CAMPANA

MONOGRAFIA DE PROJETO FINAL 2 EM ENGENHARIA AMBIENTAL

BRASÍLIA/DF, 07 DE JULHO DE 2023

UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA
FACULDADE DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL

CONTROLE NA FONTE DO ESCOAMENTO PLUVIAL URBANO: DIMENSIONAMENTO E SELEÇÃO DE ALTERNATIVAS DE SISTEMAS DE DRENAGEM SUSTENTÁVEL

GLENDA ROCHA FLORES

MONOGRAFIA DE PROJETO FINAL SUBMETIDA AO DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL DA UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA COMO PARTE DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE BACHAREL EM ENGENHARIA AMBIENTAL.

APROVADA POR:

_____

NÉSTOR ALDO CAMPANA, Dr (UnB)
(ORIENTADOR)

_____

SÉRGIO KOIDE, PhD (UnB)
(EXAMINADOR INTERNO)

_____

ANTÔNIO JOSÉ DE BRITO, Engenheiro Civil
(EXAMINADOR EXTERNO)

DATA: BRASÍLIA/DF, 12 DE JULHO DE 2023.

FICHA CATALOGRÁFICA

FLORES, Glenda Rocha

Controle na fonte do escoamento pluvial urbano: dimensionamento e seleção de alternativas de sistemas de drenagem sustentável.

xi, 84 p., 297 mm (ENC/FT/UnB, Bacharel, Engenharia Ambiental, 2023)

Monografia de Projeto Final – Universidade de Brasília, Faculdade de Tecnologia. Departamento de Engenharia Civil e Ambiental.

1. Drenagem Urbana 2. Drenagem Sustentável

3. Análise Multicritério 4. Controle na fonte do escoamento pluvial

I. ENC/FT/UnB II. Título (série)

REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

FLORES, G. R. (2023). Controle na fonte do escoamento pluvial urbano: dimensionamento e seleção de alternativas de sistemas de drenagem sustentável. Monografia de Projeto Final, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 95 p.

CESSÃO DE DIREITOS

AUTOR: Glenda Rocha Flores

TÍTULO DA MONOGRAFIA DE PROJETO FINAL: Controle na fonte do escoamento pluvial urbano: dimensionamento e seleção de alternativas de sistemas de drenagem sustentável.

GRAU / ANO: Bacharel em Engenharia Ambiental / 2023

É concedida à Universidade de Brasília a permissão para reproduzir cópias desta monografia de Projeto Final e para emprestar ou vender tais cópias somente para propósitos acadêmicos e científicos. O autor reserva outros direitos de publicação e nenhuma parte desta monografia de Projeto Final pode ser reproduzida sem a autorização por escrito do autor.

_____

Glenda Rocha Flores
glendarflores99@gmail.com

AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar, agradeço a Deus, sempre a única fonte inesgotável de sustento.

À toda minha família que sempre foi essencial em toda a minha trajetória, me apoiando e confortando nos momentos difíceis e compartilhando os bons: meus pais, minha irmã, meu irmão e meu cunhado. E aos meus queridos sobrinhos por serem sempre uma alegria na minha vida.

A todos os meus amigos, principalmente aqueles que estiveram comigo durante a realização desse trabalho, que me apoiaram e me ofereceram palavras de incentivo e motivação. De modo muito especial, às minhas amigas que estão presentes em todos os momentos da vida e são consideradas parte da minha família.

Ao meu orientador, Professor Néstor, por toda a colaboração e todas as sugestões que me ofereceu para que esse trabalho ocorresse da melhor maneira possível.

A todos os professores que foram parte da minha formação aqui na UnB.

A todos os colegas de curso e da UnB que passaram pela minha vida ao longo desses anos, pelas trocas, conversas e trabalhos em equipe.

RESUMO

A necessidade de realização de projetos de manejo das águas pluviais urbanas se faz presente em todos os ambientes antropizados que sofrem com os efeitos da urbanização na dinâmica do ciclo hidrológico, em especial do escoamento superficial e da infiltração. Quando não gerenciado da maneira correta, o escoamento das águas pluviais pode resultar em sérios problemas nas cidades. A fim de minimizar esses impactos da melhor maneira possível, medidas sustentáveis de gestão das águas pluviais têm sido usadas ao redor do mundo: são as técnicas ou medidas compensatórias de controle na fonte do escoamento pluvial urbano, que podem ser usadas também junto aos sistemas tradicionais. Os projetos de drenagem urbana podem ser realizados de várias maneiras, e são muitos os critérios que devem ser considerados em todo o processo. A fim de contribuir para a facilitação da concepção desses projetos, o presente trabalho buscou desenvolver um método de apoio à decisão para seleção de medidas de controle na fonte do escoamento pluvial urbano, através do estudo de diferentes critérios, elaboração de indicadores e aplicação de um método multicritério – o AHP – para obtenção de resultados. Foi realizado um estudo de caso com a avaliação dos critérios físico, hidrológico, hidráulico, econômico, ambiental e social para seis medidas compensatórias alocadas em lotes padrão de dois locais diferentes, sendo que cada local tem diferentes prioridades e consequentemente diferentes pesos para os indicadores. A partir dos resultados, notou-se a grande influência que o peso dado aos indicadores tem no processo de decisão, logo a etapa de atribuição destes merece especial atenção dos projetistas de drenagem urbana. Além disso, as características do local de implantação também influenciam consideravelmente na prioridade que cada alternativa terá no final do processo de decisão. Assim, é necessário sempre fazer uma boa avaliação de critérios a partir dos indicadores formulados, de forma a lapidar essa seleção da melhor alternativa.

Palavras-chave: drenagem urbana, drenagem sustentável, análise multicritério, controle na fonte do escoamento pluvial.

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO 1

2. OBJETIVOS 2

2.1. OBJETIVO GERAL 2

2.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS 2

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA 2

3.1. EFEITOS DA URBANIZAÇÃO 3

3.2. SISTEMAS DE DRENAGEM 4

3.3. TÉCNICAS COMPENSATÓRIAS 6

3.3.1. Reservatórios de detenção 8

3.3.2. Reservatórios de retenção 9

3.3.3. Reservatórios de lote 11

3.3.4. Pavimentos permeáveis 11

3.3.5. Poços de infiltração 13

3.3.6. Valas de infiltração 14

3.3.7. Trincheiras de infiltração 15

3.3.8. Telhado verde 17

3.3.9. Jardins de chuva 19

3.4. DIMENSIONAMENTO DAS MEDIDAS COMPENSATÓRIAS DE CONTROLE NA FONTE 20

3.4.1. Método da curva envelope 20

3.5. CRITÉRIOS PARA AVALIAÇÃO DE SISTEMAS DE DRENAGEM SUSTENTÁVEL 23

3.5.1. Físico 25

3.5.2. Hidrológico 25

3.5.3. Hidráulico 26

3.5.4. Econômico 26

3.5.5. Ambiental e social 27

3.6. INDICADORES PARA COMPARAÇÃO DAS MEDIDAS COMPENSATÓRIAS 28

3.7. MÉTODOS PARA ANÁLISE DOS INDICADORES 35

3.7.1. Processo hierárquico analítico (AHP) 36

4. METODOLOGIA 38

4.1. SELEÇÃO DE ALTERNATIVAS VIÁVEIS 39

4.2. INDICADORES 40

4.2.1. Indicador físico 41

4.2.2. Indicador hidrológico 41

4.2.3. Indicador hidráulico – tempo de retorno 42

4.2.4. Indicador hidráulico – tempo de esvaziamento 43

4.2.5. Indicador econômico 43

4.2.6. Indicador ambiental 44

4.2.7. Indicador social – Contribuição estética 46

4.2.8. Indicador social – Reuso de águas pluviais 47

4.3. DIMENSIONAMENTO DAS MEDIDAS COMPENSATÓRIAS 47

4.4. MÉTODO AHP 50

5. RESULTADOS E DISCUSSÕES 53

5.1. LOCAIS DE PROJETO PARA O ESTUDO DE CASO 54

5.2. ALOCAÇÃO DAS MEDIDAS COMPENSATÓRIAS 59

5.3. PARÂMETROS UTILIZADOS PARA CADA ALTERNATIVA 60

5.4. MATRIZ DE JULGAMENTO DOS INDICADORES 61

5.5. PRIORIDADE DOS INDICADORES EM PORCENTAGEM 63

5.6. DIMENSÕES DAS MEDIDAS COMPENSATÓRIAS 64

5.7. VALORES DOS INDICADORES QUANTITATIVOS 65

5.8. MATRIZ DE COMPARAÇÃO DOS INDICADORES QUALITATIVOS 66

5.9. RESULTADO (PRIORIDADE GLOBAL DE CADA ALTERNATIVA) 67

6. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES 69

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS 72

APÊNDICES 75

APÊNDICE A – PLANILHA DE EXCEL FEITA PARA AUTOMATIZAÇÃO DOS CÁLCULOS 76

LISTA DE FIGURAS

Figura 3.1 - Hidrograma da bacia rural e após urbanização (Tucci, 2002 apud Sell *et al*., 2015) 4
Figura 3.2 - Bacia de detenção (Prefeitura de Porto Alegre, [s.d.]) 8
Figura 3.3 - Bacia de retenção (IPHAN, 2016) 10
Figura 3.4 - Reservatório de lote (CondomínioSC, 2016) 11
Figura 3.5 - Pavimento permeável (EPA, 2020) 13
Figura 3.6 - Esquemas de pavimento permeável (Azzout *et al*., 1994 apud SUDERHSA, 2002). 13
Figura 3.7 - Poço de infiltração (Baptista, 2006 apud Brito, 2006) 14
Figura 3.8 - Vala de infiltração (*City of Omaha Environmental Quality Control Division*, 2014) 15
Figura 3.9 - Trincheira de infiltração (Temecula, [s.d.]) 16
Figura 3.10 - Exemplo de esquema simplificado de trincheira de infiltração (Elaboração própria, 2022) 17
Figura 3.11 - Esquema de telhado verde (Adaptado de *City of Omaha Environmental Quality Control Division*, 2014) 18
Figura 3.12 - Telhado verde *extensive* (EPA, 2020) 18
Figura 3.13 - Jardim de chuva (*City of Omaha Environmental Quality Control Division*, 2014) 19
Figura 3.14 - Estrutura Hierárquica do AHP (Vieira, 2006 apud Costa e Belderrain, 2009) 36
Figura 4.1 - Fluxograma da metodologia aplicada no trabalho. 39
Figura 5.1 - Planta do lote padrão RH2 (Elaboração própria, 2023) 57
Figura 5.2 - Planta do lote padrão RH4 (Elaboração própria, 2023) 58

Figura A.1 – Planilha de Excel para automatização dos cálculos, parte 1 (Dados de chuva e áreas) 77
Figura A.2 – Planilha de Excel para automatização dos cálculos, parte 2 (Dimensionamento) 78
Figura A.3 – Planilha de Excel para automatização dos cálculos, parte 3 (Econômico e ambiental) 79
Figura A.4 – Planilha de Excel para automatização dos cálculos, parte 4 (Indicadores – exceto social) 80
Figura A.5 – Planilha de Excel para automatização dos cálculos, parte 5 (Indicadores – social) 81
Figura A.6 – Planilha de Excel para automatização dos cálculos, parte 6 (Pesos) 82
Figura A.7 – Planilha de Excel para automatização dos cálculos, parte 7 (Modelo - AHP) 83
Figura A.8 – Planilha de Excel para automatização dos cálculos, parte 8 (Resultado) 84

LISTA DE TABELAS

Tabela 3.1 - Medidas de controle e principais características (Adaptado de Adasa, 2018) .. 7
Tabela 3.2 - Vantagens e desvantagens dos reservatórios de detenção (Adaptado de *City of Omaha Environmental Quality Control Division*, 2018) 9
Tabela 3.3 - Vantagens e desvantagens dos poços de infiltração (Adaptado de Adasa, 2018 e SUDERHSA, 2002) 14
Tabela 3.4 - Vantagens e desvantagens das valas de infiltração (Adaptado de *City of Omaha Environmental Quality Control Division*, 2018) 15
Tabela 3.5 - Vantagens e desvantagens das trincheiras de infiltração (Adaptado de Adasa, 2018 e SUDERHSA, 2002) 16
Tabela 3.6 - Vantagens e desvantagens dos telhados verdes (Adaptado de Miguez *et al*., 2015 e SUDERHSA, 2002) 18
Tabela 3.7 - Vantagens e desvantagens de medidas de biorretenção (Adaptado de *City of Omaha Environmental Quality Control Division*, 2018) 19
Tabela 3.8 - Amenidades oferecidas pelos SuDS (Adaptado de Ballard *et al*., 2015, p. 68, tradução nossa) 27
Tabela 3.9 - Critérios e indicadores propostos por Castro (2002) (Adaptado de Castro, 2002) 29
Tabela 3.10 - Critérios e variáveis em drenagem urbana utilizados por Brito (2006) (Brito, 2006) 32
Tabela 3.11 - Porcentagem de redução média dos poluentes do escoamento superficial (Adaptada de *Urban Drainage and Flood Control District*, 1999, apud Brito, 2006) 34
Tabela 3.12 - Escala Fundamental do AHP, de Saaty (Costa e Belderrain, 2009)..... 37
Tabela 4.1 - Condições e recomendações a serem verificadas na seleção de alternativas viáveis (Adaptado de SUDERHSA, 2002 e Adasa, 2018). 40
Tabela 4.2 - Custos corrigidos de implantação, operação e manutenção das medidas compensatórias (Adaptado de Moura, 2004 e Melo, 2011) 44
Tabela 4.3 - Valores (escores) atribuídos para cada faixa de porcentagem de redução média de poluentes (Adaptado de Brito, 2006) 46
Tabela 4.4 - Níveis de contribuição estética das medidas compensatórias (Elaboração própria, 2023) 47
Tabela 5.1 - Tipos de estruturas urbanas da categoria “residencial – unifamiliar” e suas características (Castro, 2007) 55
Tabela 5.2 - Áreas de contribuição do lote padrão do tipo UST RH2..... 57
Tabela 5.3 - Áreas de contribuição do lote padrão do tipo UST RH4..... 58
Tabela 5.4 - Parâmetros utilizados para cada medida compensatória, para o lote de Sobradinho. 60
Tabela 5.5 - Parâmetros utilizados para cada medida compensatória, para o lote do Lago Sul. 61
Tabela 5.6 - Matriz de julgamento absoluto (não normalizado) entre os indicadores, para o lote de Sobradinho 62
Tabela 5.7 - Matriz de julgamento absoluto (não normalizado) entre os indicadores, para o lote do Lago Sul..... 62
Tabela 5.8 - Prioridade dos indicadores, em porcentagem, para o lote de Sobradinho..... 63
Tabela 5.9 - Prioridade dos indicadores, em porcentagem, para o lote do Lago Sul 63

Tabela 5.10 - Dimensões das medidas compensatórias e outros parâmetros, para o lote de Sobradinho 64
Tabela 5.11 - Dimensões das medidas compensatórias e outros parâmetros, para o lote do Lago Sul 65
Tabela 5.12 - Valores dos indicadores quantitativos para o lote de Sobradinho 66
Tabela 5.13 - Valores dos indicadores quantitativos para o lote do Lago Sul 66
Tabela 5.14 - Matriz de julgamento em relação ao indicador social de contribuição estética 67
Tabela 5.15 - Resultado para o lote de Sobradinho (prioridades de cada alternativa) 68
Tabela 5.16 - Resultado para o lote do Lago Sul (prioridades de cada alternativa) 68

LISTA DE EQUAÇÕES

(Equação 3.1)..... 20
(Equação 3.2)..... 21
(Equação 3.3)..... 21
(Equação 3.4)..... 21
(Equação 3.5)..... 22
(Equação 3.6)..... 22
(Equação 3.7)..... 22
(Equação 3.8)..... 22
(Equação 3.9)..... 22
(Equação 3.10)..... 23
(Equação 3.11)..... 23
(Equação 3.12)..... 23
(Equação 3.13)..... 23
(Equação 3.14)..... 30
(Equação 3.15)..... 30
(Equação 3.16)..... 31
(Equação 3.17)..... 32
(Equação 3.18)..... 33
(Equação 3.19)..... 33
(Equação 3.20)..... 33
(Equação 3.21)..... 34
(Equação 3.22)..... 35
(Equação 4.1)..... 41
(Equação 4.2)..... 41
(Equação 4.3)..... 42
(Equação 4.4)..... 43
(Equação 4.5)..... 43
(Equação 4.6)..... 44
(Equação 4.7)..... 48
(Equação 4.8)..... 48
(Equação 4.9)..... 49
(Equação 4.10)..... 49
(Equação 4.11)..... 50
(Equação 4.12)..... 50
(Equação 4.13)..... 50
(Equação 4.14)..... 50
(Equação 4.15)..... 51
(Equação 4.16)..... 51
(Equação 4.17)..... 51
(Equação 4.18)..... 51
(Equação 4.19)..... 52
(Equação 4.20)..... 52

1. INTRODUÇÃO

A água das chuvas, em um terreno em condições naturais, tende a infiltrar no solo e a escoar lentamente pelas superfícies com vegetação, confluindo para cursos d'água (Tucci, 2009). Com a urbanização e as construções, ocorre a impermeabilização de grande parte das superfícies que antes permitiam a infiltração da água no solo e, consequentemente, o aumento da vazão de água que escoa superficialmente (Tucci, 2005).

Com essa mudança, a possibilidade de ocorrência e a frequência de inundações em leitos de rios e de enxurradas aumenta nas cidades, o que pode ter graves consequências para a infraestrutura urbana e, portanto, para a vida humana. Por essa razão, é necessário que o planejamento das cidades e novos loteamentos inclua um bom projeto de drenagem urbana, para garantir que o escoamento das águas pluviais seja devidamente ordenado e que não cause prejuízos (Tucci, 2005).

Mais do que apenas canalizar as águas pluviais para despejo em outro local, o ideal é que sejam adotadas outras medidas, chamadas técnicas compensatórias, que visam tornar o escoamento dessa água o mais próximo possível das condições de pré-urbanização, seja amortecendo sua vazão, seja facilitando sua infiltração no solo, ou os dois. A gestão de águas pluviais que considere esses aspectos será uma gestão mais sustentável e com maiores benefícios para o ambiente. Além de evitar prejuízos à jusante da canalização, a gestão sustentável com técnicas compensatórias, ao contrário da canalização, diminui os impactos sobre a qualidade da água, pois evita o carreamento de poluentes no caminho do escoamento das águas (Tucci, 2009).

Um projeto de drenagem sustentável pode aliar técnicas de canalização com as técnicas compensatórias, de acordo com a necessidade local (Tucci, 2009). Para a seleção da melhor alternativa de sistema de drenagem em um projeto, é necessário considerar uma série de aspectos, como físicos, hidrológicos, hidráulicos, econômicos, ambientais e sociais, entre outros (Brito, 2006). A fim de facilitar esse processo de escolha, estudos vêm sendo feitos com o intuito de criar uma metodologia com indicadores, numéricos ou não, que relacionem esses aspectos, uma vez que possam ser medidos de alguma forma.

Assim sendo, o presente trabalho tem por finalidade contribuir com a proposição de uma metodologia que auxilie na seleção de sistemas de drenagem, considerando os aspectos que forem relevantes. Os próximos capítulos estarão divididos em: definição de objetivos do trabalho; revisão bibliográfica, contendo a base de conteúdos utilizada para a sua elaboração;

metodologia proposta a partir dos indicadores; aplicação dos indicadores em um estudo de caso; conclusões e recomendações finais.

2. OBJETIVOS

2.1. OBJETIVO GERAL

O objetivo geral deste projeto é desenvolver um sistema de indicadores para a seleção de alternativas de controle na fonte do escoamento pluvial urbano e aplicá-lo em um estudo de caso, no qual será feito o dimensionamento de diferentes medidas compensatórias para que sejam comparadas a partir do sistema de indicadores desenvolvido.

2.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Selecionar medidas compensatórias de controle na fonte e apresentar o método de dimensionamento das mesmas;
- Propor a formulação de cada indicador assim como as informações necessárias para sua quantificação ou qualificação (no caso dos indicadores não numéricos);
- Aplicar os indicadores desenvolvidos em um estudo de caso (projeto de sistema sustentável de drenagem para novos condomínios) e avaliar seu desempenho.

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

A revisão bibliográfica deste trabalho começará por desenvolver os motivos que levaram à escolha do tema e que o tornam relevante, apresentando os efeitos da urbanização no escoamento de águas pluviais e as vantagens de sistemas de drenagem com abordagem sustentável. Depois disso, serão apresentadas algumas alternativas utilizadas neste tipo de sistema de drenagem e um método de dimensionamento dessas técnicas. Por fim, para fundamentar o método de análise por indicadores, serão explanados os critérios a serem utilizados para sua construção.

3.1. EFEITOS DA URBANIZAÇÃO

O processo de urbanização dos espaços e a consequente impermeabilização dos terrenos naturais provoca uma drástica alteração no ciclo hidrológico, principalmente um aumento do escoamento superficial de águas pluviais. Por causa das construções e da impermeabilização das superfícies, parte da água que antes infiltrava no solo permeável passa a escoar por essas superfícies impermeáveis, o que contribui para o aumento exacerbado do volume de escoamento superficial.

Além da diminuição da infiltração, a urbanização e modificação do uso e ocupação do solo interfere na velocidade do escoamento:

> [...] em áreas urbanas existem outros aspectos que influenciam significativamente as características "naturais" da infiltração tais como: presença de aterros, escavação, compactação, mistura de materiais de diferente granulometria, etc. A incorporação de superfícies semi-permeáveis e impermeáveis torna a superfície do terreno mais lisa, o que aumenta a velocidade do escoamento. (Campana, 1995, p. 9)

Esse escoamento, sem o planejamento devido, pode causar inundações e enxurradas nas cidades, o que representa um grande risco para a infraestrutura urbana e até mesmo para a vida humana, visto que acidentes graves podem acontecer. Além desses problemas, muitos outros podem vir a ocorrer. Ao passo que as cidades se urbanizam, ocorrem alguns impactos, tais como: o aumento das vazões máximas (em até 7 vezes) e da sua frequência, por causa do aumento da capacidade de escoamento por condutos e canais e pela impermeabilização das superfícies; aumento da produção de sedimentos; e deterioração da qualidade da água superficial e subterrânea, entre outros (Tucci, 2005). Na Figura 3.1 pode-se ver o efeito da urbanização na vazão de águas pluviais e a distribuição no tempo (a vazão máxima aumenta e seu pico no tempo é antecipado).

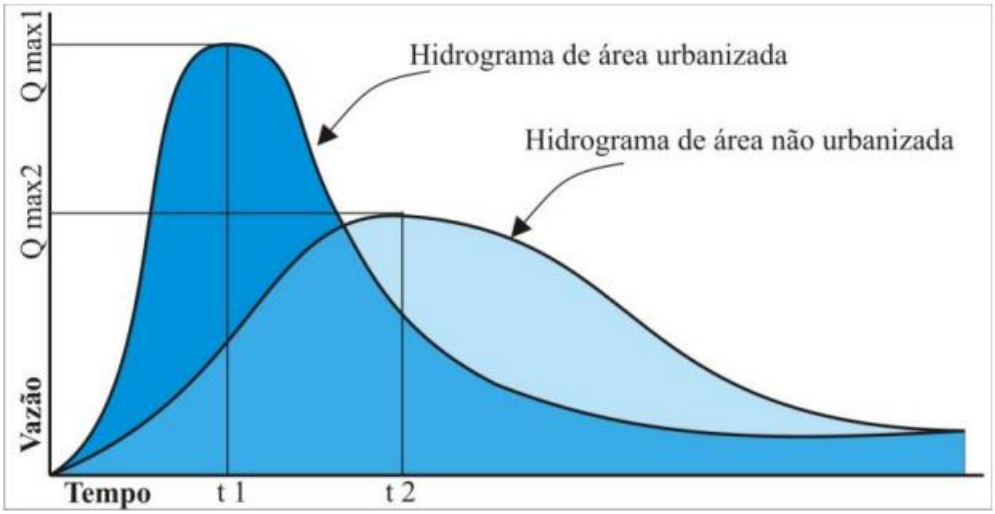


Figura 3.1 - Hidrograma da bacia rural e após urbanização (Tucci, 2002 apud Sell *et al*., 2015)

Com a redução no tempo total de escoamento e aumento da vazão máxima, o escoamento das águas pluviais torna-se mais difícil de ser contido e há um aumento das chances de acontecer enxurradas e acidentes correlatos, por conta da velocidade de escoamento.

3.2. SISTEMAS DE DRENAGEM

Como visto na Figura 3.1 na seção anterior, a vazão máxima de escoamento das águas pluviais é menor na bacia natural, em comparação com a urbanizada. Para controlar e direcionar essa vazão, com o objetivo de evitar impactos negativos desse escoamento na infraestrutura urbana, deve ser projetado e construído um sistema de drenagem urbana.

Segundo Tucci *et al*. (2009, p. 805), o termo "drenagem urbana" se refere ao "conjunto de medidas que tenham por objetivo minimizar os riscos a que as populações estão sujeitas, diminuir os prejuízos causados por inundações e possibilitar o desenvolvimento urbano de forma harmônica, articulada e sustentável".

O sistema tradicional de drenagem a nível urbano, chamado de sistema de microdrenagem, é composto por dispositivos (como galerias, bocas de lobo, sarjetas, etc) de captação e direcionamento das águas pluviais para um corpo receptor. Porém, essa canalização apenas transfere todo o volume para jusante (ponto de despejo da água), e consequentemente a inundação, de um lugar para outro na bacia (Tucci, 2005).

Essa mera transferência do problema de um local para o outro é prejudicial tanto para os interesses públicos como da sociedade em geral, pois devem ser utilizados muitos recursos

(financeiros e materiais) para a construção de todo o sistema de microdrenagem e, além disso, possibilita a ocorrência de inundações na região localizada à jusante. Outro problema frequente em locais com sistemas tradicionais de drenagem é a mistura das águas pluviais com o esgoto, levando problemas para o setor de tratamento de efluentes (Ballard *et al*., 2015). Para mudar essa situação, é preferível a adoção de sistemas de amortecimento no lugar da canalização, ou então uma combinação desses dois tipos de sistema, com a meta de evitar que novos projetos venham a transferir impactos para a bacia (Tucci, 2005).

De acordo com Tucci (2005), alguns dos princípios do controle do escoamento pluvial e de sua gestão sustentável são: evitar que as medidas apenas transfiram impactos de uma área para outra; associar medidas estruturais a não-estruturais, compatibilizando-as com o desenvolvimento urbano; atentar-se ao planejamento de áreas a serem futuramente desenvolvidas ou densificadas; evitar ampliação de cheias naturais pelos ocupantes de uma bacia; priorizar mecanismos naturais de escoamento, como a infiltração; entre outros.

No contexto da drenagem urbana sustentável, foi publicado pela CIRIA (*Construction Industry Research and Information Association*) um manual chamado *The SuDS Manual*, que guia o planejamento, a construção e a manutenção de Sistemas de Drenagem Sustentáveis (*Sustainable Drainage Systems - SuDS*). Segundo Ballard *et al*. (2015), os *SuDS* devem ser pensados como um sistema interconectado para o manejo e tratamento da água de escoamento superficial, fazendo o melhor uso possível desta.

Ainda, nos Estados Unidos, são usadas as Melhores Práticas de Gerenciamento (*Best Management Practice – BMP*). Segundo o *Omaha Regional Stormwater Design Manual*, manual que contém diretrizes para projetos de drenagem pluvial na cidade de Omaha (Nebraska, EUA), uma *BMP* é "uma técnica, medida ou controle estrutural usado em determinadas condições para manejar a quantidade e melhorar a qualidade do escoamento de águas pluviais com o melhor custo-benefício possível" (*City of Omaha Environmental Quality Control Division*, 2014, p. 8-ix, tradução nossa).

Os sistemas sustentáveis de drenagem de águas pluviais consistem em medidas – chamadas de técnicas compensatórias – que retém a água temporariamente ou contribuem para sua infiltração no solo, a fim de tornar o escoamento pós-urbanização o mais próximo possível do natural, promovendo a diminuição da vazão máxima e o aumento do tempo ao pico (tempo até a vazão de escoamento superficial atingir o valor máximo).

De acordo com Ballard *et al*. (2015), os *SuDS* contemplam componentes que podem ter seis funções específicas diferentes:

- Captação de águas pluviais: dispositivos que capturam as águas pluviais para que sejam usadas na edificação ou ambiente local;
- Superfícies permeáveis: medidas estruturais que facilitam a penetração da água, reduzindo o volume de escoamento superficial conduzido para sistemas de drenagem; alguns desses sistemas incluem armazenamento e tratamento da água;
- Infiltração: facilitam a infiltração da água no solo, geralmente incluindo zonas de armazenamento temporário para acomodar parte do volume de escoamento para então liberá-lo para o solo;
- Condução: conduzem a água para sistemas de armazenamento e, quando possível, esses sistemas também promovem controle de volume e de vazão e o tratamento;
- Armazenamento: armazenam e controlam a vazão (amortecem), liberando-a mais devagar; podem prover também o tratamento;
- Tratamento: promovem ou facilitam a degradação de contaminantes presentes na água de escoamento superficial.

Um projeto de sistema de drenagem sustentável pode incluir diferentes tipos de componentes, interligados. Preferencialmente, o escoamento deve ser manejado na fonte, ou seja, perto de onde a água da chuva precipita; quando necessário, o escoamento residual deve ser conduzido para outros componentes, de armazenamento ou tratamento (Ballard *et al*., 2015). Na próxima seção serão explanadas mais informações sobre cada tipo de técnica.

3.3. TÉCNICAS COMPENSATÓRIAS

Alguns exemplos de técnicas compensatórias são: reservatórios de detenção, reservatórios de retenção, reservatórios de lote, pavimento permeável, poço de infiltração, vala de infiltração, trincheira de infiltração, telhado verde e jardins de chuva.

Vale destacar que algumas das referências utilizadas para este trabalho, em especial o Manual de Drenagem Sustentável da CIRIA e o Manual de Drenagem da cidade de Omaha, não fazem distinção entre bacias de detenção e retenção. Porém, as referências brasileiras como Miguez *et al*. (2015), Manual de Drenagem da SUDERHSA e o Manual da Adasa fazem essa distinção, logo aqui serão apresentados os dois.

O Manual de Drenagem e Manejo de Águas Pluviais Urbanas do Distrito Federal (Adasa, 2018) apresenta uma tabela com a síntese das principais medidas de controle na fonte. Pode-se ver uma adaptação na Tabela 3.1:

Tabela 3.1 - Medidas de controle e principais características (Adaptado de Adasa, 2018)

Medida de controle	**Característica Principal**	**Variantes**	**Função**	**Efeito**
Pavimento permeável	Pavimento com revestimento e base porosos	Esgotamento por infiltração no solo e/ou para um exutório	Armazenamento temporário e/ou infiltração	Retardo e amortecimento do escoamento. Remoção parcial de poluentes e sedimentos
Trincheira de infiltração	Reservatório linear escavado no solo preenchido com material poroso	Trincheira de infiltração ou de retenção, com esgotamento para um exutório	Infiltração no solo ou retenção, concentrada e linear	Retardo e amortecimento do escoamento. Remoção parcial de poluentes e sedimentos
Vala de infiltração	Depressões lineares em terreno permeável	Vala de infiltração efetiva no solo ou vala de retenção sobre solo pouco permeável	Infiltração no solo e/ou retenção linear da chuva precipitada na própria vala e em áreas adjacentes	Retardo e amortecimento do escoamento. Remoção parcial de poluentes e sedimentos
Poço de infiltração	Reservatório vertical e pontual escavado no solo	Poço preenchido com material poroso ou revestido com paredes permeáveis	Infiltração pontual	Retardo e amortecimento do escoamento. Remoção parcial de poluentes e sedimentos
Microrreservatório (Reservatório de lote)	Reservatório enterrado de pequenas dimensões	Vazio ou preenchido com material poroso. Com fundo em solo ou vedado, tipo cisterna	Amortecimento das vazões de pico por armazenamento temporário	Retardo e amortecimento do escoamento. Remoção parcial de poluentes e sedimentos
Telhado reservatório	Telhado com função reservatório	Vazio ou preenchido com material poroso, podendo ser solo com vegetação (telhado verde)	Armazenamento temporário da chuva no telhado da edificação	Retardo e amortecimento do escoamento. Isolamento térmico. Remoção parcial de poluentes
Reservatório de detenção aberto	Reservatório seco	Reservatório sobre leito natural ou escavado. Com leito em solo permeável ou impermeável, ou com leito revestido	Amortecimento das vazões de pico por armazenamento temporário	Retardo e amortecimento do escoamento.
Reservatório de retenção aberto	Reservatório com água permanente	Reservatório com leito permeável (freático aflorante) ou com leito impermeável	Armazenamento temporário e/ou infiltração	Retardo e amortecimento do escoamento. Remoção parcial de poluentes e sedimentos

3.3.1. Reservatórios de detenção

Os reservatórios de detenção, também chamados de bacias de detenção, tem como utilidade o armazenamento das águas pluviais durante um curto período, reduzindo a vazão de pico e redistribuindo as vazões ao longo de um período de tempo maior (Miguez *et al*., 2015). O Manual de Drenagem Urbana da SUDERHSA (2002, p. 55) explica que esse tipo de reservatório pode ser de terreno natural ou de concreto, é mantido seco nas estiagens e pode ser "escavado ou materializado por uma pequena barragem de terra ou de concreto, aproveitando ou não depressões naturais do terreno". Pode-se ver um exemplo na Figura 3.2.



Figura 3.2 - Bacia de detenção (Prefeitura de Porto Alegre, [s.d.])

Segundo Miguez *et al*. (2015), esses reservatórios podem ser usados para:

- Controle da vazão máxima: amortecimento do pico à jusante, reduzindo assim a seção hidráulica dos condutos de águas pluviais;
- Controle do volume: armazenamento para tratamento da água e para deposição de sedimentos, melhorando a qualidade da água;
- Controle de material sólido: retenção de sedimentos para que sejam retirados do sistema de drenagem.

Para garantir seu bom funcionamento, é necessário o uso de dispositivos na entrada para evitar obstrução por lixo, como gradeamento, e na saída deve ter um extravasor de emergência para os casos em que a vazão supere a de projeto (SUDERHSA, 2002). Para evitar a proliferação de insetos, o tempo de detenção deve ser limitado; em Brasília, de acordo com o Plano Diretor de Drenagem do DF, o limite é de 12 horas (Adasa, 2018).

As bacias de detenção podem desenvolver vegetação *wetland* – plantas aquáticas – em seu fundo, o que "pode aumentar a eficiência de remoção de poluentes solúveis através de processos biológicos" (*City of Omaha Environmental Quality Control Division*, 2014, p. 8-66, tradução nossa).

Ballard *et al.* (2015, p. 474, tradução nossa) ressalta que "a forma e a aparência estética desse componente dependerá das características específicas do terreno e amenidades desejadas e critérios de projeto e desenvolvimento". Além disso, as bacias de detenção com vegetação, se não forem usadas como quadras esportivas ou desejadas numa forma específica, devem ter arestas curvas e ondulações para que aparentem ser naturais e mais interessantes esteticamente; quanto ao fundo, não deve exceder declividade de 1% (Ballard *et al*., 2015).

O *Omaha Regional Stormwater Design Manual* apresenta as vantagens e as desvantagens das bacias de detenção, apresentados na Tabela 3.2:

Tabela 3.2 - Vantagens e desvantagens dos reservatórios de detenção (Adaptado de *City of Omaha Environmental Quality Control Division*, 2018)

Vantagens	**Desvantagens**
- Planejamento, construção e manutenção são simples - Alta remoção de sedimentos e poluentes absorvidos - Sua aplicação difundida pode reduzir a degradação em canais causada por grandes quantidades de sedimentos e carga de escoamento - Potencial para ser usado como controle de inundação - Redução do volume de escoamento superficial - Oportunidade para uso recreativo e em áreas verdes/paisagismo	- Remoção média a baixa de poluentes solúveis - Potencial necessidade de grandes terrenos - Necessidade de manutenção frequente (remoção de lixo, detritos e vegetação)

3.3.2. Reservatórios de retenção

Os reservatórios de retenção, também chamados de bacias de retenção, têm a função de reter o escoamento superficial e possuem um lago permanente, considerado como volume morto, e neles a água é tratada, através dos mecanismos de sedimentação e de decomposição biológica (Miguez *et al.*, 2015). Além de controlar as cheias, esse tipo de reservatório também contribui para a melhora da qualidade da água; para tal, o tempo de residência deve

ser de 2 a 4 semanas (SUDERHSA, 2002). A Figura 3.3 apresenta um exemplo de bacia de retenção:



Figura 3.3 - Bacia de retenção (IPHAN, 2016)

Esses reservatórios, também chamados de bacias de retenção, tem a vantagem de serem multifuncionais e possibilitarem a redução da vazão de pico e da carga de contaminante do escoamento, o controle da erosão (por evitar perturbações à jusante), melhoria da paisagem e recarregamento dos aquíferos, entre outros (Lima *et al*., 2006 apud Miguez *et al*., 2015). No geral, as vantagens e desvantagens são similares às do reservatório de detenção, com os seguintes acréscimos e diferenças:

- Demais vantagens: ocorre a decomposição biológica de poluentes, devido ao tempo de residência ser maior; devido ao lago permanente, também oferece contribuição estética para o ambiente durante a seca;
- Demais desvantagens: para o controle de insetos vetores de doenças, por ter um lago permanente e um longo tempo de residência da água, “utilizam-se espécimes de peixes e anfíbios adaptados ao ecossistema do lago permamente, tomando-se o cuidado de que haja renovação constante da água e de se prever o manejo permanente e adequado dessa fauna.” (Adasa, 2018, p. 181).

3.3.3. Reservatórios de lote

Os reservatórios de lote podem ser construídos tanto com o fim de armazenar temporariamente a água da chuva para controle da vazão como também o de reaproveitar essa água para usos não potáveis no próprio lote, como lavagem de carros e calçadas, descargas, irrigação, etc., depois de passar pelo tratamento exigido para tal. Esses reservatórios atuam de forma distribuída, sendo uma medida de controle na fonte (Miguez *et al.*, 2015). A água captada pode tanto ser reutilizada como também devolvida ao sistema de drenagem público, na vazão permitida.

A estrutura desses reservatórios é simples, sendo de caixas de concreto, alvenaria ou outro material; ou escavados no solo, preenchidos com brita e isolados do solo por geotêxtil (SUDERHSA, 2002). A Figura 3.4 apresenta uma ilustração de um reservatório para armazenamento de água da chuva em lote residencial:

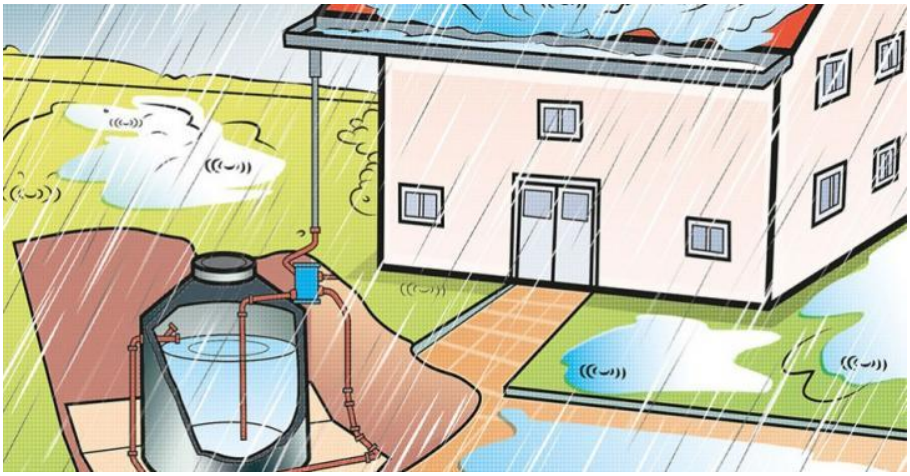


Figura 3.4 - Reservatório de lote (CondomínioSC, 2016)

As vantagens desse tipo de controle são a facilidade de reuso no próprio lote, fazendo pequenas adequações de projeto (como tubulações e uso de bombas), como também a economia de água. A desvantagem é a necessidade de manutenção regular e os custos com a execução.

3.3.4. Pavimentos permeáveis

Os pavimentos permeáveis são estruturas que permitem a infiltração da água pela superfície e o seu armazenamento temporário numa camada porosa abaixo. A água pode ser reutilizada

ou apenas ser liberada de forma controlada no solo (Ballard *et al*., 2015). Devido à baixa resistência, não são usados em áreas com tráfego pesado, mas podem ser usados em estacionamentos e ruas com baixo tráfego. Segundo Urbonas e Stahre (1993) e Araújo *et al*. (2000) (apud Miguez *et al*., 2015), os pavimentos permeáveis "podem ser de asfalto poroso, de concreto poroso ou de blocos de concreto vazado preenchido com material granular (areia, grama)".

No Manual de Drenagem Sustentável da CIRIA, Ballard *et al.* (2015) faz uma distinção entre *porous pavements* e *permeable pavements* (respectivamente, pavimentos porosos e pavimentos permeáveis): os porosos permitem que a água infiltre através de seu próprio material, sendo de grama, brita, concreto ou asfalto poroso, etc.; os permeáveis são de materiais de superfície que por si mesma é considerada impermeável, mas que são dispostos de forma a deixar espaços vazios entre eles, por onde a água infiltra e chega até a sub-base.

Os pavimentos permeáveis podem ser construídos de três modos diferentes: com toda a água captada sendo infiltrada no solo; com infiltração parcial da água, sendo parte dela armazenada para condução para um exutório; sem infiltração, quando o subleito é impermeável (Adasa, 2018). Entretanto, "se houver presença de contaminantes no solo, ou risco de contaminação do lençol freático, deve-se optar pelo pavimento sem infiltração" (Adasa, 2018, p. 154). No geral, esses pavimentos são constituídos da superfície drenante e de uma estrutura porosa de armazenamento logo abaixo, podendo ter uma camada impermeável no fundo nos casos em que não pode ocorrer infiltração.

Algumas vantagens do uso desses pavimentos são a redução do escoamento superficial em relação à superfície impermeável, a redução dos condutos de drenagem pluvial e de custos relacionados, e a redução da lâmina d'água em estacionamentos e calçadas. Já as desvantagens são a necessidade de manutenção para evitar a colmatação (acúmulo de detritos), maior custo de construção (desconsiderando a economia com o sistema tradicional) e a contaminação de aquíferos (Tucci, 2005).

Em contrapartida, quanto à essa última desvantagem, algumas referências apontam que na verdade os pavimentos permeáveis contribuem para a melhora da qualidade de água, como no Manual de Drenagem da cidade de Omaha, devido à filtração da água pela passagem nas camadas granulares. Entretanto, vale ressaltar novamente que esse não é o caso dos pavimentos implantados em locais onde contaminantes possam ser levados para o lençol freático, caso no qual o subleito deve ser impermeável.

Na Figura 3.5 pode-se ver um exemplo de ambiente onde foi utilizado o pavimento permeável, enquanto na Figura 3.6 pode-se ver um esquema ilustrativo dos tipos de pavimentos permeáveis e de suas camadas:



Figura 3.5 - Pavimento permeável (EPA, 2020)

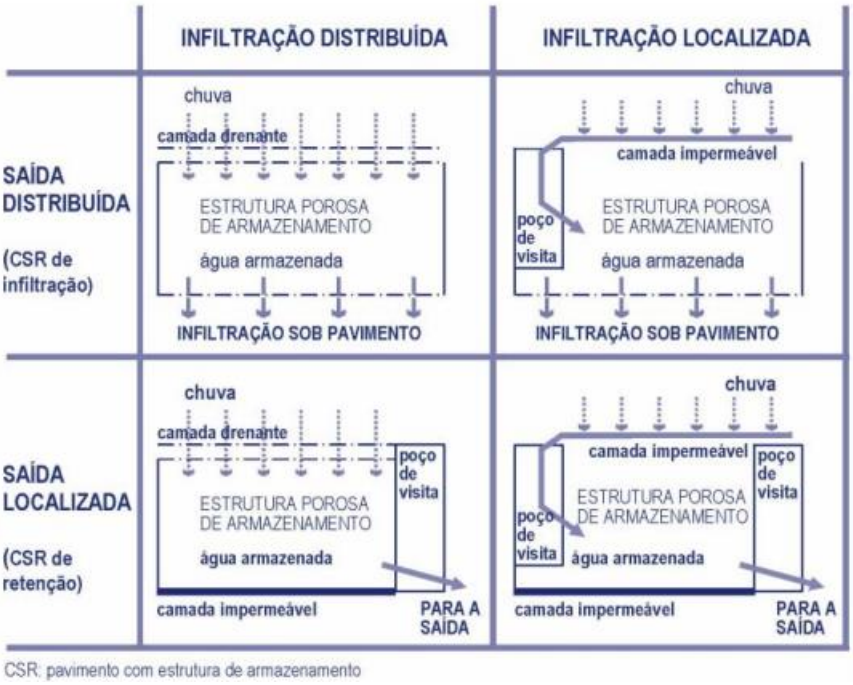


Figura 3.6 - Esquemas de pavimento permeável (Azzout *et al*., 1994 apud SUDERHSA, 2002).

3.3.5. Poços de infiltração

Os poços de infiltração, segundo SUDERHSA (2002, p. 52), "são dispositivos pontuais que permitem a evacuação do escoamento superficial para dentro do solo". Podem ser preenchidos por brita ou outro material granular, ou vazios com a parede interna revestida

(de material permeável/poroso) de modo a possibilitar não serem preenchidos (SUDERHSA, 2002). Algumas vantagens e desvantagens são apresentadas na Tabela 3.3.

Tabela 3.3 - Vantagens e desvantagens dos poços de infiltração (Adaptado de Adasa, 2018 e SUDERHSA, 2002)

Vantagens	Desvantagens
- Possibilidade de integração ao paisagismo do entorno - Promovem a redução e o amortecimento de picos de escoamento superficial - Ocupam pouco espaço (em planta) e podem ser bem discretos - Promovem a recarga de aquíferos	- Pequena capacidade volumétrica de armazenamento - Oferecem risco de contaminação das águas subterrâneas - Não toleram grandes cargas de sedimentos e poluentes, como todas as medidas de controle de infiltração

A Figura 3.7 apresenta um esquema simples de um poço de infiltração:

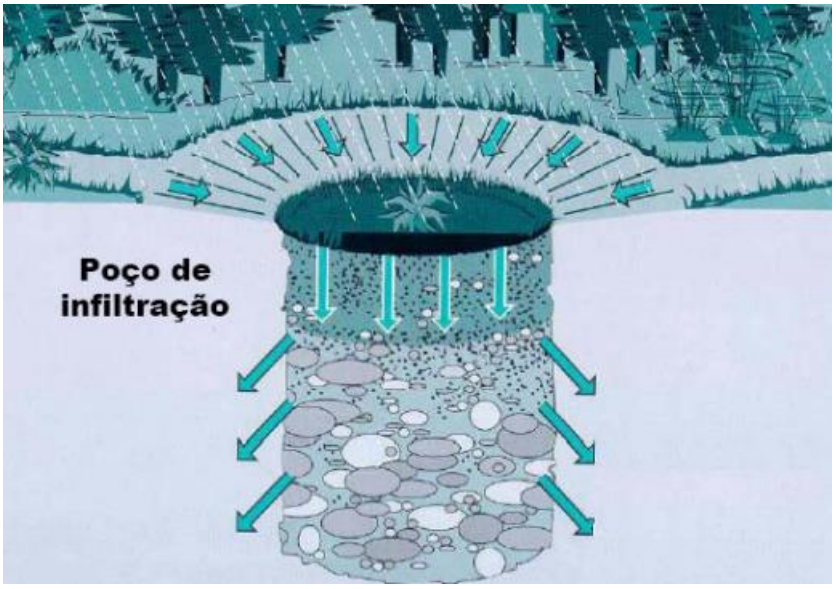


Figura 3.7 - Poço de infiltração (Baptista, 2006 apud Brito, 2006)

3.3.6. Valas de infiltração

As valas de infiltração são leves depressões gramadas com laterais em talude inclinado, nas quais a profundidade e largura são significantemente menores do que o comprimento, geralmente. Elas têm como função transportar o escoamento superficial ao longo de estradas, contribuindo também para a redução de sua velocidade, para o aumento do tempo de concentração e para a infiltração. São mais apropriadas para locais com declividade baixa a média, caso contrário a capacidade de infiltração e de redução da velocidade de escoamento

é prejudicada, e o canal da vala deve suportar a chuva de projeto (Miguez *et al*., 2015). Na Figura 3.8 pode-se ver uma vala de infiltração.



Figura 3.8 - Vala de infiltração (*City of Omaha Environmental Quality Control Division*, 2014)

Vale destacar que as valas de infiltração têm eficiência reduzida em declividades maiores que 5% (SUDERHSA, 2002). Algumas vantagens e desvantagens são listadas na Tabela 3.4.

Tabela 3.4 - Vantagens e desvantagens das valas de infiltração (Adaptado de *City of Omaha Environmental Quality Control Division*, 2018)

Vantagens	**Desvantagens**
- Melhoram a qualidade da água devido a filtração das águas pluviais pela vegetação - Geralmente os custos de construção são menores do que os condutos de drenagem - Conduzem o escoamento de pico e reduzem sua velocidade, minimizando erosão - Podem reduzir volume de escoamento (quando há infiltração)	- Durante precipitações muito intensas, a melhora na qualidade da água é limitada - Requerem grande área quando construídas para atender áreas com grande parte impermeável - A concentração média de alguns poluentes no efluente é maior do que quando se usam outras medidas - Requerem mais manutenção e podem precisar de irrigação para manter a vegetação durante meses secos - Não são eficientes em reduzir vazões de pico para precipitações muito intensas

3.3.7. Trincheiras de infiltração

As trincheiras de infiltração são estruturas preenchidas por material granular que tem a função de armazenar a água por tempo suficiente para sua infiltração no solo, reduzindo

assim os volumes de escoamento superficial e as vazões máximas (Miguez *et al*., 2015). São dispositivos lineares – o comprimento é extenso em relação à largura e à profundidade – e são escavadas no solo, preenchidas com brita de granulometria uniforme, sendo cobertas com grama ou outro revestimento permeável; em outros casos podem ser descobertas (Adasa, 2018). Além disso, as trincheiras promovem a recarga do lençol freático e melhoram a qualidade da água, visto que seu preenchimento funciona como um filtro.

A água infiltra pelas paredes e pelo fundo da estrutura, os quais são revestidos por filtro geotêxtil ou filtro de areia, para evitar penetração de sedimentos (Adasa, 2018). Assim como para as valas de infiltração, declividades elevadas inviabilizam o uso de trincheiras. Tabela 3.5 apresenta algumas vantagens e desvantagens:

Tabela 3.5 - Vantagens e desvantagens das trincheiras de infiltração (Adaptado de Adasa, 2018 e SUDERHSA, 2002)

Vantagens	**Desvantagens**
- Reduzem o volume do escoamento superficial, quando há infiltração - Reduzem a vazão de pico das águas pluviais - Promovem a recarga de aquíferos - Promovem tratamento das águas superficiais pela infiltração no solo	- Não toleram escoamento com altas concentrações de sedimentos, por causa do risco de colmatação - Não é recomendado que sejam usadas para infiltração de águas com cargas elevadas de poluição, pois não tem capacidade de redução de cargas tão concentradas

A Figura 3.9 e a Figura 3.10 apresentam uma aplicação de trincheira de infiltração e um esquema simplificado, respectivamente:



Figura 3.9 - Trincheira de infiltração (Temecula, [s.d.])

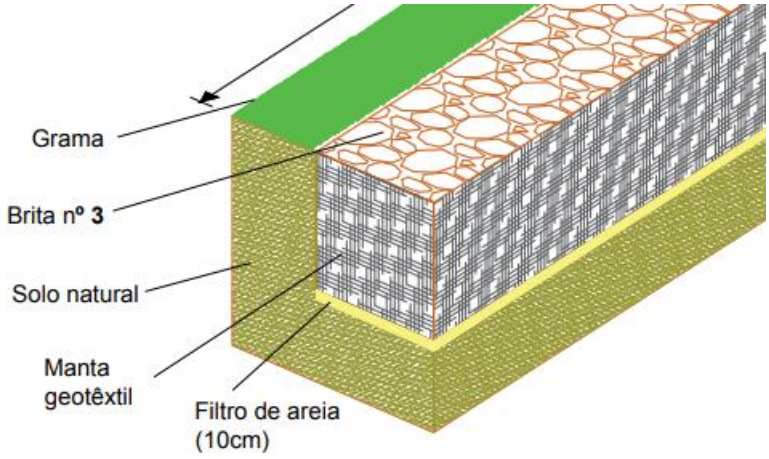


Figura 3.10 - Exemplo de esquema simplificado de trincheira de infiltração (Elaboração própria, 2022)

3.3.8. Telhado verde

O telhado reservatório é uma técnica que compensa a impermeabilização da cobertura de uma edificação, funcionando como um reservatório que armazena provisoriamente as águas pluviais e a libera gradualmente (SUDERHSA, 2002). A partir de adaptações de projeto, a água captada pode ser tratada e reutilizada na própria edificação. Chama-se telhado verde quando é coberto com vegetação, o que confere mais vantagens para o edifício. As camadas de um telhado verde são, geralmente, as seguintes: fundo impermeável, para evitar que a umidade prejudique a camada de suporte (laje ou telhado); uma camada de drenagem (de material poroso) logo acima, para recolher a água precipitada e de irrigação; manta permeável, servindo de filtro; camada de substrato; e por fim, na superfície, a vegetação propícia.

Ballard *et al.* (2015) destaca que os telhados verdes são divididos em duas categorias: *extensive roofs*, cuja camada de substrato não é muito profunda, o que o torna menos pesado, tem plantas mais simples e geralmente não permitem acesso e trânsito de pessoas; *intensive roofs*, com camada de substrato mais profunda, o que o torna adequado para maior variedade de plantas, mas requer maior manutenção, e geralmente permitem acesso e trânsito de pessoas.

Algumas vantagens e desvantagens são apresentadas na Tabela 3.6.

Tabela 3.6 - Vantagens e desvantagens dos telhados verdes (Adaptado de Miguez *et al*., 2015 e SUDERHSA, 2002)

Vantagens	**Desvantagens**
- Aumento da área verde útil - Redução do volume de água na drenagem urbana - Contribuem para o isolamento acústico e térmico do edifício - Contribuição estética	- Necessidade de adequação da estrutura da edificação, para suportar o telhado verde - Necessidade de manutenção mais frequente - Restrição de inclinação máxima (2%)

A Figura 3.11 e a Figura 3.12 apresentam um esquema e uma aplicação de telhado verde, respectivamente:

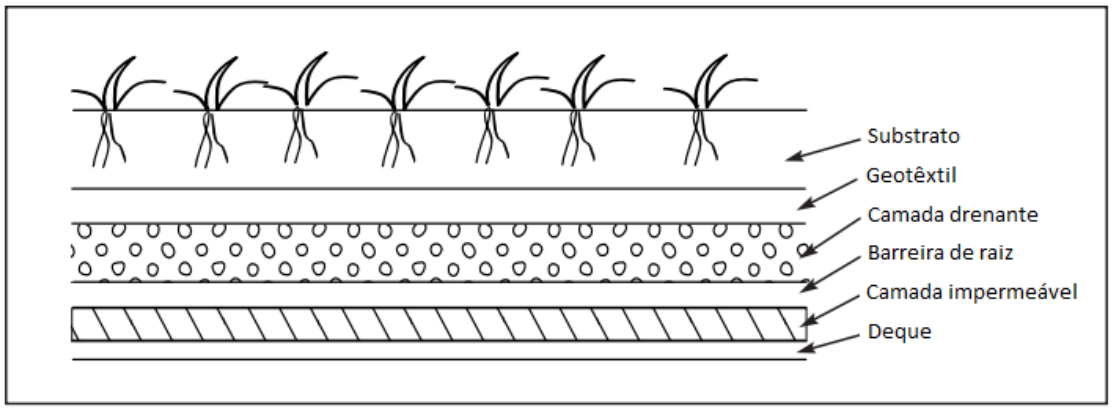


Figura 3.11 - Esquema de telhado verde (Adaptado de *City of Omaha Environmental Quality Control Division*, 2014)



Figura 3.12 - Telhado verde *extensive* (EPA, 2020)

3.3.9. Jardins de chuva

Os jardins de chuva, incluídos na categoria de sistemas de biorretenção, são "rasas depressões paisagísticas que podem reduzir as vazões e os volumes de escoamento superficial, e tratar poluição através de solos e vegetação projetadas" (Ballard *et al.*, 2015, p. 333, tradução nossa). São estruturas que podem ser integradas ao paisagismo, tornando o ambiente mais atrativo e contribuindo também para a manutenção do microclima local, por conta da evapotranspiração das plantas presentes. Na Figura 3.13 pode-se ver um exemplo de aplicação:



Figura 3.13 - Jardim de chuva (*City of Omaha Environmental Quality Control Division*, 2014)

Algumas vantagens e desvantagens estão listadas na Tabela 3.7:

Tabela 3.7 - Vantagens e desvantagens de medidas de biorretenção (Adaptado de *City of Omaha Environmental Quality Control Division*, 2018)

Vantagens	**Desvantagens**
- Alta redução de volume, dependendo das condições do terreno - Baixas concentrações médias no efluente - Contribuição estética - Interceptação de água - Eficaz dentro de uma sequência de tratamento com outras medidas que reduzem carga de sedimentos - Ocupa relativamente pouco espaço (1 a 15% da área drenada) - Eficiência aumenta conforme o tempo passa e a vegetação se estabiliza - Pode contribuir para recarga de aquíferos	- Entope facilmente com sedimentos suspensos - Custo elevado por unidade de área impermeável - Não pode ser usado em áreas com lençol freático pouco profundo - Não pode ser usado para drenagem de áreas com declividades maiores que 20% - Pode não ser eficiente ao remover poluentes, inicialmente

3.4. DIMENSIONAMENTO DAS MEDIDAS COMPENSATÓRIAS DE CONTROLE NA FONTE

O dimensionamento das medidas compensatórias para aplicação do sistema de indicadores para seleção será realizado a partir do método da "curva envelope" ou "método das chuvas". Nesse método, que pode ser utilizado para qualquer medida compensatória de controle na fonte que possua volume de armazenamento, são comparadas as curvas de massa dos volumes afluente (de entrada) e efluente (de saída) ao dispositivo, e a máxima diferença entre os dois é o volume de armazenamento necessário (Silveira e Goldenfum, 2007).

Dessa forma, para se iniciar o projeto, deve-se calcular a vazão afluente ao dispositivo, calculando a vazão de projeto produzida pela bacia para o tempo de recorrência adotado, utilizando a chuva de projeto (Miguez *et al*., 2015). Como o objetivo dessas medidas compensatórias é tornar o escoamento das águas pluviais o mais próximo possível do escoamento em terreno natural, o volume de saída determinado é a vazão de pré-urbanização, ou seja, a vazão natural de escoamento superficial de águas pluviais, antes da urbanização e consequente impermeabilização das superfícies. Essa vazão de pré-urbanização, também chamada de vazão de restrição, é definida de acordo com o local e suas normas vigentes.

O próximo item descreve o método da curva envelope, usado no processo de dimensionamento das medidas compensatórias, e foi elaborado com base no texto de Silveira e Goldenfum (2007).

3.4.1. Método da curva envelope

Para iniciar o dimensionamento, deve-se obter a equação IDF (curva IDF) do local, para que seja possível o cálculo da intensidade máxima da chuva a ser considerada. Essa equação pode ser encontrada em Planos Diretores de Drenagem Urbana, em Manuais de Drenagem, ou outras fontes.

- Expressão da equação IDF (tipo Talbot)

$$i = \frac{a \cdot T^b}{t + c} \qquad \text{(Equação 3.1)}$$

Sendo:

i = intensidade da chuva (mm/h);

T = período de retorno (anos);
t = duração da chuva (min);
a, b, c = parâmetros da equação.

Com os parâmetros da equação IDF, calcula-se a lâmina d'água de entrada e de saída. Vale destacar que o valor de T (tempo de retorno) é escolhido a partir de recomendações de planos diretores ou manuais de drenagem, considerando o risco aceitável de ocorrer um evento extremo para o qual a medida não foi preparada.

- Cálculo da lâmina d'água de entrada na medida compensatória

$$H_E = \beta \cdot \frac{a \cdot T^b}{t + c} \cdot \frac{t}{60} \qquad \text{(Equação 3.2)}$$

$$\beta = C \cdot \frac{A_C}{A_{Mc}} \qquad \text{(Equação 3.3)}$$

Nas quais:
H_E = lâmina d'água de entrada medida sobre a área em planta da MC (mm);
β = produto do coeficiente de escoamento pela razão entre a área contribuinte e a área do dispositivo;
C = coeficiente de escoamento (depende do tipo de cobertura da área de contribuição);
A_C = área de contribuição (qualquer medida de área, desde que seja igual à medida usada para a A_{Mc});
A_{Mc} = área em planta da medida compensatória (qualquer medida de área, desde que seja igual à medida usada para a A_C).

- Cálculo da lâmina d'água de saída da medida compensatória

$$H_S = \gamma \cdot H \cdot q_s \cdot \frac{t}{60} \qquad \text{(Equação 3.4)}$$

Na qual:
H_S = lâmina d'água de saída, também medida sobre a área em planta da MC;
γ = razão entre a área de percolação e volume do dispositivo (mm^{-1});
H = profundidade do volume de acumulação do dispositivo (mm);

q_s = vazão de saída constante do dispositivo (mm/h).

É importante lembrar que a vazão de saída q_s será a vazão de restrição (pré-urbanização) local para as medidas de armazenamento, enquanto para as medidas de infiltração será a condutividade hidráulica do solo.

Geralmente, as equações IDF encontradas no Brasil estão no modelo de Keifer & Chu. As equações de diversas localidades brasileiras podem ser encontradas no artigo "Coletânea das equações de Chuva do Brasil", de Festi (2007). Por isso, deve-se fazer a conversão da equação IDF para o modelo de Talbot.

- Conversão da equação tipo Keifer & Chu para tipo Talbot

Expressão da equação IDF geralmente usada no Brasil, de Keifer & Chu:

$$i = \frac{k \cdot T^m}{(t+d)^n} \qquad \text{(Equação 3.5)}$$

Sendo:

d, k, m, n = parâmetros da equação.

Para a conversão para a equação do tipo Talbot (Equação 3.1), utilizam-se as seguintes expressões:

$$a = 0{,}68 \cdot k \cdot \exp(0{,}06 \cdot n^{-0{,}26} \cdot d^{1{,}13}) \qquad \text{(Equação 3.6)}$$

$$b = m \qquad \text{(Equação 3.7)}$$

$$c = 1{,}32 \cdot n^{-2{,}28} \cdot d^{0{,}89} \qquad \text{(Equação 3.8)}$$

Agora, tendo obtido os parâmetros a, b e c da equação do tipo Talbot (Equação 3.1), segue-se com o dimensionamento.

- Lâmina d'água armazenável

Silveira e Goldenfum (2007, p. 157) dizem que "para efeito de cálculo, os volumes podem ser expressos em lâminas de água equivalentes sobre a área em planta do dispositivo". Em seu artigo, a variável V_{max} tem dimensão de comprimento (mm). Para facilitar o entendimento, neste trabalho a variável V_{max} foi trocada por H_{max}.

Para obtenção do volume de armazenamento, maximiza-se a diferença entre HE e HS:

$$\frac{\partial H}{\partial t} = \frac{\partial (H_E - H_S)}{\partial t} = 0 \qquad \text{(Equação 3.9)}$$

Sendo:

$\frac{\partial H}{\partial t}$ = variação da altura da lâmina d'água dentro da medida compensatória no tempo.

Utilizando as expressões anteriores, desenvolvendo e explicitando o tempo, tem-se, respectivamente:

$$\beta \cdot \frac{a \cdot T^b}{(t+c)} \cdot \left[1 - \frac{t}{t+c}\right] - \gamma \cdot H \cdot q_s = 0 \qquad \text{(Equação 3.10)}$$

$$\beta \cdot \frac{c \cdot a \cdot T^b}{(t+c)^2} - \gamma \cdot H \cdot q_s = 0 \qquad \text{(Equação 3.11)}$$

$$t = \sqrt{\frac{\beta \cdot c \cdot a \cdot T^b}{\gamma \cdot H \cdot q_s}} - c \qquad \text{(Equação 3.12)}$$

Sendo:

t = tempo da máxima diferença entre volumes (tempo através do qual pode-se calcular o volume de dimensionamento ou volume máximo);

Assim, a profundidade máxima de armazenamento na medida compensatória é dada pela equação:

$$H_{max} = \left(\sqrt{\frac{a}{60}} \cdot \sqrt{\beta} \cdot T^{\frac{b}{2}} - \sqrt{\frac{c}{60}} \cdot \sqrt{\gamma} \cdot \sqrt{H} \cdot \sqrt{q_s}\right)^2 \qquad \text{(Equação 3.13)}$$

Sobre as particularidades no dimensionamento de cada medida, elas serão apresentadas quando os cálculos forem feitos no desenvolvimento do trabalho.

3.5. CRITÉRIOS PARA AVALIAÇÃO DE SISTEMAS DE DRENAGEM SUSTENTÁVEL

Como visto com a apresentação das técnicas compensatórias que podem ser usadas como alternativas sustentáveis em sistemas de drenagem, cada uma possui muitas particularidades, vantagens e desvantagens. Ao fazer um projeto, a escolha quanto a quais alternativas adotar depende de vários pontos a serem observados. Desse modo, todo projeto deve começar com um estudo preliminar, que é uma etapa obrigatória no processo de implantação de um projeto de drenagem (Brito, 2006).

Em relação à escolha de critérios para a seleção de medidas compensatórias, destaca-se que, em uma concepção de projeto, primeiramente se faz um estudo do terreno, analisando sua topografia (em especial a declividade), o tipo de solo local e sua capacidade de infiltração, a profundidade do lençol freático, entre outros. Todas essas características influenciam na escolha da alternativa a ser utilizada, por exemplo: se a profundidade do lençol freático for pequena, não se pode construir um poço de infiltração muito profundo que não respeite a limitação de distância entre o topo do lençol e o fundo do poço; se a declividade do terreno for muito alta em determinada direção, não se pode construir uma trincheira ou uma vala de infiltração nesta, pois perde-se espaço de armazenamento de água e existe o risco do dispositivo atuar mais como um canal do que como uma medida compensatória em si. É necessário, também, verificar se há restrições no local de implantação do projeto, como um perímetro de proteção para captação de água potável (SUDERHSA, 2002).

Então, para verificar quais são as limitações do local de projeto e então selecionar previamente as medidas viáveis, podem ser consultadas as recomendações dos manuais de drenagem ou outras fontes. O Manual de Drenagem Urbana da Região Metropolitana de Curitiba (SUDERHSA, 2002) e o Manual de Drenagem da Adasa (Adasa, 2018) são exemplos de documentos que apresentam recomendações de projeto para medidas compensatórias.

Além das recomendações supracitadas, observadas para garantir a segurança e a eficiência do projeto, a fim de aprimorá-lo e obter o máximo de benefícios, outros fatores também são levados em conta. Segundo Ballard *et al*. (2015), os benefícios pretendidos com o uso de *SuDS*, que dependem do local onde serão implantados, se encaixam nas seguintes categorias:

- Quantidade de água: controlar o volume de escoamento superficial para gerenciar o risco de enchentes e proteger o ciclo natural da água;
- Qualidade da água: manejar a qualidade da água de escoamento superficial, prevenindo a poluição;
- Amenidade: criar lugares melhores para a população;
- Biodiversidade: criar lugares melhores para a natureza.

Um projeto sustentável e eficiente buscará o máximo de benefícios possível dentro das possibilidades e limitações existentes.

Com a análise de estudos preliminares de sistemas de drenagem, Brito (2006) concluiu que os critérios geralmente observados são as características físicas, hidrológicas, hidráulicas e

econômicas. Além desses, devido aos impactos que esses projetos podem causar, negativos ou positivos, serão considerados também os aspectos ambiental e social. Assim, nas seções a seguir serão detalhados cada critério em específico.

3.5.1. Físico

Na categoria dos critérios físicos, destacam-se a capacidade de infiltração do solo e a declividade do terreno. O *Omaha Regional Stormwater Design Manual* faz uma distinção entre o potencial de infiltração e a taxa de infiltração da água no solo: "a taxa de infiltração dos solos e o volume subterrâneo disponível para armazenamento da água determina o potencial de infiltração em um terreno" (*City of Omaha Environmental Quality Control Division*, 2014, p. 8-8, tradução nossa). Logo, a possibilidade de uso de técnicas compensatórias de infiltração depende das condições de infiltração no solo local.

Segundo o Termo de Referência para elaboração de projetos de sistemas de drenagem pluvial no DF, da NOVACAP, é preciso verificar no local a situação das ruas, interferências existentes, condições de acesso, facilidades e dificuldades que possam influenciar na execução dos projetos, etc.

Em resumo, Brito (2006) destaca as seguintes características como relevantes para o critério físico: declividade do terreno, permeabilidade do solo, grupo de solo, capacidade de infiltração, tipo de ocupação local e porcentagem de área impermeabilizada.

3.5.2. Hidrológico

Quanto ao aspecto hidrológico, primeiramente é necessário conhecer as características da precipitação no local do projeto. Segundo Tucci *et al.* (2009, p. 177), "as características principais da precipitação são o seu total, duração e distribuições temporal e espacial". A intensidade da precipitação, que relaciona o total precipitado com a duração do evento, é um ponto essencial a ser estudado para o controle de inundação. Para o planejamento, são usados os dados das curvas de intensidade-duração-frequência (IDF), que são obtidas através de séries históricas de precipitação local.

Segundo Brito (2006), características hidrológicas como intensidade da chuva, precipitação média da área ou da bacia, precipitação máxima, vazão de pico, tempo de concentração e tempo ao pico são importantes na avaliação desse critério.

3.5.3. Hidráulico

No contexto hidráulico, deve-se garantir que o projeto, quando executado, atenda aos objetivos determinados inicialmente. Os aspectos hidráulicos se referem a escolha e dimensionamento das estruturas e estão estreitamente ligados aos hidrológicos, visto que, por exemplo, para aplicação da curva IDF deve ser determinado o tempo de retorno, que "avalia de forma indireta o risco da obra e diretamente a probabilidade de ocorrência de um evento extremo" (Brito, 2006, p. 49). O tempo de retorno é o inverso da probabilidade anual de excedência de uma determinada intensidade de chuva (probabilidade de que determinada intensidade seja igualada ou superada em um ano qualquer) (Adasa, 2018). Esse parâmetro é determinado a partir de diretrizes geralmente propostas no Plano Diretor local, variando de acordo com o risco que se pode aceitar na obra em questão, e a partir dele é definida a precipitação máxima para a qual as medidas compensatórias devem estar preparadas. Logo, o tempo de retorno é um exemplo de variável nesse critério (Brito, 2006).

Com isso, vê-se a importância dos estudos hidráulico e hidrológico, pois são pilares para a garantia da segurança e da efetividade do projeto em questão, evitando riscos para os habitantes e para a infraestrutura local.

3.5.4. Econômico

Como em toda obra, o valor econômico é um ponto muito importante a ser estudado. Segundo Brito (2006, p. 49), o "valor econômico pode ser especificado em forma de custo quando da construção do projeto e manutenção da obra, ou na forma de benefício quando na execução forem verificados prejuízos evitados".

Devido aos aspectos construtivos de cada técnica compensatória, a adequações necessárias em projeto, aos materiais e mão de obra, entre outros, é muito importante avaliar os custos envolvidos com cada uma. Algumas requerem obras mais simples, outras mais complexas. Outro fator que também influencia é se a técnica em questão será implantada no começo de um empreendimento ou depois que ele já está construído, pois os custos para adequação podem ser maiores. As seguintes variáveis são analisadas nesse critério: custo de implantação, custo de manutenção e custo de operação; além dessas, a variável benefício, quando pode ser quantificada, melhora a avaliação do critério econômico (Brito, 2006).

3.5.5. Ambiental e social

Os critérios ambiental e social serão apresentados juntos já que têm uma ligação estreita entre si. No contexto ambiental e social, é de grande importância observar os impactos do projeto na qualidade da água, na vida dos habitantes locais e na natureza. Três dos quatro objetivos do uso dos *SuDS* (sistemas de drenagem sustentável) definidos por Ballard *et al*. (2015) estão relacionados a esse critério: qualidade da água, amenidades e biodiversidade. O aspecto *amenity* (amenidade) é definido como:

> [...] "Uma instalação ou serviço útil ou agradável", que inclui o tangível (algo que pode ser medido em termos de uso), e o menos tangível (algo que pode ser experimentado como prazer ou apreciação estética). (Ballard *et al*., 2015, p. 67, tradução nossa)

Além disso, esse aspecto também está associado com a *liveability*, ou seja, os fatores que melhoram a qualidade de vida para os habitantes, incluindo o bem-estar da comunidade e dos indivíduos, tornando o local desejável para residir ou trabalhar (Ballard *et al*., 2015).

Quanto à biodiversidade, além de incluir a diversidade de espécies individuais, inclui o ser humano e sua interação com o ambiente; localmente, a biodiversidade remete à fauna e a flora que compartilham o espaço nos quais os humanos vivem, trabalham e se entretém.

Na Tabela 3.8 constam alguns dos vários benefícios ambientais e sociais fornecidos pelas técnicas compensatórias. Vale ressaltar que *SuDS* "verdes" e "azuis" se referem respectivamente a infraestruturas integradas com vegetação e com corpos hídricos.

Tabela 3.8 - Amenidades oferecidas pelos SuDS (Adaptado de Ballard *et al*., 2015, p. 68, tradução nossa)

Categoria de amenidade	**Exemplos**
Melhoria na qualidade do ar	*SuDS* que utilizam áreas azuis e verdes, incluindo grama e árvores, providencia uma melhora significativa na qualidade do ar.
Regulação da temperatura do ar	Infraestruturas verdes e azuis moderam temperaturas extremas.
Biodiversidade e ecologia	*SuDS* verdes e azuis auxiliam no apoio à flora e à fauna para o benefício das comunidades, aspecto no qual os valores da amenidade e da biodiversidade se juntam
Crescimento econômico e investimento	Lugares atrativos (particularmente onde a água faz parte do design) tendem a encorajar investimento interno. Os *SuDS* agregam valor à terra e a propriedades próximas. Além disso, podem atrair turistas, especialmente se forem novidades, e contribuem para tornar os lugares atrativos.

Categoria de amenidade	Exemplos
Saúde e bem-estar	Infraestruturas verdes e azuis desempenham um papel importante em manter a saúde mental e física, providenciando locais para recreação e relaxamento.
Redução de ruídos	SuDS e áreas verdes associadas providenciam barreiras e superfícies que absorvem o som. Telhados verdes proporcionam isolamento acústico para edifícios.
Segurança hídrica	Armazenamento de águas pluviais para uso residencial ou outros economiza água, fornece recursos para irrigação e viabilidade a longo prazo para vegetação.
Recreação	SuDS fornecem áreas verdes e azuis que podem ser usadas para caminhadas, ciclismo, esportes, jogos, etc.

Por fim, de maneira mais evidente, Brito (2006) define que o critério ambiental pode ser avaliado a partir do(a): porcentagem de áreas verdes suprimidas, supressão ou criação de habitats; escoamento superficial resultante; e qualidade da água de drenagem pluvial.

No âmbito social, as variáveis relevantes são: aceitação e preferência da população por uma técnica específica; benefício social; impactos na saúde humana; criação de áreas recreativas; multifuncionalidade da obra, etc. (Brito, 2006).

3.6. INDICADORES PARA COMPARAÇÃO DAS MEDIDAS COMPENSATÓRIAS

Para realizar a avaliação dos critérios mencionados anteriormente, aplicando a análise multicritério, é necessária a construção de indicadores utilizando variáveis pertinentes dentro de cada categoria. A fim de esclarecer o que são os indicadores e como se dá sua construção e uso para avaliações do tipo, será feita uma revisão de alguns trabalhos realizados na área.

De acordo com OECD (1993 apud Castro, 2002), indicadores são parâmetros ou valores derivados de parâmetros e que fornecem informações sobre o estado de um fenômeno. Ainda, o termo “indicador” pode ser definido como sendo uma variável, um parâmetro, uma medida, um valor, um índice, entre outros, em que é comparado uma quantidade com um valor medido ou calculado cientificamente (Moldan e Bilharz, 1997 apud Castro, 2002). Porém, indicadores podem também ser qualitativos. Segundo Moldan e Bilharz (1997 apud Castro, 2002), o indicador pode ser uma variável qualitativa (nominal), de classificação

(ordinal) ou quantitativa, sendo que os qualitativos são preferíveis quando não há informação quantitativa disponível e/ou o atributo de interesse não for quantificável.

Ainda, os indicadores podem ser variáveis individuais ou ser uma função de outras variáveis, de acordo com Michael (2007, apud Junior, 2009), sendo que esta função pode ser: uma relação que mede a variação da variável em relação a um valor fixo; uma função simples (de duas ou mais variáveis); ou uma função complexa, resultante de um modelo de simulação. Tendo esclarecido o que de fato são indicadores, o próximo passo é definir quais variáveis podem ser utilizadas para sua construção e então utilização no método multicritério a ser escolhido, além da demonstração do que são os indicadores na prática.

Castro (2002) propôs indicadores dentro dos critérios "objetivo", "impactos da obra" e "inserção da obra", em seu trabalho sobre avaliação de sistemas de drenagem urbana. O autor os escolheu considerando o que seria pertinente à avaliação a ser feita, de forma que eles englobassem os "parâmetros possíveis de comparação entre as diversas técnicas de drenagem urbana" (Castro, 2002, p. 38). No caso dos indicadores quantitativos, os valores deveriam estar dentro do intervalo de -1,0 a 1,0; enquanto no caso de indicadores qualitativos (de avaliação subjetiva) a escala de avaliação utilizada teve 7 níveis (Grande Piora, Sensível Piora, Pequena Piora, Indiferente, Pequena Melhora, Sensível Melhora e Grande Melhora) (Castro, 2002). A Tabela 3.9 apresenta os principais indicadores propostos pelo autor:

Tabela 3.9 - Critérios e indicadores propostos por Castro (2002) (Adaptado de Castro, 2002)

Critério	**Indicadores**
Objetivo	Indicador de atendimento ao objetivo
Impactos da obra	- Impactos hidrológicos: indicador de impacto sobre as vazões de jusante; indicador de recarga do aquífero; - Impactos sanitários: indicador de possibilidade de transmissão de doenças; indicador de possibilidade de proliferação de insetos; - Impactos na qualidade das águas: indicador de impacto nas águas superficiais; indicador de impacto nas águas subterrâneas;
Inserção da obra	- Inserção ambiental: indicador de criação e preservação de habitats; indicador de impacto paisagístico; - Inserção social: indicador de criação de áreas de recreação, lazer e equipamentos urbanos; indicador de impacto nas condições de circulação; indicador de possibilidade da utilização para o desempenho de outras funções técnicas; indicador de desapropriação de áreas;

Algumas das expressões dos indicadores propostos por Castro (2002), para exemplificação, são:

- Atendimento ao objetivo

$$I_o = \frac{T_R}{T_{RD}} \qquad \text{(Equação 3.14)}$$

Sendo:

T_R = tempo de retorno de projeto;

T_{RD} = tempo de retorno desejável.

O tempo de retorno desejável (T_{RD}) depende do risco ao qual aquela obra pode submeter-se de forma aceitável, o que depende das recomendações dos órgãos locais responsáveis por definir esse parâmetro, cujo cálculo foi brevemente explicado no item 3.5.3. Assim, a situação favorável é que o T_R de um projeto seja maior ou igual ao recomendado. Com isso, é desejável que $I_o \geq 1$. No entanto, o comum é adotar pelo menos o valor recomendado para o T_R, não maior, visto que um valor maior que o recomendado significa ter gastos a mais com a construção do sistema.

- Impacto sobre as vazões a jusante

Castro (2002) define duas expressões possíveis para este indicador: uma para o caso no qual a vazão alvo a ser mantida a jusante seja superior a um dado valor mínimo, e outra expressão para o caso no qual a vazão alvo seja limitada a um valor máximo. Como no DF há uma limitação da vazão a escoar a jusante, sendo de 24,4 L/(s.ha), definida pela Resolução Nº 09/2011 da Adasa, a expressão desse indicador seria a do segundo caso, que é a seguinte:

$$I_{H1} = \frac{Q_{alvo}}{Q_{jus}} \qquad \text{(Equação 3.15)}$$

Sendo:

Q_{alvo} = vazão alvo a ser mantida a jusante;

Q_{jus} = vazão máxima a escoar a jusante segundo a alternativa estudada.

A vazão alvo é a vazão de pré-urbanização, que foi previamente explicada no presente trabalho. Para sua utilização, é necessário ter o conhecimento dos dados de precipitação local, a fim de calcular a vazão de escoamento pluvial.

Segundo a Resolução Nº 09/2011 supracitada, da Adasa, Q_{jus} é limitada a Q_{alvo} de 24,4 L/(s.ha). Nesse caso, o valor desejável para este indicador seria de $I_{H1} \geq 1$. No entanto, com o objetivo de aproximar a dinâmica do ciclo hidrológico do cenário urbanizado mais próximo do funcionamento natural, o ideal é que $I_{H1} = 1$.

- Recarga do aquífero

A expressão apresentada abaixo para esse indicador (Equação 3.16), conforme arbitrado por Castro (2002), é usada na situação em que $Q_{inf} < 2 \cdot Q_{nat}$. Já no caso em que $Q_{inf} \geq 2 \cdot Q_{nat}$, o valor do indicador é igual a 1. O autor definiu dessa forma por que, segundo Barraud *et al*. (2001 apud Castro, 2002), para que um sistema de drenagem contribua para a recarga de um aquífero, o volume total infiltrado deve ser superior ao volume infiltrado no cenário natural, pré-urbanizado.

$$I_{H2} = \frac{Q_{inf} - Q_{nat}}{Q_{nat}} \qquad \text{(Equação 3.16)}$$

Sendo:

Q_{inf} = Vazão infiltrada segundo a alternativa estudada;

Q_{nat} = Vazão infiltrada caso a área não estivesse urbanizada.

A vazão infiltrada pode ser calculada a partir das características da medida compensatória, da pluviosidade e capacidade de infiltração do solo local.

- Impacto nas águas subterrâneas

Esse indicador é medido pela observação do decisor quanto à melhora ou piora da qualidade das águas, a partir de uma escala subjetiva, explicada previamente nesse item. Depende da situação local, fontes de poluição, capacidade de depuração das águas pluviais pela medida compensatória e pelo solo, etc.

Enquanto isso, em seu modelo para seleção de alternativas de sistemas de drenagem, Brito (2006) propôs indicadores relacionando variáveis dentro de cada um dos critérios escolhidos. Ressalta ainda que a seleção das variáveis foi feita considerando "a possibilidade de observação antes e após a implantação do sistema de drenagem para que pudesse haver uma comparação em termos de impacto de cada alternativa de projeto" (Brito, 2006, p. 57). As variáveis escolhidas pela autora estão relacionadas na Tabela 3.10.

Tabela 3.10 - Critérios e variáveis em drenagem urbana utilizados por Brito (2006) (Brito, 2006)

Critério	Variáveis
Físico	Declividade Tipo de ocupação predominante Tipo e condições de solo
Hidrológico	Tempo de concentração Tempo ao pico Vazão de pico Intensidade de chuva
Hidráulico	Tempo de retorno Velocidade do escoamento Coeficiente de escoamento Dimensões das estruturas Grau de eficiência do sistema
Econômico	Custo de instalação Custo de manutenção Custo de operação TIR
Ambiental	Qualidade das águas Quantidade das águas
Social	Áreas recreativas Número de doentes Volume de água para aproveitamento

Com isso, alguns dos indicadores propostos por Brito (2006) foram os seguintes:

- Indicador de alterações físicas

Avalia se houve aumento ou redução de áreas impermeáveis com a alternativa utilizada, expresso por:

$$I_f = \frac{A_{imp.1} - A_{imp.2}}{A_{imp.1}} \qquad \text{(Equação 3.17)}$$

Sendo:

$A_{imp.1}$ = porcentagem de área impermeável antes da implantação do sistema (%);

$A_{imp.2}$ = porcentagem de área impermeável após a implantação do sistema (%).

Para utilização desse indicador é necessária a obtenção de dados de áreas impermeáveis através de fotos aéreas.

- Redução ou aumento da vazão de pico

Avalia o desempenho hidrológico do sistema proposto, visto que a redução da vazão de pico significa o amortecimento da vazão. É calculado por:

$$I_{H2} = \frac{Q_{p1} - Q_{p2}}{Q_{p1}} \qquad \text{(Equação 3.18)}$$

No qual:

Q_{p1} = vazão de pico antes da implantação do sistema de drenagem;

Q_{p2} = vazão de pico após a implantação do sistema de drenagem.

Para uso desse indicador, é necessário obter dados de precipitação local para que seja possível calcular a vazão de pico.

- Critério econômico

Neste indicador, são considerados os custos de instalação, manutenção e operação de cada alternativa. Foi proposto por Moura (2004) (apud Brito, 2006), e é expresso por:

$$I_{CK} = \frac{\frac{\sum_{k=1}^{n_t} C_k}{n_t}}{C_k} \qquad \text{(Equação 3.19)}$$

Sendo:

I_{CK} = índice de custos referente à alternativa k;

k = alternativa em análise;

C_k = custos da alternativa k;

n_t = número de alternativas.

Para o cálculo desse critério, deve-se obter as informações relativas aos custos mencionados (instalação, manutenção e operação), para cada medida compensatória analisada.

- Impactos no meio ambiente

Para simplificação, nesse indicador foi utilizada a variável extensão de áreas verdes, dando uma dimensão do impacto. É calculado por:

$$I_A = \frac{A_{verde2} - A_{verde1}}{A_{verde1}} \qquad \text{(Equação 3.20)}$$

No qual:

A_{verde1} = área verde antes da implantação do sistema de drenagem;

A_{verde2} = área verde após a implantação do sistema de drenagem.

O uso desse indicador requer o cálculo da área dos espaços verdes de antes e depois do sistema implantado, ou seja, as mudanças na cobertura do solo.

- Qualidade das águas

Este indicador foi baseado no trabalho de Urban Drainage and Flood Control District (1999, apud Brito, 2006), no qual foram analisados algumas estruturas e alguns parâmetros de qualidade da água. A Tabela 3.11 mostra a porcentagem de redução média de alguns poluentes presentes no escoamento superficial por diferentes medidas compensatórias:

Tabela 3.11 - Porcentagem de redução média dos poluentes do escoamento superficial (Adaptada de *Urban Drainage and Flood Control District*, 1999, apud Brito, 2006)

Medida compensatória	**TSS**	**TP**	**TN**	**TZ**	**TPb**	**DBO**	**Bactéria**
Bacia de detenção gramada	30	15	5	5	NA	NA	NA
Bacia de detenção	80,5	39,5	40	35,5	52	34,5	NA
Vala gramada	40	20	15	20	NA	NA	NA
Pavimento poroso de bloco modular	87,5	65	80	98	80	80	NA
Pavimento poroso com detenção	52	48,5	-22,5	54	70	70	NA
Plano de infiltração de areia de detenção	52	48,5	-22,5	54	70	70	NA
Legenda: TSS – Sólidos suspensos totais; TP – Fósforo total; TN – Nitrogênio total; TZ – Zinco total; TPb – Chumbo total; DBO – Demanda Bioquímica de Oxigênio; NA – Não avaliado.							

Devido à grande variação nas porcentagens, Brito (2006) as organizou em intervalos, e a cada um foi dado uma nota (escore), o qual foi utilizado para inserção na equação a seguir. Foi atribuído um peso a cada parâmetro analisado, utilizando como critério a quantidade de dados avaliados e a variação da porcentagem de redução. Assim o indicador de qualidade de água foi expresso por:

$$I_{QA} = \frac{0{,}25 \cdot TSS + 0{,}25 \cdot TP + 0{,}2 \cdot TN + 0{,}2 \cdot TZ + 0{,}05 \cdot TPb + 0{,}05 \cdot DBO}{10} \qquad \text{(Equação 3.21)}$$

- Criação ou supressão de áreas de lazer

Avalia as modificações quanto à criação ou supressão de áreas de lazer e recreação com a implantação do sistema de drenagem, e é expresso por:

$$I_{SO1} = \frac{A_{re2} - A_{re1}}{A_{re1}} \qquad \text{(Equação 3.22)}$$

Sendo:

A_{re1} = área de recreação e lazer antes da implantação do sistema de drenagem;

A_{re2} = área de recreação e lazer após a implantação do sistema de drenagem.

Esse indicador requer a análise do impacto da implantação do sistema de drenagem na cobertura do solo.

Ainda, Junior (2009) realizou um trabalho para a avaliação de intervenções em áreas urbanas à luz dos impactos nos sistemas de infraestrutura sanitária. Ele obteve seus indicadores a partir de uma triagem dos conjuntos de indicadores do projeto SWITCH (*Sustainable Water Management Improves Tomorrow Cities' Health*), lançado pela União Européia com a IHE-UNESCO. Assim, dentre os indicadores utilizados pelo autor, os que tem relação com sistemas de drenagem urbana são: geração de água de chuva; água reciclada; custo total de infraestrutura; custo de manutenção e operação; desenvolvimento do local, aceitação social/conveniência; aceitabilidade legal; provisão de espaços abertos no ambiente urbano; risco de contaminação; qualidade da água tratada; enchente; paisagem; durabilidade/vida útil; e compatibilidade com sistemas existentes.

Com a breve análise das variáveis e dos indicadores utilizados nesses trabalhos, tem-se uma base para elaboração dos indicadores próprios do presente trabalho.

3.7. MÉTODOS PARA ANÁLISE DOS INDICADORES

Segundo Milograna (2009), a análise de problemas que se tratam de empreendimentos governamentais ou com fins sociais, o que é o caso de um sistema de drenagem, segue dois grupos de metodologias: análises de critério único e análises multicritério. Como foi explanado na seção anterior, em um projeto de drenagem sustentável há muitos outros critérios que devem ser observados, de modo que as análises de critério único não são aplicáveis nesse caso. Não se busca apenas a alternativa com melhor custo, menos riscos e mais benefícios, visto que essas e outras características devem ser observadas em conjunto.

Milograna (2009, p. 50) destaca que “as situações nas quais se inserem os problemas ligados aos recursos hídricos, e em especial ao controle de inundações, não se encaixam, forçosamente, no atendimento a um único critério.”. Portanto, a fim de atender todas as considerações necessárias em um projeto do tipo, a abordagem deve ser multicriterial. A autora diz ainda que, nessa análise, diferentes aspectos (sociais, econômicos, ambientais, políticos e culturais, dentre outros) devem ser simultaneamente ponderados, e que deve agregar todas as características relevantes para o processo, incluindo as não-quantitativas.

3.7.1. Processo hierárquico analítico (AHP)

O método multicritério que será usado para avaliação das alternativas, neste trabalho, será o Processo Hierárquico Analítico (*Analytic Hierarchy Process* - AHP), que é um dos mais utilizados para apoio à decisão e pode ser aplicado a diversas áreas do conhecimento, devido à possibilidade de uso de critérios quantitativos e qualitativos na análise (Costa e Belderrain, 2009). Segundo Vieira (2006, apud Costa e Belderrain, 2009), os três princípios do método são:

- Construção de hierarquias, que consiste em estruturar os critérios de modo que o critério de mais alto nível é decomposto a níveis mais detalhados, sendo a estruturação em árvore a mais utilizada (pode-se ver um esquema na Figura 3.14);

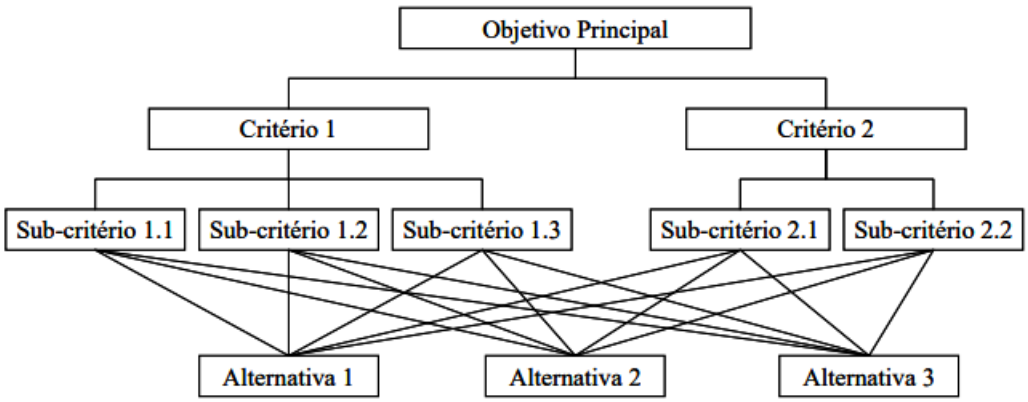


Figura 3.14 - Estrutura Hierárquica do AHP (Vieira, 2006 apud Costa e Belderrain, 2009)

- Definição de prioridades, a partir de comparações par a par dos elementos tendo em vista determinado critério;

- Consistência lógica, cuja verificação o método permite por meio da proposição de índices.

As comparações par a par dos elementos são feitas associando um valor de prioridade de um em relação ao outro, seguindo a Escala Fundamental do AHP (proposta por Saaty, criador do método) mostrada na Tabela 3.12:

Tabela 3.12 - Escala Fundamental do AHP, de Saaty (Costa e Belderrain, 2009)

Intensidade	Definição	Explicação
1	Igual importância	Ambos os elementos contribuem igualmente para o objetivo
3	Importância pequena de uma sobre a outra	Experiência e juízo favorecem levemente uma atividade com relação à outra
5	Importância grande ou essencial	Experiência e juízo favorecem fortemente uma atividade com relação à outra
7	Importância muito grande ou demonstrada	Uma atividade é muito fortemente favorecida, sendo sua dominância evidenciada na prática
9	Importância absoluta	Uma evidência favorecendo uma das atividades é a maior possível, com o mais alto grau de segurança
2, 4, 6, 8	Valores intermediários	Quando se procura uma condição de compromisso entre duas definições
Recíprocos dos números acima	Se a atividade i possui um dos números acima, quando comparada com a atividade j, a atividade j possuirá o valor inverso quando comparada a i.	Uma consideração razoável.

As etapas do procedimento analítico do método AHP são explicadas por Costa e Belderrain (2009) resumidamente:

- Definição do objeto de decisão: define-se o problema a ser resolvido, reconhecendo as necessidades, valores e convicções do decisor;

- Identificação dos decisores: visto que a alternativa escolhida depende das informações fornecidas pelos agentes de decisão, estes devem ser identificados;

- Definição das alternativas: define-se as alternativas possíveis, candidatas à solução;

- Definição dos critérios e estruturação hierárquica: define-se os critérios, incluindo os interesses do decisor; estruturam-se os critérios de modo hierárquico na forma de uma árvore, fazendo uma decomposição sistemática dos critérios em níveis mais detalhados;

- Comparação das alternativas em relação aos critérios: deve-se realizar a comparação par a par entre as alternativas, para cada critério; as preferências estipuladas pelo decisor são organizadas na forma de matrizes quadradas – matrizes de decisão –, cujos elementos

definem a quantidade de vezes que uma alternativa é mais ou menos importante que as demais;

- Determinação da importância relativa dos critérios: essa importância é atribuída por meio de pesos – ou coeficientes de prioridade –, os quais representam o quanto um critério está disposto a ceder para que seja melhorado o desempenho do outro;

- Obtenção do vetor de prioridades: obtém-se o vetor de prioridades das alternativas e também dos critérios;

- Avaliação global de cada alternativa: calcula-se o valor global de cada alternativa a partir dos vetores de prioridade estabelecidos;

- Análise de consistência: utilizando o método do autovetor direto, analisa-se a consistência das matrizes de decisão;

- Análise de sensibilidade: verifica-se se o modelo criado é condizente com a realidade, o que contribui para a compreensão da abrangência e das limitações do problema por parte do decisor.

Maiores detalhes sobre a utilização do método serão apresentados ao longo do desenvolvimento do trabalho e da aplicação do próprio método.

4. METODOLOGIA

Como explanado nos objetivos do presente trabalho, o pretendido foi desenvolver um sistema de indicadores para a seleção de alternativas de controle na fonte do escoamento pluvial urbano, assim como sua aplicação em um estudo de caso. A metodologia usada para atingir esse objetivo foi selecionar indicadores que quantificam ou qualificam os aspectos considerados relevantes para a comparação das medidas compensatórias, dimensionar essas medidas de acordo com o local escolhido para implantação, efetuar os cálculos dos indicadores e usar um método multicritério para chegar ao resultado da melhor alternativa a ser adotada. Foi feita a sistematização dos dados necessários, dos indicadores e do método AHP em uma planilha do Excel (apresentada no Apêndice A), com todos os cálculos automatizados.

O estudo de caso para aplicação do método desenvolvido consistiu na alocação e no dimensionamento de medidas compensatórias para lotes residenciais padrão em dois locais

diferentes do DF, cada um com particularidades que influenciam nos pesos dados aos indicadores, a fim de analisar as diferenças de resultados.

A sequência de etapas (que serão detalhadas neste capítulo) seguidas até os resultados serem atingidos são apresentadas de forma esquematizada no fluxograma abaixo. A planilha de Excel feita automatiza todas as etapas de cálculo.

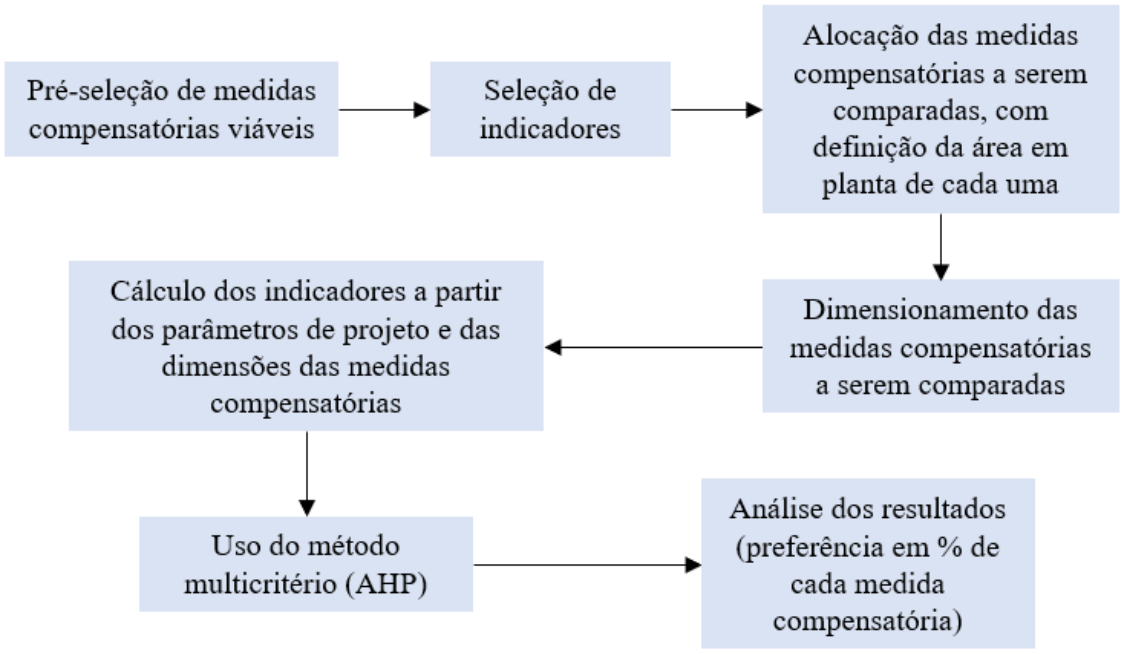


Figura 4.1 - Fluxograma da metodologia aplicada no trabalho.

4.1. SELEÇÃO DE ALTERNATIVAS VIÁVEIS

Com base na revisão bibliográfica, o processo de pré-seleção de alternativas será feito com base na declividade, na distância entre a base da medida compensatória e o lençol freático, e na capacidade de infiltração do solo. Os valores de declividade máxima, distância mínima até o lençol freático e condutividade hidráulica mínima do solo são apresentados na Tabela 4.1 a seguir.

Tabela 4.1 - Condições e recomendações a serem verificadas na seleção de alternativas viáveis (Adaptado de SUDERHSA, 2002 e Adasa, 2018).

Medida compensatória	**Condições e recomendações**		
	Declividade máxima (%)	**Distância mínima entre a base da estrutura e o lençol freático (m)**	**Condutividade hidráulica saturada mínima (m/s)**
Reservatório de lote	-	1	-
Jardim de chuva	-	1	$2{,}1 \times 10^{-6}$
Vala de infiltração (vala gramada)	5	1	$2{,}1 \times 10^{-6}$
Pavimento poroso de bloco modular (concreto permeável)	5	1	$2{,}1 \times 10^{-6}$
Trincheira de infiltração	5	1	$2{,}1 \times 10^{-6}$
Poço de infiltração	-	1	$2{,}1 \times 10^{-6}$

Ainda, é preciso verificar se o tempo de esvaziamento das medidas de infiltração não é muito elevado, para que elas estejam vazias quando da ocorrência de uma próxima chuva. Assim, considerando que uma chuva intensa pode ocorrer uma vez ao dia, pode-se adotar um valor máximo de 24 horas para o tempo de esvaziamento da medida compensatória.

4.2. INDICADORES

Após a primeira etapa de seleção na qual são descartadas alternativas inviáveis, as alternativas restantes que podem realmente ser implantadas no local devem ser comparadas entre si a partir dos indicadores relacionados aos diferentes critérios, conforme definido após a consulta bibliográfica realizada. São eles: físico, hidrológico, hidráulico, econômico, ambiental e social. Assim, serão propostos indicadores para cada um dos seis critérios. As expressões definidas para cada um serão apresentados na sequência.

É importante pontuar que os indicadores foram selecionados e suas expressões foram formuladas de modo que o sentido de variação do seu valor seja o mesmo para todos, neste caso, o sentido crescente do valor de cada indicador corresponderá às situações mais favoráveis ou desejadas. Quanto a escala numérica de cada indicador (intervalo entre os valores mínimos e máximos possíveis), não haverá padronização, pois não há essa necessidade com a aplicação do método AHP no presente trabalho.

4.2.1. Indicador físico

O critério físico para seleção de medidas compensatórias está relacionado com as características do terreno e do solo, espaço disponível para implantação, entre outros. Como pontuado anteriormente, fatores a serem considerados na elaboração de projetos de sistema de drenagem pluvial são as facilidades e as dificuldades que possam influenciar em sua execução no local, como espaço disponível e estruturas existentes no local, e no funcionamento das medidas compensatórias, como a declividade recomendada, o que será avaliado em uma etapa inicial de seleção de medidas, a fim de descartar as alternativas inviáveis, como foi explicado previamente no item 4.1.

Para o estudo de caso, será avaliada qual a área do terreno que as medidas compensatórias ocupam, visto que é preferível o uso de medidas que ocupem menos espaço, tanto para que se tenham mais áreas disponíveis para outros usos como para facilitar a construção. Assim, o indicador físico foi expresso pela equação abaixo.

$$I_F = \frac{A_D}{A_{MC}} \qquad \text{(Equação 4.1)}$$

Sendo:

A_D = área disponível para construção (m²);

A_{MC} = área em planta da medida compensatória (m²).

O valor desejado para este indicador é o maior possível, visto que quanto menor a área em planta da medida compensatória, maior será o valor de I_F.

Menor área em planta pressupõe atenuar a interferência com a movimentação de pessoas e veículos, além de reduzir o espaço com uso restrito ao controle do escoamento.

4.2.2. Indicador hidrológico

O critério hidrológico está relacionado, dentre outros aspectos, ao impacto que a alternativa de projeto tem sobre a vazão e o volume do escoamento pluvial superficial. Como um dos principais objetivos do uso de medidas compensatórias é atenuar a vazão a jusante, este indicador o desempenho de cada alternativa nessa questão. A expressão definida para este indicador será:

$$I_{H1} = \frac{Q_{alvo}}{Q_{jus}} \qquad \text{(Equação 4.2)}$$

Sendo:

Q_{jus} = vazão máxima a escoar a jusante segundo a alternativa estudada (L/s);

Q_{alvo} = vazão alvo a ser mantida a jusante (L/s) (calculado a partir da vazão de restrição/pré-urbanização).

Visto que Q_{jus} pode ser igual (situação ideal) ou maior (quando não se controla toda a vazão) que a Q_{alvo}, o valor desejável para este indicador é I_{H1} = 1. Se não for possível manter a vazão a jusante igual a vazão alvo, o desejável é que o valor do indicador seja o mais próximo possível de 1. Como explicado anteriormente, é desejável que a vazão a jusante seja igual a vazão alvo (de pré-urbanização) para que o ciclo hidrológico não seja impactado negativamente.

4.2.3. Indicador hidráulico – tempo de retorno

O critério hidráulico está relacionado, entre outros aspectos, ao tempo de retorno do projeto, pois este deve ser executado de forma que atenda os objetivos determinados inicialmente, e o tempo de retorno avalia, de certa forma, o risco da obra, ao representar a probabilidade de ocorrência de um evento extremo (Brito, 2006). Esse critério será avaliado a partir de dois indicadores. O primeiro avaliará o atendimento a recomendação de tempo de retorno. Assim, este indicador avaliará se o tempo de retorno adotado atende ao recomendado, sendo expresso por:

$$I_{H2} = \frac{T_R}{T_{RD}} \qquad \text{(Equação 4.3)}$$

Sendo:

T_R = tempo de retorno de projeto (anos);

T_{RD} = tempo de retorno desejável (anos).

O tempo de retorno desejável é aquele recomendado pelos manuais de drenagem e demais diretrizes pertinentes para o projeto, a depender do local. Conforme foi explicado no item 3.6, no contexto do "indicador de atendimento ao objetivo", é desejável que $I_{H2} \geq 1$. Quanto maior o tempo de retorno de projeto, mais seguro é o projeto, o que quer dizer que as medidas compensatórias suportarão chuvas mais intensas.

4.2.4. Indicador hidráulico – tempo de esvaziamento

O segundo indicador do critério hidráulico avaliará o tempo de esvaziamento das medidas compensatórias. O tempo de esvaziamento das medidas de infiltração depende da condutividade hidráulica do solo. É importante avaliar esse parâmetro porque é essencial para determinar a eficácia da medida compensatória, visto que esta deve esvaziar entre uma chuva e outra, a fim de que possa cumprir com sua função. Esse indicador é expresso por:

$$I_{H3} = \frac{1}{t_{esv}} \qquad \text{(Equação 4.4)}$$

Sendo:

t_{esv} = tempo de esvaziamento da medida compensatória (horas).

O valor desejável para esse indicador é o maior possível, visto que quanto menor o tempo de esvaziamento, maior segurança e eficácia a medida compensatória tem, pois estará vazia na ocorrência de um próximo evento chuvoso. Para a pré-seleção de alternativas, foi definido que o tempo de esvaziamento deve ser menor que 24 horas, considerando a ocorrência de apenas uma chuva intensa por dia. Porém, ainda assim, quanto menor o tempo de esvaziamento, melhor, para o caso em que ocorra mais de uma chuva intensa por dia.

4.2.5. Indicador econômico

O indicador usado para avaliação do critério econômico, assim como o de Moura (2004), considera o custo total (soma dos custos de instalação, operação e manutenção):

$$I_E = \frac{1}{C_k} \qquad \text{(Equação 4.5)}$$

Sendo:

C_k = custo total (R$) da alternativa k.

O valor desejado para este indicador é o maior possível, visto que quanto menor o custo da medida compensatória em questão, maior será o valor de I_E. É importante relembrar, novamente, que o indicador foi formulado de modo que o sentido desejado seja o crescente (quanto maior o valor, mais favorável é a alternativa).

Os valores referentes ao custo total, incluindo instalação, manutenção e operação para cada medida compensatória analisada no estudo foram obtidos no trabalho de Moura (2004), com exceção dos custos para o jardim de chuva, que foram encontrados no trabalho de Melo (2011). No entanto, é importante considerar a inflação que ocorreu desde a publicação dos

trabalhos utilizados como referência para os valores da tabela acima. Utilizando a Calculadora do IPCA (Índice Nacional de Preços ao Consumidor Amplo), disponibilizada pelo IBGE, os custos foram atualizados, considerando janeiro de cada ano de publicação dos trabalhos de referência como data inicial, e maio de 2023 como mês final. Os valores finais são apresentados na Tabela 4.2.

Tabela 4.2 - Custos corrigidos de implantação, operação e manutenção das medidas compensatórias (Adaptado de Moura, 2004 e Melo, 2011)

Medida compensatória	**Custos**				**Vida útil (anos)**
	Custo de implantação		**Custo de operação e manutenção por ano**		
	Valor	**Unidade**	**Valor**	**Unidade**	
Reservatório de lote	378,39	R$/m³	15,22	R$/m³	30
Jardim de chuva	331,61	R$/m²	4,17	R$/m²	20
Vala de infiltração (vala gramada)	157,88	R$/m	31,06	R$/m	15
Pavimento poroso de bloco modular (concreto permeável)	78,96	R$/m²	4,31	R$/m²	15
Trincheira de infiltração	159,11	R$/m	47,89	R$/m	10
Poço de infiltração	347,93	R$/m³	36,83	R$/unidade	15

4.2.6. Indicador ambiental

O critério ambiental será avaliado por meio de dois indicadores. Um avaliará a redução de poluentes de cada alternativa e o outro avaliará a distância entre o fundo da medida compensatória e o nível do lençol freático.

O indicador ambiental que avalia a redução e poluentes foi baseado no proposto por Brito (2006), e será expresso por:

$$I_{A1} = 0{,}25 \cdot TSS + 0{,}25 \cdot TP + 0{,}2 \cdot TN + 0{,}2 \cdot TZ + 0{,}05 \cdot TPb + 0{,}05 \cdot DBO \quad \text{(Equação 4.6)}$$

Sendo:

TSS = Valor atribuído para o percentual de remoção de Sólidos Suspensos Totais;

TP = Valor atribuído para o percentual de remoção de Fósforo total;

TN = Valor atribuído para o percentual de remoção de Nitrogênio total;

TZ = Valor atribuído para o percentual de remoção de Zinco total;

TPb = Valor atribuído para o percentual de remoção de Chumbo total;

DBO = Valor atribuído para o percentual de remoção de Demanda Bioquímica de Oxigênio.

O valor desejável para este indicador é o mais próximo possível de 10, indicando a melhor eficácia na redução de poluentes da água.

É importante relembrar que o "valor atribuído para o percentual de remoção" de cada poluente se refere aos valores escolhidos por Brito (2006).

A Tabela 3.11 apresenta a porcentagem de redução média dos poluentes do escoamento superficial para várias medidas. Dentre os valores consultados no trabalho de Brito (2006), que por sua vez usou como fonte o *Urban Storm Drainage Criteria Manual*, do *Urban Drainage and Flood Control District*, não há dados para o reservatório de lote, o jardim de chuva, a trincheira e o poço de infiltração. Assim sendo, devido à falta de dados, foram usadas aproximações da seguinte forma:

- Os percentuais de redução média dos poluentes para o reservatório de lote foram considerados como sendo iguais aos da bacia de detenção, devido a esta ser a medida que mais se aproxima, no quesito funcionamento, do reservatório, por ser de armazenamento e ter um tempo de detenção;
- Para o jardim de chuva foram usados os mesmos valores da vala gramada de infiltração, desconsiderando assim o efeito das plantas na redução de poluentes (em uma aplicação em caso concreto, é importante verificar o percentual de redução real de poluentes por parte das plantas utilizadas);
- Por fim, para a trincheira e o poço de infiltração, foram usados os mesmos dados do "plano de infiltração de areia de detenção"; sabe-se que a brita utilizada para preencher a trincheira e o poço de infiltração não retém poluentes como a areia, por ter uma granulometria muito maior; dessa forma, para a aproximação ser utilizada, pode-se utilizar uma camada de geotêxtil no fundo da trincheira e do poço.

Dessa forma, justificadas as substituições, a Tabela 4.3 apresenta os valores dos escores atribuídos a cada faixa de percentual de redução de poluentes, os quais serão usados na fórmula para o indicador ambiental. Os valores atribuídos foram os mesmos utilizados por Brito (2006).

Tabela 4.3 - Valores (escores) atribuídos para cada faixa de porcentagem de redução média de poluentes (Adaptado de Brito, 2006)

Medida compensatória	**Escores atribuídos**					
	TSS	**TP**	**TN**	**TZ**	**TPb**	**DBO**
Reservatório de lote	10	6	8	4	2	4
Jardim de chuva	2	2	4	2	0	0
Vala de infiltração (vala gramada)	2	2	4	2	0	0
Pavimento poroso de bloco modular (concreto permeável)	10	10	10	10	10	10
Trincheira de infiltração	4	8	2	6	6	10
Poço de infiltração	4	8	2	6	6	10

4.2.7. Indicador social – Contribuição estética

O critério social será avaliado a partir de dois indicadores, ambos qualitativos. O primeiro indicador avaliará a contribuição estética que cada alternativa oferece ao ambiente, no sentido paisagístico. Em uma aplicação concreta, a fim de obter esse dado, o ideal seria fazer uma pesquisa com os habitantes do local de implantação do projeto, a fim de coletar as opiniões relevantes e fazer uma avaliação mais precisa desse critério. No presente trabalho, a avaliação será subjetiva, a partir da observação de fotos das medidas compensatórias avaliadas e o quanto elas contribuem para a beleza do ambiente, sendo atribuída para cada alternativa de projeto um nível de contribuição estética, sendo:

- Muito ruim (piora muito a aparência do ambiente);
- Ruim (piora a aparência do ambiente);
- Indiferente (não piora nem melhora a aparência do ambiente);
- Boa (melhora a aparência do ambiente);
- Muito boa (melhora muito a aparência do ambiente).

Por meio da observação de fotos de aplicações concretas das medidas compensatórias, foram atribuídos os seguintes níveis de contribuição estética para cada uma (Tabela 4.4).

Tabela 4.4 - Níveis de contribuição estética das medidas compensatórias (Elaboração própria, 2023)

Medida compensatória	Nível de contribuição estética
Reservatório de lote	Indiferente (para reservatório enterrado)
	Muito ruim (para reservatório aparente, superficial)
Jardim de chuva	Muito boa
Vala de infiltração (vala gramada)	Ruim
Pavimento poroso de bloco modular (concreto permeável)	Indiferente
Trincheira de infiltração	Boa
Poço de infiltração	Ruim

Na aplicação do modelo AHP a preferência de cada categoria desse indicador será definida com base na escala fundamental de julgamentos paritários de Saaty, apresentada na Tabela 3.12. O reservatório de lote considerado para o estudo de caso é o enterrado, logo a contribuição estética será indiferente.

4.2.8. Indicador social – Reuso de águas pluviais

O segundo indicador do critério social avaliará a possibilidade de reuso da água pluvial. Com o aproveitamento da água pluvial armazenada, se reduz o consumo de água tratada e os custos com conta de água, o que contribui para o amortecimento do investimento aplicado na construção das medidas compensatórias. Sendo qualitativo, este indicador avaliará apenas duas situações:

- Há possibilidade de reuso de águas pluviais;
- Não há possibilidade de reuso de águas pluviais.

4.3. DIMENSIONAMENTO DAS MEDIDAS COMPENSATÓRIAS

Para o estudo de caso, por se tratar da implantação em um lote residencial, foram selecionadas apenas seis medidas compensatórias dentre todas as apresentadas neste trabalho, por serem as mais viáveis nesse caso, sendo elas: reservatório de lote, poço de infiltração, trincheira de infiltração, jardim de chuva, vala de infiltração e pavimento poroso.

As medidas compensatórias foram dimensionadas (com uso do método da curva envelope, apresentado na seção 3.4) de acordo com os parâmetros de projeto definidos para o estudo de caso, a fim de se obter os valores a serem inseridos nas expressões definidas de cada indicador.

Quanto aos parâmetros hidrológicos, tais como a equação IDF, o tempo de retorno, a vazão de restrição, etc., seus valores foram consultados no Manual de Drenagem da Adasa (Adasa, 2018). O tempo de retorno adotado, recomendado pelo manual, foi de 10 anos. A equação IDF de Brasília é a seguinte:

$$i = \frac{1574{,}7 \cdot T^{0{,}207}}{(td + 11)^{0{,}884}} \qquad \text{(Equação 4.7)}$$

Sendo:

i = intensidade da chuva (mm/h);

T = tempo de retorno (anos);

td = tempo de duração da chuva (minutos).

Ressalta-se que, como pontuado anteriormente, as áreas de contribuição das medidas de infiltração são diferentes das áreas de contribuição para a medida que funciona somente por armazenamento (reservatório de lote), para que se garanta a vazão de pré-urbanização de escoamento superficial. Para definir qual a área a ser "descartada" da contribuição para as medidas de infiltração, foi calculada a área que gera a vazão de restrição, a partir do método racional (Adasa, 2018), pela equação abaixo:

$$Q = 2{,}78 \cdot C \cdot i \cdot A \qquad \text{(Equação 4.8)}$$

Sendo:

Q = vazão (L/s);

C = coeficiente de escoamento superficial;

i = intensidade da chuva (mm/h);

A = área de contribuição (ha).

Para o cálculo da área a ser descartada, o tempo de duração usado na equação IDF foi de 15 minutos (de acordo com a sugestão do Manual da Adasa), considerando que este tempo seria igual ao tempo de entrada, que é o tempo de percurso do escoamento até a primeira captação do sistema de drenagem. Visto que o lote é pequeno se comparado a uma grande bacia, não houve necessidade de calcular um tempo de concentração maior.

É importante apontar que, durante o dimensionamento, o tempo de retorno e a vazão à jusante, que é a vazão a escoar superficialmente após a implantação das medidas compensatórias, podem ser ajustados até que o tempo de esvaziamento resultante atinja um valor aceitável, por exemplo. Além do tempo de esvaziamento, é importante observar as profundidades calculadas: se forem muito grandes, a construção das medidas compensatórias se torna mais difícil; assim, deve-se ajustar o dimensionamento a fim de que as dimensões resultantes sejam viáveis para implantação.

Definidos os parâmetros iniciais para o dimensionamento das medidas compensatórias, o segundo passo foi prosseguir com o método da curva envelope mostrado na seção 3.4. A equação 3.13 é a fórmula geral para o dimensionamento das medidas. Visto que a incógnita H (profundidade) aparece duas vezes na equação, deve-se fazer algumas manipulações primeiro. Isso é feito a partir da relação entre o parâmetro γ, que é a razão entre a área de percolação e o volume do dispositivo, e a profundidade *H*. Para o reservatório de lote, o jardim de chuva, a vala de infiltração e o pavimento permeável, considerando que a área de percolação é igual a área em planta da medida, tem-se:

$$\sqrt{\gamma} \cdot \sqrt{H} = \sqrt{\frac{A_{MC}}{A_{MC} \cdot H}} \cdot \sqrt{H} = 1$$

Com isso, a equação 3.13 fica da seguinte forma, que será utilizada para dimensionamento dessas medidas:

$$H_{max} = \left(\sqrt{\frac{a}{60}} \cdot \sqrt{\beta} \cdot T^{\frac{b}{2}} - \sqrt{\frac{c}{60}} \cdot \sqrt{q_s} \right)^2 \qquad \text{(Equação 4.9)}$$

Destaca-se que q_s (vazão de saída) para o reservatório de lote é igual à vazão de restrição, e para as medidas de infiltração é a condutividade hidráulica do solo. Ainda, como o pavimento permeável é preenchido por brita, é necessário dividir a H_{max} calculada acima pela porosidade η da brita.

Já para a trincheira e o poço de infiltração, o dimensionamento é diferente, visto que a área de percolação não é exatamente a área em planta. Segundo o mesmo artigo utilizado para embasar o dimensionamento no presente trabalho, de Silveira e Goldenfum (2007), para estas medidas se utilizam as seguintes equações:

$$H = \left[\frac{k_1 \cdot \left(k_2 - \sqrt{\eta} \right)}{\eta - {k_2}^2} \right]^2 \qquad \text{(Equação 4.10)}$$

$$k_1 = \sqrt{\frac{a}{60}} \cdot \sqrt{\beta} \cdot T^{\frac{b}{2}} \qquad \text{(Equação 4.11)}$$

$$k_2 = \sqrt{\frac{c}{60}} \cdot \sqrt{\gamma} \cdot \sqrt{q_s} \qquad \text{(Equação 4.12)}$$

O parâmetro γ, para a trincheira e o poço, respectivamente, tem as seguintes expressões:

$$\gamma = \frac{2}{B} \qquad \text{(Equação 4.13)}$$

$$\gamma = \frac{4}{D} \qquad \text{(Equação 4.14)}$$

Sendo:

B = largura da trincheira (mm);

D = diâmetro do poço (mm).

4.4. MÉTODO AHP

O método multicritério utilizado para a seleção da melhor medida compensatória para cada situação foi o AHP (*Analytic Hierarchy Process*), cujos princípios foram explicados anteriormente na revisão bibliográfica. A aplicação do método no estudo de caso se deu por, inicialmente, comparar os critérios, par a par, a partir da Escala Fundamental de Saaty, o que define a prioridade de cada um na seleção. Depois disso, as alternativas foram comparadas par a par dentro de cada critério; como seis dos oito critérios utilizados são indicadores quantitativos, foram utilizados os próprios valores para comparação, por meio de razões entre os indicadores de duas alternativas. No caso dos indicadores do critério social, que são qualitativos, foi usada a escala fundamental (escala de Saaty), apresentada anteriormente. O resultado final do modelo é a obtenção da prioridade global de cada alternativa, o que serve de base para a decisão de qual medida compensatória deve ser adotada.

Os passos do método AHP foram brevemente descritos na seção 3.7.1. Sobre as equações utilizadas para cada passo, Costa e Belderrain (2009) as apresentam em seu artigo, e podem ser encontradas na sequência.

Atribuídos os valores de comparação entre cada alternativa na matriz de julgamentos, o vetor de prioridade da alternativa *i* com relação ao critério C_k é definido por:

$$\overline{v_k}(A_i) = \frac{\sum_{j=1}^{n} \overline{v_i}(A_j)}{n}, i = 1, \dots, n \qquad \text{(Equação 4.15)}$$

Sendo:

$\overline{v_k}(A_i)$ = vetor de prioridades da alternativa *i* com relação ao critério C_k;

$\overline{v_i}(A_j)$ = vetor de valores (normalizado) de impacto da alternativa *j* em relação à alternativa *i*;

n = número de alternativas.

Ressalta-se que "o valor de impacto da alternativa *j* em relação à alternativa *i* constitui-se a representação numérica das atribuições verbais dadas pelo decisor a cada comparação de alternativas" (Costa e Belderrain, 2009, p. 6). A mesma lógica da equação apresentada acima é utilizada para a avaliação das prioridades dos critérios um em relação ao outro.

Com relação aos critérios, o vetor de prioridades é calculado por:

$$\overline{w}(C_i) = \frac{\sum_{j=1}^{m} \overline{w_i}(C_j)}{m}, i = 1, \dots, m \qquad \text{(Equação 4.16)}$$

Sendo:

$\overline{w}(C_i)$ = vetor de prioridades dos critérios;

$\overline{w_i}(C_j)$ = vetor de valores de impacto do critério *j* em relação ao critério *i*;

m = número de critérios.

A avaliação global de cada alternativa é calculada a partir dos vetores de prioridade, sendo dada pela função:

$$\bar{f}(A_j) = \sum_{j=1}^{m} \overline{w}(C_i) \cdot v_i(A_j), j = 1, \dots, n \qquad \text{(Equação 4.17)}$$

Feito o julgamento e calculadas as prioridades, faz-se uma análise de consistência do julgamento, a partir do cálculo da razão de consistência:

$$RC = \frac{IC}{IR} \qquad \text{(Equação 4.18)}$$

Sendo:

RC = Razão de Consistência;

IC = Índice de Consistência;

IR = Índice Randômico.

O Índice de Consistência é dado por:

$$IC = \frac{|\lambda_{max} - n|}{n - 1} \qquad \text{(Equação 4.19)}$$

$$\lambda_{max} = \frac{\frac{M \cdot \overline{v_k}(M_i)}{\overline{v_k}(M_i)}}{n} \qquad \text{(Equação 4.20)}$$

Sendo:

IC = índice de consistência;

n = número de linhas e colunas da matriz de julgamentos (número de critérios ou alternativas);

M = matriz de julgamentos qualquer (de critérios ou alternativas);

$\overline{v_k}(M_i)$ = vetor de prioridades qualquer (de critérios ou alternativas);

Já o Índice Randômico é um valor definido por Saaty (1991) para cada ordem n de matrizes de julgamento. Nesse estudo de caso foram usadas matrizes de ordem 6 e 8, as quais têm IR igual a 1,24 e 1,41, respectivamente (Hung Do, 2014).

A razão de consistência precisa ser menor que 0,1. Caso contrário, o julgamento deve ser refeito. Isto porque, na prática, a razão de consistência avalia a coerência dos julgamentos realizados. O valor de RC estar acima de 0,1 significa que ocorreu um erro na atribuição dos valores de julgamento par a par, e este deve ser corrigido.

Os pesos atribuídos a cada um dos indicadores no processo de seleção de medidas compensatórias dependerão do perfil econômico da população, visto que sua renda influencia as prioridades. Por exemplo, em um condomínio com habitantes de maior poder aquisitivo, é provável que a contribuição estética do projeto receba um peso maior, porque há disponibilidade de recursos para serem destinados à construção e manutenção de medidas compensatórias que agregam beleza ao ambiente; em contrapartida, em uma região onde a população tem menor poder aquisitivo e não há condições de priorizar a contribuição estética, a prioridade será simplesmente solucionar o problema de alagamentos.

5. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Apresentadas anteriormente as etapas da metodologia adotada no presente trabalho, de modo detalhado, o presente capítulo discorrerá sobre os resultados obtidos com o uso do modelo desenvolvido e aplicado em estudo de caso. O modelo foi implantado em uma planilha Excel (apresentada no Apêndice A), com abas organizadas em etapas de inserção de dados, dimensionamento das medidas, cálculo de indicadores, atribuição de valores da escala Saaty, cálculo das etapas do AHP e resultados.

O estudo de caso teve como objetivo analisar o resultado do uso do sistema de seleção de medidas compensatórias desenvolvido em dois casos diferentes: um local com alto padrão construtivo, grandes lotes e de população com maior poder aquisitivo (Lago Sul); e outro local com menor padrão construtivo, lotes pequenos e de população com menor poder aquisitivo (Sobradinho).

A diferença entre os lotes, no que diz respeito à área disponível para alocação de medidas e quantitativo de áreas de contribuição, influencia principalmente na parte do dimensionamento das medidas; enquanto o perfil socioeconômico da população influencia nos pesos que cada indicador tem em relação aos outros. Para a definição desses pesos, foi usada a Escala de Saaty (Tabela 3.12), que estabelece uma relação de comparação da importância de cada indicador em relação a todos os outros. Assim, como as duas regiões tem diferentes perfis socioeconômicos, os pesos de cada indicador foram diferentes em cada uma.

Para ambas as regiões, o indicador hidráulico (tempo de retorno) e o indicador hidrológico, que avalia o impacto na vazão, foram colocados em primeiro lugar na "hierarquia", pois juntos avaliam, de certa forma, a eficácia do sistema. Junto com estes, em primeiro lugar, para a região de Sobradinho foi considerado o indicador econômico, visto que para a população de menor poder aquisitivo é importante escolher uma alternativa mais econômica; para a região do Lago Sul, o indicador social de contribuição estética também foi colocado em primeiro lugar, já que a população com mais condições financeiras tem capacidade de investir mais dinheiro para um projeto de melhor aparência.

O indicador físico tem peso maior para a região de Sobradinho, pois os lotes são menores e consequentemente há menos espaço para alocar medidas compensatórias. O indicador de reuso também tem maior peso nesta região, porque é mais interessante para esses habitantes a possibilidade de economizar dinheiro com conta de água. O indicador hidráulico, que

avalia o tempo de esvaziamento das medidas, teve um peso menor em ambas as regiões porque, estando dentro do limite aceitável (até 24 horas), não é de tão grande importância avaliar esse parâmetro. Para mais esclarecimentos, a matriz de comparação entre os indicadores é apresentada no item 5.4. No geral, a sequência da "hierarquia" de indicadores para cada região ficou da seguinte forma:

- Sobradinho: indicador econômico, indicador hidráulico (tempo de retorno) e indicador hidrológico; indicador físico; indicador social (reuso); indicador ambiental; indicador hidráulico (tempo de esvaziamento); indicador social (estética).
- Lago Sul: indicador social (estética), indicador hidráulico (tempo de retorno) e indicador hidrológico; indicador ambiental; indicador físico; indicador econômico; indicador social (reuso) e indicador hidráulico (tempo de esvaziamento).

Quanto aos critérios para pré-seleção de alternativas – declividade, distância entre a base da medida compensatória e o nível freático, e condutividade hidráulica do solo –, foram todos considerados no estudo de caso.

A declividade dos lotes padrão definidos foram arbitradas, sendo de 1% em direção à frente do lote; logo, não apresenta obstáculo ao uso de qualquer uma das alternativas para o estudo de caso. Na prática, a declividade do lote deve ser analisada a partir de modelos de elevação de terreno, pelo Google Earth ou a partir de estudos de topografia no local.

Quanto à distância até o nível freático, é necessário que se faça um ensaio no terreno para saber qual a profundidade do lençol; como essa informação não foi encontrada, foi considerado que o lote padrão atende a esse critério. Quanto à condutividade hidráulica, os valores encontrados para os tipos de solo de Sobradinho e do Lago Sul (Latossolo Vermelho e Latossolo Vermelho-Amarelo) atendem à exigência mínima, no entanto é necessário ressaltar, novamente, que é preciso fazer um ensaio para descobrir a condutividade hidráulica saturada do terreno, antes de se fazer um projeto com medidas de infiltração.

5.1. LOCAIS DE PROJETO PARA O ESTUDO DE CASO

Castro (2017), em sua tese de doutorado, baseando-se no conceito dos Tipos de Estruturas Urbanas (UST), realizou o mapeamento do padrão urbano das regiões do DF. Os UST representam unidades homogêneas do espaço e possibilitam "uma representação mais adequada do ambiente urbano e de suas particularidades" (Castro, 2017, p. 19). O mapeamento dos UST no DF resultou em uma divisão em 5 classes, 12 subclasses e 25

padrões UST. As 5 classes são: áreas abertas, áreas de uso comum, áreas de comércio e indústria, áreas residenciais e áreas em consolidação.

Visto que o presente estudo de caso tem como objetivo fazer a aplicação do sistema de seleção de medidas compensatórias para projetos em lotes residenciais, como em condomínios, serão selecionadas duas diferentes áreas residenciais, uma de maior padrão construtivo e outra de menor padrão, a fim de verificar as diferenças entre os resultados para áreas diferentes, as quais terão diferentes prioridades e consequentemente diferentes pesos para cada indicador. Dentro da classe de áreas residenciais, tem-se as subclasses "unifamiliar, "mistas" e "multifamiliar". A subclasse "unifamiliar" se divide em 5 padrões UST, caracterizados conforme apresentado na Tabela 5.1.

Tabela 5.1 - Tipos de estruturas urbanas da categoria "residencial – unifamiliar" e suas características (Castro, 2007)

Tipo de estrutura urbana	**Características**
RH1	Alta taxa de ocupação e baixo padrão construtivo; até 250 m²; geralmente 1 andar; não possui quintal; maioria dos telhados de amianto; possui pavimentação.
RH2	Média taxa de ocupação e médio padrão construtivo; de 250 a 500 m²; geralmente 1 andar; possui quintal, mas apresenta características heterogêneas; maioria dos telhados de amianto; possui pavimentação.
RH3	Média taxa de ocupação e alto padrão construtivo; de 500 m² até 2000 m²; maioria com 2 andares; jardim e piscinas privadas; geralmente telhados de argila; possui pavimentação; geralmente condomínios.
RH4	Média taxa de ocupação e muito alto padrão construtivo; de 1000 m² até 2000 m²; maioria com 2 andares; jardim e piscina; geralmente telhados de argila; possui pavimentação; em zonas nobres.
RH5	Baixa taxa de ocupação e muito alto padrão construtivo; maior que 2000 m²; maioria com 2 andares; jardim e piscinas privadas; geralmente telhados de argila; possui pavimentação; geralmente condomínios.

Como foi dito anteriormente, a fim de verificar a diferença de resultados com o sistema de seleção desenvolvido sendo usado para diferentes locais de projeto, foram escolhidas duas regiões bem diferentes do DF, em ambos os quesitos: padrão de uso e ocupação do solo e perfil socioeconômico da população. Para o contexto socioeconômico, foi consultado o Atlas do Distrito Federal (CODEPLAN, 2020), que apresenta a renda per capita de cada região

administrativa do DF. Em relação ao padrão de uso e ocupação do solo, foram selecionadas duas regiões administrativas com diferentes UST. Assim, as regiões administrativas escolhidas para o estudo de caso foram:

- Lago Sul: renda per capita de R$ 7.000 a R$ 8.000; UST predominante das áreas residenciais é RH4 – muito alto padrão construtivo, lotes de 1000 a 2000 m², possui jardim;
- Sobradinho: renda per capita de R$ 1.000 a R$ 2.000; UST predominante das áreas residenciais é RH2 – médio padrão construtivo, lotes de 250 a 500 m², possui quintal.

Para o estudo de caso, foram definidos dois lotes padrão, um para cada região, seguindo os padrões UST e a Lei de Uso e Ocupação do Solo (LUOS) do DF. O lote padrão considerado para a região do Lago Sul tem 1000 m² de área total, e o de Sobradinho tem 250 m². De acordo com a Lei Complementar Nº 948, de 16 de janeiro de 2019 – Lei de Uso e Ocupação do Solo (LUOS) do DF –, em seu anexo IV, o afastamento mínimo obrigatório entre a edificação (com altura de até 8,5 metros) e os limites do lote é de 1,5m para vãos com abertura e para vãos com abertura de compartimentos de permanência transitória. Quanto à permeabilidade do terreno, deve ser de no mínimo 20%. Sendo assim, os lotes padrão foram definidos respeitando essas exigências. A declividade dos terrenos foi arbitrada, sendo de 1%, com caimento para a frente do lote.

A planta dos lotes com a alocação das medidas compensatórias é apresentada a seguir (Figura 5.1 e Figura 5.2). O quantitativo de áreas de cada lote é apresentado na Tabela 5.2 e na Tabela 5.3.

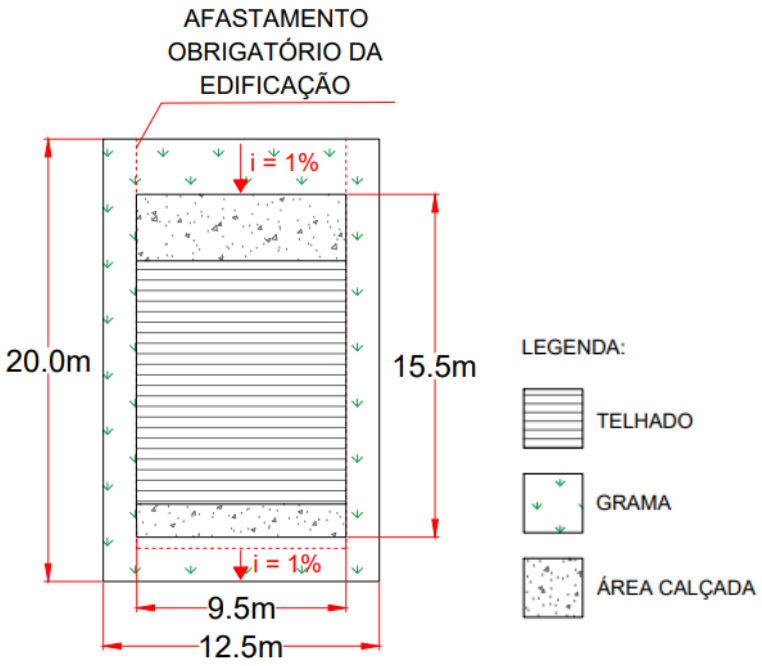


Figura 5.1 - Planta do lote padrão RH2 (Elaboração própria, 2023)

Tabela 5.2 - Áreas de contribuição do lote padrão do tipo UST RH2.

Tipo	**Área de contribuição (m²) – RH2**
Telhado	104,50
Área calçada	42,75
Área gramada	102,75
TOTAL	250,00

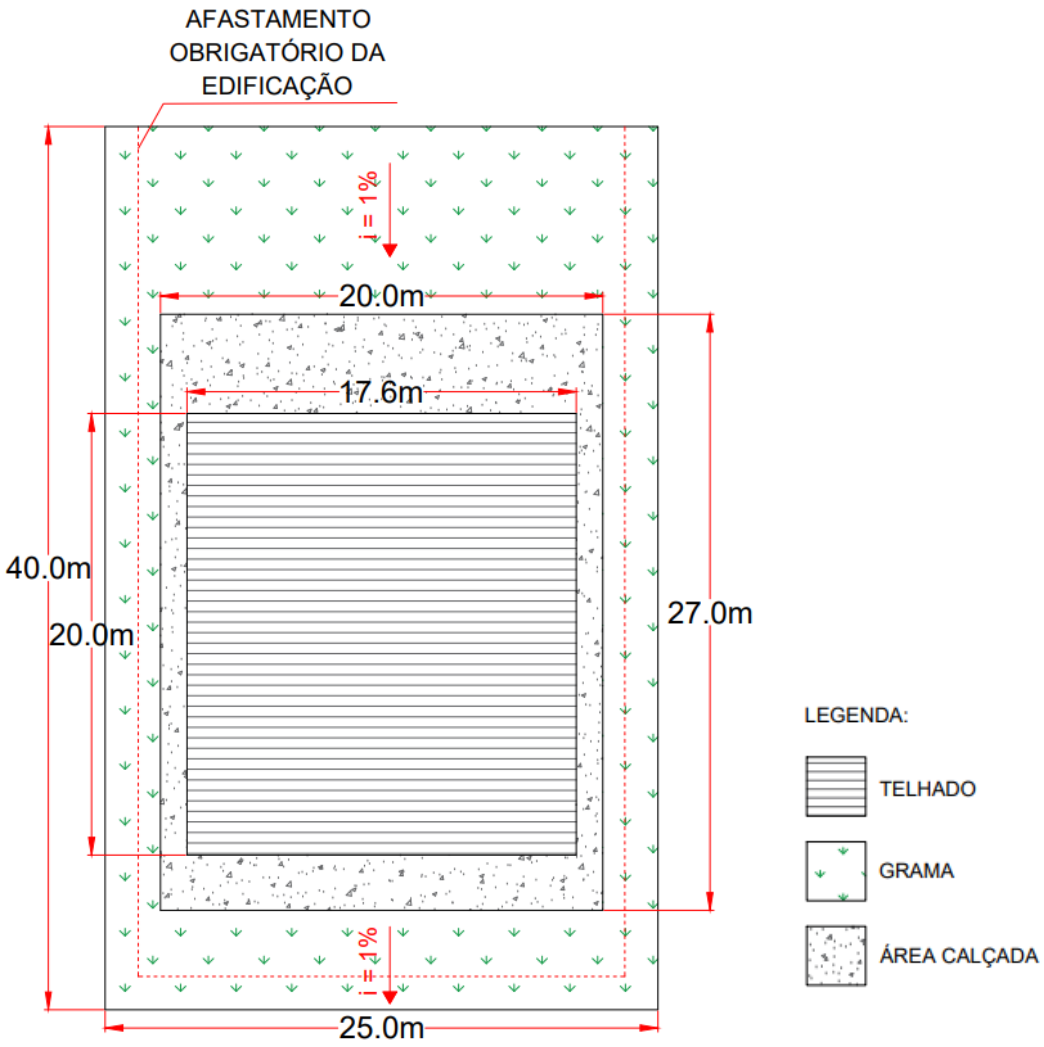


Figura 5.2 - Planta do lote padrão RH4 (Elaboração própria, 2023)

Tabela 5.3 - Áreas de contribuição do lote padrão do tipo UST RH4.

Tipo	**Área de contribuição (m²) – RH4**
Telhado	352,00
Área calçada	188,00
Área gramada	460,00
TOTAL	1000,00

Quanto às características específicas dos solos nos locais e projeto, foi consultado no Atlas do Distrito Federal (CODEPLAN, 2020) os tipos predominantes em cada local. Em ambas as regiões, Lago Sul e Sobradinho, os principais tipos de solo presentes são o Latossolo Vermelho e o Latossolo Vermelho-Amarelo, sendo que o primeiro é predominante. Lima *et*

al. (2013) levantou dados para vários tipos de solo do DF, e apresenta em seu trabalho os valores máximos, médios e mínimos. Por segurança, será adotado no presente trabalho o valor mínimo, medido numa profundidade de 1 metro. Para o Latossolo Vermelho, o valor mínimo medido na profundidade de 1 metro foi de 177, 48 mm/h, enquanto para o Latossolo Vermelho-Amarelo, também presente nas áreas de estudo, foi de 49,34 mm/h. Será adotado o menor valor, também por uma questão de segurança. Logo, a condutividade hidráulica do solo adotada para o projeto é de 49,34 mm/h.

5.2. ALOCAÇÃO DAS MEDIDAS COMPENSATÓRIAS

As medidas compensatórias foram alocadas considerando a declividade do terreno e a área disponível para construção. No presente trabalho, não serão apresentadas as plantas de cobertura dos lotes com as medidas compensatórias alocadas, mas sim apenas suas dimensões finais. Seguem abaixo as razões que guiaram a escolha de alocação e definição de dimensões iniciais das medidas compensatórias:

- O reservatório de lote foi alocado no ponto mais baixo possível, respeitando o afastamento obrigatório dos limites do lote, visto que consiste em uma construção, já que devido a seu tamanho e formato deveria ser, provavelmente, de concreto. O tamanho do reservatório foi escolhido de modo que não seja grande o suficiente para dificultar sua implantação e exigir estruturas mais complexas;
- As trincheiras e as valas de infiltração, por serem medidas lineares (de comprimento muito maior em relação às outras dimensões), foram alocadas nas laterais do lote, ao longo de seu comprimento. Essas medidas foram alocadas de forma a ocupar espaços que provavelmente não teriam outro uso, por isso foram colocadas nas laterais do terreno que provavelmente serviriam apenas para passagem. Seu tamanho foi definido de forma a ocupar somente as laterais do terreno;
- O pavimento poroso foi alocado de forma que substitua o calçamento impermeável original ao redor da casa e na área externa, que poderia ser uma área de lazer, churrasqueira, etc.;
- Os poços de infiltração foram alocados nos pontos mais baixos possíveis do terreno, ou seja, na parte da frente, com certa distância entre cada um para não prejudicar sua capacidade de infiltração;

- Os jardins de chuva, sendo as medidas compensatórias que mais contribuem esteticamente para o ambiente, foram alocados na parte da frente da casa, que também é o ponto mais baixo do terreno.

5.3. PARÂMETROS UTILIZADOS PARA CADA ALTERNATIVA

Como foi dito anteriormente, a fim de tornar as medidas compensatórias viáveis para construção, é necessário, às vezes, ajustar alguns parâmetros para que as dimensões fiquem em faixas de valores aceitáveis. Isso foi feito, no presente estudo de caso, com o reservatório de lote. Com a área em planta definida para os reservatórios (são duas unidades em cada lote), a profundidade calculada estava resultando em mais de 4 metros de profundidade, o que torna inviável a construção. Assim, o tempo de retorno foi reduzido para 5 anos, a fim de diminuir a vazão gerada e consequentemente o volume necessário para amortecimento da vazão. Além disso, para o lote do Lago Sul, a vazão à jusante também teve de ser aumentada, o que faz o indicador hidrológico do reservatório diminuir um pouco, desfavorecendo essa medida no processo de seleção nesse cenário específico. Os parâmetros utilizados são apresentados na Tabela 5.4 e na Tabela 5.5.

Tabela 5.4 - Parâmetros utilizados para cada medida compensatória, para o lote de Sobradinho.

Medida compensatória	**Tempo de retorno (anos)**	**Qjus (L/s)**	**Área de contribuição final da MC (m^2)**	**Coeficiente de escoamento médio final pra MC**
Reservatório de lote	5	0,61	250,00	0,612
Jardim de chuva	10	0,61	172,93	0,796
Vala de infiltração (vala gramada)	10	0,61	172,93	0,796
Pavimento poroso de bloco modular (concreto permeável)	10	0,61	172,93	0,796
Trincheira de infiltração	10	0,61	172,93	0,796
Poço de infiltração	10	0,61	172,93	0,796

Tabela 5.5 - Parâmetros utilizados para cada medida compensatória, para o lote do Lago Sul.

Medida compensatória	**Tempo de retorno (anos)**	**Qjus (L/s)**	**Área de contribuição final da MC (m^2)**	**Coeficiente de escoamento médio final pra MC**
Reservatório de lote	5	7,44	837,96	0,578
Jardim de chuva	10	2,44	691,71	0,746
Vala de infiltração (vala gramada)	10	2,44	691,71	0,746
Pavimento poroso de bloco modular (concreto permeável)	10	2,44	691,71	0,746
Trincheira de infiltração	10	2,44	691,71	0,746
Poço de infiltração	10	2,44	691,71	0,746

5.4. MATRIZ DE JULGAMENTO DOS INDICADORES

A Tabela 5.6 e a Tabela 5.7 apresentam a matriz de julgamento entre os indicadores, para o lote de Sobradinho e o do Lago Sul, respectivamente. O julgamento par a par dos indicadores foi feito pela escala fundamental do AHP (escala de Saaty), de acordo com a ordem pré-definida de importância relativa entre eles. Quanto maior o número atribuído na comparação par a par, maior a importância relativa de um indicador sobre outro.

Tabela 5.6 - Matriz de julgamento absoluto (não normalizado) entre os indicadores, para o lote de Sobradinho

Comparação entre indicadores	**Indicador físico**	**Indicador hidrológico**	**Indicador hidráulico - TR**	**Indicador hidráulico - Tesv**	**Indicador econômico**	**Indicador ambiental**	**Indicador social - estética**	**Indicador social - reuso**
Indicador físico	1	1/3	1/3	4	1/3	3	6	1
Indicador hidrológico	3	1	1	6	1	5	8	4
Indicador hidráulico - TR	3	1	1	6	1	5	8	4
Indicador hidráulico - Tesv	1/4	1/6	1/6	1	1/6	1/2	3	1/3
Indicador econômico	3	1	1	6	1	5	8	4
Indicador ambiental	1/3	1/5	1/5	2	1/5	1	4	1/2
Indicador social - estética	1/6	1/8	1/8	1/3	1/8	1/4	1	1/5
Indicador social - reuso	1	1/4	1/4	3	1/4	2	5	1

Tabela 5.7 - Matriz de julgamento absoluto (não normalizado) entre os indicadores, para o lote do Lago Sul

Comparação entre indicadores	**Indicador físico**	**Indicador hidrológico**	**Indicador hidráulico - TR**	**Indicador hidráulico - Tesv**	**Indicador econômico**	**Indicador ambiental**	**Indicador social - estética**	**Indicador social - reuso**
Indicador físico	1	1/5	1/5	5	2	1/2	1/5	5
Indicador hidrológico	5	1	1	9	6	4	1	9
Indicador hidráulico - TR	5	1	1	9	6	4	1	9
Indicador hidráulico - Tesv	1/5	1/9	1/9	1	1/4	1/6	1/9	1
Indicador econômico	1/2	1/6	1/6	4	1	1/3	1/6	4
Indicador ambiental	2	1/4	1/4	6	3	1	1/4	6
Indicador social - estética	5	1	1	9	6	4	1	9
Indicador social - reuso	1/5	1/9	1/9	1	1/4	1/6	1/9	1

5.5. PRIORIDADE DOS INDICADORES EM PORCENTAGEM

As prioridades dos indicadores em porcentagem (Tabela 5.8 e Tabela 5.9) foram obtidas com a equação 4.16, tomando como base a matriz de comparações binárias normalizadas, e expressos em porcentagem (%).

Tabela 5.8 - Prioridade dos indicadores, em porcentagem, para o lote de Sobradinho

Indicador	**Prioridade (%)**
Indicador físico	10,20
Indicador hidrológico	23,57
Indicador hidráulico - TR	23,57
Indicador hidráulico - Tesv	3,68
Indicador econômico	23,57
Indicador ambiental	5,23
Indicador social - estética	2,08
Indicador social - reuso	8,12

Tabela 5.9 - Prioridade dos indicadores, em porcentagem, para o lote do Lago Sul

Indicador	**Prioridade (%)**
Indicador físico	6,92
Indicador hidrológico	24,78
Indicador hidráulico - TR	24,78
Indicador hidráulico - Tesv	2,06
Indicador econômico	5,04
Indicador ambiental	9,59
Indicador social - estética	24,78
Indicador social - reuso	2,06

As tabelas acima tornam mais clara a comparação par a par dos indicadores, ao mostrar a prioridade percentual que cada um teve no processo de seleção. Analisando os valores da Tabela 5.8 e da Tabela 5.9, nota-se que os três indicadores que foram considerados igualmente importantes em primeiro lugar na hierarquia somam mais de 70% na prioridade global. É interessante apontar que, em Sobradinho, o econômico foi considerado muito mais importante que a contribuição estética, estando à frente com mais de 20% de prioridade, sendo o contrário no Lago Sul.

5.6. DIMENSÕES DAS MEDIDAS COMPENSATÓRIAS

O dimensionamento das medidas foi realizado seguindo as etapas indicadas nos itens 3.4 e 4.3. Como já foi mencionado, suas dimensões pré-definidas (largura, comprimento e consequentemente a área em planta) foram escolhidas a partir da observação do espaço disponível em cada lote. Por exemplo, como as medidas lineares (trincheira e vala de infiltração) foram alocadas nas laterais do lote, foi necessário verificar se elas não atrapalhariam a passagem. Assim, como no lote de Sobradinho a largura disponível nas laterais do lote era de somente 1,5 m (que é o afastamento obrigatório da edificação), a largura pré-definida para as medidas foi de 0,6 m, deixando 0,9 m livre para passagem. Já no Lago Sul, a largura disponível é maior, então as medidas têm 1,0 m de largura.

O tempo de esvaziamento foi calculado dividindo-se o volume de água acumulada pela vazão de saída em cada medida. O resultado do dimensionamento e o tempo de esvaziamento é apresentado na Tabela 5.10 e na Tabela 5.11.

Tabela 5.10 - Dimensões das medidas compensatórias e outros parâmetros, para o lote de Sobradinho

Medida compensatória	**Profundidade - H (m)**	**Largura - B (m)**	**Comprimento - L (m)**	**Diâmetro - D (m)**	**Área em planta (m^2)**	**Unidades alocadas**	**Área de infiltração (m^2)**	**Tempo de esvaziamento (h)**
Reservatório de lote	2,28	1,00	2,00	-	2,00	2	-	4,14
Jardim de chuva	0,64	0,60	10,00	-	6,00	2	6,00	13,11
Vala de infiltração (vala gramada)	0,64	0,60	10,00	-	6,00	2	6,00	13,11
Pavimento poroso de bloco modular (concreto permeável)	0,35	-	-	-	42,75	1	42,75	2,84
Trincheira de infiltração	0,18	0,60	10,00	-	6,00	2	7,85	1,08
Poço de infiltração	0,29	-	-	1	0,79	8	1,24	1,49

Tabela 5.11 - Dimensões das medidas compensatórias e outros parâmetros, para o lote do Lago Sul

Medida compensatória	**Profundidade - H (m)**	**Largura - B (m)**	**Comprimento - L (m)**	**Diâmetro - D (m)**	**Área em planta (m^2)**	**Unidades alocadas**	**Área de infiltração (m^2)**	**Tempo de esvaziamento (h)**
Reservatório de lote	2,14	2,00	3,00	-	6,00	2	-	3,48
Jardim de chuva	0,53	1,00	27,00	-	27,00	2	27,00	10,65
Vala de infiltração (vala gramada)	0,53	1,00	27,00	-	27,00	2	27,00	10,65
Pavimento poroso de bloco modular (concreto permeável)	0,28	-	-	-	188,00	1	188,00	2,31
Trincheira de infiltração	0,21	1,00	27,00	-	27,00	2	32,77	1,38
Poço de infiltração	0,43	-	-	1,5	1,77	12	2,79	2,22

5.7. VALORES DOS INDICADORES QUANTITATIVOS

A Tabela 5.12 e a Tabela 5.13 apresentam os valores resultantes dos cálculos dos indicadores quantitativos, para Sobradinho e Lago Sul, respectivamente. Nota-se que, quanto ao indicador hidrológico em Sobradinho, como não foi necessário aumentar a vazão à jusante para além da vazão de restrição, todos eles receberam valor 1, igualmente.

Tabela 5.12 - Valores dos indicadores quantitativos para o lote de Sobradinho

Medida compensatória	**Indicador físico**	**Indicador hidrológico**	**Indicador hidráulico - TR**	**Indicador hidráulico – Tesv (h^{-1})**	**Indicador econômico (1/R$)**	**Indicador ambiental**
Reservatório de lote	36,375	1,000	0,500	0,241	0,000132	6,700
Jardim de chuva	12,125	1,000	1,000	0,076	0,000201	2,200
Vala de infiltração (vala gramada)	12,125	1,000	1,000	0,076	0,000080	2,200
Pavimento poroso de bloco modular (concreto permeável)	3,404	1,000	1,000	0,352	0,000163	10,000
Trincheira de infiltração	12,125	1,000	1,000	0,926	0,000078	5,400
Poço de infiltração	23,157	1,000	1,000	0,670	0,000138	5,400

Tabela 5.13 - Valores dos indicadores quantitativos para o lote do Lago Sul

Medida compensatória	**Indicador físico**	**Indicador hidrológico**	**Indicador hidráulico - TR**	**Indicador hidráulico – Tesv (h^{-1})**	**Indicador econômico (1/R$)**	**Indicador ambiental**
Reservatório de lote	54,000	0,328	0,500	0,287	0,000047	6,700
Jardim de chuva	12,000	1,000	1,000	0,094	0,000045	2,200
Vala de infiltração (vala gramada)	12,000	1,000	1,000	0,094	0,000030	2,200
Pavimento poroso de bloco modular (concreto permeável)	3,447	1,000	1,000	0,434	0,000037	10,000
Trincheira de infiltração	12,000	1,000	1,000	0,727	0,000029	5,400
Poço de infiltração	30,558	1,000	1,000	0,450	0,000102	5,400

5.8. MATRIZ DE COMPARAÇÃO DOS INDICADORES QUALITATIVOS

Como os indicadores do critério social foram os únicos qualitativo, foram analisados por meio da Escala de Saaty. Os valores atribuídos na comparação quanto ao critério de contribuição estética podem ser vistos na tabela Tabela 5.14. O reservatório de lote considerado foi o enterrado, por isso foi considerado como tendo uma contribuição estética indiferente.

Tabela 5.14 - Matriz de julgamento em relação ao indicador social de contribuição estética

Comparação entre alternativas segundo o indicador social - estética	**Reservatório de lote**	**Jardim de chuva**	**Vala de infiltração (vala gramada)**	**Pavimento poroso de bloco modular (concreto permeável)**	**Trincheira de infiltração**	**Poço de infiltração**
Reservatório de lote	1	1/5	3	1	1/3	3
Jardim de chuva	5	1	7	5	3	7
Vala de infiltração (vala gramada)	1/3	1/7	1	1/3	1/5	1
Pavimento poroso de bloco modular (concreto permeável)	1	1/5	3	1	1/3	3
Trincheira de infiltração	3	1/3	5	3	1	5
Poço de infiltração	1/3	1/7	1	1/3	1/5	1

Quanto ao indicador social de reuso, o reservatório de lote foi considerando como tendo "importância absoluta" sobre todos os outros, tendo recebido o número 9 na matriz de julgamentos. Todos os outros receberam o valor 1 em relação um ao outro (igual importância). Na comparação das outras alternativas em relação ao reservatório, o valor atribuído foi 1/9.

5.9. RESULTADO (PRIORIDADE GLOBAL DE CADA ALTERNATIVA)

Por fim, com a aplicação do método AHP e todas as suas etapas, obtém-se as prioridades globais de cada alternativa para a situação modelada, que pode ser vista na Tabela 5.15 e na Tabela 5.16, para os lotes de Sobradinho e do Lago Sul, respectivamente.

Tabela 5.15 - Resultado para o lote de Sobradinho (prioridades de cada alternativa)

Preferência (prioridade global - %)	
Reservatório de lote	20,65
Jardim de chuva	17,44
Vala de infiltração (vala gramada)	13,00
Pavimento poroso de bloco modular (concreto permeável)	16,41
Trincheira de infiltração	15,20
Poço de infiltração	17,30

Tabela 5.16 - Resultado para o lote do Lago Sul (prioridades de cada alternativa)

Preferência (prioridade global - %)	
Reservatório de lote	13,92
Jardim de chuva	22,76
Vala de infiltração (vala gramada)	12,37
Pavimento poroso de bloco modular (concreto permeável)	16,27
Trincheira de infiltração	18,70
Poço de infiltração	15,98

Analisando indicador por indicador, os pesos atribuídos a cada um e o resultado das preferências globais de cada alternativa de projeto, percebe-se que o resultado final é consistente. Em Sobradinho, a alternativa de maior preferência é o reservatório de lote (com 20,65%), enquanto no Lago Sul é o jardim de chuva (com 22,76%). Em ambas as regiões, o indicador hidrológico e o hidráulico de tempo de retorno tiveram igual importância, garantindo a eficácia das alternativas propostas. Como no Lago Sul a contribuição estética foi o indicador que, em comparação com a situação de Sobradinho, recebeu maior peso, era esperado que o jardim de chuva tivesse uma alta pontuação, visto que é a alternativa que mais contribui para a beleza do ambiente.

Em Sobradinho, o critério econômico foi considerado como tendo também uma grande importância, e como pode ser visto na Tabela 4.2, considerando que o reservatório de lote tem uma longa vida útil, acaba sendo uma alternativa relativamente econômica. É claro que, com a implantação do sistema de reuso, mais custos deveriam ser incluídos na análise, como o sistema para filtração e bombeamento da água, por exemplo; sugere-se avaliar esse custo adicional ao comparar as medidas para uma aplicação em caso concreto. Além disso, em

Sobradinho o indicador físico e o de reuso tiveram pesos maiores, e o reservatório de lote é o que ocupa menor área em planta e permite o reuso das águas pluviais.

Ademais, outro ponto interessante a ser ressaltado é a diferença que a atribuição de pesos diferentes em um único indicador pode fazer no resultado das preferências globais ao final. Por exemplo, ao analisar o cenário proposto para o lote do Lago Sul, a partir dos valores dos indicadores quantitativos na Tabela 5.13, nota-se que desempenho do jardim de chuva e da vala de infiltração é muito parecido, sendo diferente apenas o indicador econômico. No entanto, enquanto o jardim de chuva apresentou preferência global final de 22,76%, a vala de infiltração ficou em último lugar, com 12,37%. O que influenciou esse resultado foi o fato de o jardim de chuva ter sido considerado, em comparação com a vala de infiltração, de importância muito grande no quesito contribuição estética.

É importante analisar, no método de seleção de alternativas que foi proposto nesse trabalho, como as etapas do processo influenciam no resultado, a fim de verificar quais são os indicadores que realmente contribuem para um método sólido de comparação entre as alternativas, quais podem ser alterados, se os pesos fazem sentido para o cenário avaliado, dentre outros aspectos. Assim, é possível refinar o processo a fim de se obter um método otimizado e realmente útil para o caso concreto.

Enfatiza-se que o estudo de caso foi realizado considerando apenas dois cenários hipotéticos, escolhidos com o único objetivo de analisar parte das diferenças de resultado obtidas com o modelo; no entanto, podem ser escolhidos e analisados diversos outros cenários possíveis, a partir de pequenas alterações na planilha de Excel desenvolvida e utilizada nesse estudo, apresentada no Apêndice A. Com isso, pode ser feita uma análise de sensibilidade para validar o método utilizado: a análise de sensibilidade "consiste em realizar a análise multicritério variando determinados parâmetros, tais como pesos e os valores de indicadores obtidos por avaliação subjetiva, verificando, por fim, quais são os mais sensíveis e que condicionam a classificação final das alternativas" (Brito, 2006, p. 87).

6. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

A partir da revisão bibliográfica realizada, entende-se que há muito o que ser analisado em um projeto de drenagem urbana, especialmente no caso do uso de medidas compensatórias, que tem, cada uma, suas vantagens e desvantagens. Com isso, é clara a importância de se desenvolver um método de apoio à decisão de quais alternativas adotar em projeto.

Portanto, essa constatação foi o ponto de partida para a realização do presente trabalho, cujo objetivo geral foi propor um método de seleção de medidas compensatórias, e de modo específico: selecionar e dimensionar alternativas diferentes de projeto, propor e calcular um sistema de indicadores para quantificar ou qualificar características que pudessem ser usadas para comparar as diferentes alternativas e, por fim, fazer a aplicação em um estudo de caso, utilizando um método multicritério para análise e escolha de alternativas.

Atendidos os objetivos e obtidos os resultados, pôde-se verificar que o método apresentado se mostra como um importante apoio à decisão. Entretanto, quanto à sua eficiência na prática e sua precisão, é importante ressaltar a necessidade de se desenvolver bem os indicadores utilizados, que serão a base para a decisão. Além disso, também é essencial que os dados usados no cálculo desses indicadores sejam o mais precisos possível, o que exige a realização de futuros estudos para obtenção de dados faltantes (o que foi uma das dificuldades encontradas nesse trabalho), como, por exemplo, a porcentagem de redução média de poluentes para algumas das medidas, para as quais foram feitas aproximações nesse trabalho. Para o uso da planilha de Excel que foi desenvolvida neste trabalho, quando não houver disponibilidade de dados para algum indicador, a fim de não precisar alterar a estrutura da planilha automatizada, pode-se atribuir a ele o valor 1, para todas as alternativas – assim, ele é neutralizado.

Em relação aos pesos atribuídos a cada critério, como visto, eles dependem do local de implantação do projeto, dado que a depender do perfil dos habitantes de certo local, cada critério terá uma importância maior ou menor; por exemplo, em locais com habitantes de maior renda, o quesito “beleza” dentro do critério social terá uma importância maior que o custo, visto que tais habitantes podem estar dispostos a conceder mais recursos financeiros para melhorar a aparência do ambiente do que em um local onde o que mais se preza é a funcionalidade da medida compensatória e não a beleza, por não se ter a possibilidade de arcar com maiores custos.

Ressalta-se que, quanto ao uso de critérios subjetivos, é importante fazer uma consulta à população ou aos órgãos públicos envolvidos no projeto. Por exemplo, para o indicador de contribuição estética, poderia ser feita uma pesquisa de opinião com a população do local de implantação do projeto. Ainda quanto aos pesos atribuídos a cada critério/indicador (importância relativa de um em comparação aos outros), enfatiza-se a necessidade de se fazer uma análise detalhada das necessidades do projeto a ser implantado e de existir um consenso entre as partes envolvidas no projeto, para a definição otimizada e acurada desses pesos.

Ademais, vale observar que em cada caso particular de processo de decisão haverá uma necessidade igualmente particular de avaliação de critérios específicos, que dependerão das alternativas em análise, os pontos em comum que podem ser analisados ou não. Alguns dos indicadores só tem significância real de comparação quando esta é feita entre medidas de funcionamento similar. Portanto, com todas as considerações, é importante fazer uma análise de sensibilidade para ajustar o modelo às demandas do projeto.

Por fim, chega-se à conclusão de que ainda há muito o que ser explorado no campo dos processos de seleção de medidas de drenagem urbana, visto que são diversos os critérios que podem ser utilizados para analisar esse tipo de problema, o que abre um leque de possibilidades de realização de estudos, elaboração de novos modelos e lapidação dos critérios e indicadores utilizados nesses processos.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Adasa (2011). Resolução Nº 9 de 08/04/2011. Estabelece os procedimentos gerais para requerimento e obtenção de outorga de lançamento de águas pluviais em corpos hídricos de domínio do Distrito Federal e naqueles delegados pela União e Estados. Diário Oficial do Distrito Federal, Brasília, ano 43, n. 69, p. 18, 11 abril 2011. Disponível em: https://www.sinj.df.gov.br/sinj/Diario/ee6e96ed-4811-3515-aa63-b3d37cf67a1a/d42e46d2.pdf. Acesso em: 12 nov. 2022.

Adasa (2018). *Manual de Drenagem e Manejo de Águas Pluviais Urbanas do Distrito Federal.* Brasília, DF, 333p.

Ballard, B. W. *et al*. (2015). *The SuDS Manual*. v. 5. Londres: CIRIA, 968p.

Brito, D. S. (2006). *Metodologia para seleção de alternativas de sistemas de drenagem*. Dissertação de Mestrado (Tecnologia Ambiental e Recursos Hídricos), Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Faculdade de Tecnologia, Universidade de Brasília. Brasília, DF, 117p.

Campana, N. A. (1995). *Impacto da urbanização nas cheias urbanas.* Tese de Doutorado em Engenharia de Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental. Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, RS, 226p.

Castro, L. M. A. (2002). *Proposição de indicadores para a avaliação de sistemas de drenagem urbana.* Dissertação de Mestrado em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos. Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental, Departamento de Engenharia Hidráulica e Recursos Hídricos, Escola de Engenharia, Universidade Federal de Minas Gerais. Belo Horizonte, MG, 118p.

Castro, K. B. (2017). "Segurança Hídrica Urbana: Morfologia urbana e Indicadores de Serviços Ecossistêmicos, estudo de caso do Distrito Federal, Brasil.". Tese de Doutorado em Geociências Aplicadas, Instituto de Geociências, Universidade de Brasília. Brasília, DF, 207p.

City of Omaha Environmental Quality Control Division (2014). *Omaha Regional Stormwater Design Manual*. Omaha, EUA.

CODEPLAN. Atlas do Distrito Federal 2020. Disponível em: <https://www.codeplan.df.gov.br/atlas-do-distrito-federal-2020/>. Acesso em: 26 jun. 23.

Companhia Urbanizadora da Nova Capital do Brasil (NOVACAP). (2019). *Termo de referência e especificações para elaboração de projetos de sistema de drenagem pluvial no Distrito Federal.* Brasília, DF, 25p.

CondomínioSC (2016). *Sistema de Captação da Água da Chuva: informações e benefícios.* Disponível em: https://condominiosc.com.br/secoes/mercado-condominial/2733-sistema-de-captacao-da-agua-da-chuva-informacoes-e-beneficios. Acesso em: 18 ago. 2022.

Costa, T. C.; Belderrain, M. C. N. (2009). "Decisão em grupo em métodos multicritério de apoio à decisão". *Anais do 15º Encontro de Iniciação Científica e Pós-Graduação do ITA.* São José dos Campos, SP, 12p.

Distrito Federal (2019). Lei Complementar Nº 948, de 16 de janeiro de 2019. Aprova a Lei de Uso e Ocupação do Solo do Distrito Federal - LUOS nos termos dos arts. 316 e 318 da Lei Orgânica do Distrito Federal e dá outras providências. Diário Oficial do Distrito Federal, Brasília, ano 48, n. 12-A, p. 1, 17 janeiro 2019. Disponível em: https://www.sinj.df.gov.br/sinj/BaixarArquivoDiario.aspx?id_file=25bf306f-44f6-3a22-94c0-a200c6fbc917. Acesso em: 11 jan. 2023.

Festi, A. V. (2007). "Coletânea das equações de chuva do Brasil". *ABRHidro – Associação Brasileira de Recursos Hídricos*. São Paulo, SP, 18p.

Hung Do, Q. (2014). *Evaluating teaching performance based on fuzzy AHP and comprehensive evaluation approach*. *Applied Soft Computing 28 (2015),* p. 100-108.

IBGE. Inflação. Calculadora do IPCA. Disponível em: <https://www.ibge.gov.br/explica/inflacao.php>. Acesso em: 24 jun. 23.

IPHAN (2016). *Conjunto Urbanístico de Brasília: Preservação e Drenagem Urbana*. Brasília, DF. Disponível em: http://portal.iphan.gov.br/uploads/ckfinder/arquivos/Conjunto_urbanistico_de_brasilia_preserva%C3%A7%C3%A3o_e_denagem_urbana.pdf. Acesso em: 18 ago. 2022.

Junior, M. O. F. (2009). *Avaliação de intervenções em áreas urbanas à luz dos impactos nos sistemas de infra-estrutura sanitária*. Dissertação de Mestrado em Recursos Hídricos, Hidrologia Urbana. Escola de Engenharia da UFMG. Belo Horizonte, MG, 180p.

Lima, J. E. F. W. *et al*. (2013). "Desenvolvimento de base de dados de solos para a apliação do modelo SWAT em bacia do bioma Cerrado". XX Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, Bento Gonçalves, 8p.

Melo, T. A. T. (2011). *Jardim de chuva: Sistema de biorretenção como técnica compensatória no manejo de águas pluviais urbanas*. Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil. Centro de Tecnologia e Geociências. Universidade Federal de Pernambuco. Recife, PE, 137p.

Miguez, M. G.; Veról, A.P.; Rezende, O.M. (2015). *Drenagem Urbana: Do projeto tradicional à sustentabilidade.* Elsevier, Rio de Janeiro, RJ, 1 ed, 361p.

Milograna, J. (2009). *Sistemática de auxílio à decisão para a seleção de alternativas de controle de inundações urbanas.* Tese de Doutorado em Tecnologia Ambiental e Recursos Hídricos. Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Faculdade de Tecnologia, Universidade de Brasília. Brasília, DF, 316p.

Moura, P. M. (2004). "Contribuição para a Avaliação Global de Sistemas de Drenagem Urbana". Dissertação de Mestrado em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos. Escola de Engenharia da UFMG. Belo Horizonte, MG, 164p.

Novacap (2019). Termo de referência e especificações para elaboração de projetos de sistema de drenagem pluvial no Distrito Federal. Brasília, DF, abril 2019, 25p.

Prefeitura de Porto Alegre. *Detenção – as bacias que ficam secas.* Porto Alegre, RS, [s.d.]. Disponível em: http://www2.portoalegre.rs.gov.br/dep/default.php?p_secao=69. Acesso em: 18 ago. 2022.

Sell, B. M. *et al*. (2015). "Uso de geotecnologias para avaliação qualitativa dos fatores de influência nas regiões críticas de alagamentos na cidade de Pelotas-RS". *XXI Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos*. Brasília, DF, 9p.

Silveira, A. L. L.; Goldenfum, J. A. (2007). "Metodologia Generalizada para Pré-Dimensionamento de Dispositivos de Controle Pluvial na Fonte". *Revista Brasileira de Recursos Hídricos – RBRH*. Porto Alegre, RS, **12**(2), p. 157-168.

SUDERHSA (2002). *Manual de Drenagem Urbana – Região Metropolitana de Curitiba – PR.* Versão 1.0. Curitiba, PR, 150p.

Temecula. *Water Quality Management Plan*. Califórnia, EUA, [s.d.]. Disponível em: https://temeculaca.gov/796/Water-Quality-Management-Plan. Acesso em: 18 ago. 2022.

Tucci, C. E. M. (2005). *Gestão de águas pluviais urbanas*. 4º volume. Brasília: Ministério das cidades, 197p.

Tucci, C. E. M. (Org) (2009). *Hidrologia: Ciência e Aplicação*. 4ª edição. Editora da UFRGS, Porto Alegre, RS, 943p.

Urban Drainage and Flood Control District (2010). *Urban Storm Drainage Criteria Manual*. v.3. Denver, EUA, 578p.

U.S. Environmental Protection Agency (EPA) (2020). *Office of Water*. *Saving the Rain: Green Stormwater Solutions for Congregations*. [s.l.].

APÊNDICES

APÊNDICE A – PLANILHA DE EXCEL FEITA PARA AUTOMATIZAÇÃO DOS CÁLCULOS

A Figura A.1 até a Figura A.8 mostram as partes da planilha de Excel que foi feita para automatização dos cálculos, incluindo todas as etapas do sistema de seleção de alternativas de drenagem sustentável apresentadas nesse trabalho.

Equação IDF (Keifer & Chu) (*i* em mm/h) [1]			
k	m	n	d
1574,7	0,207	0,884	11

LEGENDA:
Em amarelo: células para se inserir dados
Em branco: NÃO MEXER

Equação IDF (Talbot)		
a	b	c
2716,062	0,207	14,774

Vazão de restrição (L/s.ha) [2]	Vazão de restrição (mm/h)	Coeficiente de permeabilidade do solo adotado: k (mm/h)
24,4	8,784	49,34

Áreas		
Tipo	Área de contribuição (m²)	Coeficiente de escoamento [3]
Telhado	352	0,9
Área calçada	188	0,9
Área gramada	460,00	0,2
Área total	1000	
Coeficiente de escoamento médio		0,578

Área total do lote (m²)	Vazão de restrição lote (L/s)
1000	2,44

Medidas compensatórias	Tempo de retorno (anos) *	Tempo de duração (min)	i (mm/h)	Vazão total gerada no lote (L/s)	Área gramada que produz a vazão de restrição (m²)	Se Qjus for maior que Qalvo (Qpre-urb), Qjus-Qalvo: (L/s)	Área de telhado que produz a vazão adicional (Qjus-Qalvo) (m²)	Área de contribuição final da MC (m²)	Coeficiente de escoamento médio final pra MC
Reservatório de lote	5	15	123	19,82	-	5,00	162,045	837,955	0,516
Jardim de chuva	10	15	142	22,87	308,286	0,00	0,000	691,714	0,746
Vala de infiltração (vala gramada)	10	15	142	22,87	308,286	0,00	0,000	691,714	0,746
Pavimento poroso de bloco modular (concreto permeável)	10	15	142	22,87	308,286	0,00	0,000	691,714	0,746
Trincheira de infiltração	10	15	142	22,87	308,286	0,00	0,000	691,714	0,746
Poço de infiltração	10	15	142	22,87	308,286	0,00	0,000	691,714	0,746

Vazões de saída (qs) (mm/h)		Qjus (L/s)
Reservatório de lote	8,784	7,44
Jardim de chuva	49,34	2,44
Vala de infiltração (vala gramada)	49,34	2,44
Pavimento poroso de bloco modular (concreto permeável)	49,34	2,44
Trincheira de infiltração	49,34	2,44
Poço de infiltração	49,34	2,44

Pro reservatório de lote, não há desconto de vazão para garantir a vazão de pré-urbanização. Terá desconto de vazão somente se for necessário para o dimensionamento.

Figura A.1 – Planilha de Excel para automatização dos cálculos, parte 1 (Dados de chuva e áreas)

Funcionamento	Medida compensatória	Unidades	Área de contribuição por	Largura (m)	Comprimento (m)	Área em planta (m²)	β	qs (mm/h)	H (mm)
Armazenamento	Reservatório de lote	2	418,98	2	3	6	36,013	8,784	2137
Infiltração	Jardim de chuva*	2	345,86	1	27	27	9,562	49,34	525
Infiltração	Vala de infiltração (vala gramada)	2	345,86	1	27	27	9,562	49,34	525

Observações

Obs.:*Dimensionamento segue a fórmula da vala / reservatório

Funcionamento	Medida compensatória	Unidades	Área de contribuição por	Área em planta (m²)	β	η	qs (mm/h)	H (mm)
Infiltração	Pavimento poroso de bloco modular (concreto permeável)	1	691,71	188	2,747	0,4	49,34	284

Funcionamento	Medida compensatória	Unidades	Área de contribuição por	Largura (m)	Comprimento (m)	Área em planta (m²)	β	γ (mm^{-1})	k1	k2	η	qs (mm/h)	H (mm)
Infiltração	Trincheira de infiltração	2	345,86	1	27	27	9,562	0,0020	26,4038	1,2074	0,4	49,34	206

Funcionamento	Medida compensatória	Unidades	Área de contribuição por	Diâmetro (m)	Área em planta (m²)	β	γ (mm^{-1})	k1	k2	η	qs (mm/h)	H (mm)
Infiltração	Poço de infiltração	12	57,64	1,5	1,77	24,349	0,0027	42,1344	1,3942	0,4	49,34	432

SÍNTESE - DIMENSÕES

Medida compensatória	Profundidade - H (m)	Largura - B (m)	Comprimento - L (m)	Área em planta (m²)	Unidades alocadas	Área de infiltração (m²)	Tempo de esvaziamento (h)
Reservatório de lote	2,137	2	3	6	2	-	3,48
Jardim de chuva	0,525	1	27	27	2	27	10,65
Vala de infiltração (vala gramada)	0,525	1	27	27	2	27	10,65
Pavimento poroso de bloco modular (concreto permeável)	0,284	-	-	188	1	188	2,31
Trincheira de infiltração	0,206	1	27	27	2	32,766	1,38

Medida compensatória	Profundidade - H (m)	Diâmetro - D (m)	Área em planta (m²)	Unidades alocadas	Área de infiltração	Tempo de esvaziamento
Poço de infiltração	0,432	1,5	1,77	12	2,786	2,22

Figura A.2 – Planilha de Excel para automatização dos cálculos, parte 2 (Dimensionamento)

Medida compensatória	Custos				Vida útil (anos)
	Custo de implantação		Custo de operação e manutenção por ano		
	Valor	Unidade	Valor	Unidade	
Reservatório de lote	378,39	R$/m³	15,22	R$/m³	30
Jardim de chuva	331,61	R$/m²	4,17	R$/m²	20
Vala de infiltração (vala gramada)	157,88	R$/m	31,06	R$/m	15
Pavimento poroso de bloco modular (concreto permeável)	78,96	R$/m²	4,31	R$/m²	15
Trincheira de infiltração	159,11	R$/m	47,89	R$/m	10
Poço de infiltração	347,93	R$/m³	36,83	R$/unidade	15

Medida compensatória	Quantidade	Unidade	Custo total (R$)
Reservatório de lote	25,640	m³	21408,9735
Jardim de chuva	54	m²	22410,54
Vala de infiltração (vala gramada)	54	m	33684,12
Pavimento poroso de bloco modular (concreto permeável)	188	m²	26998,68
Trincheira de infiltração	54	m	34452,54
Poço de infiltração	9,165	m³	9818,328906
	12	unidades	

Medida compensatória	Porcentagem de redução média dos poluentes do escoamento superficial [6]					
	TSS	TP	TN	TZ	TPb	DBO
Reservatório de lote*	80,5	39,5	40	35,5	52	34,5
Jardim de chuva**	40	20	15	20	0	0
Vala de infiltração (vala gramada)	40	20	15	20	0	0
Pavimento poroso de bloco modular (concreto permeável)	87,5	65	80	98	80	80
Trincheira de infiltração***	52	48,5	-22,5	54	70	70
Poço de infiltração***	52	48,5	-22,5	54	70	70

Observações

1. Os valores que estão como zero (0) na verdade não foram avaliados; por isso estes parâmetros tem peso menor no indicador;
2. *Por falta de dados, os valores usados para o reservatório foram os mesmos de uma bacia de detenção;
3. **Por falta de dados, os valores usados para o jardim de chuva foram os mesmos da vala gramada, desconsiderando assim o efeito das plantas na redução de poluentes;
4. ***Por falta de dados, os valores usados para a trincheira e para o poço de infiltração foram os mesmos do tipo "plano de infiltração de areia de detenção"; para essa aproximação ser utilizada, será sugerido o uso de geotêxtil para melhorar a filtração.

Medida compensatória	Escores [6]					
	TSS	TP	TN	TZ	TPb	DBO
Reservatório de lote*	10	6	8	4	2	4
Jardim de chuva**	2	2	4	2	0	0
Vala de infiltração (vala gramada)	2	2	4	2	0	0
Pavimento poroso de bloco modular (concreto permeável)	10	10	10	10	10	10
Trincheira de infiltração***	4	8	2	6	6	10
Poço de infiltração***	4	8	2	6	6	10

Medida compensatória	Ind. Amb.
Reservatório de lote	6,7
Jardim de chuva	2,2
Vala de infiltração (vala gramada)	2,2
Pavimento poroso de bloco modular (concreto permeável)	10
Trincheira de infiltração	5,4
Poço de infiltração	5,4

Figura A.3 – Planilha de Excel para automatização dos cálculos, parte 3 (Econômico e ambiental)

Medidas compensatórias	Indicador físico	Indicador hidrológico	Indicador hidráulico 1	Indicador hidráulico 2	Indicador econômico	Indicador ambiental	Indicador social 1	Indicador social 2
A1 - Reservatório de lote	54,00	0,327957	0,5	0,287	0,00005	6,7	próxima planilha	
A2 - Jardim de chuva	12,00	1,000	1	0,094	0,00004	2,2		
A3 - Vala de infiltração (vala gramada)	12,00	1,000	1	0,094	0,00003	2,2		
A4 - Pavimento poroso de bloco modular (concreto	3,45	1	1	0,434	0,00004	10		
A5 - Trincheira de infiltração	12,00	1	1	0,727	0,00003	5,4		
A6 - Poço de infiltração	30,56	1	1	0,450	0,00010	5,4		

Para o indicador hidráulico 1	Tempo de retorno desejável
	10

Figura A.4 – Planilha de Excel para automatização dos cálculos, parte 4 (Indicadores – exceto social)

Escala subjetiva - contribuição estética
Como é a contribuição estética...?
Muito ruim (piora muito a aparência do ambiente)
Ruim (piora a aparência do ambiente)
Indiferente (nem piora nem melhora a aparência do ambiente)
Boa (melhora a aparência do ambiente)
Muito boa (melhora muito a aparência do ambiente)

Escala fundamental AHP (Saaty)	
Intensidade	Definição
1	Igual importância
3	Importância pequena de uma sobre a outra
5	Importância grande ou essencial
7	Importância muito grande ou demonstrada
9	Importância absoluta
2, 4, 6, 8	Valores intermediários
Recíproco dos números acima	Se a atividade i possui um dos números acima, quando comparada com a atividade j, a atividade j possuirá o valor inverso quando comparada a i.

Medida compensatória	Numeração planilha AHP	Nível de contribuição estética
Reservatório de lote	**A1**	Indiferente
Jardim de chuva	**A2**	Muito boa
Vala de infiltração (vala gramada)	**A3**	Ruim
Pavimento poroso de bloco modular (concreto permeável)	**A4**	Indiferente
Trincheira de infiltração	**A5**	Boa
Poço de infiltração	**A6**	Ruim

COMPARAÇÃO ALTERNATIVAS - I7	A1	A2	A3	A4	A5	A6
A1	**1**	1/5	3	1	1/3	3
A2	5	**1**	7	5	3	7
A3	1/3	1/7	**1**	1/3	1/5	1
A4	1	1/5	3	**1**	1/3	3
A5	3	1/3	5	3	**1**	5
A6	1/3	1/7	1	1/3	1/5	**1**

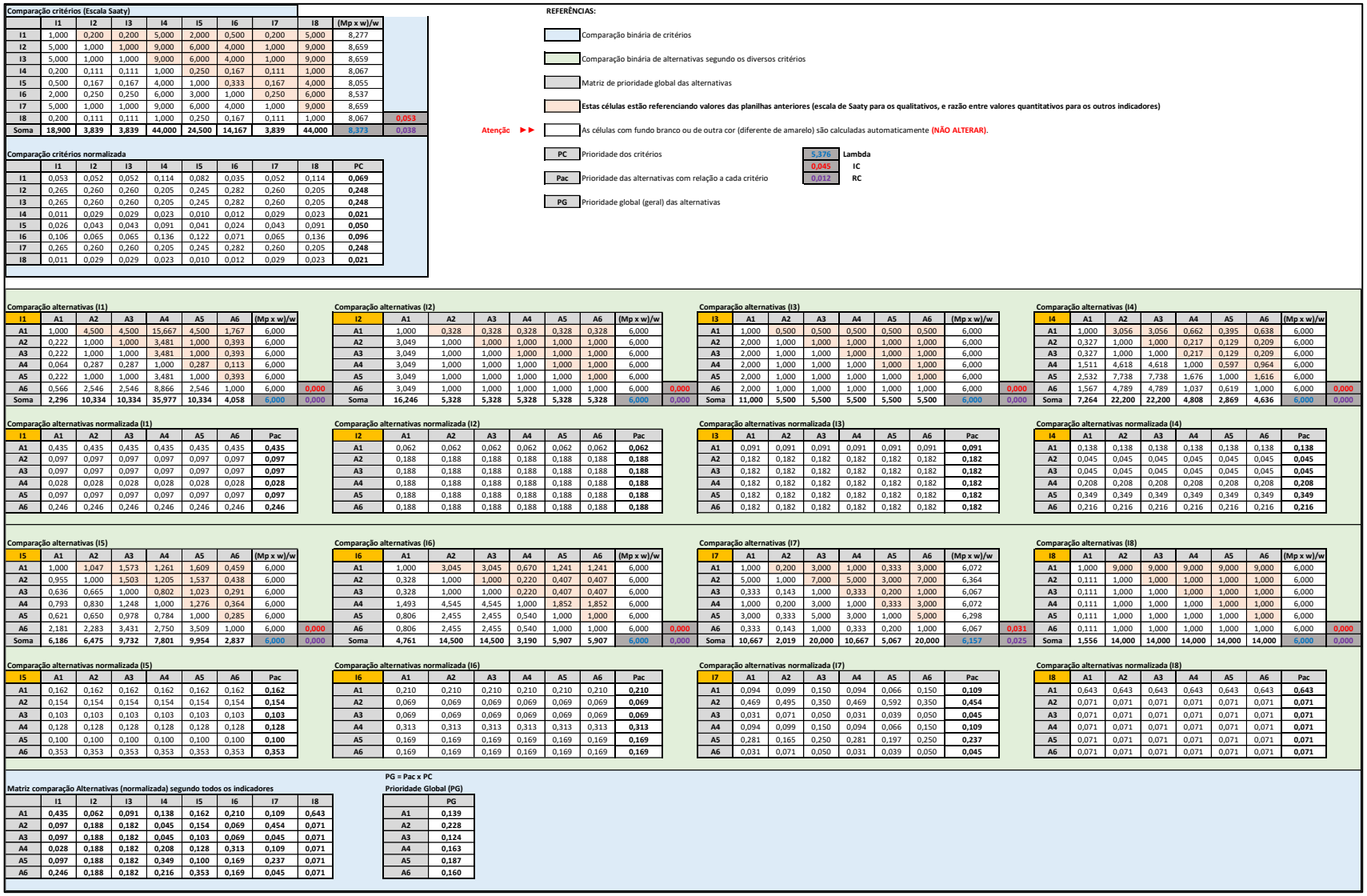
Medida compensatória	Numeração planilha AHP	Reuso de água?
Reservatório de lote	**A1**	Sim
Jardim de chuva	**A2**	Não
Vala de infiltração (vala gramada)	**A3**	Não
Pavimento poroso de bloco modular (concreto permeável)	**A4**	Não
Trincheira de infiltração	**A5**	Não
Poço de infiltração	**A6**	Não

COMPARAÇÃO ALTERNATIVAS - I8	A1	A2	A3	A4	A5	A6
A1	**1**	9	9	9	9	9
A2	1/9	**1**	1	1	1	1
A3	1/9	1	**1**	1	1	1
A4	1/9	1	1	**1**	1	1
A5	1/9	1	1	1	**1**	1
A6	1/9	1	1	1	1	**1**

Figura A.5 – Planilha de Excel para automatização dos cálculos, parte 5 (Indicadores – social)

	Indicador físico	Indicador hidrológico	Indicador hidráulico - TR	Indicador hidráulico - Tesv	Indicador econômico	Indicador ambiental	Indicador social - estética	Indicador social - reuso
Indicador físico	1	1/5	1/5	5	2	1/2	1/5	5
Indicador hidrológico	5	1	1	9	6	4	1	9
Indicador hidráulico - TR	5	1	1	9	6	4	1	9
Indicador hidráulico - Tesv	1/5	1/9	1/9	1	1/4	1/6	1/9	1
Indicador econômico	1/2	1/6	1/6	4	1	1/3	1/6	4
Indicador ambiental	2	1/4	1/4	6	3	1	1/4	6
Indicador social - estética	5	1	1	9	6	4	1	9
Indicador social - reuso	1/5	1/9	1/9	1	1/4	1/6	1/9	1

Figura A.6 – Planilha de Excel para automatização dos cálculos, parte 6 (Pesos)



Comparação critérios (Escala Saaty)

	I1	I2	I3	I4	I5	I6	I7	I8	(Mp x w)/w	
I1	1,000	0,200	0,200	5,000	2,000	0,500	0,200	5,000	8,277	
I2	5,000	1,000	1,000	9,000	6,000	4,000	1,000	9,000	8,659	
I3	5,000	1,000	1,000	9,000	6,000	4,000	1,000	9,000	8,659	
I4	0,200	0,111	0,111	1,000	0,250	0,167	0,111	1,000	8,067	
I5	0,500	0,167	0,167	4,000	1,000	0,333	0,167	4,000	8,055	
I6	2,000	0,250	0,250	6,000	3,000	1,000	0,250	6,000	8,537	
I7	5,000	1,000	1,000	9,000	6,000	4,000	1,000	9,000	8,659	
I8	0,200	0,111	0,111	1,000	0,250	0,167	0,111	1,000	8,067	0,053
Soma	**18,900**	**3,839**	**3,839**	**44,000**	**24,500**	**14,167**	**3,839**	**44,000**	8,373	0,038

Comparação critérios normalizada

	I1	I2	I3	I4	I5	I6	I7	I8	PC
I1	0,053	0,052	0,052	0,114	0,082	0,035	0,052	0,114	**0,069**
I2	0,265	0,260	0,260	0,205	0,245	0,282	0,260	0,205	**0,248**
I3	0,265	0,260	0,260	0,205	0,245	0,282	0,260	0,205	**0,248**
I4	0,011	0,029	0,029	0,023	0,010	0,012	0,029	0,023	**0,021**
I5	0,026	0,043	0,043	0,091	0,041	0,024	0,043	0,091	**0,050**
I6	0,106	0,065	0,065	0,136	0,122	0,071	0,065	0,136	**0,096**
I7	0,265	0,260	0,260	0,205	0,245	0,282	0,260	0,205	**0,248**
I8	0,011	0,029	0,029	0,023	0,010	0,012	0,029	0,023	**0,021**

REFERÊNCIAS:

- Comparação binária de critérios
- Comparação binária de alternativas segundo os diversos critérios
- Matriz de prioridade global das alternativas
- **Estas células estão referenciando valores das planilhas anteriores (escala de Saaty para os qualitativos, e razão entre valores quantitativos para os outros indicadores)**
- Atenção ►► As células com fundo branco ou de outra cor (diferente de amarelo) são calculadas automaticamente **(NÃO ALTERAR).**
- PC — Prioridade dos critérios
- Pac — Prioridade das alternativas com relação a cada critério
- PG — Prioridade global (geral) das alternativas

5,376	Lambda
0,045	IC
0,012	RC

Comparação alternativas (I1)

I1	A1	A2	A3	A4	A5	A6	(Mp x w)/w	
A1	1,000	4,500	4,500	15,667	4,500	1,767	6,000	
A2	0,222	1,000	1,000	3,481	1,000	0,393	6,000	
A3	0,222	1,000	1,000	3,481	1,000	0,393	6,000	
A4	0,064	0,287	0,287	1,000	0,287	0,113	6,000	
A5	0,222	1,000	1,000	3,481	1,000	0,393	6,000	
A6	0,566	2,546	2,546	8,866	2,546	1,000	6,000	0,000
Soma	**2,296**	**10,334**	**10,334**	**35,977**	**10,334**	**4,058**	6,000	0,000

Comparação alternativas (I2)

I2	A1	A2	A3	A4	A5	A6	(Mp x w)/w	
A1	1,000	0,328	0,328	0,328	0,328	0,328	6,000	
A2	3,049	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	6,000	
A3	3,049	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	6,000	
A4	3,049	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	6,000	
A5	3,049	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	6,000	
A6	3,049	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	6,000	0,000
Soma	**16,246**	**5,328**	**5,328**	**5,328**	**5,328**	**5,328**	6,000	0,000

Comparação alternativas (I3)

I3	A1	A2	A3	A4	A5	A6	(Mp x w)/w	
A1	1,000	0,500	0,500	0,500	0,500	0,500	6,000	
A2	2,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	6,000	
A3	2,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	6,000	
A4	2,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	6,000	
A5	2,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	6,000	
A6	2,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	6,000	0,000
Soma	**11,000**	**5,500**	**5,500**	**5,500**	**5,500**	**5,500**	6,000	0,000

Comparação alternativas (I4)

I4	A1	A2	A3	A4	A5	A6	(Mp x w)/w	
A1	1,000	3,056	3,056	0,662	0,395	0,638	6,000	
A2	0,327	1,000	1,000	0,217	0,129	0,209	6,000	
A3	0,327	1,000	1,000	0,217	0,129	0,209	6,000	
A4	1,511	4,618	4,618	1,000	0,597	0,964	6,000	
A5	2,532	7,738	7,738	1,676	1,000	1,616	6,000	
A6	1,567	4,789	4,789	1,037	0,619	1,000	6,000	0,000
Soma	**7,264**	**22,200**	**22,200**	**4,808**	**2,869**	**4,636**	6,000	0,000

Comparação alternativas normalizada (I1)

I1	A1	A2	A3	A4	A5	A6	Pac
A1	0,435	0,435	0,435	0,435	0,435	0,435	**0,435**
A2	0,097	0,097	0,097	0,097	0,097	0,097	**0,097**
A3	0,097	0,097	0,097	0,097	0,097	0,097	**0,097**
A4	0,028	0,028	0,028	0,028	0,028	0,028	**0,028**
A5	0,097	0,097	0,097	0,097	0,097	0,097	**0,097**
A6	0,246	0,246	0,246	0,246	0,246	0,246	**0,246**

Comparação alternativas normalizada (I2)

I2	A1	A2	A3	A4	A5	A6	Pac
A1	0,062	0,062	0,062	0,062	0,062	0,062	**0,062**
A2	0,188	0,188	0,188	0,188	0,188	0,188	**0,188**
A3	0,188	0,188	0,188	0,188	0,188	0,188	**0,188**
A4	0,188	0,188	0,188	0,188	0,188	0,188	**0,188**
A5	0,188	0,188	0,188	0,188	0,188	0,188	**0,188**
A6	0,188	0,188	0,188	0,188	0,188	0,188	**0,188**

Comparação alternativas normalizada (I3)

I3	A1	A2	A3	A4	A5	A6	Pac
A1	0,091	0,091	0,091	0,091	0,091	0,091	**0,091**
A2	0,182	0,182	0,182	0,182	0,182	0,182	**0,182**
A3	0,182	0,182	0,182	0,182	0,182	0,182	**0,182**
A4	0,182	0,182	0,182	0,182	0,182	0,182	**0,182**
A5	0,182	0,182	0,182	0,182	0,182	0,182	**0,182**
A6	0,182	0,182	0,182	0,182	0,182	0,182	**0,182**

Comparação alternativas normalizada (I4)

I4	A1	A2	A3	A4	A5	A6	Pac
A1	0,138	0,138	0,138	0,138	0,138	0,138	**0,138**
A2	0,045	0,045	0,045	0,045	0,045	0,045	**0,045**
A3	0,045	0,045	0,045	0,045	0,045	0,045	**0,045**
A4	0,208	0,208	0,208	0,208	0,208	0,208	**0,208**
A5	0,349	0,349	0,349	0,349	0,349	0,349	**0,349**
A6	0,216	0,216	0,216	0,216	0,216	0,216	**0,216**

Comparação alternativas (I5)

I5	A1	A2	A3	A4	A5	A6	(Mp x w)/w	
A1	1,000	1,047	1,573	1,261	1,609	0,459	6,000	
A2	0,955	1,000	1,503	1,205	1,537	0,438	6,000	
A3	0,636	0,665	1,000	0,802	1,023	0,291	6,000	
A4	0,793	0,830	1,248	1,000	1,276	0,364	6,000	
A5	0,621	0,650	0,978	0,784	1,000	0,285	6,000	
A6	2,181	2,283	3,431	2,750	3,509	1,000	6,000	0,000
Soma	**6,186**	**6,475**	**9,732**	**7,801**	**9,954**	**2,837**	6,000	0,000

Comparação alternativas (I6)

I6	A1	A2	A3	A4	A5	A6	(Mp x w)/w	
A1	1,000	3,045	3,045	0,670	1,241	1,241	6,000	
A2	0,328	1,000	1,000	0,220	0,407	0,407	6,000	
A3	0,328	1,000	1,000	0,220	0,407	0,407	6,000	
A4	1,493	4,545	4,545	1,000	1,852	1,852	6,000	
A5	0,806	2,455	2,455	0,540	1,000	1,000	6,000	
A6	0,806	2,455	2,455	0,540	1,000	1,000	6,000	0,000
Soma	**4,761**	**14,500**	**14,500**	**3,190**	**5,907**	**5,907**	6,000	0,000

Comparação alternativas (I7)

I7	A1	A2	A3	A4	A5	A6	(Mp x w)/w	
A1	1,000	0,200	3,000	1,000	0,333	3,000	6,072	
A2	5,000	1,000	7,000	5,000	3,000	7,000	6,364	
A3	0,333	0,143	1,000	0,333	0,200	1,000	6,067	
A4	1,000	0,200	3,000	1,000	0,333	3,000	6,072	
A5	3,000	0,333	5,000	3,000	1,000	5,000	6,298	
A6	0,333	0,143	1,000	0,333	0,200	1,000	6,067	0,031
Soma	**10,667**	**2,019**	**20,000**	**10,667**	**5,067**	**20,000**	6,157	0,025

Comparação alternativas (I8)

I8	A1	A2	A3	A4	A5	A6	(Mp x w)/w	
A1	1,000	9,000	9,000	9,000	9,000	9,000	6,000	
A2	0,111	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	6,000	
A3	0,111	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	6,000	
A4	0,111	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	6,000	
A5	0,111	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	6,000	
A6	0,111	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	6,000	0,000
Soma	**1,556**	**14,000**	**14,000**	**14,000**	**14,000**	**14,000**	6,000	0,000

Comparação alternativas normalizada (I5)

I5	A1	A2	A3	A4	A5	A6	Pac
A1	0,162	0,162	0,162	0,162	0,162	0,162	**0,162**
A2	0,154	0,154	0,154	0,154	0,154	0,154	**0,154**
A3	0,103	0,103	0,103	0,103	0,103	0,103	**0,103**
A4	0,128	0,128	0,128	0,128	0,128	0,128	**0,128**
A5	0,100	0,100	0,100	0,100	0,100	0,100	**0,100**
A6	0,353	0,353	0,353	0,353	0,353	0,353	**0,353**

Comparação alternativas normalizada (I6)

I6	A1	A2	A3	A4	A5	A6	Pac
A1	0,210	0,210	0,210	0,210	0,210	0,210	**0,210**
A2	0,069	0,069	0,069	0,069	0,069	0,069	**0,069**
A3	0,069	0,069	0,069	0,069	0,069	0,069	**0,069**
A4	0,313	0,313	0,313	0,313	0,313	0,313	**0,313**
A5	0,169	0,169	0,169	0,169	0,169	0,169	**0,169**
A6	0,169	0,169	0,169	0,169	0,169	0,169	**0,169**

Comparação alternativas normalizada (I7)

I7	A1	A2	A3	A4	A5	A6	Pac
A1	0,094	0,099	0,150	0,094	0,066	0,150	**0,109**
A2	0,469	0,495	0,350	0,469	0,592	0,350	**0,454**
A3	0,031	0,071	0,050	0,031	0,039	0,050	**0,045**
A4	0,094	0,099	0,150	0,094	0,066	0,150	**0,109**
A5	0,281	0,165	0,250	0,281	0,197	0,250	**0,237**
A6	0,031	0,071	0,050	0,031	0,039	0,050	**0,045**

Comparação alternativas normalizada (I8)

I8	A1	A2	A3	A4	A5	A6	Pac
A1	0,643	0,643	0,643	0,643	0,643	0,643	**0,643**
A2	0,071	0,071	0,071	0,071	0,071	0,071	**0,071**
A3	0,071	0,071	0,071	0,071	0,071	0,071	**0,071**
A4	0,071	0,071	0,071	0,071	0,071	0,071	**0,071**
A5	0,071	0,071	0,071	0,071	0,071	0,071	**0,071**
A6	0,071	0,071	0,071	0,071	0,071	0,071	**0,071**

Matriz comparação Alternativas (normalizada) segundo todos os indicadores

	I1	I2	I3	I4	I5	I6	I7	I8
A1	**0,435**	**0,062**	**0,091**	**0,138**	**0,162**	**0,210**	**0,109**	**0,643**
A2	**0,097**	**0,188**	**0,182**	**0,045**	**0,154**	**0,069**	**0,454**	**0,071**
A3	**0,097**	**0,188**	**0,182**	**0,045**	**0,103**	**0,069**	**0,045**	**0,071**
A4	**0,028**	**0,188**	**0,182**	**0,208**	**0,128**	**0,313**	**0,109**	**0,071**
A5	**0,097**	**0,188**	**0,182**	**0,349**	**0,100**	**0,169**	**0,237**	**0,071**
A6	**0,246**	**0,188**	**0,182**	**0,216**	**0,353**	**0,169**	**0,045**	**0,071**

PG = Pac x PC

Prioridade Global (PG)

	PG
A1	**0,139**
A2	**0,228**
A3	**0,124**
A4	**0,163**
A5	**0,187**
A6	**0,160**

Figura A.7 – Planilha de Excel para automatização dos cálculos, parte 7 (Modelo - AHP)

RESULTADO - % PREFERÊNCIA	
A1 - Reservatório de lote	**13,9%**
A2 - Jardim de chuva	**22,8%**
A3 - Vala de infiltração (vala gramada)	**12,4%**
A4 - Pavimento poroso de bloco modular (concreto permeável)	**16,3%**
A5 - Trincheira de infiltração	**18,7%**
A6 - Poço de infiltração	**16,0%**

Figura A.8 – Planilha de Excel para automatização dos cálculos, parte 8 (Resultado)