



TELHADOS VERDES COMO TÉCNICA COMPENSATÓRIA EM DRENAGEM  
URBANA NA CIDADE DO RIO DE JANEIRO: ESTUDO EXPERIMENTAL E  
AVALIAÇÃO DE SUA ADOÇÃO NA BACIA DO RIO JOANA A PARTIR DO USO  
DE MODELAGEM MATEMÁTICA

Pedro de Souza Garrido Neto

Dissertação de Mestrado apresentada ao  
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil,  
COPPE, da Universidade Federal do Rio de  
Janeiro, como parte dos requisitos necessários à  
obtenção do título de Mestre em Engenharia  
Civil.

Orientadores: Marcelo Gomes Miguez  
Elaine Garrido Vazquez

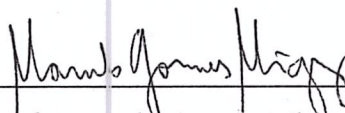
Rio de Janeiro  
Dezembro de 2016

TELHADOS VERDES COMO TÉCNICA COMPENSATÓRIA EM DRENAGEM  
URBANA NA CIDADE DO RIO DE JANEIRO: ESTUDO EXPERIMENTAL E  
AVALIAÇÃO DE SUA ADOÇÃO NA BACIA DO RIO JOANA A PARTIR DO USO  
DE MODELAGEM MATEMÁTICA

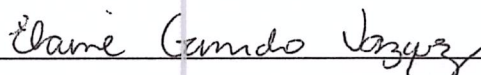
Pedro de Souza Garrido Neto

DISSERTAÇÃO SUBMETIDA AO CORPO DOCENTE DO INSTITUTO ALBERTO  
LUIZ COIMBRA DE PÓS-GRADUAÇÃO E PESQUISA DE ENGENHARIA  
(COPPE) DA UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO COMO PARTE  
DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE  
EM CIÊNCIAS EM ENGENHARIA CIVIL.

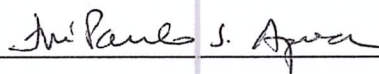
Examinada por:



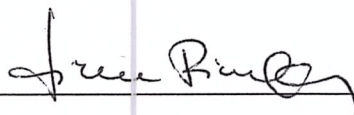
Prof. Marcelo Gomes Miguez, D.Sc.



Prof. Elaine Garrido Vazquez, D.Sc.



Prof. José Paulo Soares de Azevedo, Ph. D.



Prof. Luciene Pimentel da Silva, Ph.D.

RIO DE JANEIRO, RJ – BRASIL

DEZEMBRO DE 2016

Garrido Neto, Pedro de Souza

Telhados verdes como técnica compensatória em drenagem urbana na cidade do Rio de Janeiro: Estudo experimental e avaliação de sua adoção na bacia do rio Joana a partir do uso de modelagem matemática / Pedro de Souza Garrido Neto – Rio de Janeiro: UFRJ / COPPE, 2016.

XXIII, 344 p.: il.; 29,7 cm.

Orientadores: Marcelo Gomes Miguez

Elaine Garrido Vazquez

Dissertação (mestrado) – UFRJ / COPPE / Programa de Engenharia Civil, 2016.

Referências Bibliográficas: p. 225-260.

1. Telhados verdes. 2. Drenagem urbana sustentável. I. Miguez, Marcelo Gomes. *et al.* II. Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE, Programa de Engenharia Civil. III. Título.

À Jéssica, minha futura esposa.  
À minha mãe, ao meu irmão e minha avó.  
Ao meu pai (em memória).  
Ao meu afilhado Miguel.

## AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar, à minha mãe, que fez de tudo para que eu só tivesse os estudos como preocupação por grande parte da minha vida.

Ao meu pai, que, embora não esteja mais comigo, estaria vibrando pela confecção deste produto, mesmo não entendendo sobre do que se trata.

Ao meu irmão, que dividiu comigo a responsabilidade de cuidar de nosso pai. Sem sua ajuda nessa época difícil, eu não chegaria até aqui.

À minha querida avó, Neusa, com quem eu tive o prazer de conviver durante alguns anos e que sempre me escutou e ajudou.

À minha namorada, Jéssica, a melhor mulher que eu poderia ter conhecido nessa vida. Obrigado por toda a paciência em meus momentos difíceis, por sempre me lembrar de minha capacidade e por estar sempre ao meu lado, me motivando, ao longo dessa empreitada.

Ao meu afilhado, Miguel, o melhor presente que eu tive da vida, e que me faz querer ser um profissional que ele tenha orgulho e venha a se espelhar. E, claro, aos meus amigos, Antônio e Mara, que me deram este presente e que sempre acompanharam minha trajetória acadêmica.

Aos meus tios, Paulo e Fátima, que investiram muito em minha educação, tanto pessoal quanto profissional. Mesmo estando agora afastados, sou eternamente grato por todo companheirismo e apoio.

Aos meus brilhantes orientadores, Marcelo Miguez e Elaine Vazquez, que sempre me deram, de forma rápida, respostas e sugestões aos meus questionamentos, que me conduziram de modo impecável nesta pesquisa, que contribuíram muito para este trabalho e que, de fato, exercem com êxito e louvor seus papéis de orientadores. Agradeço por todo apoio e por não desistirem de mim em nenhum momento. Eu não poderia ter escolhido melhor.

À Camila, minha grande amiga, que sempre me socorre, tanto na área acadêmica, quanto na profissional e pessoal. Não tenho nem palavras para agradecer todos os conselhos e conversas que tivemos em todas as mesas de bares pelas quais já passamos.

À Meggie, pelo companheirismo de sempre.

Aos amigos que fiz no Instituto Estadual do Ambiente (Inea), Gisa, Cáren, Daniel, Luana, Marlon, Tatiane, Cintia, Claudia, Nizara, Marcelo e Thiago que sempre me disseram para não desistir dessa pesquisa e que sempre estavam disponíveis para

conversar e me ajudar. Aos profissionais que eu sempre considerarei como “meus Chefes”, por toda orientação e motivação, desde 2013, no Inea: Giselle Menezes, Magaly Vieira e Mauro Medeiros (vocês me inspiram!).

À toda equipe do Serviço de Hidrologia e Hidráulica – SEHID, pelo apoio.

À Escola Politécnica e à COPPE da UFRJ, por todas as oportunidades.

Aos colegas que fiz nessa jornada no Programa de Engenharia Civil da COPPE, Daniele, Dearley, Francis e Luciana.

Aos Professores da Escola Politécnica da UFRJ, Heloisa Firmo, Theophilo Filho, Isaac Volschan, Iene Figueiredo, Paulo Renato e Gilberto Fialho, que eu tive o prazer de conviver e que são os responsáveis pela minha formação como engenheiro civil, na área de recursos hídricos, que sou completamente apaixonado.

Aos Professores da COPPE/UFRJ, José Paulo, Otto Rotunno, Paulo Canedo, Paulo Carneiro, Renato Elias e Geraldo Wilson, por todos os ensinamentos.

Em especial, aos Professores do Laboratório de Traçadores da COPPE (LT/COPPE), Roldão e Otávio, e ao Amauri, que abriram as portas do laboratório para minha pesquisa.

Ao Paulinho e ao Marcelo, que dão o sangue pelo Centro Experimental de Saneamento Ambiental (CESA/UFRJ). Sem eles, com toda certeza, não haveria este trabalho.

À professora Luciene Pimentel (UERJ) que muito me ajudou no início desta pesquisa, prestando orientações e sugestões para este trabalho.

À professora Fernanda Reinert (CCS/UFRJ) que eu tive o prazer em conhecer e que, com sua didática, faz qualquer um se apaixonar por Botânica.

À equipe de pesquisa sobre telhados verdes que trabalhou comigo no CESA/UFRJ, faça chuva ou faça sol: Manon, Fernando, Wiliam, Marcelo, Marcele, Luiz Felipe, Will, Bernard e Victor. Vocês foram sensacionais!

À minha psiquiatra, Denise, e às minhas psicólogas, Patrícia e Marina, por terem me dado todo suporte necessário para enfrentar, de maneira saudável, este desafio.

Ao Netflix, que me proporcionou distrações nos momentos de tensão, e ao ar condicionado, que muito me esfriou durante as horas que passei sentado em frente ao computador

*“Se você quiser ser bem-sucedido, duplique sua taxa de  
fracassos”  
(Thomas Watson)*

Resumo da Dissertação apresentada à COPPE/UFRJ como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Mestre em Ciências (M.Sc.).

TELHADOS VERDES COMO TÉCNICA COMPENSATÓRIA EM DRENAGEM URBANA  
NA CIDADE DO RIO DE JANEIRO: ESTUDO EXPERIMENTAL E AVALIAÇÃO DE SUA  
ADOÇÃO NA BACIA DO RIO JOANA A PARTIR DO USO DE MODELAGEM  
MATEMÁTICA

Pedro de Souza Garrido Neto

Dezembro / 2016

Orientadores: Marcelo Gomes Miguez

Elaine Garrido Vazquez

Programa: Engenharia Civil

Telhados verdes são uma opção de técnica compensatória em drenagem urbana, voltada para as tendências atuais de desenvolvimento sustentável, com potencial de reter parte do volume das águas precipitadas e atrasar e diminuir vazões de pico que seriam lançadas nas redes pluviais. As coberturas verdes atuam na recuperação de parte dos processos hidrológicos que foram reduzidos significativamente, ou mesmo perdidos, com a impermeabilização dos espaços no processo de urbanização, tais como a interceptação vegetal, a infiltração e a retenção superficial. Este trabalho apresenta um estudo experimental, que buscou compreender e interpretar o funcionamento de um protótipo de cobertura verde, construído em bancada experimental, exposto à ação de chuvas induzidas. O principal resultado obtido refere-se à determinação do coeficiente de escoamento superficial neste protótipo. Os ensaios experimentais apontaram uma redução para um valor de 65% da vazão de pico produzida por telhados, em eventos de chuva intensa. Efeitos de interceptação vegetal e retenção na camada drenante de argila expansiva utilizada no experimento foram os responsáveis por essa redução. O amortecimento não foi efetivo, em função do longo tempo de duração da chuva, compatível com a escala da bacia. Posteriormente, um estudo de caso avaliou o impacto da adoção desta tecnologia, em uma bacia hidrográfica urbanizada, especificamente na bacia do Rio Joana, situada na zona norte do município do Rio de Janeiro. Percebeu-se uma pequena melhora no quadro geral, mas que não reverte os graves problemas da bacia estudada, mostrando a necessidade de medidas diversas combinadas para o adequado controle de inundações.

Abstract of Dissertation presented to COPPE/UFRJ as a partial fulfillment of the requirements for the degree of Master of Science (M.Sc.).

GREEN ROOFS AS A COMPENSATORY TECHNIQUE FOR URBAN DRAINAGE IN THE  
CITY OF RIO DE JANEIRO: EXPERIMENTAL STUDY AND EVALUATION OF ITS  
APPLICATION IN THE JOANA RIVER BASIN USING MATHEMATICAL MODELLING

Pedro de Souza Garrido Neto

December / 2016

Advisors: Marcelo Gomes Miguez

Elaine Garrido Vazquez

Department: Civil Engineering

Green roofs may be considered as a compensatory technique in urban drainage. They are related to current sustainable development trends, due to its potential to retain part of the rainwater volume and to delay and reduce peak flows that would be released into urban stormdrains. Green roofs act recovering part of the water cycle processes that have been significantly reduced, or completely lost, due to the urbanization process, such as vegetation interception, infiltration and surface retention. This work presents an experimental study, which sought to understand and describe the behavior of a green roof prototype, exposed to the action of induced rainfalls. The main result obtained refers to the prototype's ability in reducing the runoff generation. The experiments showed a peak flow reduction to 65% of the original flow produced by roofs under intense rainfall. The vegetation interception and the retention promoted by expansive clay in the draining layer were the main factors leading to this result. The damping effect was not effective given the long duration of the rainfall, compatible with the basin scale. In the sequence, a case study evaluated the impact of using such technology on the scale of an urbanized watershed, specifically that of Joana River basin, located in the north zone of Rio de Janeiro City. There was a slight improvement in the overall situation, although it did not reverse the serious flooding problems, showing that other combined measures should be used to properly control floods in this basin.

## ÍNDICE

|          |                                                                                                        |           |
|----------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| <b>1</b> | <b>INTRODUÇÃO</b>                                                                                      | <b>1</b>  |
| 1.1      | Contexto                                                                                               | 1         |
| 1.2      | Base teórica                                                                                           | 10        |
| 1.2.1    | Uma breve relação entre os temas                                                                       | 10        |
| 1.2.2    | Urbanização, crescimento das cidades e sustentabilidade                                                | 11        |
| 1.2.3    | Drenagem urbana sustentável                                                                            | 18        |
| 1.2.4    | Telhados verdes                                                                                        | 20        |
| 1.2.5    | Sustentabilidade na construção civil                                                                   | 22        |
| 1.2.6    | Modelo matemático como apoio ao estudo                                                                 | 24        |
| 1.3      | Motivação, escolha e relevância                                                                        | 25        |
| 1.4      | Objetivos                                                                                              | 27        |
| 1.4.1    | Objetivo geral                                                                                         | 27        |
| 1.4.2    | Objetivos específicos                                                                                  | 28        |
| 1.5      | Metodologia resumida                                                                                   | 28        |
| 1.6      | A bancada experimental e o protótipo de cobertura verde onde serão realizados os ensaios experimentais | 30        |
| 1.7      | Estudo de caso: A bacia do rio Joana                                                                   | 33        |
| 1.8      | Contribuição da pesquisa                                                                               | 38        |
| 1.9      | Estruturação da dissertação                                                                            | 39        |
| <b>2</b> | <b>DRENAGEM URBANA</b>                                                                                 | <b>41</b> |
| 2.1      | Introdução                                                                                             | 41        |
| 2.2      | Aspectos históricos da drenagem urbana                                                                 | 45        |
| 2.2.1    | No mundo                                                                                               | 46        |
| 2.2.2    | No Brasil                                                                                              | 58        |
| 2.3      | O ciclo hidrológico e as cheias urbanas                                                                | 64        |
| 2.3.1    | Ciclo hidrológico: condições naturais e alterações devido à urbanização                                | 64        |
| 2.3.2    | As cheias urbanas                                                                                      | 68        |
| 2.4      | A abordagem sustentável para a drenagem urbana                                                         | 71        |
| <b>3</b> | <b>COBERTURAS VERDES</b>                                                                               | <b>84</b> |
| 3.1      | Introdução                                                                                             | 84        |
| 3.2      | Aspectos históricos                                                                                    | 86        |
| 3.2.1    | No mundo                                                                                               | 86        |

|            |                                                                                                       |            |
|------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------|
| 3.2.2      | No Brasil.....                                                                                        | 100        |
| <b>3.3</b> | <b>Os sistemas de naturação .....</b>                                                                 | <b>105</b> |
| 3.3.1      | Sistema Completo.....                                                                                 | 106        |
| 3.3.1.1    | Estrutura de suporte .....                                                                            | 107        |
| 3.3.1.2    | Camada de impermeabilização .....                                                                     | 107        |
| 3.3.1.3    | Camada de drenagem.....                                                                               | 107        |
| 3.3.1.4    | Camada separadora filtrante de proteção .....                                                         | 108        |
| 3.3.1.5    | Substrato de suporte de vida vegetal.....                                                             | 108        |
| 3.3.1.6    | Vegetação.....                                                                                        | 109        |
| 3.3.2      | Sistema Modular.....                                                                                  | 109        |
| 3.3.3      | Sistema Manta Vegetativa Pré-Cultivada.....                                                           | 111        |
| <b>3.4</b> | <b>Classificação das coberturas verdes .....</b>                                                      | <b>111</b> |
| <b>3.5</b> | <b>Vantagens e desvantagens da naturação em coberturas .....</b>                                      | <b>113</b> |
| <b>3.6</b> | <b>Aspectos a serem observados na concepção e construção de coberturas verdes .....</b>               | <b>117</b> |
| <b>3.7</b> | <b>A qualidade da água drenada por telhados verdes.....</b>                                           | <b>119</b> |
| <b>3.8</b> | <b>Telhados verdes como técnica compensatória em drenagem urbana .....</b>                            | <b>121</b> |
| 3.8.1      | A influência da intensidade de chuva .....                                                            | 123        |
| 3.8.2      | A influência do clima local.....                                                                      | 123        |
| 3.8.3      | A influência da declividade do telhado verde .....                                                    | 123        |
| 3.8.4      | A influência do substrato .....                                                                       | 124        |
| 3.8.5      | A influência da vegetação.....                                                                        | 125        |
| 3.8.6      | Relações chuva-vazão em telhados verdes.....                                                          | 126        |
| <b>4</b>   | <b>ENSAIOS EXPERIMENTAIS EM PROTÓTIPO DE TELHADO VERDE .....</b>                                      | <b>131</b> |
| <b>4.1</b> | <b>Concepção do protótipo de telhado verde .....</b>                                                  | <b>131</b> |
| <b>4.2</b> | <b>Bromélias compoendo a camada vegetal do protótipo de telhado verde..</b>                           | <b>134</b> |
| <b>4.3</b> | <b>A construção do protótipo de telhado verde .....</b>                                               | <b>139</b> |
| <b>4.4</b> | <b>Metodologia dos ensaios experimentais .....</b>                                                    | <b>148</b> |
| 4.4.1      | Calibração da intensidade de chuva produzida pelo Simulador de Chuvas 152                             |            |
| 4.4.2      | Caracterização da condição inicial de umidade do substrato .....                                      | 156        |
| 4.4.3      | Medições na Caixa Pluviômetra .....                                                                   | 162        |
| <b>4.5</b> | <b>Metodologia para caracterizar matematicamente o comportamento do módulo de telhado verde .....</b> | <b>166</b> |

|            |                                                                                                                                                |            |
|------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------|
| 4.5.1      | Descrição física do processo.....                                                                                                              | 166        |
| 4.5.2      | Princípios para a modelação matemática do comportamento do protótipo de cobertura verde.....                                                   | 167        |
| 4.5.2.1    | O Princípio de Conservação da Massa .....                                                                                                      | 169        |
| 4.5.2.2    | Relação Cota-Volume no protótipo .....                                                                                                         | 170        |
| 4.5.2.3    | Representação hidráulica do escoamento na saída da camada de drenagem .....                                                                    | 171        |
| 4.5.2.4    | Hidrograma de saída estimado a partir de cálculos do Balanço Hídrico                                                                           | 174        |
| 4.5.3      | Determinação do coeficiente de escoamento (runoff) do protótipo de telhado verde ( $C_{TV}$ ) .....                                            | 176        |
| 4.5.3.1    | Cálculo do volume total precipitado .....                                                                                                      | 176        |
| 4.5.3.2    | Cálculo do volume de água direcionado para a Caixa Pluviômetro ...                                                                             | 177        |
| 4.5.3.3    | Cálculo do volume de água obtido a partir do hidrograma calculado                                                                              | 178        |
| 4.5.3.4    | Cálculo da vazão máxima (constante) afluyente ao sistema.....                                                                                  | 179        |
| 4.5.3.5    | Cálculo da vazão máxima de saída do protótipo medida na CP .....                                                                               | 179        |
| 4.5.3.6    | Cálculo da vazão máxima de saída do protótipo calculada .....                                                                                  | 180        |
| 4.5.3.7    | Coeficiente de escoamento ( <i>runoff</i> ) do módulo de cobertura verde...                                                                    | 180        |
| 4.5.4      | Ajustes na modelação matemática do comportamento do protótipo de cobertura verde considerando os resultados experimentais obtidos.....         | 181        |
| 4.5.4.1    | Consideração de interceptação vegetal na metodologia apresentada até o momento a partir da análise dos $C_{TV}$ obtidos experimentalmente..... | 181        |
| 4.5.4.2    | Consideração da absorção de água pela argila expandida da camada drenante na metodologia até então apresentada .....                           | 184        |
| 4.5.4.3    | Correção do valor do coeficiente de descarga $C_d$ .....                                                                                       | 187        |
| 4.5.4.4    | Hidrograma de saída estimado a partir dos ajustes realizados.....                                                                              | 188        |
| <b>5</b>   | <b>RESULTADOS DOS ENSAIOS EXPERIMENTAIS .....</b>                                                                                              | <b>190</b> |
| <b>5.1</b> | <b>Medições em campo .....</b>                                                                                                                 | <b>190</b> |
| 5.1.1      | Resultados obtidos.....                                                                                                                        | 190        |
| 5.1.2      | Discussão e comentários sobre os resultados .....                                                                                              | 191        |
| <b>5.2</b> | <b>Hidrogramas de resposta para o escoamento superficial gerado pelo módulo.....</b>                                                           | <b>192</b> |
| 5.2.1      | Resultados obtidos.....                                                                                                                        | 192        |
| 5.2.2      | Discussão e comentários sobre os resultados .....                                                                                              | 198        |
| <b>5.3</b> | <b>Coeficiente de escoamento superficial do protótipo de cobertura verde</b>                                                                   | <b>199</b> |

|       |                                                                                                                                          |            |
|-------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------|
| 5.3.1 | Resultados obtidos .....                                                                                                                 | 199        |
| 5.3.2 | Discussão e comentários sobre os resultados .....                                                                                        | 201        |
| 5.4   | Comentários gerais a respeito da campanha experimental e resultados obtidos .....                                                        | 203        |
| 6     | <b>ESTUDO DE CASO: APLICAÇÃO DE TELHADOS VERDES EM ESCALA DE BACIA, COM APOIO DE MODELO MATEMÁTICO, NA BACIA DO RIO JOANA - RJ .....</b> | <b>206</b> |
| 6.1   | Levantamento de dados e informações da bacia do rio Joana .....                                                                          | 206        |
| 6.2   | Chuvas de projeto consideradas .....                                                                                                     | 208        |
| 6.3   | Metodologia adotada .....                                                                                                                | 208        |
| 7     | <b>RESULTADOS DO ESTUDO DE CASO .....</b>                                                                                                | <b>213</b> |
| 7.1   | Mapas de inundação da bacia para os cenários considerados .....                                                                          | 213        |
| 7.2   | Discussão e comentários gerais sobre os resultados obtidos para a bacia .....                                                            | 216        |
| 8     | <b>CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES .....</b>                                                                                                  | <b>217</b> |
| 8.1   | Considerações gerais .....                                                                                                               | 217        |
| 8.2   | Considerações específicas .....                                                                                                          | 217        |
| 8.2.1 | Sobre a parte experimental .....                                                                                                         | 218        |
| 8.2.2 | Sobre a parte de modelagem matemática da bacia do rio Joana .....                                                                        | 220        |
| 8.3   | Contribuições .....                                                                                                                      | 221        |
| 8.4   | Recomendações e sugestões para pesquisas futuras .....                                                                                   | 221        |
| 8.4.1 | Sobre a parte experimental .....                                                                                                         | 221        |
| 8.4.2 | Sobre a parte de modelagem matemática .....                                                                                              | 223        |
|       | <b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>                                                                                                  | <b>225</b> |
|       | <b>REFERÊNCIAS ELETRÔNICAS .....</b>                                                                                                     | <b>261</b> |
|       | <b>APÊNDICE A – Histórico das atividades no protótipo de cobertura verde.....</b>                                                        | <b>263</b> |
|       | <b>APÊNDICE B – Folhas de campo dos ensaios experimentais .....</b>                                                                      | <b>266</b> |
|       | <b>ANEXO I – O Simulador de Água de Chuva.....</b>                                                                                       | <b>307</b> |
|       | <b>ANEXO II – A Caixa Pluviômetro (CP).....</b>                                                                                          | <b>311</b> |
|       | <b>ANEXO III – O Modelo de Células - MODCEL .....</b>                                                                                    | <b>314</b> |

## ÍNDICE DE FIGURAS

|                                                                                                                                                 |    |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Figura 1.1 – Localização dos rios em torno dos quais cresceram as quatro primeiras grandes civilizações.....                                    | 2  |
| Figura 1.2 – Império Romano, no século IV, em 395 d.C. ....                                                                                     | 3  |
| Figura 1.3 – As quatro principais vantagens ao optar-se pela adoção de sistemas de drenagem sustentáveis. ....                                  | 7  |
| Figura 1.4 – Exemplo de telhado verde: Hospital Humber River, em Toronto, Canadá. ....                                                          | 8  |
| Figura 1.5 – Taxas de crescimento médio anuais pelo mundo, com projeção até 2100.....                                                           | 12 |
| Figura 1.6 – A evolução desigual da urbanização ao redor do mundo, entre 1950 e 2014.....                                                       | 14 |
| Figura 1.7 – Evolução da população rural e urbana no mundo, período de 1950-2050.....                                                           | 15 |
| Figura 1.8 – Evolução da população rural e urbana no Brasil, período de 1950-2050. ....                                                         | 15 |
| Figura 1.9 – Esquema das composições típicas de uma cobertura verde. ....                                                                       | 20 |
| Figura 1.10 – Telhado verde composto por placas modulares (Sistema Modular da empresa Studio Cidade Jardim). ....                               | 21 |
| Figura 1.11 – Notícia publicada no <i>site</i> “Estadão”, em 23/02/2011. ....                                                                   | 25 |
| Figura 1.12 – Distribuição das pesquisas sobre telhados verdes pelo mundo.....                                                                  | 26 |
| Figura 1.13 – Notícias publicadas no <i>site</i> “O Globo”, em 2016. ....                                                                       | 26 |
| Figura 1.14 – Notícia publicada no <i>site</i> “O Globo”, em 22/01/2013. ....                                                                   | 27 |
| Figura 1.15 – Mapa com a localização do CESA/UFRJ. ....                                                                                         | 30 |
| Figura 1.16 – Localização do CESA/UFRJ na Ilha do Fundão, com indicação da Linha Amarela, um dos principais acessos à Cidade Universitária..... | 31 |
| Figura 1.17 – Localização da bancada experimental e do protótipo no CESA/UFRJ.....                                                              | 31 |
| Figura 1.18 – Bancada experimental, com a indicação dos módulos e equipamentos. ....                                                            | 32 |
| Figura 1.19 – Principais rios da bacia do canal do Manguê.....                                                                                  | 33 |
| Figura 1.20 – Praça da Bandeira (localização: 22°54’40”S / 43°12’53”O).....                                                                     | 34 |
| Figura 1.21 – Praça Niterói (localização: 22°54’57”S / 43°14’03”O).....                                                                         | 35 |
| Figura 1.22 – Praça Varnhagen (localização: 22°55’09”S / 43°14’04”O).....                                                                       | 35 |
| Figura 1.23 – Notícia publicada no <i>site</i> “O Globo”, em 10/04/2016. ....                                                                   | 35 |
| Figura 1.24 – Bacia do rio Joana (em vermelho) e os bairros que a mesma intercepta. ....                                                        | 36 |
| Figura 1.25 – Principais afluentes do rio Joana.....                                                                                            | 37 |
| Figura 1.26 – Bacia hidrográfica do rio Joana. ....                                                                                             | 38 |
| Figura 2.1 – Os povos da Mesopotâmia.....                                                                                                       | 47 |
| Figura 2.2 – Planta (no topo à esquerda), seção transversal (embaixo à esquerda) e fotografia (à direita) de um canal na Babilônia.....         | 47 |
| Figura 2.3 – A Grécia no século VIII a.C. ....                                                                                                  | 48 |

|                                                                                                                                |    |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Figura 2.4 – Condutos em Cnossos: em pedra (à esquerda) e em argila cozida (à direita).....                                    | 49 |
| Figura 2.5 – O “Grande Dreno”: vista aérea (à esquerda) e as paredes do dreno existentes até os dias de hoje (à direita).....  | 49 |
| Figura 2.6 – Civilizações do vale do rio Indo. ....                                                                            | 50 |
| Figura 2.7 – Rios Amarelo e Yangtzé, na China.....                                                                             | 51 |
| Figura 2.8 – Cloaca máxima Romana. ....                                                                                        | 52 |
| Figura 2.9 – Traçado da cloaca máxima.....                                                                                     | 53 |
| Figura 2.10 – Desenho esquemático do ciclo hidrológico. ....                                                                   | 64 |
| Figura 2.11 – Hidrogramas: pré e pós urbanização de uma bacia.....                                                             | 66 |
| Figura 2.12 – Efeito da urbanização na vazão de pico e no tempo de escoamento.....                                             | 67 |
| Figura 2.13 – Leito maior e menor de um rio. ....                                                                              | 68 |
| Figura 2.14 – Terminologias em drenagem urbana, de acordo com seu foco principal e especificidade.....                         | 74 |
| Figura 3.1 – Representação de um zigurarte na Antiga Cidade de Ur, na Babilônia.....                                           | 87 |
| Figura 3.2 – Torre de Babel, na visão do pintor flamengo Pieter Brueghel.....                                                  | 87 |
| Figura 3.3 – Representação artística dos Jardins Suspensos da Babilônia.....                                                   | 88 |
| Figura 3.4 – <i>Mont-Saint-Michel</i> , na França. ....                                                                        | 89 |
| Figura 3.5 – Foto do jardim do claustro da abadia de <i>Saint-Michel</i> , na França.....                                      | 89 |
| Figura 3.6 – Fotografia do <i>Palazzo Piccolomini</i> , em Pienza, Itália. ....                                                | 90 |
| Figura 3.7 – Fotografia da Torre de Guinigi com sete carvalhos, em Lucca, Itália.....                                          | 90 |
| Figura 3.8 – Ilustração da cidade asteca de <i>Tenochtitlán</i> .....                                                          | 91 |
| Figura 3.9 – Vista do Grande Palácio do Kremlin, a partir do outro lado do rio Moscou, que corta a capital russa. ....         | 91 |
| Figura 3.10 – Museu de Arte Hermitage, antigo palácio de inverno da Imperatriz Catarina II da Rússia, em Saint-Petersburg..... | 92 |
| Figura 3.11 – Fotos de <i>Villa Savoye</i> , na França, com vista para fachada e cobertura.....                                | 93 |
| Figura 3.12 – Foto do <i>Waldspirale</i> , em Darmstad, na Alemanha. ....                                                      | 94 |
| Figura 3.13 – Exemplo de telhado verde construído em 2001.....                                                                 | 96 |
| Figura 3.14 – Exemplo de telhado verde construído em 2002.....                                                                 | 96 |
| Figura 3.15 – Exemplo de telhado verde construído em 2003.....                                                                 | 96 |
| Figura 3.16 – Exemplo de telhado verde construído em 2004.....                                                                 | 96 |
| Figura 3.17 – Exemplo de telhado verde construído em 2005.....                                                                 | 97 |
| Figura 3.18 – Exemplo de telhado verde construído em 2006.....                                                                 | 97 |
| Figura 3.19 – Exemplo de telhado verde construído em 2007.....                                                                 | 97 |
| Figura 3.20 – Exemplo de telhado verde construído em 2008.....                                                                 | 97 |
| Figura 3.21 – Exemplo de telhado verde construído em 2009.....                                                                 | 98 |
| Figura 3.22 – Exemplo de telhado verde construído em 2010.....                                                                 | 98 |

|                                                                                                                                           |     |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Figura 3.23 – Exemplo de telhado verde construído em 2011.....                                                                            | 98  |
| Figura 3.24 – Exemplo de telhado verde construído em 2011.....                                                                            | 98  |
| Figura 3.25 – Exemplo de telhado verde construído em 2012.....                                                                            | 99  |
| Figura 3.26 – Exemplo de telhado verde construído em 2013.....                                                                            | 99  |
| Figura 3.27 – Exemplo de telhado verde construído em 2014.....                                                                            | 99  |
| Figura 3.28 – Exemplo de telhado verde construído em 2015.....                                                                            | 99  |
| Figura 3.29 – Fotos do terraço-jardim projetado por Burle Marx na cobertura do Palácio Gustavo Capanema, na cidade do Rio de Janeiro..... | 100 |
| Figura 3.30 – Telhado Verde Extensivo no Morro da Babilônia, Leme. ....                                                                   | 102 |
| Figura 3.31 – Exemplo de telhado verde construído em 2010.....                                                                            | 103 |
| Figura 3.32 – Exemplo de telhado verde construído em 2011.....                                                                            | 103 |
| Figura 3.33 – Exemplo de telhado verde construído em 2012.....                                                                            | 103 |
| Figura 3.34 – Exemplo de telhado verde construído em 2013.....                                                                            | 103 |
| Figura 3.35 – Estação Jardim Oceânico (Linha 4 do metrô), na cidade do Rio de Janeiro.....                                                | 104 |
| Figura 3.36 – Tipos de sistemas de telhados verdes.....                                                                                   | 105 |
| Figura 3.37 – Composição de telhado verde com sistema completo. ....                                                                      | 106 |
| Figura 3.38 – Módulo de telhado verde de um sistema modular. ....                                                                         | 110 |
| Figura 3.39 – Aplicação do sistema modular em uma cobertura. ....                                                                         | 110 |
| Figura 3.40 – Aplicação do sistema modular em uma cobertura. ....                                                                         | 110 |
| Figura 3.41 – Sistema da manta pré-cultivada aplicada em uma cobertura residencial. ....                                                  | 111 |
| Figura 3.42 – Ilustração das camadas de coberturas verdes extensivas, semi-intensiva e intensiva. ....                                    | 112 |
| Figura 4.1 – Módulo 5 da bancada experimental. ....                                                                                       | 131 |
| Figura 4.2 – Esquema ilustrativo das camadas do protótipo de cobertura verde. ....                                                        | 132 |
| Figura 4.3 – Torneiras A e B que liberam a água para a calha coletora.....                                                                | 133 |
| Figura 4.4 – As bromélias (em vermelho) no mundo.....                                                                                     | 135 |
| Figura 4.5 – <i>Neoregelia cruenta</i> . ....                                                                                             | 136 |
| Figura 4.6 – Distribuição geográfica da espécie <i>Neoregelia cruenta</i> . ....                                                          | 137 |
| Figura 4.7 – Bromélias no canteiro central da Avenida Athos da Silveira Ramos, em seu trecho entre o CT e o CCMN. ....                    | 137 |
| Figura 4.8 – Bromélias em frente ao símbolo da Minerva no CT.....                                                                         | 138 |
| Figura 4.9 – Bromélias do gênero <i>Neoregelia</i> utilizadas no protótipo.....                                                           | 138 |
| Figura 4.10 – Recorte da manta bidim para obter o tamanho necessário.....                                                                 | 140 |
| Figura 4.11 – Colocação da manta bidim para proteger os tubos de drenagem.....                                                            | 140 |
| Figura 4.12 – Processo de colocação e adequação da argila expandida.....                                                                  | 140 |
| Figura 4.13 – Camada de drenagem executada.....                                                                                           | 140 |
| Figura 4.14 – Processo de colocação da manta bidim sobre a camada drenante. ....                                                          | 141 |

|                                                                                                               |     |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Figura 4.15 – Manta bidim colocada no módulo, abrangendo as paredes das faces. ....                           | 141 |
| Figura 4.16 – Primeira fileira de sacos com a areia que irá compor o substrato. ....                          | 142 |
| Figura 4.17 – Processo de lançamento da areia dos sacos para o protótipo. ....                                | 142 |
| Figura 4.18 – Regularização da subcamada de areia do substrato. ....                                          | 142 |
| Figura 4.19 – Procedimento para aumentar a espessura da subcamada. ....                                       | 142 |
| Figura 4.20 – Saco do substrato comercial “Tropstrato Floreiras e Vasos” (Frente). ....                       | 143 |
| Figura 4.21 – Saco do substrato comercial “Tropstrato Floreiras e Vasos” (Verso). ....                        | 143 |
| Figura 4.22 – Protótipo de telhado verde, após lançamento da camada de substrato. ....                        | 143 |
| Figura 4.23 – Fertilizante Forth Cote 14.14.14 (Frente). ....                                                 | 144 |
| Figura 4.24 – Fertilizante Forth Cote 14.14.14 (Verso). ....                                                  | 144 |
| Figura 4.25 – Casca de pinus. ....                                                                            | 144 |
| Figura 4.26 – Protótipo de telhado verde concluído em 06/11/2015. ....                                        | 145 |
| Figura 4.27 – <i>Neoregelia</i> (mista). ....                                                                 | 145 |
| Figura 4.28 – <i>Neoregelia</i> (verde). ....                                                                 | 145 |
| Figura 4.29 – <i>Neoregelia</i> (roxa). ....                                                                  | 146 |
| Figura 4.30 – Exemplo de bromélia que não resistiu (1). ....                                                  | 146 |
| Figura 4.31 – Exemplo de bromélia que não resistiu (2). ....                                                  | 146 |
| Figura 4.32 – Protótipo de telhado verde utilizado nos ensaios experimentais. ....                            | 147 |
| Figura 4.33 – Procedimento experimental da realização de ensaios no protótipo de telhado verde. ....          | 148 |
| Figura 4.34 – Localização das estações do Alerta Rio. ....                                                    | 150 |
| Figura 4.35 – Bandejas de calibração para determinação da intensidade da chuva produzida pelo simulador. .... | 153 |
| Figura 4.36 – Chuva com duração de 6 minutos sobre as bandejas de calibração. ....                            | 153 |
| Figura 4.37 – Transferência da água da bandeja para o balde graduado. ....                                    | 154 |
| Figura 4.38 – Balde graduado utilizado para verificar o volume precipitado. ....                              | 154 |
| Figura 4.39 – Colheres e tubo de PVC utilizados para a coleta das amostras. ....                              | 156 |
| Figura 4.40 – Panos umedecidos que acomodaram as amostras. ....                                               | 157 |
| Figura 4.41 – Coleta de uma colherada de areia da subcamada do substrato. ....                                | 158 |
| Figura 4.42 – Amostra da subcamada de areia em pano umedecido. ....                                           | 158 |
| Figura 4.43 – Coleta de substrato com o auxílio de um tubo PVC. ....                                          | 158 |
| Figura 4.44 – Amostra do substrato em pano umedecido. ....                                                    | 158 |
| Figura 4.45 – Amostras acomodadas em pano umedecido. ....                                                     | 159 |
| Figura 4.46 – Reposição de areia que foi removida do protótipo. ....                                          | 159 |
| Figura 4.47 – Caminho (cerca de 500 m) entre o CESA/UFRJ e o LT/UFRJ. ....                                    | 159 |
| Figura 4.48 – Balança e recipientes. ....                                                                     | 160 |
| Figura 4.49 – Estufa. ....                                                                                    | 160 |

|                                                                                                                                                            |     |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Figura 4.50 – Vista superior da CP suspensa.....                                                                                                           | 162 |
| Figura 4.51 – Medidor de nível.....                                                                                                                        | 164 |
| Figura 4.52 – Régua do Medidor de nível.....                                                                                                               | 164 |
| Figura 4.53 – Aparato para medição de nível dentro do tubo piezométrico, destacando os parafusos como mecanismo de prisão.....                             | 164 |
| Figura 4.54 – Obstrução da entrada de água no reservatório pequeno com fita.....                                                                           | 165 |
| Figura 4.55 – Dimensões do protótipo.....                                                                                                                  | 170 |
| Figura 4.56 – Saídas da camada de drenagem do módulo experimental.....                                                                                     | 172 |
| Figura 4.57 – Representação do aumento do nível de água (N.A.) no fundo do protótipo, devido a existência de outros materiais constituintes da camada..... | 173 |
| Figura 4.58 – Vazão máxima obtida a partir da observação do hidrograma proveniente das medições na CP no ensaio 1.....                                     | 179 |
| Figura 4.59 – Vazão máxima obtida a partir da observação do hidrograma proveniente dos cálculos realizados para descrever o ensaio 2.....                  | 180 |
| Figura 5.1 – Ensaio 1 ( $i_{média} = 114,2 \text{ mm/h}$ ): Hidrogramas medido e calculado.....                                                            | 193 |
| Figura 5.2 – Ensaio 2 ( $i_{média} = 92,5 \text{ mm/h}$ ): Hidrogramas medido e calculado.....                                                             | 194 |
| Figura 5.3 – Ensaio 3 ( $i_{média} = 101,9 \text{ mm/h}$ ): Hidrogramas medido e calculado.....                                                            | 194 |
| Figura 5.4 – Ensaio 4 ( $i_{média} = 97,8 \text{ mm/h}$ ): Hidrogramas medido e calculado.....                                                             | 195 |
| Figura 5.5 – Ensaio 5 ( $i_{média} = 95,6 \text{ mm/h}$ ): Hidrogramas medido e calculado.....                                                             | 195 |
| Figura 5.6 – Ensaio 6 ( $i_{média} = 50,8 \text{ mm/h}$ ): Hidrogramas medido e calculado.....                                                             | 196 |
| Figura 5.7 – Ensaio 7 ( $i_{média} = 50,3 \text{ mm/h}$ ): Hidrogramas medido e calculado.....                                                             | 196 |
| Figura 5.8 – Ensaio 8 ( $i_{média} = 50,0 \text{ mm/h}$ ): Hidrogramas medido e calculado.....                                                             | 197 |
| Figura 5.9 – Ensaio 9 ( $i_{média} = 51,4 \text{ mm/h}$ ): Hidrogramas medido e calculado.....                                                             | 197 |
| Figura 5.10 – Ensaio 10 ( $i_{média} = 51,1 \text{ mm/h}$ ): Hidrogramas medido e calculado.....                                                           | 198 |
| Figura 6.1 – Bacia do rio Joana dividida em células de escoamento para a modelagem.....                                                                    | 207 |
| Figura 6.2 – Parte urbana da bacia do rio Joana, com a indicação do mapeamento das áreas propícias à instalação de coberturas verdes.....                  | 210 |
| Figura 7.1 – Cenário 1 (Chuva TR10, situação atual).....                                                                                                   | 214 |
| Figura 7.2 – Cenário 2 (Chuva TR10, considerando a adoção de telhados verdes).....                                                                         | 214 |
| Figura 7.3 – Cenário 3 (Chuva TR25, situação atual).....                                                                                                   | 215 |
| Figura 7.4 – Cenário 4 (Chuva TR25, considerando a adoção de telhados verdes).....                                                                         | 215 |

## ÍNDICE DE QUADROS

|                                                                                                                             |     |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Quadro 1.1 – Definições de sustentabilidade.....                                                                            | 17  |
| Quadro 1.2 – Terminologias utilizadas em drenagem urbana ao redor do mundo.....                                             | 19  |
| Quadro 1.3 – Princípios para a sustentabilidade na construção.....                                                          | 23  |
| Quadro 1.4 – Metodologia da pesquisa.....                                                                                   | 29  |
| Quadro 2.1 – Descrição do ciclo hidrológico.....                                                                            | 65  |
| Quadro 2.2 – Referências bibliográficas consultadas para formular o Quadro 2.1.....                                         | 81  |
| Quadro 3.1 – Exemplos de coberturas verdes construídas no século XXI (2001 – 2004). ....                                    | 96  |
| Quadro 3.2 – Exemplos de coberturas verdes construídas no século XXI (2005 – 2008). ....                                    | 97  |
| Quadro 3.3 – Exemplos de coberturas verdes construídas no século XXI (2009 – 2011). ....                                    | 98  |
| Quadro 3.4 – Exemplos de coberturas verdes construídas no século XXI (2012 – 2015). ....                                    | 99  |
| Quadro 3.5 – Exemplos de coberturas verdes construídas no Brasil entre 2010 e 2014.....                                     | 103 |
| Quadro 3.6 – Vantagens dos telhados verdes.....                                                                             | 116 |
| Quadro 3.7 – Desvantagens das coberturas verdes. ....                                                                       | 117 |
| Quadro 3.8 – Principais cuidados na concepção e/ou construção de telhados verdes.....                                       | 118 |
| Quadro 4.1 – Etapas para a execução do ensaio experimental.....                                                             | 149 |
| Quadro 4.2 – Etapas de campo para obtenção das amostras do substrato.....                                                   | 158 |
| Quadro 4.3 – Procedimento de determinação da umidade para cada amostra. ....                                                | 160 |
| Quadro 4.4 – Hipóteses adotadas <i>a priori</i> na modelagem matemática do comportamento do protótipo de telhado verde..... | 168 |
| Quadro 4.5 – Balanço hídrico no sistema, em volumes, para estimativa do hidrograma de saída. ....                           | 175 |
| Quadro 4.6 – Valores de coeficiente de escoamento determinados. ....                                                        | 181 |
| Quadro 4.7 – Balanço hídrico no sistema (ajustado), em volumes, para estimativa do hidrograma de saída.....                 | 189 |
| Quadro 5.1 – Principais dificuldades enfrentadas durante a campanha de ensaios.....                                         | 203 |
| Quadro 6.1 – Metodologia para aplicação de telhados verdes em bacia urbana. ....                                            | 209 |
| Quadro 6.2 – Cenários avaliados.....                                                                                        | 212 |

## ÍNDICE DE TABELAS

|                                                                                                                                                                          |     |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Tabela 2.1 – Impactos da urbanização sobre as cheias urbanas.....                                                                                                        | 70  |
| Tabela 2.2 – Informações sobre os termos existentes no âmbito da drenagem urbana sustentável.<br>.....                                                                   | 75  |
| Tabela 2.3 – Técnicas compensatórias: características, responsabilidade e exemplos. ....                                                                                 | 82  |
| Tabela 3.1 – Classificação dos sistemas de natureza em coberturas, de acordo com seus<br>componentes.....                                                                | 112 |
| Tabela 3.2 – Classificação dos telhados verdes de acordo com a declividade.....                                                                                          | 113 |
| Tabela 3.3 – Funções dos diferentes tamanhos de poros em substratos.....                                                                                                 | 124 |
| Tabela 3.4 – Pesquisas realizadas sobre a capacidade de retenção de água de chuva em telhados<br>verdes. ....                                                            | 128 |
| Tabela 4.1 – Ensaio realizado durante a campanha experimental.....                                                                                                       | 150 |
| Tabela 4.2 – Dados pluviométricos da estação São Cristovão (nº 32) do Alerta Rio. ....                                                                                   | 151 |
| Tabela 4.3 – Intensidades de chuva consideradas para cada ensaio experimental. ....                                                                                      | 155 |
| Tabela 4.4 – Umidades para o substrato antes da realização dos ensaios considerados nesta<br>pesquisa. ....                                                              | 161 |
| Tabela 4.5 – Coeficientes de escoamento superficial obtidos e altura máxima de lâmina d’água<br>no protótipo calculada – 1ª aproximação. ....                            | 182 |
| Tabela 4.6 – Coeficientes de escoamento superficial obtidos e altura máxima de lâmina d’água<br>no protótipo calculada – 2ª aproximação. ....                            | 184 |
| Tabela 4.7 – Nível de encharcamento da camada drenante, para $i_{média} = 50,7$ mm/h. ....                                                                               | 186 |
| Tabela 4.8 – Nível de encharcamento da camada drenante, para $i_{média} = 100,4$ mm/h. ....                                                                              | 186 |
| Tabela 4.9 – Coeficientes de escoamento superficial obtidos e altura máxima de lâmina d’água<br>no protótipo calculada – 3ª aproximação. ....                            | 187 |
| Tabela 4.10 – Coeficientes de escoamento superficial obtidos e altura máxima de lâmina d’água<br>no protótipo calculada – 4ª e última aproximação (modelo ajustado)..... | 188 |
| Tabela 5.1 – Resultados obtidos nos experimentos com simulador calibrado para gerar uma<br>intensidade de 100 mm/h.....                                                  | 191 |
| Tabela 5.2 – Resultados obtidos nos experimentos com simulador calibrado para gerar uma<br>intensidade de 50 mm/h.....                                                   | 191 |
| Tabela 5.3 – Resultados obtidos (medido e calculado), para chuvas na faixa de 100 mm/h. ...                                                                              | 200 |
| Tabela 5.4 – Resultados obtidos (medido e calculado), para chuvas na faixa de 50 mm/h. ....                                                                              | 200 |
| Tabela 6.1 – Coeficientes da IDF para o posto Sabóia Lima. ....                                                                                                          | 208 |

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

|        |                                                                          |
|--------|--------------------------------------------------------------------------|
| AGP    | <i>Angiosperm Phylogeny Group</i>                                        |
| AT     | <i>Alternative Techniques</i>                                            |
| BMPs   | <i>Best Management Practices</i>                                         |
| CCS    | Centro de Ciência da Saúde da UFRJ                                       |
| CESA   | Centro Experimental de Saneamento Ambiental da UFRJ                      |
| CETESB | Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental                          |
| CIRIA  | <i>Construction Industry Research Information Association</i>            |
| COPPE  | Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós-Graduação e Pesquisa de Engenharia |
| CP     | Caixa Pluviômetra                                                        |
| CT     | <i>Compensatory Techniques</i>                                           |
| DAEE   | Departamento de Águas e Energia Elétrica do Estado de São Paulo          |
| Drhima | Departamento de Recursos Hídricos e Meio Ambiente da UFRJ                |
| EP     | Escola Politécnica da UFRJ                                               |
| FINEP  | Financiadora de Estudos e Projetos                                       |
| GBI    | <i>Green Building Index</i>                                              |
| GI     | <i>Green Infrastructure</i>                                              |
| HP     | <i>Horse Power</i>                                                       |
| IBGE   | Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística                          |
| INPI   | Instituto Nacional da Propriedade Industrial                             |
| IPCC   | <i>Intergovernmental Panel on Climate Change</i>                         |
| IUCN   | <i>The World Conservation Union</i>                                      |

|        |                                                       |
|--------|-------------------------------------------------------|
| IUWM   | <i>Integrated Urban Water Management</i>              |
| LHC    | Laboratório de Hidráulica Computacional da COPPE/UFRJ |
| LID    | <i>Low Impact Development</i>                         |
| LIUUD  | <i>Low Impact Urban Design and Development</i>        |
| LT     | Laboratório de Traçadores da COPPE/UFRJ               |
| MAPLU  | Manejo de Águas Pluviais em Meio Urbano               |
| MCT    | Ministério da Ciência e Tecnologia                    |
| MIT    | <i>Massachussets Institute of Technology</i>          |
| MODCEL | Modelo de Células                                     |
| MS     | Ministério da Saúde                                   |
| ONU    | Organização das Nações Unidas                         |
| PEU    | Programa de Engenharia Urbana da EP/UFRJ              |
| SCMs   | <i>Stormwater Control Measures</i>                    |
| SEPA   | <i>Scottish Environmental Protection Agency</i>       |
| SME    | <i>Soil Moisture Extraction Function</i>              |
| SUDS   | <i>Sustainable Urban Drainage Systems</i>             |
| TR     | Tempo de Recorrência                                  |
| UAS    | Umidade Antecedente do Substrato                      |
| UERJ   | Universidade Estadual do Rio de Janeiro               |
| UFRGS  | Universidade Federal do Rio Grande do Sul             |
| UFMS   | Universidade Federal do Mato Grosso do Sul            |
| UFRJ   | Universidade Federal do Rio de Janeiro                |
| UNEP   | <i>United Nations Environment Programme</i>           |

|      |                                          |
|------|------------------------------------------|
| USA  | <i>United States of America</i>          |
| WMO  | <i>World Meteorological Organization</i> |
| WSC  | <i>Water Sensitive Cities</i>            |
| WSUD | <i>Water Sensitive Urban Design</i>      |
| WWF  | <i>World Wide Fund For Nature</i>        |

# 1 INTRODUÇÃO

*“Do rio que tudo arrasta se diz violento.  
Mas ninguém diz violentas as margens que o comprimem.”*  
(Bertholt Brecht<sup>1</sup>)

## 1.1 CONTEXTO

A água é um dos elementos fundamentais para a existência e manutenção da vida na Terra; afinal, todo ser vivo, do mais simples ao mais complexo, precisa de água para viver. Na verdade, todo ser vivo consiste principalmente de água (BRUNI, 1994).

Sendo um bem essencial para sua existência, observa-se, historicamente, que o homem buscou se estabelecer onde a água poderia ser obtida sem grandes dificuldades, ou seja, próximos a rios, lagos e, até mesmo, aos mares.

A proximidade do homem com a água foi fundamental para o desenvolvimento da prática agrícola, principal fator que levou o homem a abandonar a vida nômade em prol da vida sedentária. Assim, surgem as primeiras civilizações, localizadas em áreas estratégicas, próximas a corpos hídricos, que forneciam água para o consumo humano, para a criação de animais, para a irrigação das plantações, para o despejo de dejetos, para a defesa de sítios, para o transporte de mercadorias, entre outros.

De acordo com Chinen e Cabra (2002), as quatro primeiras grandes civilizações humanas do planeta datam de 4000 a.C. a 3000 a.C. e todas se formaram às margens de importantes rios, conforme apresentado na Figura 1.1. A Mesopotâmia, às margens dos rios Tigre e Eufrates; o Antigo Egito, com sua fertilidade advinda das cheias do rio Nilo; a Civilização do rio Amarelo na China; e o Vale do rio Indo no Paquistão.

Tais civilizações, conhecidas como “berços das civilizações”, constantemente eram alagadas devido às cheias dos rios, fato este que gerava transtorno aos habitantes, pois era necessário limpar o local, construir barreiras para controlar o excesso de água e abrir canais de drenagem. O problema com as cheias era tal que os povos na época, na tentativa de evitá-las, realizavam cerimônias de encantamento com o objetivo de que os deuses do céu e das águas as impedissem (CHINEN e CABRA, 2002).

---

<sup>1</sup> **Eugen Bertholt Friedrich Brecht:** Poeta, dramaturgo e reformista teatral do século XX. (Fonte: ENCICLOPÆDIA BRITANNICA, 2016).



Figura 1.1 – Localização dos rios em torno dos quais cresceram as quatro primeiras grandes civilizações.

Fonte: AS CIVILIZAÇÕES DOS GRANDES RIOS (2012).

Já neste momento da história da humanidade, dois fatos importantes podem ser destacados, o primeiro é a tendência histórica do homem em buscar desenvolver-se próximo a corpos hídricos, visto a necessidade de ter água de fácil acesso para atender suas mais diversificadas demandas e, o segundo, é que tal tendência fez com que o homem convivesse com os transtornos ocasionados pelas cheias dos rios desde o início de seu processo de fixação nos espaços continentais.

O domínio e o aprimoramento das técnicas de agricultura pelos habitantes das primeiras civilizações, possível somente graças à disponibilidade de água, permitiu que os pequenos núcleos estabelecidos na época passassem a ter certa garantia em sua produção agrícola. Logo, não demorou muito tempo para que a quantidade de insumos produzida nesses núcleos fosse maior do que a necessária para o abastecimento de seus próprios habitantes. A partir deste momento, as pequenas aglomerações populacionais passaram a gerar os historicamente conhecidos “excedentes agrícolas”. A geração de excedentes é um dos principais motivadores para o início das práticas comerciais, que contribuíram para que os simples vilarejos evoluíssem, transformando-se, gradualmente, em organizações populacionais com sistemas políticos, econômicos e sociais mais avançados.

A Idade Antiga da História foi marcada pelo desenvolvimento dessas pequenas civilizações até a formação de cidades organizadas que já realizavam a prática do comércio de bens agrícolas e manufaturados, como o grande Império Romano formado ao redor do Mar Mediterrâneo, conforme ilustrado na Figura 1.2.



Figura 1.2 – Império Romano, no século IV, em 395 d.C.

Fonte: DUBY (1987) *apud* MELANI (2006).

Por volta do século V, com a crise do Império Romano, instalou-se o sistema feudal na Europa, marco da Idade Média da História, caracterizada pelo isolamento da população europeia em feudos, que eram propriedades rurais com autonomia política e econômica (GARRIDO NETO, 2012). Durante esta época da História, em pouco cresceram as cidades anteriormente estabelecidas, sendo que algumas chegaram até a retroceder.

No século XI, a sociedade europeia, até então predominantemente rural, com maior parte das atividades econômicas e da população concentradas nos feudos, viu florescerem numerosos povoados, que cresceram e se transformaram em cidades. Com o crescimento desordenado, as construções se sucediam ao acaso, sem nenhum plano. Pelas ruas tortuosas, os detritos eram atirados em qualquer lugar e, por uma vala, levados aos limites da cidade; lá se acumulavam à beira dos muros, formando focos de epidemia (ARRUDA e PILETTI, 2000).

A falta de planejamento e a desorganização no processo de formação das cidades perdurou por séculos na Europa e, assim, os padrões de uso e ocupação do solo, antes naturais, vieram, aos poucos, sendo alterados. Porém, a partir da Revolução Industrial, as cidades começaram a crescer de maneira extraordinária, como nunca havia ocorrido.

Com início na Inglaterra, na segunda metade do século XVIII, e difundindo-se pelo mundo a partir do século XIX, a Revolução Industrial foi um marco na história da Idade Moderna e provocou uma grande revolução em termos de produção econômica e de nível social do ser humano (ARRUDA e PILETTI, 2000).

A Revolução Industrial marcou uma mudança profunda na sociedade, provocando o aumento da disponibilidade de bens e serviços gerados pela agricultura, pela indústria e pelas atividades terciárias, por efeito do progresso tecnológico e de um desenvolvimento econômico sem paralelos. O perfil da cidade muda, atraindo um fluxo migratório das áreas rurais, o que provoca crescimento rápido e sem controle, rompendo um equilíbrio secular, em que cada geração ocupava o lugar das anteriores e cumpria o mesmo destino (BENEVOLO, 2015).

Percebe-se que, até este ponto, apesar do surgimento e desenvolvimento das cidades estarem totalmente atreladas à existência de corpos hídricos, a evolução do espaço urbano ao redor destes não contemplou a necessidade de conservá-los, chegando até a considerar os mesmos como mero veículo de despejo de dejetos, e como causador de enchentes. Somado a isso, como solução frente às inconveniências geradas pelos rios, que tiveram seu espaço ocupado pelas cidades, adotava-se, em muitos casos, a prática de confinamento destes em galerias fechadas, apagando-os, assim, da paisagem urbana.

As cidades europeias, a partir da Revolução Industrial, ficaram caracterizadas pelo adensamento das edificações e pela ausência de serviços de infraestrutura e de saneamento (SOUZA e DAMÁSIO, 1990). Os centros urbanos, então, passam a ter condições precárias de mobilidade, carência habitacional e inúmeros casos de doenças e mortes associadas à insalubridade destes espaços. Nesse momento, observa-se que as cidades não eram dotadas de infraestrutura apropriada para drenar a água de chuva, que se misturava com o esgoto gerado pelos habitantes. Assim, os eventos de chuvas tornavam-se catastróficos, pois o espaço urbano era inundado com água contaminada, o que causava epidemias e sérios problemas de saúde entre os habitantes.

Com a intensificação desta problemática, começaram a aparecer as primeiras iniciativas para contornar o caos que vinha sendo gerado devido ao crescimento desordenado das cidades. De acordo com Silveira (2002), entre 1850 e o fim do século

XIX, muitas cidades importantes do mundo, principalmente as capitais europeias, foram dotadas de grandes redes subterrâneas unitárias de esgoto que conduziam, em um mesmo conduto, tanto águas pluviais quanto esgoto cloacal.

Nesse contexto, destaca-se a cidade de Paris que, sob o comando do prefeito Haussmann, tornou-se emblemática e referência mundial por construir uma imponente rede de esgotos, fato que cristalizou o conceito higienista da drenagem urbana, que passa a ser conhecido no meio técnico francês da época pela expressão *tout à l'égout* (SILVEIRA, 2002).

A ideia do conceito higienista era afastar das cidades, do modo mais rápido possível, as águas das chuvas e os esgotos gerados pela população. Tal concepção baseia-se na aceleração do escoamento, através, principalmente, da execução de obras de canalizações, que transferem para jusante o problema local da falta de espaços que serviam, naturalmente, para serem alagados. Este conceito espalhou-se pelo mundo e, durante anos, tornou-se regra e modelo para concepção de projetos de drenagem.

O crescimento populacional e econômico de cidades europeias e, depois, de outras cidades pelo mundo, devido ao aumento e à modernização das indústrias e dos processos de produção, advindos da Revolução Industrial, prolongou-se até a época Contemporânea. Isso acarretou no aumento de áreas impermeáveis, na ocupação de áreas ribeirinhas e planícies de inundação, além da elevação do grau de degradação dos corpos hídricos, que perpassam as urbes, devido ao aumento da geração de esgotos domésticos, efluentes industriais e lixo, que neles eram lançados. Além disso, diversos cursos d'água foram canalizados, retificados e confinados, perdendo suas características naturais, seu espaço e sua beleza.

Hoje, é possível observar o grande impacto que a ação antrópica e a urbanização causam no processo de circulação das águas. Com a impermeabilização dos espaços naturais, tornam-se bem menores, em relação a quantidade de precipitação, as seguintes parcelas do ciclo hidrológico: interceptação, evaporação, transpiração e infiltração. Tais variáveis são responsáveis pela retenção de parte da precipitação, atuando, desta forma, na redução da geração de escoamentos superficiais, contribuindo para a diminuição, tanto das ocorrências quanto das magnitudes, das enchentes<sup>2</sup> e inundações<sup>3</sup>.

---

<sup>2</sup> **Enchente:** Fase de ascensão do hidrograma no período de cheia (que é complementado pela vazante, que representa a fase de descida do hidrograma).

<sup>3</sup> **Inundação:** Extravasamento da calha do rio, durante uma enchente, para suas áreas marginais, que se torna crítico quando estas áreas se encontram ocupadas pelo homem.

Com o passar do tempo, a área técnica foi percebendo que as soluções tradicionais adotadas para o manejo das águas de chuva, advindas do conceito higienista, não eram suficientes nem eficazes na redução dos impactos causados pela intensa urbanização sobre os processos do ciclo hidrológico.

Assim, apesar do conceito higienista ter predominado durante o século XX no mundo inteiro, o fim da sua história foi decretado nos anos 60, nos países desenvolvidos, quando a consciência ecológica expôs as limitações desta prática para levar em conta os conflitos ambientais entre as cidades e o ciclo hidrológico. Havia necessidade de reflexões mais profundas sobre as ações antrópicas densas sobre o meio ambiente, particularmente, sobre a quantidade e a qualidade dos recursos hídricos. Nascia, então, o conceito ambiental aplicado à drenagem urbana que fez com que os ícones das soluções higienistas deixassem de reinar sozinhos, ou seja, o rol de obras tradicionais como condutos, sarjetas, bocas de lobo, rios e córregos retificados, entre outras, teria de ser ampliado para admitir soluções alternativas e complementares à evacuação rápida dos excessos pluviais, dentro de um contexto de preservação ambiental. Iniciado na Europa, esse conceito de drenagem com um enfoque ambiental já se encontra espalhado pelo mundo (TUCCI e GENZ, 2015).

No período entre as décadas de 70 e 90, ganhou destaque a adoção de técnicas corretivas, com o objetivo de atuar na consequência do problema de drenagem urbana (FORGIARINI *et al.*, 2007). De acordo com Tucci (2005), as principais características dessa abordagem eram o tratamento de esgoto, o amortecimento quantitativo da drenagem e o controle da qualidade da água pluvial.

A partir da década de 90, em um contexto no qual o mundo estava preocupado com o futuro das próximas gerações visto já todo o impacto causado pelo homem ao longo de sua evolução, surge um novo conceito para enfrentar os problemas relacionados a gestão de águas pluviais nas cidades, o conceito de drenagem urbana sustentável.

Os sistemas de drenagem sustentáveis são projetados de forma a maximizar os benefícios que podem ser obtidos com a gestão da água em um determinado espaço. Basicamente, este conceito está atrelado à adoção de técnicas que proporcionem os quatro benefícios ilustrados através na Figura 1.3, conhecidos como os quatro pilares dos projetos de sistema de drenagem sustentável (CIRIA, 2015).

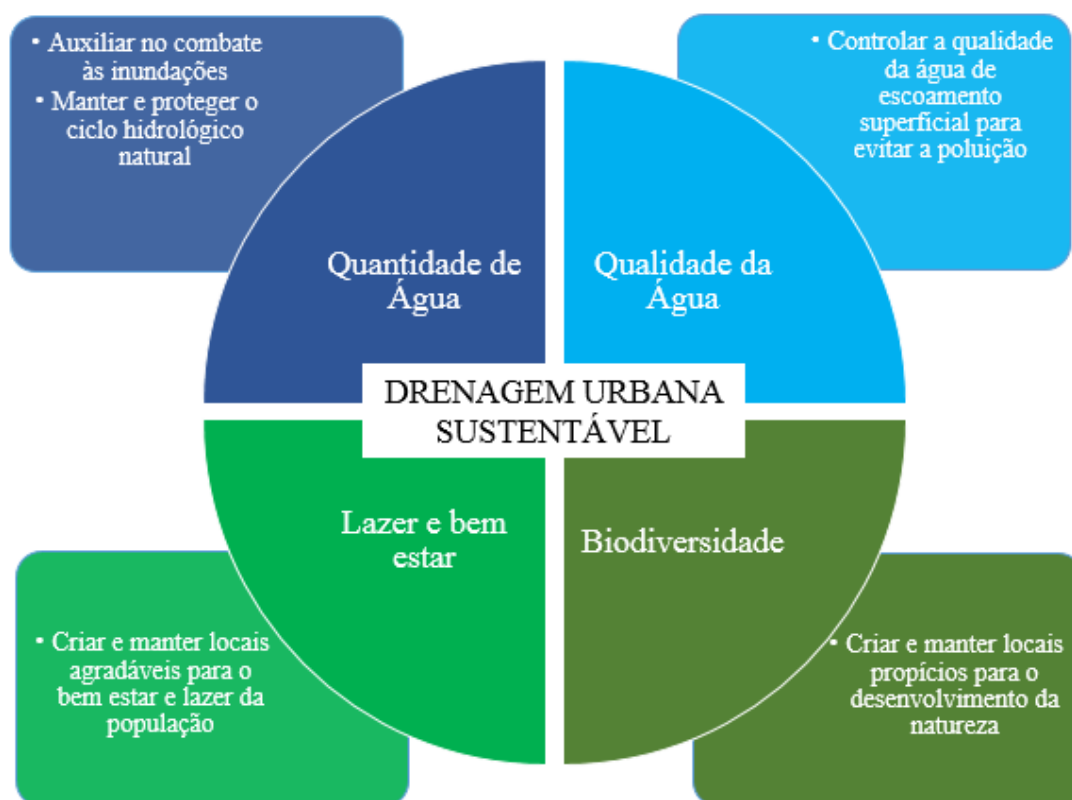


Figura 1.3 – As quatro principais vantagens ao optar-se pela adoção de sistemas de drenagem sustentáveis.

Fonte: Adaptado de CIRIA (2015).

Os reservatórios de retenção, de retenção e de lote, assim como os telhados verdes, pavimentos permeáveis, trincheiras e valas de infiltração são exemplos de técnicas utilizadas em projetos de drenagem que estão atreladas à tal concepção sustentável.

No meio técnico brasileiro, as técnicas elencadas no parágrafo anterior são conhecidas como “técnicas compensatórias em drenagem urbana” que, de acordo com Baptista *et al.* (2015), são medidas que visam aumentar a capacidade de infiltração e armazenamento de uma área, com o objetivo de compensar os impactos da urbanização no ciclo hidrológico.

O presente trabalho tem como tema a *naturação*<sup>4</sup> aplicada em coberturas, técnica compensatória popularmente conhecida como telhado ou cobertura verde, cuja concepção leva em consideração todos os quatro benefícios almejados no âmbito da drenagem urbana sustentável, conforme apresentados na Figura 1.3. Um exemplo de telhado verde, construído no Canadá, em 2015, pode ser observado na Figura 1.4.

<sup>4</sup> **Naturação:** Tecnologia de aplicação de vegetação sobre superfícies construídas, ou seja, coberturas, fachadas ou vias (ROLA *et al.*, 2003).

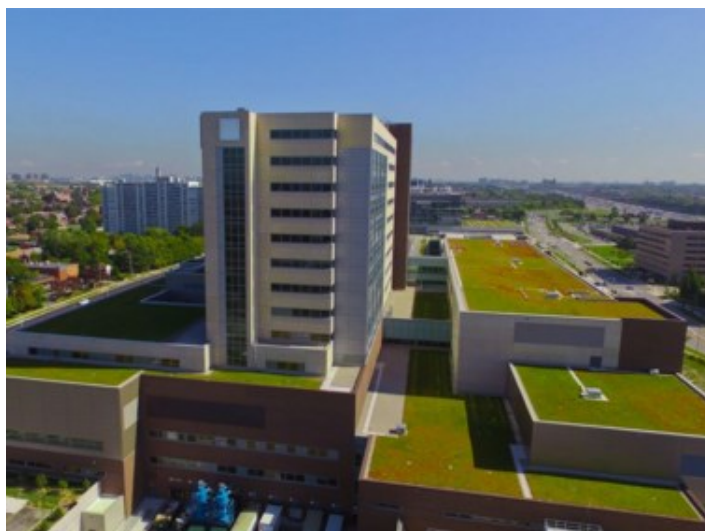


Figura 1.4 – Exemplo de telhado verde: Hospital Humber River, em Toronto, Canadá.

Fonte: GREENROOFS (2015).

No que tange ao controle do escoamento superficial, observa-se que parcela do volume de chuva que precipita nas cidades pode ser retida pelas camadas componentes das coberturas naturais, nas quais ocorrem a retenção superficial nas folhas da vegetação, a evapotranspiração do sistema planta-substrato, e o armazenamento de água nas camadas de substrato e drenagem. Sendo assim, os telhados verdes podem promover a retenção de parcela da água de chuva, reduzindo o escoamento superficial e defasando, com atraso, a vazão de pico, associada a um evento de chuva, nas galerias de drenagem.

Sobre a qualidade da água, algumas pesquisas (KOK *et al.*, 2014; GALARZA-MOLINA *et al.*, 2014; ROLA, 2008) indicam que a passagem da água de chuva através das camadas de coberturas verdes pode aumentar seu pH, sendo um indicativo de que estas coberturas podem neutralizar o efeito de chuvas ácidas, que assolam algumas áreas urbanas.

Além dos impactos na quantidade e qualidade da água de chuva mencionados nos parágrafos anteriores, de acordo com Garrido Neto (2012), nos centros urbanos, os benefícios ambientais das coberturas verdes também estão relacionados ao fato de aumentarem a área verde das “cidades acinzentadas”, reduzirem o efeito das “ilhas de calor” e interferirem positivamente nas condições climáticas e ambientais das cidades, tornando-as mais frescas, menos poluídas e com espaços mais agradáveis esteticamente.

Somado a isso, é inquestionável o incremento na biodiversidade no meio urbano, pois, além da introdução de espécies vegetais, as áreas verdes formadas trazem consigo

uma possibilidade de atrair pássaros (CANERO e REDONDO, 2010) e insetos, por exemplo.

Embora ainda pouco difundida no Brasil, a tecnologia de coberturas verdes não é inovadora e vem sendo praticada em vários países, como na Alemanha, Estados Unidos, Bélgica, Suécia, entre outros, na gestão de águas pluviais. Isso motiva para que esta tecnologia seja adequada à realidade brasileira, devido aos seus benefícios, através de materiais e espécies vegetais adequadas a condições climáticas do país (NASCIMENTO, 2015).

A pesquisa que aqui se inicia está inserida no contexto do projeto “Manejo de Águas Pluviais em Meio Urbano”, de sigla “MAPLU”, referente à Chamada Pública MCT/MCidades/FINEP/Ação Transversal Saneamento Ambiental e Habitação – 07/2009, financiado pela FINEP, no qual a UFRJ participou em conjunto com outras 16 universidades do Brasil.

O referido projeto, de acordo com o documento “Proposta de Projeto - Desenvolvimento de soluções urbanísticas e ambientalmente adequadas de manejo de águas pluviais, visando à redução do impacto sobre o hidrograma de enchente, em bacias experimentais urbanas”, apresentado à Chamada Pública MCT/MCidades/FINEP/Ação Transversal Saneamento Ambiental e Habitação – 07/2009, além de ter como objetivo o desenvolvimento de soluções urbanísticas e ambientalmente adequadas para o manejo de águas pluviais, integrando medidas estruturais e não estruturais de controle de cheias, apoiado na utilização de modelagem matemática e ensaios de medidas compensatórias, realizados em laboratório; almejou, também, promover avanços tecnológicos na temática de drenagem urbana com enfoque sustentável, ainda pouco incorporados às práticas da engenharia brasileira, buscando a adoção de técnicas compensatórias e aliando-as com as soluções tradicionais utilizadas no manejo de águas pluviais, potencializando o uso de cada tecnologia e tornando as áreas urbanas menos vulneráveis a inundações.

Esta dissertação recai em um recorte específico do projeto MAPLU, tratando da técnica compensatória “telhado verde”, tendo uma parte do trabalho voltada para a realização de ensaios experimentais em um protótipo de cobertura verde, construída na Cidade Universitária do Fundão, e outra, focada na verificação da adoção desta técnica compensatória em uma bacia hidrográfica urbanizada do município do Rio de Janeiro, a partir da utilização de modelo matemático que representa, fisicamente, a referida bacia e seus aspectos hidrológicos e hidráulicos.

## **1.2 BASE TEÓRICA**

### **1.2.1 Uma breve relação entre os temas**

Como o título deste trabalho sugere, a presente pesquisa trata da temática de telhados verdes, uma técnica compensatória em drenagem urbana com enfoque sustentável. O trabalho conta com uma parte experimental, desenvolvida a partir de um módulo de telhado verde com determinada configuração, e a aplicação, com o auxílio de um modelo matemático, de resultado constatado em escala experimental em uma bacia hidrográfica, a bacia do rio Joana, situada no Município do Rio de Janeiro, cidade esta que, devido ao seu processo desordenado de urbanização, acabou alterando, em grande parte, as características naturais dos rios que passavam em sua urbe, e promovendo uma massiva impermeabilização de toda uma área que contribuem para eles.

Destaca-se, já neste ponto, que o processo de urbanização constitui uma das ações antrópicas que geram grandes impactos ambientais, exatamente pelas consequências resultantes das mudanças nas características originais de uso do solo (MIGUEZ *et al.*, 2015). Devido a importância de tal processo, como agente responsável pelos problemas de inundações nas cidades, o item 1.2.2, que segue, abordará questões referentes à urbanização e ao crescimento das cidades, apresentando alguns registros e tendências da evolução deste processo, no mundo e no Brasil. Além disto, esse item também irá introduzir o conceito de sustentabilidade, que cada vez mais vem ganhando espaço e força em diversos setores, sendo, atualmente, bastante incorporado nas concepções de projetos de infraestrutura e de empreendimentos.

Deixando de lado, por enquanto, a evolução das concepções que foram preconizadas no gerenciamento das águas pluviais ao longo dos anos, que será devidamente abordada no Capítulo 2 deste trabalho, o item 1.2.3 apresentará, de modo sucinto, o enfoque sustentável como solução para a gestão de águas nas cidades, uma vez que esta pesquisa pretende mostrar os impactos que podem ser obtidos ao optar por soluções que tenham como base esta linha de raciocínio que, hoje, é preconizada em diversos países desenvolvidos, como na Alemanha, Inglaterra, Estados Unidos e Austrália, e que ainda encontra resistência para maior aceitação em alguns países em desenvolvimento, como o Brasil.

Das técnicas compensatórias existentes dentro do arcabouço da drenagem sustentável, a adoção de telhados verdes, que será especificamente explorada neste

trabalho, destaca-se por ser uma medida de infiltração e armazenamento que utiliza as coberturas e telhados, geralmente espaços sem grande utilização dentro do contexto urbano, para promover áreas verdes nas cidades e tentar recuperar parcelas do ciclo hidrológico que foram perdidas no processo de urbanização. No item 1.2.4 será apresentada essa técnica de forma simplificada, com vistas a abrir a discussão que será melhor tratada no Capítulo 3.

Embora o presente trabalho tenha como enfoque a apresentação de uma determinada técnica compensatória e os benefícios que a adoção da mesma pode vir a trazer em uma bacia hidrográfica consideravelmente urbanizada, em termos de redução dos impactos gerados por chuvas, às vezes não tão intensas, não se pode também desconsiderar que tal tecnologia encontra-se inserida, atualmente, na construção civil como uma “prática sustentável” que, cada vez mais, vem sendo adotada em projetos. Este aspecto, será discutido no item 1.2.5 e, visto que as minúcias deste aspecto não é o foco do presente estudo, tal discussão estará limitada somente a este item deste trabalho.

Por fim, considerando que será utilizado um modelo matemático como ferramenta para representar fisicamente a bacia do rio Joana, e que, a partir deste modelo, serão simuladas algumas alterações em sua concepção, com o objetivo de comparar alguns possíveis cenários, o item 1.2.6 discorrerá sobre como o uso de ferramentas matemáticas podem ser úteis para o apoio de estudos deste tipo e, no caso desta pesquisa, para demonstrar o impacto da adoção de coberturas verdes na escala de uma bacia hidrográfica.

### **1.2.2 Urbanização, crescimento das cidades e sustentabilidade**

A percepção de que o crescimento da população seria um dos problemas mais graves ao ambiente ainda era muito forte até a Conferência das Nações Unidas para o Meio Ambiente e Desenvolvimento, no Rio de Janeiro, em 1992 (HOGAN *et al.*, 2010).

Com o processo de globalização em sua fase inicial, as preocupações quanto aos limites do crescimento, preconizados no relatório do Clube de Roma e na Conferência da ONU sobre o Meio Ambiente em Estocolmo, em 1972, tornaram-se peça fundamental na relação entre o desenvolvimento econômico, os recursos naturais e o crescimento populacional.

A Figura 1.5 apresenta um gráfico no qual é possível observar que o crescimento populacional mundial tende a reduzir rumo à uma condição de estabilidade, na qual o

crescimento populacional das diversas regiões do mundo tenderia a zero. Pode-se destacar, observando a Figura 1.5, que, devido ao processo de urbanização mais tardio dos países em desenvolvimento, os mesmos possuíram uma tendência de crescimento da população até a década de 70, época em que os países desenvolvidos já haviam entrado no processo de redução do crescimento populacional.

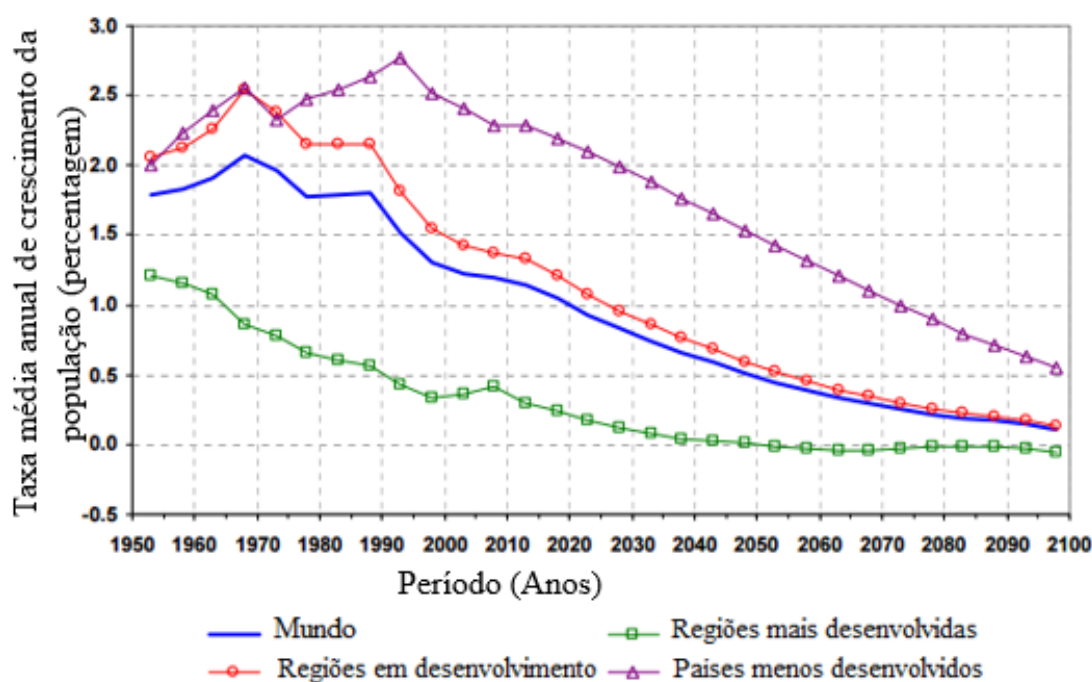


Figura 1.5 – Taxas de crescimento médio anuais pelo mundo, com projeção até 2100.

Fonte: UNITED NATIONS (2013).

Sendo assim, observa-se que o crescimento populacional em si não pode ser considerado o único e exclusivo motivo para os dilemas ambientais que emergiram ao longo do século XX (HOGAN *et al.*, 2010).

Nesse contexto, vem ganhando cada vez mais força a ideia de que os grandes problemas ambientais advêm de ações antrópicas do homem no espaço ao longo do tempo como, por exemplo, o processo de urbanização e atual tendência de crescimento dos grandes centros urbanos.

A urbanização é um processo caracterizado pela alteração das características, tanto do espaço quanto da população, que deixam de ter aspectos rurais para passarem a ter atributos urbanos. Este processo é o responsável pela formação das grandes cidades, e pode ocorrer de forma rápida ou gradual, planejada ou desordenada.

Um espaço urbaniza-se quando passa a ter seus padrões de uso e ocupação do solo alterados, deixando suas feições rurais, caracterizadas por extensas áreas destinadas à agricultura e pecuária e pela dispersão de seus habitantes em grandes lotes rurais; para passar a ter algum tipo de infraestrutura e organização urbana, marcadas, principalmente, pela impermeabilização de áreas, pela disponibilização de algum tipo de serviço de saneamento básico e pelo adensamento significativo de habitantes em pequenos espaços.

Uma população, por sua vez, tendo seu desenvolvimento alinhado com o avanço econômico e tecnológico, acaba sendo o agente responsável, de acordo com seus anseios, pela transformação do espaço rural em urbano. Essa população, que se desenvolve de modo a formar núcleos adensados, detentores de atividades industriais e comerciais, e que ocupa e altera o espaço de modo a fornecer infraestruturas que proporcionem melhor qualidade de vida, torna-se uma população urbana e o, espaço, por sua vez, uma cidade.

As cidades, fruto do processo de urbanização motivado pela população deste espaço, passaram a atrair, de maneira significativa, uma população, ainda rural, que não participou do processo de urbanização daquele espaço. Seja por busca de oportunidades, ou melhoria da qualidade de vida, a população rural que veio a tornar-se urbana com sua migração das áreas rurais para os centros urbanos, contribuem, até os dias atuais, para o crescimento de diversas cidades pelo mundo.

Historicamente, o processo de urbanização está intimamente relacionado com o desenvolvimento econômico. Observa-se que, na Europa e na América do Norte, a urbanização ocorreu de forma rápida, ao longo dos séculos XIX e XX, acompanhando a Revolução Industrial e o crescimento econômico que viveram na época. De maneira análoga, porém não tão intensa, pode-se também verificar, recentemente, uma associação entre urbanização, industrialização e desenvolvimento econômico em algumas partes da América Latina, Caribe e Oriente Asiático (UNITED NATIONS, 2015).

Considerando que as cidades espalhadas pelo mundo não começaram seu desenvolvimento a partir do mesmo ponto da linha do tempo da história da humanidade, e que, muito menos, se desenvolveram com a mesma celeridade, constata-se, hoje, certa desigualdade na evolução da urbanização entre os países. Na Figura 1.6 é possível observar, de maneira ilustrativa, este fato, de como a urbanização ocorreu de maneiras diferenciadas em diversos locais do mundo e como o processo avançou nas últimas décadas. Observando a Figura 1.6, verifica-se o aumento do número de países que aumentaram sua parcela urbana neste período.

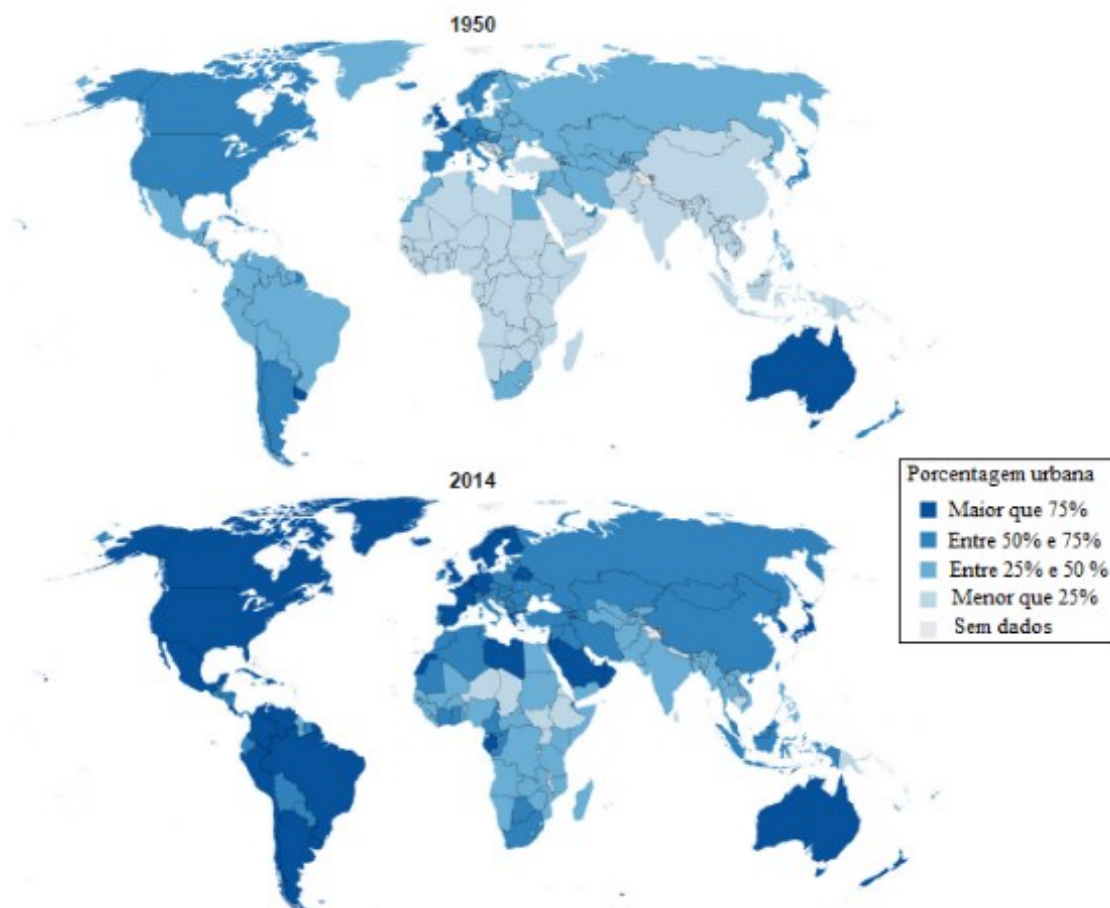


Figura 1.6 – A evolução desigual da urbanização ao redor do mundo, entre 1950 e 2014.

Fonte: UNITED NATIONS (2015).

De acordo com United Nations (2015), em 2007, pela primeira vez na história, a população urbana do mundo excedeu a rural, sendo que, atualmente, estima-se que cerca de 54% da população mundial resida nos grandes centros urbanos. Na Figura 1.7 é apresentado um gráfico através do qual é possível observar a evolução das populações urbana e rural do mundo, verificada no período de 1950 até 2014, e estimada para o período de 2015 até 2050. Nota-se que a tendência, para os próximos anos, é que aumente o número de habitantes vivendo em áreas urbanizadas.

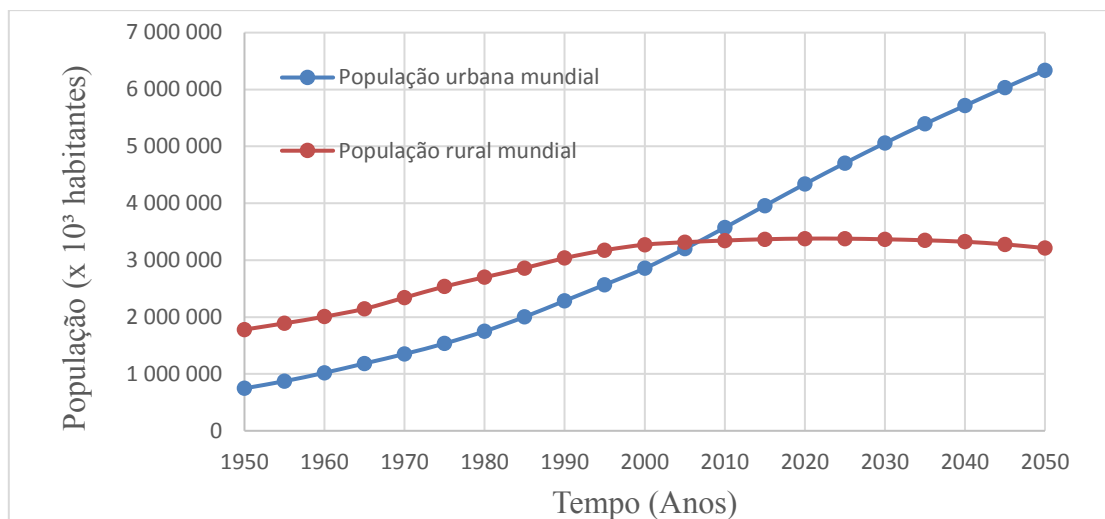


Figura 1.7 – Evolução da população rural e urbana no mundo, período de 1950-2050.

Fonte: UNITED NATIONS (2015).

No Brasil, na janela de tempo em que se faz essa observação, apenas por pouco tempo a população rural foi superior a urbana. Segundo os dados apresentados pela United Nations (2015), e representados no gráfico da Figura 1.8, nota-se que apenas no período da década de 50 até meados da década de 60 é verificada a supremacia da população rural, caracterizando a rapidez no processo de urbanização das cidades brasileiras. Cabe ressaltar que este gráfico retrata apenas o período de 1950 até 2014, e apresenta estimativas para o período de 2015 a 2050.

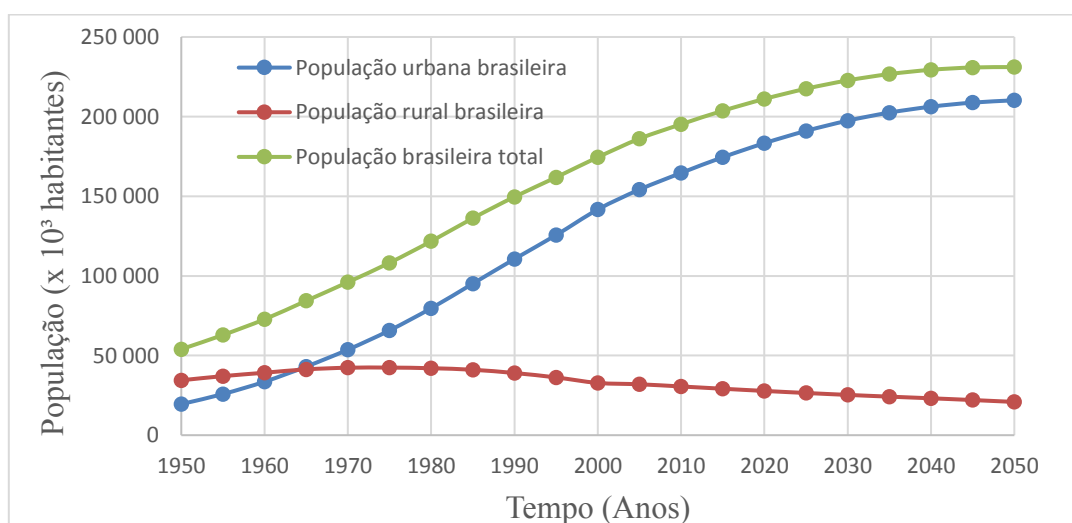


Figura 1.8 – Evolução da população rural e urbana no Brasil, período de 1950-2050.

Fonte: UNITED NATIONS (2015).

De acordo com o IPEA (2006), nos últimos anos, o Brasil acomodou sua crescente população tanto com o crescimento de cidades já existentes quanto com o surgimento de novas. Isto teve como resultado o fato de que, conforme contabilizado no censo de 2010 realizado pelo IBGE, cerca de 84% da população brasileira vive em áreas urbanas.

Observa-se, portanto, uma tendência de crescimento da população urbana e, por sua vez, a expansão das cidades, no Brasil e no mundo. Sem o devido planejamento e organização, tal expansão acontece de modo desordenado e provoca uma série de problemas no espaço urbano, como, por exemplo, a favelização, o aumento da geração de resíduos sólidos, a degradação de corpos hídricos, e as inundações urbanas. Torna-se, portanto, indispensável a adoção de práticas para tentar controlar e ordenar o inchamento das cidades ou reduzir e, talvez até mitigar, os impactos provenientes deste crescimento.

Assim, como o processo de urbanização traz consigo uma série de problemas nos quais destacam-se, principalmente, a degradação do ambiente natural e o consumo de recursos naturais, em meados do século XX, principalmente em países desenvolvidos, começou a surgir uma certa preocupação sobre as consequências dos impactos gerados pelo homem no seu processo de desenvolvimento.

Pode-se mencionar, como um dos primeiros exemplos da conscientização dessa problemática, a criação do Clube de Roma, nos anos 60 do século XX, que tinha como objetivo promover debates e estudos sobre a situação em que o mundo estava e o que era esperado para o futuro da humanidade. Em “Os limites do crescimento” (do inglês, *The Limits to Growth*), publicado em 1972, foram apresentadas as possíveis consequências para o futuro da humanidade, considerando o modelo de crescimento que eram praticados à época pelos países, e o alerta de que deveriam ser reduzidos os níveis de consumo de recursos naturais para que os mesmos não se esgotassem (MEADOWS *et al.*, 1972).

Nesse contexto, surge o conceito de desenvolvimento sustentável e sustentabilidade em diversas áreas relacionadas ao desenvolvimento social e econômico da população. Sustentabilidade é um termo de inúmeras acepções numa amplitude de interpretações que podem ser conflituosas (SOUZA *et al.*, 2005). Diversos são os conceitos atribuídos à sustentabilidade, conforme apresentados no Quadro 1.1.

### Quadro 1.1 – Definições de sustentabilidade.

Fonte: Elaborado pelo autor, com base nas referências indicadas.

*“Desenvolvimento sustentável é aquele que atende as necessidades das gerações atuais sem comprometer a capacidade das gerações futuras de atenderem às suas necessidades e aspirações” (UNITED NATIONS, 1987).*

*“O verdadeiro objetivo do desenvolvimento é melhorar a qualidade de vida humana. Ser um processo que permita aos seres humanos realizarem seu potencial plenamente e levar vidas dignas e satisfatórias. O crescimento econômico é uma parte importante do desenvolvimento, mas não pode ser um objetivo em si mesmo, nem pode continuar indefinidamente. O desenvolvimento só é real se torna nossas vidas melhores” (IUCN; UNEP; WWF, 1991).*

*“Sociedades sustentáveis são aquelas que conseguem lidar com certo grau de incerteza e insegurança, mantendo seu futuro num patamar controlado, com crescimentos que tendem à estabilidade e que possuem ações de médio e longo prazo bem definidas” (HOGAN et al., 2010).*

*“Propõe-se a ser um meio de configurar a civilização e atividade humanas, de tal forma que a sociedade, os seus membros e as suas economias possam preencher as suas necessidades e expressar o seu maior potencial no presente, e ao mesmo tempo preservar a biodiversidade e os ecossistemas naturais, planejando e agindo de forma a atingir pró-eficiência na manutenção indefinida desses ideais” (DICIONARIO INFORMAL, 2015).*

Pode-se constatar, portanto, a grande preocupação da humanidade com os danos que já foram causados ao meio ambiente natural, gerando, assim, uma conscientização de que a continuação do desenvolvimento só pode dar-se se forem levados em consideração os princípios associados a sustentabilidade.

No âmbito deste trabalho, ganha destaque o telhado verde, uma tecnologia que está inserida no rol de técnicas compensatórias que podem ser adotadas em projetos de drenagem urbana com enfoque sustentável; e que vem ficando cada vez mais em evidência como uma boa prática a ser adotada na construção civil, área que vem buscando, cada vez mais, inserir práticas sustentáveis, como esta, em projetos de infraestrutura, de empreendimentos e em sua cadeia produtiva.

### 1.2.3 Drenagem urbana sustentável

Durante muitos anos, tanto no Brasil como em outros países, a drenagem urbana das grandes metrópoles foi abordada de maneira acessória, tanto no contexto do parcelamento do solo para usos urbanos como no provimento de serviços de saneamento básico. O aumento das áreas urbanizadas e, conseqüentemente, impermeabilizadas, ocorreu a partir das zonas mais baixas, próximas às várzeas dos rios ou a beira-mar, em direção a colinas e morros, em face da necessária interação da população com os corpos hídricos (CANHOLI, 2014).

A urbanização provoca alterações significativas em alguns componentes do ciclo hidrológico. Entre as alterações destacam-se: a redução na taxa de infiltração e o aumento no escoamento superficial. Estes dois fenômenos ocorrem na grande maioria das vezes simultaneamente, resultando em problemas de enchentes e inundações devido ao aumento e aceleração do pico de vazão em bacias (SILVA *et al.*, 2015).

Os problemas de enchentes e inundações, por muito tempo, foram tratados a partir da utilização de soluções localizadas, como a construção de canais e galerias, que levam os impactos das cheias para locais a jusante. Esse tipo de solução, conforme Canholi (2014), apenas transfere a “alocação de espaços” a serem inundados. Com o passar das décadas, essas soluções tradicionais de combate aos problemas relacionados à drenagem das cidades foram se mostrando, muitas vezes, ineficazes quando existentes, ou inexequíveis, quando propostas, visto o alto custo envolvido.

A necessidade de uma nova visão, mais abrangente e sistêmica, capaz de oferecer uma maior sustentabilidade aos processos de controle de inundações se mostra, então, fundamental e urgente. Este fato promoveu, durante a década de 1970, a mudança da concepção tradicional de gestão de águas pluviais, baseada em canalizações, para uma abordagem de armazenamento, com foco sobre a detenção das águas pluviais e recarga dos lençóis freáticos (BAHIENSE, 2013).

Em drenagem urbana, sustentabilidade implica que as inundações urbanas não podem ser transferidas no espaço ou no tempo. Sistemas de drenagem urbana precisam ser planejados de forma integrada com o crescimento urbano e as soluções de drenagem devem ser integradas com a paisagem urbana (MIGUEZ *et al.*, 2007).

Nesse contexto, percebe-se cada vez mais a importância da adoção de sistemas de drenagem urbana sustentáveis, que busquem integrar-se com o desenvolvimento das cidades, e que tenham como objetivo reduzir os impactos sobre o ciclo hidrológico,

atuando tanto nos processos de armazenamento, quanto nos de infiltração, que comumente são significativamente reduzidos no processo de urbanização.

A drenagem urbana sustentável é um campo de pesquisa multidisciplinar cujos projetos requerem o conhecimento de especialistas de diversas áreas (ZHOU, 2014), como a engenharia, arquitetura, biologia e ecologia, por exemplo.

Pelo mundo, observa-se a existência de vários conceitos, termos, ou até mesmo os populares “jargões” do meio técnico, que estão relacionados com a temática da drenagem urbana com enfoque sustentável. Alguns exemplos desses conceitos estão apresentados no Quadro 1.2. Tais conceitos serão abordados de maneira mais detalhada no Capítulo 2, que trata sobre drenagem urbana.

No Brasil, existem publicações técnicas importantes que trazem conceitos e a aplicabilidade de técnicas compensatórias (BAPTISTA *et al.*, 2015; MIGUEZ *et al.*, 2015), ou “medidas não convencionais” (CANHOLI, 2014), em projetos de drenagem urbana, com o objetivo de tentar recuperar processos de infiltração e armazenamento que são normalmente reduzidos no processo de urbanização.

Os telhados verdes, foco do presente estudo, é uma tecnologia que visa estabelecer, ou recuperar, áreas verdes que foram subtraídas com a impermeabilização nos centros urbanos. Tal tecnologia vai ao encontro de diversas premissas estabelecidas dentro do escopo da drenagem urbana sustentável.

#### Quadro 1.2 – Terminologias utilizadas em drenagem urbana ao redor do mundo.

Fonte: FLETCHER *et al.* (2014).

|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                          |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <p><b>BMPs</b> (<i>Best Management Practices</i>)</p> <p><b>LID</b> (<i>Low Impact Development</i>)</p> <p><b>ATs ou CTs</b> (<i>Alternative Techniques ou Compensatory Techniques</i>)</p> <p><b>SC</b> (<i>Source Control</i>)</p> <p><b>WSUD</b> (<i>Water Sensitive Urban Design</i>)</p> <p><b>WSC</b> (<i>Water Sensitive Cities</i>)</p> <p><b>IUWM</b> (<i>Integrated Urban Water Management</i>)</p> <p><b>GI</b> (<i>Green Infrastructure</i>)</p> <p><b>SUDS</b> (<i>Sustainable Urban Drainage Systems</i>)</p> <p><b>LIUDD</b> (<i>Low Impact Urban Design and Development</i>)</p> <p><b>SCMs</b> (<i>Stormwater Control Measures</i>)</p> |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|

### 1.2.4 Telhados verdes

As coberturas são áreas geralmente subutilizadas nos centros urbanos. Os telhados verdes, no que diz respeito a seus benefícios relacionados à drenagem urbana, trazem consigo a ideia de proporcionar às cidades, áreas nas quais possam ser estabelecidos, ou recuperados, alguns processos do ciclo hidrológicos que existiam antes do avanço da urbanização.

Nesse aspecto, destaca-se que as coberturas verdes podem proporcionar o aumento de áreas de infiltração, das taxas de interceptação vegetal e da evapotranspiração na bacia.

De modo simples, a tecnologia de telhados verdes consiste na aplicação de um jardim em uma cobertura. Este jardim pode ser instalado com a aplicação de uma série de camadas sobre a superfície de uma laje, ou ainda, com a disposição de uma série de placas, com módulos de jardins.

A Figura 1.9 apresenta um esquema típico de cobertura verde que pode ser aplicada a uma laje: a parte esquerda da Figura ilustra a ideia de trazer jardins às coberturas e, a parte da direita, ilustra as camadas mais comuns que são utilizadas na implantação de uma cobertura verde. Basicamente, este típico esquema de cobertura é composto pelas seguintes camadas: estrutura de suporte (laje), camada impermeabilizante, camada de drenagem, membrana filtrante, substrato e vegetação. Já a Figura 1.10 mostra uma foto de um telhado verde composto por placas modulares.

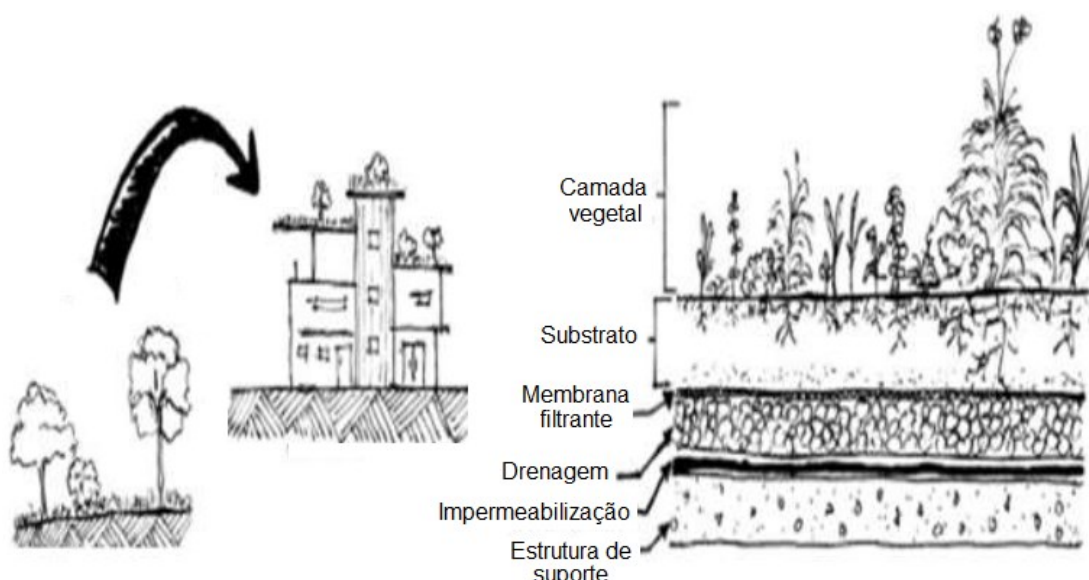


Figura 1.9 – Esquema das composições típicas de uma cobertura verde.

Fonte: CAETANO *et al.* (2010).



Figura 1.10 – Telhado verde composto por placas modulares (Sistema Modular da empresa Studio Cidade Jardim).

Fonte: STUDIO CIDADE JARDIM, acesso em 13 de novembro de 2015.

Os sistemas de coberturas verdes interferem na quantidade e qualidade do escoamento da água de chuva proveniente das coberturas. Vários estudos comprovam o potencial desse sistema no controle de escoamento de águas pluviais. Seu desempenho em relação à retenção e detenção da água de chuva pode ser avaliado em função da intensidade da chuva, composição e profundidade do substrato, e do tipo de sistema empregado. As coberturas verdes podem retardar e diminuir os picos de vazão de escoamento superficial, aliviando a demanda sobre o sistema urbano de drenagem. (TEIXEIRA *et al.*, 2011).

Além dos benefícios relacionados ao controle da geração de escoamento superficial, proporcionando o alívio para as redes de drenagem existentes, as coberturas verdes também podem trazer uma série de vantagens sociais, econômicas e ambientais, além de benefícios ao proprietário, ao ambiente e a comunidade como um todo.

Podem ser mencionados, como exemplos de vantagens e benefícios, o fato das coberturas verdes promoverem o conforto térmico para os espaços interiores das edificações (COMA *et al.*, 2016; PÉRES *et al.*, 2015; CATUZZO, 2013; QIN *et al.*, 2012; FERRAZ, 2012; LOPES, 2007), a diminuição do efeito das “ilhas de calor” nas cidades (CATUZZO, 2013; ROWE, 2011; SANTAMOURIS, 2014; SUSCA *et al.*, 2011), a melhoria da qualidade do ar no entorno (CATUZZO, 2013; BAIK *et al.*, 2012, SPEAK *et al.*, 2012; ROWE, 2011; YANG *et al.*, 2008), a absorção de ruídos (CONNELLY e HODGSON, 2015; CONNELLY e HODGSON, 2013; YANG *et al.*, 2012;

RENTERGHEM e BOTTELDOOREN, 2009) , a preservação ecológica (LUNDHOLM, 2015; WILLIAMS *et al.*, 2014; CANERO e REDONDO, 2010), e o estabelecimento da agricultura urbana (OLIVEIRA, 2009 e PIMENTEL DA SILVA *et al.*, 2011). Muitas referências a respeito dessas e outras vantagens das coberturas verdes podem ser encontradas no trabalho de Berardi *et al.* (2014).

Dos reveses das primeiras iniciativas até a aplicação no século XXI, os sistemas de coberturas verdes receberam aprimoramento tecnológico e superaram as dificuldades de implementação com uma crescente indústria de produtos, técnicas e serviços, especialmente na Alemanha, Canadá e EUA. Vários fatores vêm trazendo à pauta o uso de vegetação sobre lajes: a conformação urbana, com a valorização e a escassez dos terrenos; a impermeabilização dos solos e as ilhas de calor urbano; os imperativos financeiros e ambientais de redução do consumo energético das edificações; e a carência de áreas verdes urbanas, entre outros. Os exemplos multiplicam-se pelo mundo, mas ainda são pouco presentes na realidade brasileira (NASCIMENTO e SCHIMID, 2008).

### **1.2.5 Sustentabilidade na construção civil**

A indústria da construção civil é a responsável pela instauração de aglomerados urbanos e pela disponibilização da infraestrutura necessária para promover o desenvolvimento de um determinado espaço. As atividades de sua tipologia induzem, na maioria dos casos, alterações substanciais no ambiente. Trata-se de uma indústria altamente consumidora de recursos naturais (PINHEIRO, 2003).

Tradicionalmente, uma construção só era competitiva se tivesse o nível de qualidade exigido pelo projeto, se utilizasse sistemas construtivos que otimizassem a produtividade durante a fase de construção e que, por conseguinte, conduzisse à diminuição do período de construção, permitindo uma maior rapidez na recuperação de investimento e sem alterar significativamente os custos da construção (FERNANDES, 2015).

A procura pelo desenvolvimento sustentável, principalmente a partir da década de 60, passou a ser um fator importante a ser considerado pela sociedade em sua atividade econômica. O setor da construção civil, com grande importância no cenário econômico, também passou a fazer parte desta busca, como forma de adequação ao novo modelo de desenvolvimento que começou a ser aprimorado (JESUS, 2014).

Destaca-se que o desenvolvimento sustentável não é apenas uma bandeira dos ecologistas e já se constitui como uma preocupação real para a indústria da construção, quer a nível nacional como internacional. A indústria da construção devido à grande quantidade de recursos que consome, à quantidade de resíduos que produz, à sua implicação na economia dos países e à sua inter-relação com a sociedade, não ficou alienada dos objetivos e metas que regem o desenvolvimento sustentável (MATEUS, 2004).

Ainda de acordo com Mateus (2004), o termo “construção sustentável” foi proposto pela primeira vez por Kibbert (1994) na Primeira Conferência Mundial sobre Construção Sustentável (*First World Conference for Sustainable Construction*), realizada na Florida.

No que diz respeito às práticas sustentáveis na construção civil, em novembro de 1994, na Primeira Conferência Mundial sobre Construção Sustentável, Kibert (1994) propõe seis princípios para a sustentabilidade na construção. Tais princípios estão elencados no Quadro 1.3.

#### Quadro 1.3 – Princípios para a sustentabilidade na construção.

Fonte: KIBERT (1994).

- |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                              |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <ol style="list-style-type: none"><li>1. Minimizar o consumo de recursos (Conservar);</li><li>2. Maximizar a reutilização dos recursos (Reutilizar);</li><li>3. Utilizar recursos renováveis e recicláveis (Reciclar);</li><li>4. Proteger o ambiente natural;</li><li>5. Criar um ambiente saudável e não tóxico;</li><li>6. Fomentar a qualidade ao criar o ambiente construído.</li></ol> |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|

Tomando como foco as questões referentes aos projetos, observa-se, atualmente, que a construção civil tem buscado a adoção de técnicas compensatórias e práticas sustentáveis em seus empreendimentos de forma a minimizar o impacto da ação antrópica no meio ambiente, hoje restrito, dos grandes espaços urbanos (GARRIDO NETO, 2012).

Nesse contexto, pode-se destacar a adoção de coberturas verdes, tecnologia já bastante popular em países desenvolvidos como a Alemanha, EUA e Canadá, que podem ser consideradas tanto uma técnica compensatória em drenagem urbana, como uma prática sustentável no âmbito da construção civil, visto que vai ao encontro dos princípios de sustentabilidade elencados por Kibert (1994).

As coberturas verdes podem promover a absorção de ruídos, o conforto térmico em ambientes interiores e a melhoria de alguns parâmetros da água de chuva captada, que pode ser aproveitada para fins não potáveis em edificações. Esses benefícios podem favorecer o usuário com contas de luz e de água mais baratas e a sociedade, como um todo, com o incremento de áreas verdes nas cidades e melhoria do microclima local, indo ao encontro dos princípios de sustentabilidade na construção civil.

Além disso, é indiscutível o ganho de ambientes naturais dentro das cidades, que permitem a criação de áreas de lazer, destinadas ao contato do ser humano com a natureza, e a manutenção, mesmo que muitas vezes pequena, de uma biodiversidade no meio urbano.

### **1.2.6 Modelo matemático como apoio ao estudo**

Ambientes urbanos podem ser responsáveis por uma gama muito variável de possibilidades de escoamentos superficiais quando o sistema de drenagem falha utilizando suas próprias estruturas de forma improvisada. É muito comum que grandes áreas inundadas e estruturas urbanas passem a interagir com o sistema de drenagem, criando uma rede de escoamentos não planejada que inclui superfícies planas e ruas, ao mesmo tempo em que vários reservatórios indesejados são adicionados ao sistema, com parques, praças públicas e edifícios temporariamente retendo água. Esta situação é difícil de ser avaliada sem o apoio de um modelo matemático. Entretanto, modelos de drenagem urbana, relativos à simulação da rede de drenagem ramificada, podem conduzir a uma representação insuficiente da realidade física, pois os escoamentos superficiais podem desempenhar um papel importante no processo (MIGUEZ, 2001).

Esta dissertação propõe o uso do Modelo de Células – MODCEL (MIGUEZ, 2001; MASCARENHAS e MIGUEZ, 2002; MIGUEZ *et al.*, 2011) para avaliar os impactos da adoção de coberturas verdes, na escala da bacia hidrográfica.

O MODCEL é um modelo gratuito, desenvolvido na UFRJ, com uma interface simples, mas funcional, e capaz de representar sistemas complexos. Sua construção foi baseada no conceito de células de escoamento. As células interagem umas com as outras compondo uma rede de escoamentos bidimensional, conectada por diferentes leis hidráulicas. Cada célula também realiza uma transformação chuva-vazão. A malha de células resulta em um modelo hidrodinâmico em *loop*, em uma representação espacial que cobre toda a área da bacia e conecta escoamentos das planícies, canais e galerias, por

exemplo. Entretanto, todas as relações matemáticas escritas são unidimensionais. A principal relação de escoamento é a equação dinâmica de Saint-Venant, escrita em sua forma conservativa (VERÓL *et al.*, 2013).

### 1.3 MOTIVAÇÃO, ESCOLHA E RELEVÂNCIA

A tecnologia de telhados verdes tem ganhado atenção da comunidade técnica devido ao seu potencial múltiplo em contribuir na mitigação dos danos causados pelas enchentes no meio urbano, em prover uma fonte de água alternativa, elevar a biodiversidade urbana, reduzir gastos com o consumo de energia, entre outros.

Observa-se que as coberturas verdes já são amplamente utilizadas em cidades de países desenvolvidos como, por exemplo, Stuttgart, na Alemanha, que já possuía, em 2011, naturação em 60% de suas coberturas, conforme mostra a notícia na Figura 1.11.

## Stuttgart tem 60% de cobertura verde

Cidade alemã investe desde os anos 80 em cobertura vegetal para evitar formação  
de ilhas de calor

Figura 1.11 – Notícia publicada no *site* “Estadão”, em 23/02/2011.

Fonte: BONFIGLIOLI (2011).

Destaca-se a grande produção científica sobre telhados verdes em países na América do Norte, Europa e Ásia, que, de acordo com Ohnuma Júnior *et al.* (2015), concentram cerca de 90% dos experimentos publicados em periódicos, conforme indica o gráfico da Figura 1.12, obtido a partir da análise de cerca de 151 artigos nacionais e internacionais sobre telhados verdes publicados em mais de 70 revistas científicas a partir das ferramentas *Science Direct* e *Google Scholar*, entre 2001 e 2014. Fica também evidente, no gráfico da Figura mencionada, a carência de estudos sobre esta tecnologia em países de clima tropical.

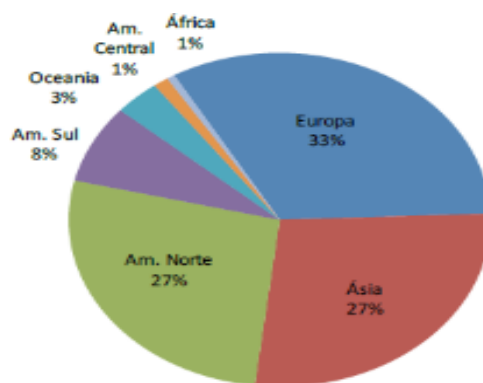


Figura 1.12 – Distribuição das pesquisas sobre telhados verdes pelo mundo.

Fonte: OHNUMA JÚNIOR *et al.* (2015).

A presente pesquisa tem como motivação a carência, ainda existente, de estudos experimentais sobre a temática de coberturas verdes em países de clima tropical, como o Brasil. Somado a isso, este estudo também propõe a aplicação de resultado, obtido em escala experimental, no contexto de uma bacia hidrográfica. Esta última avaliação não é muito comum de ser realizada, conforme mencionado por Versini *et al.* (2014).

A força motivadora para este estudo é o processo de urbanização desordenado pelo qual passou o Município do Rio de Janeiro, onde diversos rios situados na cidade tiveram seus espaços meandantes e suas planícies de inundação impermeabilizadas e alteradas, sendo, portanto, constantemente assolado por problemas de alagamentos e inundações. Na Figura 1.13 estão apresentadas várias notícias atuais sobre esses problemas que ainda estampam os noticiários da cidade.

### Após chuva, Rio volta ao estágio de normalidade

Bairros da Zona Norte e Centro foram atingidos

POR O GLOBO  
23/03/2016 15:43 / atualizado: 24/03/2016 5:23

### Sirenes da Defesa Civil são acionadas em sete comunidades do Rio por causa da chuva

Santa Teresa, Botafogo e Urca são os bairros mais atingidos

POR O GLOBO  
23/03/2016 18:36 / atualizado: 23/03/2016 22:40

### Chuva forte chega ao Rio no fim do dia

A previsão é de pancadas nas próximas horas. Na Baixada, cidades registram alagamentos e falta de luz

POR O GLOBO  
23/03/2016 19:15 / atualizado: 23/03/2016 21:41

### Chuva causa alagamento em dois andares da Biblioteca Nacional

Segundo a direção, acervo histórico não foi atingido pelas águas

POR RENNAN FRANÇA  
23/03/2016 18:55 / atualizado: 23/03/2016 19:57

Figura 1.13 – Notícias publicadas no *site* “O Globo”, em 2016.

Fonte: O GLOBO (2016a, 2016b, 2016c, 2016d).

Sendo assim, busca-se aqui avaliar como as coberturas verdes, como opção de técnica compensatória a ser adotada em drenagem urbana, poderiam ser uma tecnologia útil para reduzir os alagamentos e inundações que assolam uma bacia hidrográfica urbanizada situada na cidade do Rio de Janeiro, com características de clima tropical.

Escolheu-se a bacia do rio Joana como caso de estudo devido aos grandes problemas gerados quando ocorrem tempestades na bacia, como pode ser visto na matéria apresentada na Figura 1.14. Além disso, essa é também uma bacia já bastante estudada no âmbito de projetos de pesquisa no Laboratório de Hidráulica Computacional (LHC) da COPPE/UFRJ, o que permite compartilhar dados já levantados e resultados de outras pesquisas.



Figura 1.14 – Notícia publicada no *site* “O Globo”, em 22/01/2013.

Fonte: O GLOBO (2013).

Espera-se que esta pesquisa se torne relevante para incentivar que mais estudos sobre telhados verdes sejam realizados em cidades brasileiras, contribuindo, cada vez mais, para o aumento do conhecimento científico e prática desta tecnologia no país.

## **1.4 OBJETIVOS**

### **1.4.1 Objetivo geral**

A presente pesquisa tem como objetivo geral estudar o comportamento de um telhado verde em bancada experimental, para, a partir daí, compreender e modelar matematicamente o seu comportamento, para posterior extrapolação desta interpretação para a escala da bacia, também com o apoio de modelagem matemática. Com este estudo, pretende-se subsidiar a avaliação do impacto da adoção de telhados verdes em uma bacia hidrográfica urbanizada, considerando um coeficiente de geração de escoamento

superficial obtido a partir de ensaios experimentais realizados no protótipo de cobertura verde desenvolvido em laboratório.

#### **1.4.2 Objetivos específicos**

A primeira etapa do trabalho consiste na realização de ensaios experimentais em um protótipo de cobertura verde, com determinada configuração, cujo objetivo é avaliar seu desempenho frente a duas diferentes faixas de intensidades de chuva (de aproximadamente 50 e 100 mm/h), geradas a partir de um simulador de chuvas, com a verificação das condições iniciais de umidade do substrato.

A segunda etapa da pesquisa trata-se de um estudo de caso, que pretende avaliar o efeito da adoção de coberturas verdes, nos locais onde sua implantação é possível, na bacia do rio Joana, localizada no Município do Rio de Janeiro. Tal avaliação será realizada a partir da concepção física da bacia em tela através de um modelo matemático, o MODCEL, no qual serão comparados dois cenários para determinadas chuvas de projeto: um considerando a bacia em seu estado atual e outro considerando a aplicação de telhados verdes nas edificações em que foi identificado em que isto seria possível.

### **1.5 METODOLOGIA RESUMIDA**

De forma resumida, a metodologia de desenvolvimento deste trabalho encontra-se estruturada a partir das seguintes etapas: em primeiro lugar, foi realizada a revisão bibliográfica, na qual as temáticas de “drenagem urbana sustentável” e “telhados verdes” foram pesquisadas através de livros, monografias, dissertações de mestrado, teses de doutorado e artigos científicos, que estão especificados na bibliografia ao final deste texto. Em seguida, foi realizada a campanha de ensaios experimentais, acompanhada pela avaliação dos dados e resultados obtidos e da modelação matemática do comportamento do protótipo.

O próximo passo foi o mapeamento dos locais da bacia onde seria possível a implantação de coberturas verdes, seguido da adaptação do modelo matemático da bacia do rio Joana, a partir do modelo já calibrado e validado do canal do Mangue, para simulação dos cenários pretendidos e, por fim, análise e consolidação dos resultados. De maneira mais detalhada, a metodologia é melhor apresentada no Quadro 1.4.

Quadro 1.4 – Metodologia da pesquisa.

**Síntese da metodologia**

1. Revisão bibliográfica constante dos seguintes temas:
  - 1.1. Drenagem urbana sustentável;
  - 1.2. Telhados verdes.
2. Concepção e construção do protótipo de cobertura verde;
3. Acompanhamento, ao longo do tempo da pesquisa, de alguns aspectos funcionais dos telhados verdes, com a observação do protótipo experimental, no que diz respeito à necessidade de manutenção, proliferação de mosquitos e resistência ao clima tropical;
4. Planejamento da campanha dos ensaios experimentais e definição dos arranjos a serem estudados;
5. Realização dos ensaios experimentais;
6. Avaliação dos resultados experimentais obtidos na campanha;
7. Modelação do comportamento do protótipo de telhado verde;
8. Determinação dos critérios para identificação de áreas passíveis de usos do telhado verde;
9. Verificação das áreas da bacia nas quais é possível a implantação de coberturas verdes;
10. Ponderação, para cada célula que compõe a bacia do rio Joana, o valor do coeficiente de transformação de chuva em vazão, considerando os valores já existentes no modelo calibrado, e os referentes às áreas sem cobertura e com cobertura, sendo que, para estas últimas, considerando a possibilidade da implantação de natação;
11. Adaptação, somente na área da bacia do rio Joana, do modelo matemático da bacia do canal do Mangue, já calibrado, com o objetivo de incluir as constatações realizadas na fase experimental;
12. Simulação de dois cenários para duas chuvas de projeto na bacia, com tempos de recorrência de 10 e 25 anos: um considerando a bacia em seu estado atual e outro considerando a aplicação de telhados verdes nas edificações mapeadas;
13. Comparação dos cenários e verificação dos benefícios que a adoção de coberturas verdes na bacia do rio Joana pode trazer ao local de interesse.

## 1.6 A BANCADA EXPERIMENTAL E O PROTÓTIPO DE COBERTURA VERDE ONDE SERÃO REALIZADOS OS ENSAIOS EXPERIMENTAIS

O protótipo de cobertura verde, palco dos ensaios experimentais da presente pesquisa, está localizado em uma bancada experimental construída, no âmbito do projeto MAPLU, no Centro Experimental de Saneamento Ambiental da UFRJ – CESA/UFRJ, situado na Ilha do Fundão, cidade do Rio de Janeiro, conforme localização indicada na Figura 1.15.

O CESA/UFRJ é um laboratório de ensino, pesquisa e extensão, subordinado ao Departamento de Recursos Hídricos e Meio Ambiente (Drhima) da Escola Politécnica (EP/UFRJ) e tem como principal missão atender aos cursos de graduação e pós-graduação em Engenharia Civil e Engenharia Ambiental da UFRJ. Ocupando área de 2500 m<sup>2</sup> e localizado em um dos acessos principais da Cidade Universitária da UFRJ (Figura 1.16), o CESA/UFRJ teve origem no projeto UFRJ-HIDRO, conduzido no âmbito do Fundo Setorial de Recursos Hídricos (Edital MCT/FINEP/CT-HIDRO no.1). O CESA/UFRJ foi inaugurado em junho de 2004 (EP/UFRJ, 2015).

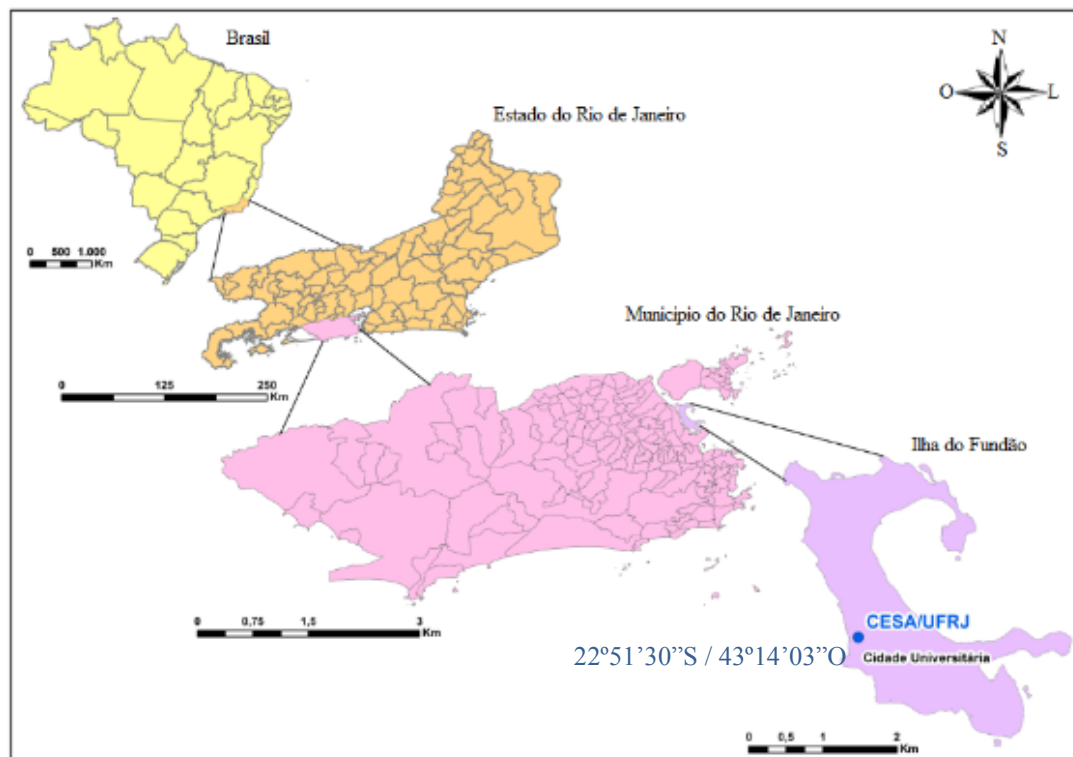


Figura 1.15 – Mapa com a localização do CESA/UFRJ.

Fonte: Elaborado pelo autor.



Figura 1.16 – Localização do CESA/UFRJ na Ilha do Fundão, com indicação da Linha Amarela, um dos principais acessos à Cidade Universitária.

Fonte: Elaborado pelo autor, com imagem do Google Earth ® (2015).

Na Figura 1.17 está apresentada a localização do protótipo de telhado verde, próximo das coordenadas de referência  $22^{\circ}51'30''\text{S}$  e  $43^{\circ}14'03''\text{O}$ , na bancada experimental e no CESA/UFRJ. De acordo com a classificação de Köppen, o local onde situa-se o protótipo está em região do grupo e tipo Aw, possuindo clima tropical, com estação seca no inverno e chuvas no verão (PEEL *et al.*, 2007).



Figura 1.17 – Localização da bancada experimental e do protótipo no CESA/UFRJ.

Fonte: Elaborado pelo autor, com imagem do Google Earth ® (2015).

A bancada experimental foi construída em área aberta do CESA/UFRJ, no período de março a julho de 2013, conforme relatado por Pontes (2013), buscando seguir o projeto que consta no Trabalho de Conclusão de Curso de Garrido Neto (2012).

Apresentando 5 módulos, separados e delimitados por paredes de alvenaria, com suas paredes internas e fundo impermeabilizados, a bancada experimental permite que nesses 5 espaços sejam implantados diversas concepções de pavimentos permeáveis e telhados verdes para a realização de ensaios experimentais. A Figura 1.18 apresenta uma foto da bancada experimental com a indicação dos 5 módulos.

Conforme também indicado na Figura 1.18, acoplados à bancada experimental estão dois equipamentos: a Caixa Pluviômetra, utilizada, principalmente, para medir os escoamentos oriundos de um determinado módulo alvo de estudo, e o Simulador de Chuvas, cuja função é produzir chuvas constantes e com intensidades conhecidas durante os ensaios sobre a área de um módulo. As características e o funcionamento do Simulador de Chuvas e da Caixa Pluviômetra encontram-se, respectivamente, nos Anexos I e II deste trabalho.

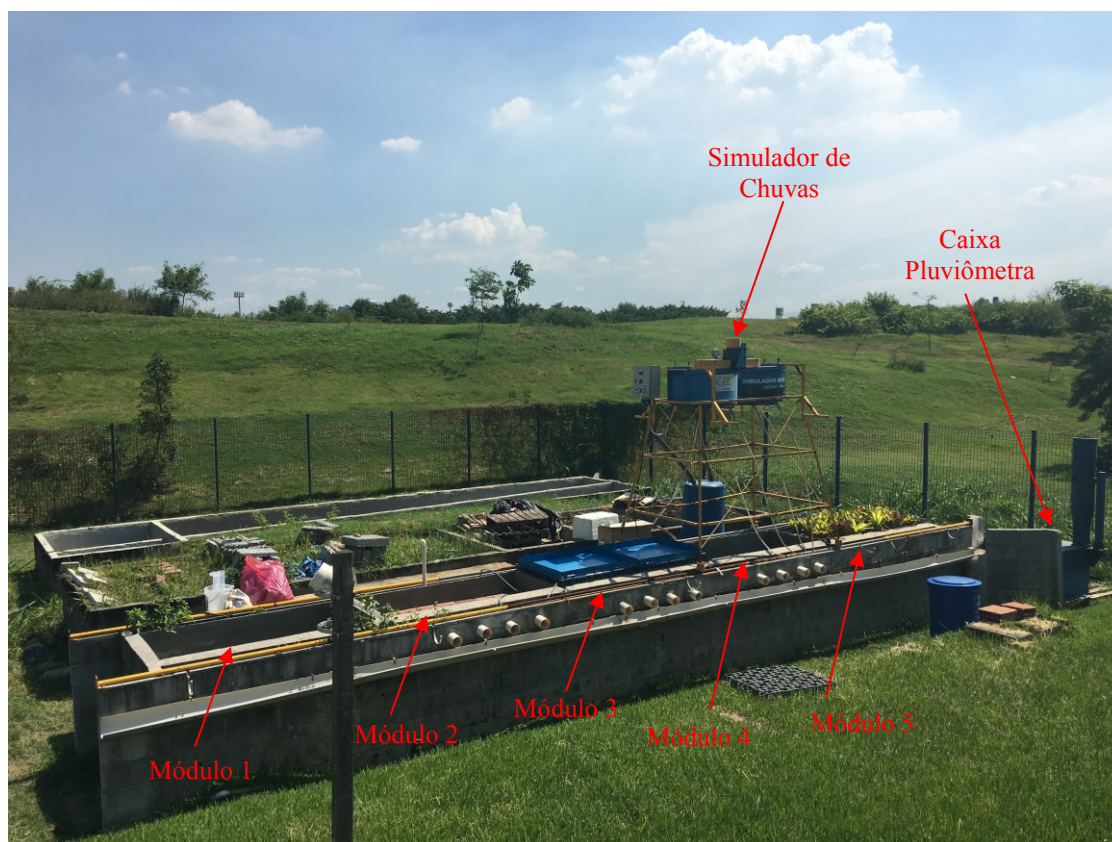


Figura 1.18 – Bancada experimental, com a indicação dos módulos e equipamentos.

Fonte: Acervo do autor (2016).



Tratando-se de uma das áreas mais ocupadas, mais centrais e que mais sofre com problemas de enchentes da cidade, a bacia do canal do Mangue, atualmente, foi alvo de diversas intervenções, executadas pela Prefeitura do Rio de Janeiro, por intermédio da Rio-Águas<sup>5</sup>, com o objetivo melhorar o escoamento das águas pluviais na região.

De acordo com a Rio-Águas (2016a), até o momento da confecção deste trabalho, foram construídos os reservatórios nas Praças da Bandeira (Figura 1.20), com capacidade de reservar 18.000 m<sup>3</sup>; Niterói (Figura 1.21), capaz de armazenar até 58.000 m<sup>3</sup>; e Varnhagen (Figura 1.22), na qual é possível reservar até 43.000 m<sup>3</sup> de água.

Além dos reservatórios das praças mencionadas, resta pendente o término das obras do túnel de desvio do rio Joana que, com 2.400 metros de extensão, será o maior túnel de águas pluviais do país. De acordo com notícias no início de 2016, a obra era para ter sido concluída após as Olimpíadas, conforme apresentado na Figura 1.23, porém, a intervenção ainda não foi concluída.



Figura 1.20 – Praça da Bandeira (localização: 22°54'40"S / 43°12'53"O).

Fonte: G1 (2015).

---

<sup>5</sup> **Fundação Instituto das Águas do Município do Rio de Janeiro, ou Rio-Águas:** órgão técnico de referência no manejo de águas pluviais urbanas do município do Rio de Janeiro, tendo como competências planejar, gerenciar e supervisionar ações preventivas e corretivas contra enchentes, entre outras atribuições. (Fonte: RIO-ÁGUAS, 2016a).



Figura 1.21 – Praça Niterói (localização: 22°54'57"S / 43°14'03"O).

Fonte: O DIA (2015).



Figura 1.22 – Praça Varnhagen (localização: 22°55'09"S / 43°14'04"O).

Fonte: RIO-ÁGUAS (2016b).

## **Desvio do Rio Joana só deve ser concluído dois meses depois dos Jogos de 2016**

Investigada na Lava-Jato, construtora Mendes Júnior desiste de obra, que havia sido  
anunciada como compromisso olímpico

Figura 1.23 – Notícia publicada no site “O Globo”, em 10/04/2016.

Fonte: O GLOBO (2016e).

A bacia do rio Joana é uma sub-bacia afluyente da bacia do canal do Mangue com de área de drenagem de, aproximadamente, 12 km<sup>2</sup>, o que corresponde à 29% da área total da bacia do referido canal. De acordo com Zampronio (2009), deste território, cerca da metade se encontra em regiões de encosta, enquanto a outra metade está em trechos de planície. Dentro do território da bacia estão os bairros do Grajaú, do Andaraí, grande parte do bairro de Vila Isabel e um trecho do bairro do Maracanã, conforme ilustra a Figura 1.24.

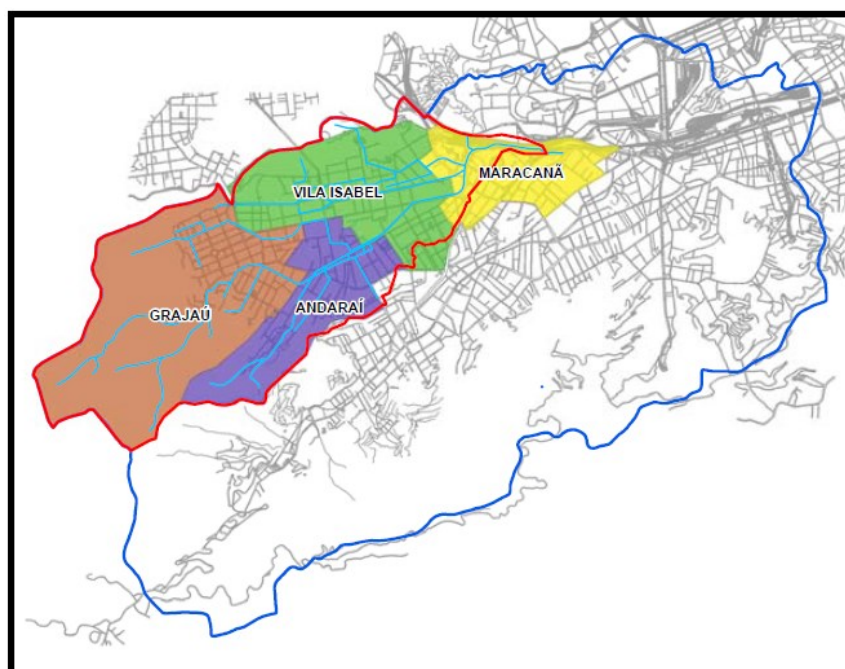


Figura 1.24 – Bacia do rio Joana (em vermelho) e os bairros que a mesma intercepta.

Fonte: ZONENSEIN (2007).

O rio Joana nasce junto ao Pico do Andaraí Maior, na Reserva Florestal do Grajaú, com aproximadamente 600 metros de altitude, a oeste da bacia do canal do Mangue. Seu estirão inicial denomina-se rio Perdido, na vertente vizinha ao sul recebe o rio Jacó e passa a chamar-se Joana. Acima da confluência com o rio Jacó, a bacia é quase toda ocupada por mata nativa densa e vegetação arbustiva com gramíneas (BORGES, 2013).

Na medida em que o rio Joana vai em direção ao rio Maracanã, onde deságua, recebe contribuições do rio Andaraí, do rio dos Urubus, de uma galeria que percorre pela *Boulevard* 28 de Setembro, e do rio dos Cachorros, conforme ilustrado na Figura 1.25.

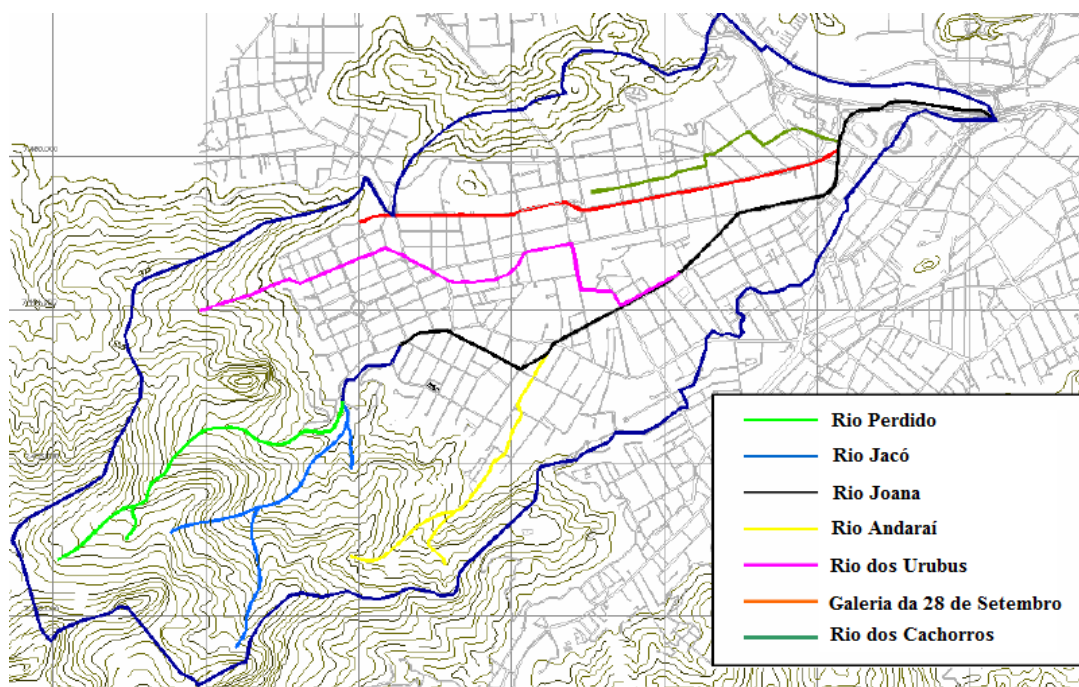


Figura 1.25 – Principais afluentes do rio Joana.

Fonte: NAGEM (2008).

Ao descer o bairro do Grajaú o curso d'água torna-se uma galeria urbana percorrendo área muito antropizada, reaparecendo como canal aberto na confluência das ruas Barão de Mesquita e Maxwell, quando recebe o rio Andaraí, no bairro do Andaraí, vindo do morro e favela do mesmo nome. Desse ponto em diante recebe as águas de drenagem dos bairros do Andaraí, Vila Isabel e parte da Tijuca, assim como da Serra do Engenho Novo, até um pouco antes do cruzamento com a linha ferroviária da Supervia, junto ao Campus da Universidade Estadual do Rio de Janeiro – UERJ, onde volta a ser capeado. Sua foz situa-se na confluência com o rio Maracanã, em frente à Estação de São Cristóvão, na cota 1,63 m, após fluir por 7,9 km (BORGES, 2013 *apud* UFRJ, 2002).

Encaixada em uma região de planície costeira e cercada por encostas do maciço da Tijuca, a bacia do rio Joana sofre regularmente com enchentes provocadas por chuvas convectivas típicas de verão. Esta situação decorre, em parte, desta característica da bacia, aliada a uma ocupação desordenada das suas encostas e a uma rede de drenagem antiga e hoje insuficiente, devido ao aumento e aceleração dos escoamentos superficiais, em virtude do próprio processo de urbanização. Na Figura 1.26 é possível observar, com o auxílio de imagem de satélite, o alto grau de urbanização na parte de planície da bacia do rio Joana, possuindo pouco mais da metade de sua área total densamente ocupada com áreas impermeabilizadas.



Figura 1.26 – Bacia hidrográfica do rio Joana.

Fonte: Autor e imagem do Google Earth ® (2016).

Visto que se trata de uma bacia que apresenta graves problemas no escoamento das águas de chuva, apresentando metade de sua área em região plana, urbanizada, e com diversas intervenções nas configurações originais dos corpos hídricos, fatos estes que intensificam os problemas gerados pelas chuvas intensas, optou-se por utilizar essa bacia em um estudo piloto, nesta pesquisa, para avaliar a extensão de um possível algum ganho, em termos de redução de enchentes, com a prática da adoção de telhados verdes em coberturas onde isto for viável.

Para subsidiar o presente estudo, pesquisas já desenvolvidas e modelagens matemáticas já realizadas para a bacia do canal do Mangue e sub-bacia do rio Joana (MIGUEZ, 2001; CAMPOS, 2001; D'ALTÉRIO, 2004; ZONENSEIN, 2007; NAGEM, 2008; ZAMPRONIO, 2009; GUIMARÃES, 2016) foram utilizados.

## 1.8 CONTRIBUIÇÃO DA PESQUISA

Este trabalho pretende contribuir preenchendo as lacunas identificadas por Nascimento (2015), que menciona que, apesar de haver considerável número de referências que tratam de pesquisas com telhados verdes, essas não abordam chuvas intensas, típicas de clima tropical; e por Versini *et al.* (2014), que indicam o fato de que

poucos estudos foram realizados com a aplicação de telhados verdes em uma bacia hidrográfica.

Esta pesquisa pretende contribuir para o conhecimento científico sobre a tecnologia de telhados verdes aplicada em regiões de climas tropicais, como a cidade do Rio de Janeiro, discorrendo sobre o comportamento de um protótipo de cobertura verde frente a determinadas chuvas e apresentando um exercício de estudo de caso.

De um ponto de vista mais ambicioso, espera-se que este trabalho sirva como motivação para que as coberturas verdes sejam vistas como uma potencial prática a ser adotada para minimizar os problemas de inundações e alagamentos em área urbanas.

## **1.9 ESTRUTURAÇÃO DA DISSERTAÇÃO**

Esta dissertação está estruturada em oito capítulos, que compreendem da introdução ao tema, apresentada aqui neste primeiro capítulo, até as conclusões e recomendações obtidas nesta pesquisa, apresentadas no oitavo e último capítulo.

Neste primeiro capítulo, o tema é apresentado através de uma contextualização geral. Também constam nesse capítulo todas as informações que subsidiam e norteiam o desenvolvimento da presente pesquisa, como a base teórica dos temas relacionados, a motivação, os objetivos, a metodologia e a contribuição esperada. Além disso, neste capítulo introdutório também é apresentada a bancada experimental onde serão realizados os ensaios experimentais no protótipo de cobertura verde, e a bacia do rio Joana, na qual será desenvolvido o estudo de caso.

A drenagem urbana é o foco do segundo capítulo, no qual, após uma breve introdução ao tema, é apresentado seu histórico, mostrando a evolução do conceito atribuído a drenagem urbana, ao longo dos anos, passando da concepção higienista até a abordagem sustentável. Em seguida, o capítulo descreve o ciclo hidrológico, o fenômeno das cheias urbanas e, por fim, discorre sobre a abordagem sustentável para a drenagem urbana, que é a tendência preconizada para que exista um desenvolvimento urbano com baixo impacto.

O terceiro capítulo refere-se a tecnologia de coberturas verdes. Com base na revisão bibliográfica, os aspectos que envolvem essa técnica compensatória serão abordados, tais como: conceituação, histórico, sistemas existentes, classificação, vantagens e desvantagens. Além disso, particularidades a serem observadas em sua concepção e construção também serão apresentados, bem como aspectos sobre a qualidade de água

drenada pelas camadas destes tipos de cobertura e sua adoção como técnica compensatória em drenagem urbana.

No quarto capítulo é apresentada a parte experimental desta pesquisa, descrevendo desde o processo de concepção e construção do protótipo de cobertura verde, até a metodologia de execução dos ensaios e da modelação matemática do comportamento do mesmo. Em seguida, no quinto capítulo, são apresentados os resultados que foram obtidos experimentalmente, com as devidas discussões a respeito do constatado.

A metodologia sobre a modelagem matemática, aplicada à bacia do rio Joana, será devidamente discutida no sexto capítulo. Os cenários simulados e resultados obtidos na parte da simulação hidrodinâmica da bacia do rio Joana são apresentados no sétimo capítulo, que discorre sobre os resultados do estudo de caso proposto.

No oitavo, e último capítulo, desta dissertação são relatadas as conclusões obtidas, as contribuições geradas e recomendações e sugestões para trabalhos futuros. Este último capítulo é seguido pelas referências bibliográficas, dois Apêndices e três Anexos.

## 2 DRENAGEM URBANA

*“Eu perdi o meu medo, o meu medo, o meu medo da chuva.*

*Pois a chuva voltando pra terra traz coisas do ar.”*

(Raul Seixas<sup>6</sup>)

### 2.1 INTRODUÇÃO

As cheias naturais são fenômenos provocados pelo excesso de escoamento superficial, gerado a partir de uma precipitação intensa. Esse processo hidrológico é cíclico, natural e benéfico ao ambiente (MIGUEZ *et al.*, 2015).

Em ambientes naturais, os leitos regulares<sup>7</sup> dos rios, que não apresentam capacidade hidráulica para escoar o incremento de vazão associado à uma chuva intensa, passam a extravasar, nas ocasiões dessas chuvas, o excesso de água para as áreas ribeirinhas e planícies de inundações associadas a estes.

Fatos históricos revelam que as primeiras civilizações que habitaram o planeta já conviviam com os benefícios e inconvenientes gerados pelas cheias dos rios. Os benefícios eram relacionados, principalmente, à fertilização das planícies de inundação, fato que favorecia as práticas agrícolas. Já os inconvenientes relacionavam-se com a força destrutiva das cheias que, muitas vezes, eram até associadas à ira de deuses cultuados por povos da época.

A proximidade dos primeiros agrupamentos humanos com os cursos d'água foi essencial no processo de fixação e de desenvolvimento destes, que, com o tempo, vieram evoluindo sua organização, partindo de pequenas aglomerações em espaços rurais, com economia baseada na prática agrícola, rumo à criação de cidades, com sistemas políticos, econômicos e sociais mais avançados.

Nesse contexto, percebe-se que a relação das cidades com as águas remonta à própria formação das cidades. As cidades sempre necessitaram das águas como fator de fixação e desenvolvimento. De forma geral, as águas são essenciais à vida e sua presença, como fonte de abastecimento das cidades, é fundamental. Além disso, a água

---

<sup>6</sup> **Raul Santos Seixas:** Músico, compositor e cantor brasileiro, um dos grandes representantes do rock no Brasil. É conhecido como “Maluco Beleza” e “Ouro de Tolo”. (Fonte: E-BIBLIOGRAFIAS, 2014).

<sup>7</sup> **Leito regular:** Calha por onde correm regularmente as águas do curso d'água durante o ano (BRASIL, 2012). De acordo com Carvalho Júnior (2013), diversos estudos da literatura indicam que essa calha é a capaz de conduzir uma vazão com tempo de recorrência de 1 a 2,33 anos.

desempenhou papel fundamental na fertilização de planícies, foi elemento de defesa contra povos inimigos, via de transporte para o comércio e veículo condutor de águas residuais, contribuindo para a salubridade das cidades. A relação das cidades com os rios foi sempre muito próxima (CARNEIRO e MIGUEZ, 2011).

As cidades tornaram-se consideravelmente expressivas a partir da Revolução Industrial que teve início na Inglaterra na segunda metade do século XVIII, em 1760, e estendeu-se durante o século XIX para outros países da Europa, assim como para os Estados Unidos e o Japão (MELLO e COSTA, 1999).

Devido à oferta de oportunidades de trabalho em indústrias, à possibilidade de melhores condições de vida e aos demais atrativos do meio urbano, a população rural acabou sendo atraída para as cidades de modo nunca antes visto, acarretando o crescimento excepcional dessas, em um curto período de tempo. Assim, houve o inchamento dos antigos centros que, sem infraestrutura suficiente, passaram a sofrer com a degradação. Com isso, espaços que possuíam características rurais, foram impermeabilizados e densamente ocupados com a expansão da malha urbana, o que acarretou no aumento da geração de efluentes domésticos e industriais, de lixo, e de escoamentos superficiais nos eventos de chuvas.

Destaca-se também que a expansão das primeiras cidades não foi acompanhada de um planejamento que contemplasse o controle do uso e da ocupação do espaço e a disponibilização de equipamentos de infraestrutura para o manejo das águas urbanas, tanto residuais quanto pluviais. A falta dessa preocupação acabou tornando as cidades vulneráveis à presença de água, e a população urbana passou a enfrentar graves problemas, como os prejuízos causados pelas inundações urbanas e o aumento de patologias relacionadas a águas contaminadas como, por exemplo, a cólera, que dizimava muitas pessoas no século XIX.

Fica em evidência, a partir desta época, a necessidade em preocupar-se com a circulação das águas nas cidades. De acordo com Baptista e Nascimento (2002), datam do século XIX as concepções de sistemas de drenagem de águas pluviais e de esgotamento sanitário, por meio de redes subterrâneas de tubulações e da canalização quase que generalizada de cursos d'água em meio urbano, o que veio reduzindo, progressivamente, o papel dos rios no quadro urbanístico, como elemento da paisagem e como fator de embelezamento das cidades.

Consolida-se, desta forma, o conceito higienista para tratamento da drenagem urbana. As principais motivações desse conceito eram tanto a melhoria das condições de

circulação e conforto, quanto a prevenção de doenças de veiculação hídrica (BAPTISTA e NASCIMENTO, 2002). Porém, conforme Canholi (2014), esse conceito tratava o problema da perda do armazenamento natural devido à urbanização através da aceleração dos escoamentos, transferindo para jusante o problema local de redução dos espaços naturais.

Concepções higienistas foram, por muito tempo, premissas básicas de projetos que tinham como objetivo a remoção das águas nas cidades.

Todavia, a partir da segunda metade do século XX, observa-se o surgimento de uma espécie de consciência ambiental e ecológica em países desenvolvidos, o que proporcionou uma série de eventos e discussões para tratar de assuntos relacionados aos impactos que as atividades humanas vêm causando ao meio ambiente, à falta de sustentabilidade nas ações do homem e à preocupação em garantir um planeta saudável e com recursos naturais disponíveis para as próximas gerações.

Nesse contexto, de acordo com Silveira (1988), a visão exclusivamente mecanicista da circulação das águas no espaço urbano não passa a ser mais admissível em um mundo moderno que deseja um saneamento com maior respeito pelo meio ambiente, fato que torna necessário o crescimento do conhecimento e controle das relações, frequentemente conflitantes, entre a cidade e o ciclo hidrológico.

Nota-se que, a partir da década de 1970, as práticas higienistas tradicionais não estavam alinhadas com a consciência ambiental que estava ganhando força na época, sendo, portanto, necessário buscar uma outra abordagem para o tratamento das águas urbanas, balizadas, de acordo com Niemczynowiz (1999), na adoção de técnicas de detenção e retenção de escoamentos superficiais, e na intensificação do processo de recarga de aquíferos. Todas essas técnicas visam reestabelecer parcelas do ciclo hidrológico que foram perdidas no processo de urbanização.

A partir do final do século XX, pode ser observado que a drenagem urbana vem incorporando ao seu rol de soluções uma série de tecnologias sustentáveis, como telhados verdes, pavimentos permeáveis, reservatórios de lote, entre outras, que reestabelecem, nas cidades, pelo menos parcialmente, processos do ciclo hidrológico que foram perdidos no processo de urbanização, como a evapotranspiração, infiltração e retenção superficial, contribuindo assim, para a redução da magnitude e frequência de eventos de cheias.

Além disso, outras soluções mais arrojadas, como o estabelecimento de áreas públicas de lazer, com reservatórios escavados abaixo de seu espaço para retenção de águas de chuva, e a requalificação fluvial de corpos hídricos, garantindo o retorno de seus

meandros e de suas áreas ribeirinhas inundáveis, trazem à drenagem urbana outros objetivos, além do gerenciamento das águas urbanas, como o de melhorar as condições ambientais dos espaços urbanos e de melhorar a qualidade de vida da comunidade, através da promoção de espaços mais agradáveis e saudáveis, além de melhorar as próprias condições ambientais dos copos d'água.

Assim, começa então a ganhar cada vez mais força a ideia de sistemas de drenagem urbana com enfoque sustentável que, de acordo com Miguez e Magalhães (2010), precisam ser concebidos no intuito de minimizar impactos da urbanização sobre os padrões naturais de escoamento, combinando aspectos quantitativos e qualitativos, alcançando objetivos técnicos, sociais, econômicos e políticos, sem transferir custos no espaço e no tempo.

Atualmente, existem diversas terminologias que são utilizadas no meio técnico para tratar de conceitos, medidas e práticas adotadas no âmbito da drenagem urbana sustentável que, embora tenham em comum o objetivo de buscar soluções para melhorar as condições de circulação das águas urbanas, podem possuir outros objetivos, que variam da promoção de melhoria da qualidade de água, até a execução de espaços multifuncionais que garantam o desenvolvimento de uma biodiversidade urbana.

Cabe mencionar que, como as civilizações espalhadas pelo mundo não se desenvolveram de modo homogêneo, é de se esperar que a evolução das cidades, bem como o modo com que a população encara os problemas do meio urbano, tenha progredido de modos diferenciados pelo mundo. Nesse panorama, constata-se uma supremacia dos países desenvolvidos na adoção de práticas sustentáveis alinhadas ao planejamento e desenvolvimento do espaço urbano.

O capítulo que aqui se inicia pretende apresentar um breve histórico da drenagem urbana, no mundo e no Brasil, tentando destacar a quebra de paradigma que tem levado ao gradual desuso de técnicas tradicionais, calcadas somente em práticas higienistas, em prol de técnicas sustentáveis, que alinham o crescimento urbano com o meio ambiente e trazem soluções voltadas para a recuperação de processos do ciclo hidrológicos que foram perdidos no processo de urbanização.

As características do ciclo hidrológico no meio urbano, bem como o fenômeno das cheias urbanas, também serão discutidas nesse capítulo, no qual, ao fim, será introduzido o conceito de drenagem urbana sustentável, como área multidisciplinar do conhecimento, seguido das diversas concepções adotadas para esta ao redor do mundo.

## 2.2 ASPECTOS HISTÓRICOS DA DRENAGEM URBANA

As revoluções, agrícola e industrial, proporcionaram mudanças radicais na vida cotidiana do homem, sendo a primeira responsável pela sedentarização dos primeiros aglomerados de indivíduos e, a segunda, precursora do crescimento extraordinário dos espaços urbanos.

A gestão de águas de chuva e de águas residuais, sendo essas últimas as geradas tanto pelos seres humanos, quanto por suas atividades, tem sido um grande desafio para o homem, praticamente, desde o abandono de sua vida nômade.

De acordo com os primeiros registros históricos, é possível observar que as primeiras concepções de drenagem aplicadas aos espaços ocupados solucionavam os problemas inerentes da existência de águas pluviais e residuais do mesmo modo, com a coleta e rápida evacuação dessas águas para locais distantes das comunidades.

Considerando este fato, verifica-se que é bastante difícil abordar a evolução das práticas e tecnologias associadas ao manejo de águas pluviais sem considerar que, durante muito tempo, as águas de chuva e as águas residuais eram tratadas do mesmo modo.

Em termos mundiais, a evolução da drenagem urbana pode ser abordada, de acordo com Burian e Edwards (2002), considerando-se 4 (quatro) períodos: o primeiro, referente às Antigas Civilizações, o segundo, retratando o Império Romano, o terceiro, compreendendo o declínio do Império Romano até o início do século XIX e, o quarto, representando os tempos modernos.

Já a evolução da drenagem urbana brasileira, segundo Silveira (1998), pode ser dividida sucintamente em 2 (duas) etapas: a do conceito higienista, até o início da década de 70, e a da abordagem científica e ambiental, a partir de meados da década de 70 do século XX.

O histórico da drenagem urbana apresentado neste capítulo não possui a pretensão de esgotar o tema, visto que a cada momento são descobertas novas informações sobre o passado da humanidade, e que há um expressivo número de referências sobre este assunto. Pretende-se aqui, de maneira breve, relatar fatos importantes, no mundo e no Brasil, que contribuíram para a evolução das práticas higienistas, de eliminação rápida de águas das cidades, até as concepções voltadas para a tendência atual de desenvolvimento sustentável.

### 2.2.1 No mundo

Em um cenário distante, em que a população mundial era pequena e dispersa, pode ser destacada a tendência dos primeiros habitantes em adotar o nomadismo como modo de vida. Sendo assim, devido a constante movimentação do homem, de um local para outro, não chegavam a existir consideráveis acumulações de dejetos, produzidos tanto pelos próprios humanos, quanto por suas atividades, que acarretassem prejuízos à vida e ao bem-estar de todos que conviviam em conjunto. Entretanto, assim que os humanos começaram a se estabelecer em locais fixos, os impactos da acumulação de dejetos na saúde dos habitantes das comunidades tornaram-se rapidamente evidentes, e medidas, mesmo que primitivas, tiveram que ser tomadas para amenizar o problema (EVANS e ORMAN, 2013).

Como um dos primeiros exemplos deste fato, ainda de acordo com Evans e Orman (2013), pode-se mencionar as tribos de Israel que, após a saída do Egito, tiveram uma vida nômade por vários anos no Deserto Sinai até que finalmente fixaram-se, por um período de tempo considerável, ao pé do Monte Sinai, não demorando muito para que problemas relacionados a evacuação de dejetos gerados pelas tribos surgissem. Para superar este problema, constam registradas nos versos 12 e 13, do Capítulo 23 do Livro de Deuteronômio<sup>8</sup>, as seguintes instruções:

- 12- Determinem um local fora do acampamento onde se possa evacuar;
  - 13- Como parte do seu equipamento, tenham algo com que cavar, e quando evacuarem, façam um buraco e cubram as fezes
- (BIBLIA ONLINE, 2015a).

De acordo com Butler e Davies (2004), os sistemas artificiais de drenagem foram desenvolvidos logo assim que o homem começou a tentar controlar o ambiente em que vivia. Evidências arqueológicas revelam que as construções de muitas civilizações da Antiguidade, como a Mesopotâmia, a Minoana, a Hindu, a Egípcia e a Chinesa, possuíam sistemas de drenagem bem desenvolvidos. Burian e Edwards (2002) acrescentam ainda que, conforme relatos históricos, os sistemas de drenagem das cidades dessas Antigas Civilizações foram construídos com enorme cautela e tinham como principais objetivos a coleta de água de chuva, para prevenir inundações, e o transporte de águas residuais.

---

<sup>8</sup> Quinto livro de Moisés, que tem como conteúdo uma série de discursos e exortações dadas por Moisés nas planícies de Moabe, antes da travessia do Jordão.  
(Fonte: BIBLIA ONLINE, 2015b).

As ruínas de cidades da Mesopotâmia (4000 – 2500 a.C.) indicam a existência de sistemas de drenagem de água de chuva e de esgotamento sanitário muito bem construídos, basicamente, com tijolos e asfalto. As cidades de Ur e Babilônia, conforme indicadas na Figura 2.1, por exemplo, localizadas onde atualmente é o Iraque, possuíam sistemas de drenagem para controle de águas pluviais bastante eficientes (JONES, 1967 *apud* DE FEO *et al.*, 2014). Na Figura 2.2 é possível observar foto e projeto (planta e seção transversal) de um canal construído na Babilônia na Antiguidade.



Figura 2.1 – Os povos da Mesopotâmia.

Fonte: ARAÚJO (2011).

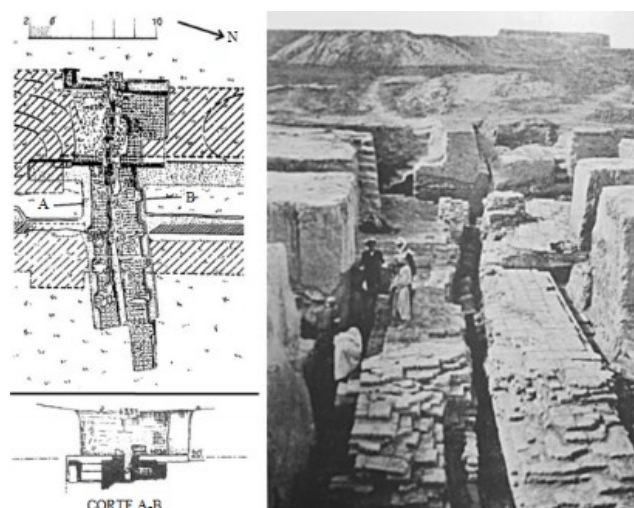


Figura 2.2 – Planta (no topo à esquerda), seção transversal (embaixo à esquerda) e fotografia (à direita) de um canal na Babilônia.

Fonte: WETZEL (1930 *apud* GEORGE, 2015).

Conforme Angelakis e Koutsoyiannis (2003), pesquisas recentes revelam que as civilizações da Grécia Antiga (Figura 2.3) estabeleceram bases fundamentais para vários avanços tecnológicos, principalmente na área de recursos hídricos.



Figura 2.3 – A Grécia no século VIII a.C.

Fonte: ATLAS HISTÓRICO (1977), retirado do *site* <http://www.moderna.com.br/>, acesso em dezembro de 2015.

Dentre as civilizações da Grécia Antiga, destaca-se a civilização Minoana (3200 – 1100 a.C.) que se desenvolveu no meio da Idade do Bronze na ilha Mediterrânea de Creta. Com sua arte e arquitetura únicas, os Minoanos contribuíram significativamente para o desenvolvimento de civilizações da Europa Ocidental (DE FEO *et al.*, 2014). Gray (1940 *apud* Burian e Edwards, 2002) informam que ruínas desta civilização revelam a existência de estruturas muito bem construídas, que conduziam esgotos sanitários e águas de chuva.

Em escavações arqueológicas realizadas na ilha de Creta, foram encontrados diferentes tipos de condutos que eram utilizados pela civilização Minoana. Esses condutos, construídos com pedra ou argila cozida, eram utilizados para o abastecimento de água e para a evacuação de águas de chuva e residuais (ANGELAKIS *et al.*, 2012). Na Figura 2.4 são ilustradas estruturas de coleta de água de chuva em Cnossos, feito em pedra e em argila cozida.



Figura 2.4 – Conduitos em Cnossos: em pedra (à esquerda) e em argila cozida (à direita).

Fonte: ANGELAKIS *et al.* (2012).

Ainda na Grécia Antiga, no período do final do século VI a.C. ao início do século V a.C., os rios passaram a ser transformados em canais artificiais na região norte da cidade de Atenas. O “Grande Dreno” (do inglês, *Great Drain*) foi o primeiro canal artificial construído, nesta época, na região oeste de Agora, centro político da cidade de Atenas, tornando possível a implantação de prédios públicos em uma área que antes era plana e pantanosa. O “Grande Dreno” (Figura 2.5) foi construído com blocos de pedra, com dimensão interna de 1 m x 1 m. O sistema de canais e conduitos, em Atenas, conduziam águas pluviais, esgotos e efluentes gerais, para uma bacia coletora fora da cidade (CHIOTIS e CHIOTI, 2014).



Figura 2.5 – O “Grande Dreno”: vista aérea (à esquerda) e as paredes do dreno existentes até os dias de hoje (à direita).

Fonte: ASCSA (1997, 2000).

Durante o início do terceiro milênio a.C., a civilização Hindu desenvolveu-se no vale do rio Indo (Figura 2.6). Ruínas de Harappa e Mohenjo-Daho, duas cidades da civilização Hindu, distantes cerca de 563 km uma da outra, indicam que as mesmas foram construídas de forma planejada, sendo a drenagem urbana concebida de modo a adequar-se ao *layout* do espaço urbano. Foram construídas ligações, na maioria das residências, para canais abertos, construídos no centro das ruas. Esses canais eram escavados no terreno, ou construídos sobre o terreno com tijolos (BURIAN e EDWARDS, 2002).



Figura 2.6 – Civilizações do vale do rio Indo.

Fonte: FEUERSTEIN *et al.* (2011).

Feuerstein *et al.* (2011) chegam a afirmar que apenas os romanos, após 2 mil anos, chegaram a ter um sistema de drenagem passível de ser comparado ao construído pela civilização Hindu.

A civilização Egípcia, desenvolvida às margens do rio Nilo, tinham este rio como pilar econômico e social, visto que os habitantes se estabeleceram em sua planície de inundação, em locais propícios para a prática da agricultura. De acordo com Abdel-Dayem *et al.* (2007), o rio Nilo, com seus ciclos de cheias e estiagem, determinava as épocas propícias para a colheita, tornando-se, assim, o principal agente responsável pela produção e renda da sociedade, que eram atreladas à produção agrícola.

Conforme De Feo *et al.* (2014), no período de 2000 – 500 a.C., habitantes de pequenas áreas espalhadas pelo Egito abandonaram suas casas e se mudaram para cidades

e comunidades maiores, caracterizando um crescimento urbano. Nos bairros da cidade de Herakopolis (2100 a.C.), que eram ocupados pela elite e pelo clero, existia uma grande preocupação em remover todas as águas urbanas para locais distantes dos que eram ocupados e destinados ao uso comum. Os egípcios da Antiguidade foram um dos primeiros a desenvolverem tubulações em cobre, que eram utilizadas em complexos sistemas de irrigação e de coleta de águas urbanas, por volta de 2500 a.C.

As primeiras civilizações da China desenvolveram-se nos trechos médio e baixo das bacias do rio Amarelo e Yangtzé (Figura 2.7). Estando situadas entre rios, as cidades eram facilmente abastecidas por água, porém, ao mesmo tempo, eram eventualmente acometidas pelas cheias destes rios. Com isto, as civilizações pertencentes à Antiga China desenvolveram um sistema de controle de água urbana que incluía o abastecimento de água, a gestão de águas de chuva e residuais e o controle das cheias dos rios (ZHENG, 2015).



Figura 2.7 – Rios Amarelo e Yangtzé, na China.

Fonte: SÓ HISTÓRIA (2015).

Destaca-se o período da Dinastia Han (202 a.C. – 220 d.C.) da civilização Chinesa que, de acordo com Yang (1989 *apud* De Feo *et al.*, 2014), foi caracterizado por proporcionar os maiores avanços no desenvolvimento urbano na China. De acordo com documentos históricos, a capital Chang'an, situada próxima da atual cidade de Xian, da Província de Shaanxi, tornou-se rapidamente uma grande cidade, sendo capital por 15 (quinze) dinastias, até o ano 907 d.C. Descobertas arqueológicas mostram que um

complexo sistema de drenagem foi construído na cidade Chang'an. Os condutos de drenagem e de esgotamento sanitário eram construídos, principalmente, com barro, sendo os maiores condutos construídos com tijolos.

Apesar dos romanos serem geralmente lembrados pela grandiosidade de seus aquedutos, em termos de infraestrutura hidráulica, cabe mencionar também a extraordinária contribuição deles no desenvolvimento de sistemas de drenagem e esgotamento sanitário (DE FEO *et al.*, 2014). De acordo com Burian e Edwards (2002), significativos avanços tecnológicos, no ramo da drenagem urbana, ocorreram durante o Império Romano, no período de 750 a.C. – 330 d.C.

Miguez *et al.* (2015) destacam que a cidade de Roma, fundada em torno de um forte localizado no topo de uma colina, conseguiu expandir-se graças à drenagem do vale pantanoso que existia ao pé desta colina, correspondente às áreas úmidas às margens do rio Tibre. Destacam-se, assim, as obras de drenagem de duas regiões às margens do rio Tibre, até o ano de 575 a.C., para a construção do Fórum Romano e do Fórum Boario, fundamentais para o assentamento da cidade de Roma.

O mais famoso, bem como o maior coletor conhecido da Antiguidade, é a cloaca máxima (Figura 2.8), construído pelos romanos na Dinastia Tarquin (século VI a.C.). Inicialmente, este coletor servia para drenar o pântano em que a cidade de Roma foi construída, possuindo, originalmente, uma extensão de mais de 100 metros, passando pelo centro do Fórum Romano, conforme traçado ilustrado na Figura 2.9. Com 4,5 metros de largura e 3,3 metros de altura, a cloaca máxima foi implantada a aproximadamente 12 metros de profundidade do atual nível do solo (LOFRANO, 2010).



Figura 2.8 – Cloaca máxima Romana.

Fonte: ZAMBARDINO (2012).

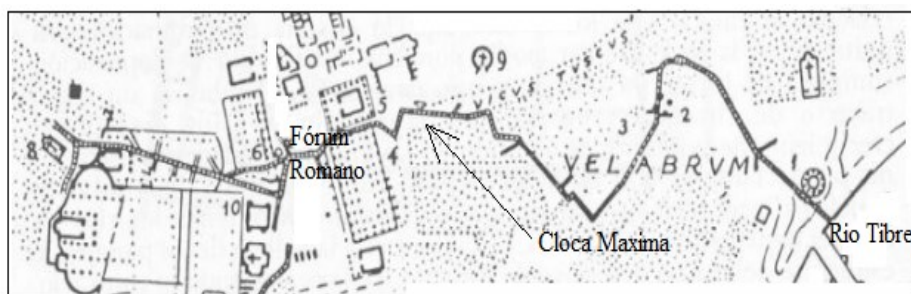


Figura 2.9 – Traçado da cloaca máxima.

Fonte: CANNIZZARO (2014).

A cloaca máxima é uma obra de engenharia que foi tão bem executada que ainda é parte do sistema de drenagem da atual Roma, sendo que seu trecho final foi retificado, de modo a desaguar perpendicularmente à margem murada do rio Tibre.

Até este ponto, pode-se observar que as Antigas Civilizações em muito contribuíram no avanço das práticas de drenagem urbana, na medida em que se percebia o quanto era importante controlar o escoamento das águas urbanas, para que as mesmas não viessem causar transtornos na vida cotidiana.

Angelakis e Zheng (2015) vão além, ressaltando que os avanços tecnológicos no gerenciamento das águas urbanas promovidos pelas civilizações grega e romana não são apenas uma herança cultural da história da humanidade, mas também a base para avanços modernos na engenharia de recursos hídricos e nas práticas de gerenciamento das águas.

A queda do Império Romano, por volta do século V, devido às invasões bárbaras, deu início ao período da história conhecido como Idade Média, que perdurou até o século XV. Este período é caracterizado pela fuga da população dos centros urbanos em direção às áreas rurais, onde foram estabelecidas grandes propriedades, erguidas com a devida proteção contra invasores, e com estruturas políticas, econômicas e sociais próprias.

Com o esvaziamento dos centros urbanos, os serviços de coleta de águas urbanas foram abandonados, e, consequentemente, as obras executadas para promover tais serviços foram se deteriorando. Baptista *et al.* (2015) corroboram este fato informando que, na Idade Média, já não mais se implantavam sistemas de evacuação das águas pluviais e cloacais, ao mesmo tempo em que os sistemas eventualmente já construídos não sofriam manutenção, caindo em desuso. A ausência de sistemas de evacuação de esgotamento sanitário levava ao conceito que poderia denominar “*tout à la rue*”, acarretando condições de vida bastante insalubres, dando origem ao termo “cidade pútrida”, com referência às aglomerações medievais.

Nesse aspecto, Matos (2003) aponta que pode até mesmo falar-se em “regressão”, em termos sanitários, ao longo de pelo menos uma parte da Idade Média, época em que a higiene e a limpeza eram completamente ignoradas pela maior parte dos cidadãos.

Em função da carência de infraestrutura de saneamento, em 1348, eclodiu a peste negra em toda a Europa, dizimando um terço da população. A recuperação foi lenta e gradual. Após essa época, as ações de saneamento urbano focavam principalmente a pavimentação das ruas, que se popularizou nas cidades europeias a partir do século XIV (MIGUEZ *et al.*, 2015).

O Renascimento comercial e urbano, ocorrido entre os séculos XIV e XVI, caracterizado pela ascensão da burguesia, classe ligada ao comércio, foi o movimento que garantiu a retomada da ocupação dos centros urbanos, locais que tiveram um crescimento grandioso, em termos de população e de malha urbana, após a Revolução Industrial.

Surgindo na Inglaterra no século XVIII e espalhando-se pelo mundo a partir do século XIX, a Revolução Industrial trouxe avanços tecnológicos na cadeia produtiva do homem, com o advento das indústrias e do estabelecimento do trabalho assalariado, que proporcionou a fabricação em larga escala, gerando uma quantidade de produtos como nunca visto antes na história da humanidade.

Observa-se que, com este contexto, grande parte da população dispersa pelas áreas rurais que, em sua maioria, eram camponeses ou vassalos de burgueses, passou a ser atraída pelas oportunidades de emprego da cidade e pela esperança de melhoria de qualidade de vida. Isso garantiu aos centros urbanos, que vieram desenvolvendo-se timidamente desde a disseminação do movimento do Renascimento pela Europa, um crescimento extraordinário, entretanto, desordenado, não sendo acompanhado do fornecimento da infraestrutura adequada para acomodar o incremento de habitantes aos espaços existentes.

Baptista *et al.* (2015) destacam que o aumento das aglomerações urbanas, a partir do século XIX, trouxe dificuldades e desconforto resultantes da precariedade da infraestrutura de controle da presença de águas nas cidades, tanto as do meio natural, como rios, áreas úmidas, lagos, etc., quanto as águas pluviais e residuais.

A partir de 1830, começaram os primeiros surtos de cólera, o que colocava em dúvida a viabilidade do desenvolvimento pelo qual as cidades estavam passando naquele momento. Novos surtos ocorreram nos anos seguintes, 1831 e 1832, evidenciando a ligação entre falta de higiene e doenças, independentemente de classe social. Com isso, os ingleses despertaram para a preocupação com as questões de saneamento, estabelecendo

algumas regras, tais como a obrigatoriedade de instalações sanitárias em cada residência, por exemplo. Assim, uma série de leis surgiu, nos anos subsequentes, todas relacionadas à fixação de requisitos higiênicos. Na França, surtos de cólera ocorreram em 1849 e a primeira lei relacionada com as questões de saneamento foi lançada no ano seguinte, 1850 (MIGUEZ *et al.*, 2015).

Nesse panorama, passou a ficar cada vez mais evidente que a circulação livre das águas pluviais e residuais nas cidades, e o contato da mesma com os habitantes, passou a ser a principal responsável pela insalubridade dos espaços urbanos e pela proliferação de doenças de veiculação hídrica. A solução para este problema, de modo lógico para o pensamento da época, foi afastar as águas urbanas, o mais rápido possível, dos espaços de convívio dos habitantes das cidades.

E, assim, surge o conceito higienista associado à drenagem urbana, que se refere à captação, condução e descarga rápida dos esgotos e águas pluviais, afastando-os da população (ANDOH e DECLERCK, 1999; ZHOU, 2014; MIGUEZ *et al.*, 2015), geralmente, por meio de impermeabilização de áreas e sistemas de condutos artificiais (SOUZA *et al.*, 2012).

Cabe destacar, neste ponto, que a drenagem pluvial como ação pública não evoluiu em decorrência da modernização de práticas de engenharia em busca do conforto, mas sim de uma recomendação de profilaxia médica (COSTA FRANCO, 1992 *apud* SILVEIRA, 2002).

Seguindo a linha de promover o afastamento das águas urbanas das áreas de convívio da população, de acordo com Souza e Damásio (1993), entre 1850 e o fim do século XIX, muitas cidades importantes do mundo, principalmente as capitais europeias, foram dotadas de grandes redes subterrâneas unitárias de esgotos, que conduziam tanto águas pluviais quanto residuais. Souza e Damásio (1993) ainda destacam, como exemplo, a cidade de Paris que, sob o comando de seu famoso prefeito George-Eugene Haussmann, tornou-se emblemática e referência mundial por construir uma imponente rede de esgotos, ajudando a cristalizar o conceito higienista que passa a ser resumido pela expressão “*tout à l’égout*” no meio técnico francês da época.

O conceito higienista, também conhecido como abordagem tradicional ou convencional em drenagem urbana, serviu de base para quase que a totalidade dos projetos desenvolvidos nesta temática no período compreendido entre o século XIX e meados do século XX. Caracterizada pela execução de medidas estruturais, como obras de canalizações e galerias subterrâneas, que confinam os rios em calhas definidas e, em

muitos casos, os excluem do espaço urbano, esta abordagem atua tentando minimizar e/ou transferir para jusante o impacto gerado pelas inundações. Junto com o afastamento das águas pluviais, vinha também a remoção das águas residuais, que poderiam se espalhar pelas ruas e retornar às casas, causando doenças.

Nesse período, os impactos hidrológicos decorrentes do processo de urbanização dos espaços, caracterizados pela redução dos processos de infiltração, retenção superficial e evapotranspiração, vieram aumentando, acarretando no aumento da geração de escoamento superficial e na aceleração dos escoamentos. Desta maneira, chuvas nem tão intensas já passam a trazer impactos em áreas urbanizadas, na medida em que as soluções higienistas passam a não ser mais tão eficientes, tanto pelas redes não comportarem o incremento de escoamento superficial decorrente da expressiva urbanização, quanto pelos transtornos que são transportados para regiões (agora ocupadas) rio abaixo.

Andoh e Iwugo (2002) ainda enfatizam que os sistemas de drenagem, eventualmente existentes, estão fadados à falharem com o incremento do volume e da velocidade dos escoamentos superficiais decorrentes do aumento da frequência e da magnitude das cheias previstas para o próximo século devido aos impactos das mudanças climáticas.

Nesse panorama, os reflexos da intensa urbanização, ao longo dos anos, sobre os processos hidrológicos têm evidenciado que as soluções tradicionais de drenagem urbana, associadas ao conceito higienista, têm-se mostrado insuficientes e pouco adaptáveis às alterações de uso e ocupação do solo, impactando diretamente no aumento da velocidade do escoamento superficial, que facilita as inundações; na redução da possibilidade de infiltração da água no solo, que reduz a capacidade de recarga dos aquíferos; além dos prejuízos ambientais, materiais e de vidas humanas (OLIVEIRA, 2009).

Observa-se, então, que, a partir de meados do século XX, passou-se a pensar, de modo mais crítico, nos conflitos ambientais existentes entre a cidade e o ciclo hidrológico, havendo uma necessidade de reflexões mais profundas sobre a urbanização e o meio ambiente, particularmente, sobre a quantidade e qualidade dos recursos hídricos (SILVEIRA, 2002). Poletto *et al.* (2015) ressaltam que, movidos pela consciência ambiental que surgia na época, a partir da década de 60 do século XX, surge, em países da Europa e América do Norte, um novo tipo de abordagem para o tratamento das águas pluviais no meio urbano, na qual a preservação dos cursos d'água naturais, bem como de seus processos, passam a ter papel fundamental.

Sendo assim, constata-se que, a partir de meados do século XX, vem ganhando cada vez mais espaço uma abordagem mais sustentável para a drenagem urbana que, inicialmente, buscava minimizar os custos da implantação de sistemas de drenagem, que tinham como objetivo a redução de inundações, utilizando técnicas de reestabelecimento de padrões de uso e ocupação do solo existentes antes do processo de urbanização. Atualmente, o conceito é mais amplo, e a drenagem urbana sustentável busca uma integração entre o desenvolvimento urbano, o meio ambiente e a população envolvida, tentando promover espaços urbanos mais saudáveis. Assim, técnicas que não apenas promovem o controle quantitativo, mas também o qualitativo, das águas urbanas passam a ser preconizados, bem como práticas que preservem e/ou incrementem a biodiversidade no espaço urbano, além de promoverem ambientes de convívio agradáveis, voltados para o uso da população.

Surge, então, em diversos países do mundo, uma série de termos, conceitos, medidas, técnicas e práticas que passam a ser adotadas como base na concepção de projetos na área de drenagem urbana dando a estes um caráter sustentável. Como exemplos de termos do meio técnico, relacionados à drenagem urbana sustentável, podem ser mencionadas as “Melhores Práticas de Gestão de Águas Pluviais” (do inglês, *Best Management Practices - BMPs*), proveniente dos EUA no início da década de 70; “Técnicas Alternativas ou Compensatórias” (do inglês, *Alternative Techniques ou Compensatory Techniques*), mencionada pela primeira vez na França nos anos 80 e utilizada amplamente no jargão técnico brasileiro; “Cidades Sensíveis à Água” (do inglês, *Water Sensitive Cities - WSC*), com origem na Austrália em meados da década de 90; “Sistemas de Drenagem Urbana Sustentável” (do inglês, *Sustainable Urban Drainage Systems - SUDS*), adotado no Reino Unido por volta do ano 2000. Esses e outros termos serão abordados de forma mais aprofundada no próximo item deste capítulo.

Nesse contexto, é possível observar que, de meados do século XX até os dias atuais, técnicas mais sustentáveis para o gerenciamento de águas no ambiente urbano passaram a ser amplamente recomendadas e disseminadas em diversos lugares e, apesar de acabarem ganhando diferentes nomes ao redor do mundo, tais técnicas foram criadas a partir da mesma filosofia (ZHOU, 2014).

Porém, mesmo com essa tendência, Miguez *et al.* (2015) destacam que a evolução dos conceitos e das abordagens dada à drenagem urbana não ocorre de modo homogêneo, sendo os novos conceitos de projeto, alinhados com a tendência de sustentabilidade, ainda percebidos de forma diferente pelos meios técnico e acadêmico. Nesse contexto, nota-se,

no meio técnico-profissional, ainda certa inércia na adoção de medidas diferentes das tradicionais. Por outro lado, observa-se no meio acadêmico, uma tendência inversa de se abandonar o tratamento tradicional, focando esforços significativos na aplicação de técnicas compensatórias. Os mesmos autores destacam ainda que é importante analisar a bacia e compreender seu funcionamento, caso a caso, e combinar as técnicas disponíveis, de modo a obter os resultados desejados.

### 2.2.2 No Brasil

Assim como em outros países ainda em fase de desenvolvimento, o urbanismo e a drenagem urbana no Brasil seguiram, inicialmente, os padrões e modelos adotados pelos países da Europa, devido à grande influência que este continente exercia sobre os países emergentes. Observa-se, então, que a preocupação com o gerenciamento das águas nas cidades brasileiras começou, assim como na Europa, a partir do agravamento da disseminação de doenças associadas à presença de águas contaminadas nas cidades.

A epidemia de cólera no Rio de Janeiro, em 1855, que vitimou mais de cinco mil pessoas, levou o Governo a decretar no ano seguinte, a imediata construção das redes de esgoto sanitário e águas pluviais da cidade, sendo implementada uma rede única de condutos para a drenagem dos efluentes pluvial e sanitário (sistema unitário). Essa construção foi um marco importante para a cidade do Rio de Janeiro, que se tornou a segunda capital do mundo a implantar uma rede de esgotamento sanitário (SANTOS NETO e BARROS, 2003).

Nos anos subsequentes à proclamação da República, em 1889, e por causa dela, o Brasil viveu um período de reformas urbanísticas no qual consolidou-se o conceito higienista do saneamento urbano. Até as primeiras décadas deste século foi uma fase em que a defasagem em relação à Europa era pequena, ao menos quando se comparava o saneamento de grandes e médias cidades (SILVEIRA, 1988).

No período entre o final do século XIX e início do século XX, um dos nomes mais importantes da fase higienista-sanitarista do Brasil é o do engenheiro Saturnino de Brito<sup>9</sup>,

---

<sup>9</sup> **Francisco Saturnino Rodrigues de Brito:** nasceu no dia 14 de julho de 1864, em Campos, estado do Rio de Janeiro, e faleceu em 10 de março de 1929, aos 65 anos de idade, em Pelotas, enquanto vistoriava obras de saneamento que ele projetara para a cidade. Formou-se em engenharia civil pela Escola Politécnica do Rio de Janeiro em 1886 e é considerado por muitos como o mais notável engenheiro sanitário brasileiro, sendo o pioneiro nesta especialidade no país. (Fonte: LOPES, 2012).

por ter sido profundo conhecedor da técnica e de questões teóricas da engenharia sanitária e por ter participado de diversos planos de saneamento desenvolvido para cidades brasileiras (SOUZA e DAMÁSIO, 1990). De acordo com Silveira (2002), em seu opúsculo “Saneamento de Santos”, de 1898, Saturnino de Brito apresenta argumentos sólidos em favor do sistema separador absoluto (redes de condutos separados, um destinado ao escoamento de esgotos sanitários e outro para águas pluviais) contra o sistema dominante da época que era o unitário. Silveira (1988) ainda informa que a obra “Saneamento de Santos” talvez seja a primeira publicação em português que desenvolve um método de cálculo original de vazão de projeto para redes pluviais.

Silveira (1998) ainda destaca que, curiosamente, contra a tendência europeia, o sistema separador absoluto parece ter predominado desde o início sobre o sistema unitário no Brasil. Razões econômicas podem estar por trás desta opção: canalizações exclusivas para esgoto doméstico tem um custo menor do que uma canalização de sistema unitário. Desta forma, foi-se cristalizando a prática de construir redes de esgoto pluvial somente após, quando houvesse recursos. Estabeleceu-se, assim, a ordem de prioridades, ainda hoje praticada na urbanização de diversas cidades brasileiras, de implantar, umas após as outras, as redes de água potável, de esgoto doméstico e esgoto pluvial.

Em decorrência da atuação de Saturnino de Brito, já no início do século XX, o conceito higienista, usando uma rede de drenagem pluvial separada dos esgotos domésticos, ficou estabelecido como regra para as cidades brasileiras. A intensidade das chuvas tropicais não favorece os sistemas unitários. Entretanto, muitas cidades ou muitos bairros de cidades acabaram adotando um arremedo de sistema unitário, destinando efluentes de fossas sépticas para a rede pluvial (SILVEIRA, 2002).

De acordo com Miguez *et al.* (2015), foi a partir de 1950 que a urbanização no Brasil ganhou intensidade, destacando-se inúmeras alterações sociais e econômicas, numa política de modernização do país. Uma das consequências foi a grande migração de pessoas das áreas rurais para os centros urbanos da região sudeste. Assim, os serviços de infraestrutura não eram mais suficientes e a demanda por saneamento nas cidades cresceu. Santos Neto e Barros (2003) destacam que o período entre 1964 e 1985 caracterizou-se pelo início dos investimentos na drenagem urbana, financiados por empréstimos internacionais.

É alarmante o fato de que, conforme mencionado por Grigg e Willie (1979 *apud* Silveira, 1998), através da análise das leis que orientaram diversos loteamentos em várias cidades, foi confirmado que o Brasil chegou às portas dos anos 80 numa situação em que

a drenagem urbana era concebida na maioria dos casos sem se basear em nenhuma norma técnica, o que facilitou a aceitação de projetos de eficácia duvidosa, sem falar em uma completa desuniformização de critérios no país. E muitos problemas foram agravados pelo fato de que, tradicionalmente, a drenagem urbana é de exclusiva responsabilidade do município e geralmente há pouca preocupação sobre consequências à jusante de ações locais implementadas à montante.

Possivelmente, esta falta de critérios estimulou a realização do manual de projeto de drenagem urbana do Departamento de Águas e Energia Elétrica do Estado de São Paulo e da Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental (DAEE e CETESB, 1980) que rapidamente assumiu na prática o papel de guia técnico nacional e, sem muito exagero, até a função de norma técnica nesta área. O mérito maior deste manual talvez tenha sido o de uniformizar as práticas de cálculo hidrológico para drenagem urbana. Entretanto, quando ele ainda recomenda o clássico estudo de Pfafstetter (1957) para definir a chuva de projeto, fica clara a pouca evolução que houve no país na aquisição de dados básicos e na realização de novos estudos hidrológicos de abrangência nacional (SILVEIRA, 1988).

Somente a partir do final do século XX, medidas com o objetivo de aumentar, dentro do contexto urbano, a quantidade de áreas capazes de promover a infiltração e o armazenamento de águas pluviais, começaram a ser adotadas, ainda que de maneira tímida, nas cidades brasileiras. Tais medidas tratavam-se, basicamente, de cópias de modelos estrangeiros, como as *BMPs* (abreviação de “*Best Management Practices*”) e *LID* (abreviação de *Low Impact Development*) que buscavam, de acordo com Souza *et al.* (2012), a conservação quali-quantitativa de processos hidrológicos ao minimizar e mitigar efeitos da ação antrópica pelo desenvolvimento de paisagens multifuncionais que considerem planejamento hidrológico, prevenção à poluição e preservação de recursos naturais.

De acordo com Poleto *et al.* (2015), a abordagem ambiental para a drenagem urbana no Brasil tem a intenção de introduzir uma série de práticas de manejo das águas pluviais na tentativa de compensar boa parte das deficiências apresentadas pelos sistemas higienistas, e passou a ser adotada de modo mais expressivo somente a partir da década de 90 do século XX, época em que as primeiras cidades brasileiras deram início à elaboração de seus Planos Diretores de Drenagem Pluvial e Esgotamento Sanitário.

Ainda conforme Poleto *et al.* (2015), a introdução de mecanismos estruturais, contrariamente ao preconizado no conceito higienista, passa a não mais priorizar o rápido

escoamento das águas pluviais; na abordagem compensatória, as estruturas devem ser concebidas de tal forma a procurar manter, sempre que possível, as condições de escoamento para jusante em padrões previamente existentes (condições pré-urbanização).

No ano de 2005 foi publicada a obra de Baptista *et al.* (2005), “Técnicas Compensatórias em Drenagem Urbana”, atualmente em sua segunda edição, que trouxe uma série de tecnologias como opções para projetos de drenagem urbana que busquem um enfoque sustentável. Como exemplos de técnicas compensatórias apresentadas na referida obra, podem ser citadas as trincheiras de infiltração e retenção, valas de retenção e infiltração, pavimentos permeáveis e telhados armazenadores.

Destaca-se, no início do século XXI, o lançamento do programa “Drenagem Urbana Sustentável”, pelo Ministério das Cidades, cujo objetivo era promover, em articulação com as políticas de desenvolvimento urbano, de uso e ocupação do solo e de gestão das respectivas bacias hidrográficas, a gestão sustentável da drenagem urbana com ações estruturais e não-estruturais dirigidas à recuperação de áreas úmidas, à prevenção, ao controle e à minimização dos impactos provocados por enchentes urbanas e ribeirinhas (BRASIL, 2006). Conforme Cruz *et al.* (2007), este programa apresentava como ações prioritárias o desenvolvimento de ações na gestão da drenagem urbana dos municípios segundo as diretrizes de seu Plano Diretor de Drenagem Urbana ou de Manejo das Águas Pluviais e caso este não existisse, a prioridade de ação para o seu desenvolvimento, seguindo os princípios do Manejo Sustentável das Águas Pluviais Urbanas.

O referido programa apoia a implantação de diversas soluções técnicas, como a execução de obras de microdrenagem complementares adotando canaletas gramadas ou ajardinadas; valas, trincheiras e poços de infiltração; microrreservatórios; e coberturas ajardinadas de edifícios públicos (BRASIL, 2006).

Desta forma, a partir desta época, ficam consolidados os termos “técnicas compensatórias” e “desenvolvimento urbano de baixo impacto” no meio técnico brasileiro para tratar da temática de drenagem urbana sustentável. O primeiro termo refere-se ao conjunto de medidas de infiltração e de armazenamento, como, por exemplo, reservatórios de retenção, retenção e de lote, assim como os telhados verdes, pavimentos permeáveis, trincheiras e valas de infiltração que, de acordo com Poletto *et al.* (2015), buscam controlar volumes, velocidades, vazões e qualidade de água escoada no sistema de drenagem. O segundo termo, de acordo com o programa “Drenagem Urbana Sustentável” (BRASIL, 2006), se traduz em soluções mais eficazes e econômicas quando comparadas às soluções tradicionais de drenagem urbana, buscando a preservação do

ciclo hidrológico natural, a partir da redução do escoamento superficial adicional gerado pelas alterações da superfície do solo decorrentes do desenvolvimento urbano.

Após a iniciativa do programa “Drenagem Urbana Sustentável”, foi promulgada a Lei Federal nº 11.445/2007, que estabelece diretrizes nacionais para o saneamento básico e que incluía em seu texto a definição de “drenagem e manejo das águas pluviais urbanas” como sendo:

O conjunto de atividades, infraestruturas e instalações operacionais de drenagem urbana de águas pluviais, de transporte, detenção ou retenção para o amortecimento de vazões de cheias, tratamento e disposição final das águas pluviais drenadas nas áreas urbanas (BRASIL, 2007).

Observa-se, assim, o aumento da preocupação em considerar estruturas de detenção e retenção para o amortecimento de cheias no escopo das atividades relacionadas à drenagem urbana. Cabe mencionar que o termo “drenagem e manejo das águas pluviais urbanas” foi substituído, através da Lei Federal nº 13.308/2016, que altera a Lei Federal nº 11.445/2007, por “drenagem e manejo das águas pluviais, limpeza e fiscalização preventiva das respectivas redes urbanas” (BRASIL, 2016).

Porém, conforme ressaltado por Baptista e Nascimento (2002), do ponto de vista institucional, a drenagem pluvial urbana brasileira é historicamente serviço de competência do poder municipal. Assim, em razão das características do serviço, a gestão das águas urbanas é efetuada por uma estrutura técnica e administrativa de competência e responsabilidade do poder executivo municipal, cabendo, na maioria dos municípios brasileiros, à Secretaria Municipal de Obras a execução dos serviços de drenagem pluvial.

Desta forma, a estrutura administrativa de gestão da drenagem pluvial assume características muito diferenciadas, de acordo com cada municipalidade, em função de sua posição no organograma do poder executivo municipal; da quantidade de recursos financeiros alocados, meios materiais e de recursos humanos; do porte do município e de outras características específicas, como a natureza local dos problemas afeitos à drenagem, o nível de desenvolvimento técnico e institucional da gestão municipal, entre outros aspectos (BAPTISTA e NASCIMENTO, 2002).

Com isto, Poletto *et al.* (2015) destacam que a aplicação dos princípios de técnicas compensatórias no Brasil é, normalmente, imposta por meio de algum decreto ou lei municipal, que obriga que empreendimentos que se enquadrem em algumas características (área do lote, percentual de área impermeável, localização na bacia) façam

uso de um ou mais tipos de técnicas compensatórias. Porém, destaca-se mais expressivamente a atuação do Ministério das Cidades que, através dos seus critérios de financiamento de obras de macrodrenagem, induzem a utilização das técnicas compensatórias de maneira significativa.

Neste ponto, já se observa um descompasse entre o preconizado pela drenagem urbana sustentável, que considera que a infraestrutura de drenagem deve ser pensada a partir da adoção de técnicas compensatórias distribuídas na bacia hidrográfica na qual se insere. Assim, ao considerar a bacia hidrográfica como unidade de gestão, as ações acabam ultrapassando os limites dos municípios, esbarrando em um entrave burocrático, devido às divergências de interesse, de regulamentações e da própria falta de infraestrutura de alguns municípios.

Portanto, percebe-se que, mesmo com a disseminação da consciência ecológica e com os consideráveis avanços tecnológicos no mundo, a partir dos anos 60 e 70 do século XX, a maioria das obras de drenagem urbana no Brasil vem seguindo, ainda, a doutrina higienista. Isto deve-se ao fato de que concepções sustentáveis são muito mais difíceis e caras de serem aplicadas porque, conforme Silveira (2002), exigem ações integradas sobre grandes áreas, com conhecimento técnico multidisciplinar, ao contrário das ações higienistas voltadas para soluções locais.

Porém, são notáveis os esforços, intensificados principalmente a partir do início do século XXI, realizados para o aumento da aceitação de concepções mais sustentáveis nos projetos de drenagem urbana no Brasil.

Por fim, de acordo Silveira (2002), a história da drenagem urbana para qual o Brasil quer redirecionar é uma história já em andamento nos países desenvolvidos. Agora o que importa é uma correta gestão dos impactos do meio urbano sobre o meio-ambiente hidrológico e isto transcende a um simples receituário de obras padrão e remete a uma abordagem mais complexa incluindo aspectos técnicos de engenharia, sanitários, ecológicos, legais e econômicos e que exige uma conexão muito mais estreita com a concepção e gestão dos espaços urbanos. O ciclo hidrológico é elemento chave na definição do saneamento urbano e da drenagem.

## 2.3 O CICLO HIDROLÓGICO E AS CHEIAS URBANAS

### 2.3.1 Ciclo hidrológico: condições naturais e alterações devido à urbanização

O ciclo hidrológico é o enfoque central da hidrologia, não possui início ou fim definidos, e seus diversos processos ocorrem de forma contínua (CHOW *et al.*, 1994). Trata-se de um fenômeno global de circulação fechada da água entre a superfície terrestre e a atmosfera, impulsionado fundamentalmente pela energia solar e associada à gravidade e à rotação terrestre (SILVEIRA, 2013).

Na Figura 2.10 estão representados os principais componentes do ciclo hidrológico: precipitação, evaporação, evapotranspiração, infiltração, interceptação vegetal, retenção em depressões e escoamentos superficial, subsuperficial e subterrâneo.

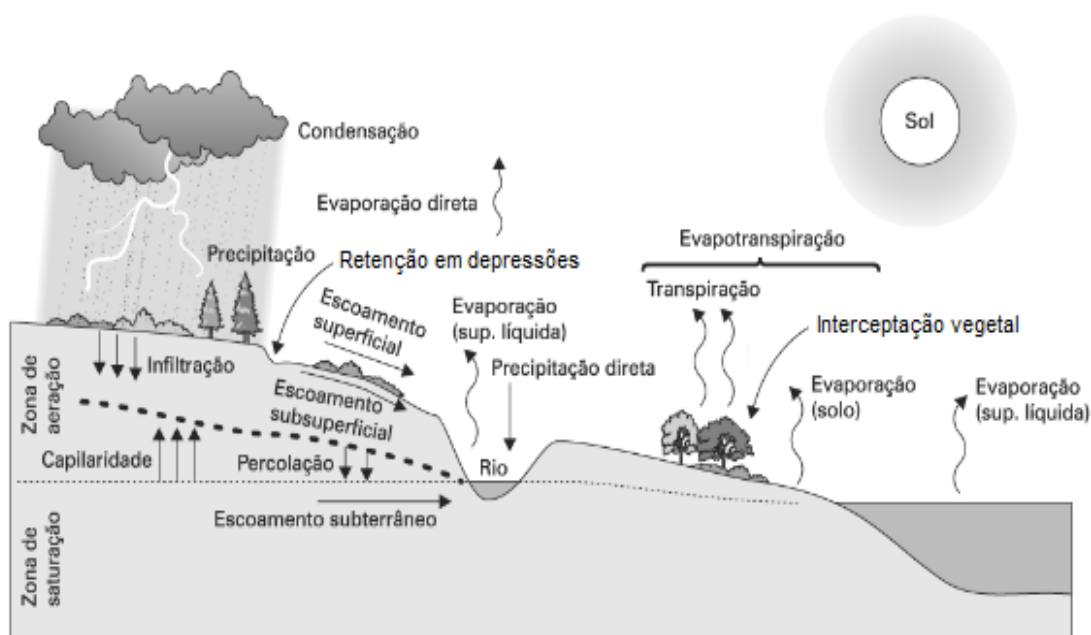


Figura 2.10 – Desenho esquemático do ciclo hidrológico.

Fonte: BRAGA *et al.* (2005), adaptado pelo autor.

O Quadro 2.1 apresenta, de modo resumido, a descrição de como esse ciclo ocorre, partindo do processo de formação das nuvens pelo vapor de água existente na atmosfera até a geração dos escoamentos, superficial e subterrâneo, e o retorno da água à atmosfera, fechando o ciclo.

## Quadro 2.1 – Descrição do ciclo hidrológico.

Fonte: SILVEIRA (2013).

*O vapor de água presente na atmosfera, sob determinadas condições meteorológicas, condensa-se e forma microgotículas de água que se mantêm suspensas no ar devido à turbulência natural. O agrupamento dessas microgotículas, mais eventuais partículas de poeira e gelo, formam as nuvens. Através da dinâmica das massas de ar, que acontece a principal transferência de água da atmosfera para a superfície terrestre que é a precipitação.*

*A precipitação, na sua forma mais comum que é a chuva, podendo também ser neve ou granizo, ocorre quando complexos fenômenos de aglutinação e crescimento das microgotículas, em nuvens com presença significativa de umidade (vapor de água) e núcleos de condensação (poeira ou gelo), formam uma grande quantidade de gotas com tamanho e peso suficientes para que a força da gravidade supere a turbulência normal ou movimentos ascendentes do meio atmosférico. No trajeto em direção à superfície terrestre a precipitação já sofre evaporação. Em algumas regiões esta evaporação pode ser significativa, existindo casos em que a precipitação é totalmente vaporizada.*

*Caindo sobre um solo com cobertura vegetal, parte do volume precipitado sofre interceptação em folhas e caules, de onde evapora. Excedendo a capacidade de armazenar água na superfície dos vegetais, ou por ação dos ventos, a água interceptada pode direcionar-se para o solo.*

*A água que atinge o solo segue diversos caminhos. Como o solo é meio poroso, há infiltração de toda precipitação que chega ao solo enquanto a superfície do solo não se satura. A partir do momento da saturação a infiltração decresce até uma taxa residual, e o excesso não infiltrado da precipitação gera o escoamento superficial. A infiltração e a percolação no interior do solo são comandadas pelas tensões capilares nos poros e pela gravidade. A umidade do solo realimentada pela infiltração é aproveitada em parte pelos vegetais, que a absorvem pelas raízes e a devolvem, quase toda, à atmosfera por transpiração, na forma de vapor de água, e o que os vegetais não aproveitam, percola para o lençol freático que normalmente contribui para o escoamento da base dos rios.*

*O escoamento superficial é impulsionado pela gravidade para as cotas mais baixas, vencendo principalmente o atrito com a superfície do solo.*

*Em qualquer tempo e local por onde circula a água na superfície terrestre, ou seja, nos continentes ou nos oceanos, há evaporação para a atmosfera, fenômeno que fecha o ciclo hidrológico. Naturalmente, contribuição maior é a dos oceanos. Entretanto o interesse maior, por estar intimamente ligada a maioria das atividades humanas, reside na água doce dos continentes.*

Nas bacias hidrográficas em que seu estado natural é conservado, observa-se que, geralmente, as interações entre todos os processos do ciclo hidrológico ocorrem de modo equilibrado e harmônico. De acordo com Veról (2013), nestes casos, é possível observar bosques protegendo o escoamento em encostas, vegetação ciliar protegendo as margens dos rios, a infiltração recarregando lençóis que, por sua vez, garantem a vazão de base de rios, e planícies ribeirinhas livres para absorver os eventuais transbordamentos dos rios.

Porém, a representatividade de algumas parcelas que compõem o ciclo hidrológico é alterada na medida em que os espaços de uma dada bacia hidrográfica passam pelo processo de urbanização. A impermeabilização massiva de áreas, a ocupação das planícies de inundação, a remoção da vegetação e a canalização de corpos hídricos naturais, trazidos pelo processo de urbanização, fazem com que os processos de evaporação, evapotranspiração, infiltração, interceptação vegetal e retenção tenham sua atuação reduzida, quando não suprimida.

De acordo com Linsley *et al.* (1958), usualmente, em áreas urbanas, o pico da cheia tende a ser maior e a acontecer mais rápido, quando comparado à situação da bacia natural, uma vez que uma maior quantidade de água fica disponível para escoar, e mais rapidamente, pela diminuição das retenções superficiais. Na Figura 2.11 é possível observar as diferenças entre os hidrogramas obtidos, em uma mesma seção de referência de um rio que compõe a macrodrenagem de uma bacia hidrográfica, considerando um cenário anterior e outro posterior à urbanização da bacia. Já através da Figura 2.12 é possível observar a evolução da urbanização e o seu efeito nos respectivos hidrogramas.

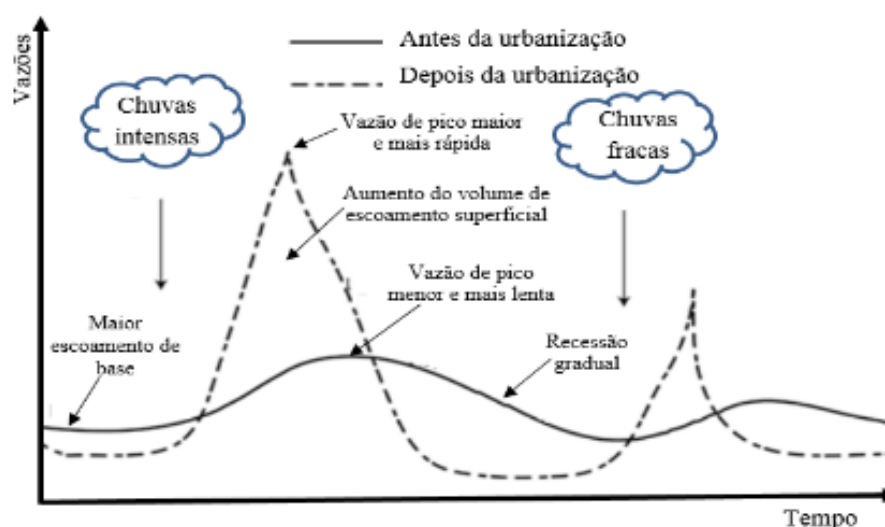


Figura 2.11 – Hidrogramas: pré e pós urbanização de uma bacia.

Fonte: SCHUELER (1987).

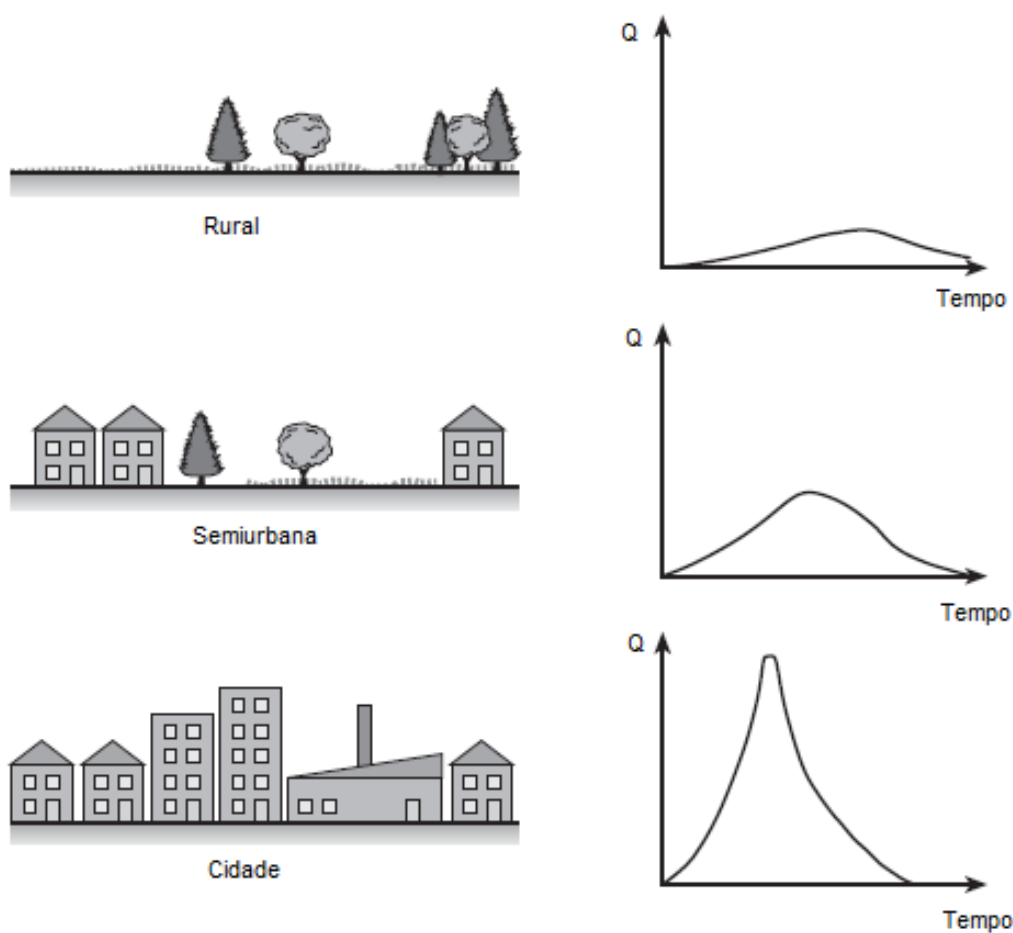


Figura 2.12 – Efeito da urbanização na vazão de pico e no tempo de escoamento.

Fonte: BUTLER e DAVIES (2004).

Desta forma, conclui-se, conforme Veról (2013), que o processo de urbanização altera fortemente o ciclo hidrológico urbano e as respostas dos sistemas fluviais no ambiente construído. A remoção da vegetação, a consequente impermeabilização, a regularização de superfícies e a introdução de sistemas artificiais de drenagem modificam significativamente o padrão de escoamentos, produzindo maiores e mais rápidas respostas dos escoamentos superficiais e menores oportunidades de infiltração e armazenamento, o que resulta em incremento de vazões de pico, redução de vazões de base, redução dos tempos de concentração da bacia e de recessão do hidrograma, e perda de ecossistemas fluviais. Um resultado frequente observado nas cidades é o agravamento do problema de cheias.

### 2.3.2 As cheias urbanas

Os escoamentos gerados na bacia, sendo eles superficiais, subsuperficiais e subterrâneos, chegam até os rios, que podem ser considerados como a síntese dos territórios a ele conectados (CIRF, 2006). Os rios, em seu estado natural, por sua vez, possuem dois leitos (Figura 2.13): o leito menor, onde a água escoar na maioria do tempo; e o leito maior que, por vezes, é inundado devido a processos naturais decorrentes do ciclo hidrológico (TUCCI, 2005).

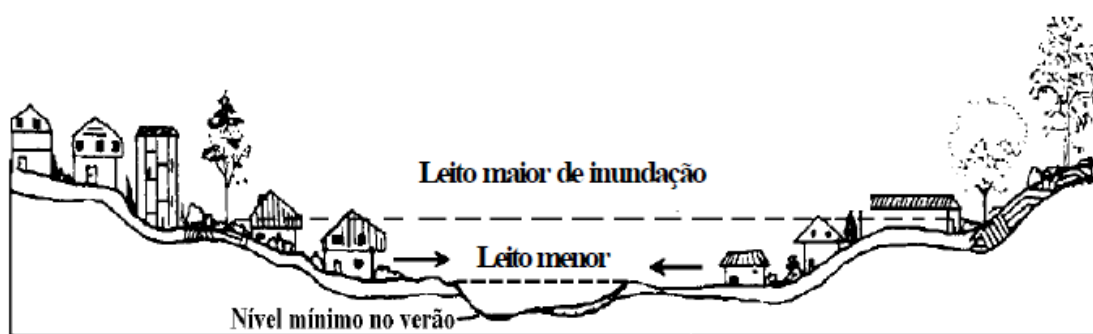


Figura 2.13 – Leito maior e menor de um rio.

Fonte: TUCCI (2005).

As cheias dos rios, ou seja, a inundação de seu leito maior e de suas planícies de inundação associadas é um processo natural e esperado. Eventualmente, a calha menor não possui capacidade hidráulica para escoar vazões superiores às associadas a um determinado tempo de recorrência (aproximadamente entre 1 e 2 anos). Essas vazões que causam o extravasamento da calha menor, em bacias hidrográficas conservadas, ocorrem, geralmente, devido à baixa capacidade do solo em realizar os processos de infiltração e percolação, por encontrar-se saturado ou próximo da saturação; e à redução do volume disponível para armazenamento de água nas depressões do relevo e na vegetação. Isso acontece quando ocorrem tempestades de intensidade e duração consideráveis ou eventos sucessivos de chuvas, não necessariamente tão intensas.

A urbanização da bacia traz diversos impactos no ciclo hidrológico natural, conforme já descrito no item anterior. Além disso, verifica-se que, no contexto urbano, os corpos hídricos que recebem as águas da bacia hidrográfica de contribuição, geralmente, já passaram por algum tipo de intervenção. As mais frequentes são sua

canalização e retificação, e a ocupação de suas margens, leito maior e planícies de inundação.

Com o crescimento da ocupação urbana, a própria calha secundária do rio (leito maior de inundação) acaba recebendo obras de urbanização, com ruas e até quadras inteiras tomando o seu espaço, o que agrava ainda mais o processo de cheias. Uma vez eliminado o espaço que deveria ser deixado livre para acomodação das grandes enchentes, as águas acabam procurando outros caminhos, se espalhando e atingindo regiões antes não alagáveis naturalmente (MIGUEZ e MAGALHÃES, 2010). Nesse contexto, em ocasiões de chuvas intensas, de acordo com Miguez *et al.* (2015), ruas se tornam canais, muros de parques se tornam vertedouros, e os próprios parques, praças e quadras, em geral se tornam reservatórios.

Observa-se, então, que, no processo de desenvolvimento dos centros urbanos, os rios foram perdendo seus espaços marginais e ribeirinhos que, eventualmente, eram utilizados por estes para extravasar. Além disso, a urbanização trouxe aos corpos hídricos urbanos, usualmente com sua configuração alterada, um incremento de escoamento superficial de águas pluviais e o aumento do lançamento de efluentes sanitários, devido à impermeabilização dos espaços e ao adensamento populacional sem provimento da infraestrutura necessária a este crescimento. Essas ações da urbanização, contribuem para que, conforme Jha *et al.* (2012), as cheias urbanas se apresentem como o mais frequente dentre os desastres naturais registrados e a cada ano são registrados aumentos de ocorrências, número de pessoas atingidas e prejuízos associados. Na Tabela 2.1 estão sintetizados os principais efeitos de ações decorrentes do processo de urbanização que contribuem para as cheias urbanas.

As cheias urbanas são um desafio sério e crescente enfrentado pelo desenvolvimento (BUTLER e DAVIES, 2004) e provocam impactos na vida das pessoas, em especial àquelas que vivem em cidades em processo acelerado de expansão, ou em países em desenvolvimento (JHA *et al.*, 2012). Diante de um cenário de crescimento demográfico, urbanização e mudanças climáticas, as causas das cheias estão mudando e seus impactos estão aumentando (BUTLER e DAVIES, 2004).

Segundo dados do IBGE, entre 2008 e 2012, as enchentes atingiram cerca de 1543 municípios no Brasil. Isso equivale a 27,7% das cidades do país, o que resultou em registros de 8942 ocorrências, que deixaram 1,4 milhão de pessoas desabrigadas ou desalojadas (PINTO *et al.*, 2015).

Tabela 2.1 – Impactos da urbanização sobre as cheias urbanas.

Fonte: CARNEIRO e MIGUEZ (2011).

| Ação da urbanização                                                                                                                                                                                      | Efeitos                                                                                                                                                                                                                                                                            |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Remoção da vegetação natural                                                                                                                                                                             | Aumento dos volumes de escoamento superficial e das vazões de pico; maiores velocidades de escoamento; crescimento dos processos de erosão e consequente sedimentação em canais e galerias de drenagem.                                                                            |
| Aumento das taxas de impermeabilização                                                                                                                                                                   | Aumento dos volumes de escoamento superficial e das vazões de pico; menos depressões superficiais, permitindo menores retenções; menos irregularidades nas superfícies de escoamento e maiores velocidades de escoamento.                                                          |
| Construção de redes de drenagem artificial                                                                                                                                                               | Significativo crescimento das velocidades de escoamento e antecipação do pico das cheias.                                                                                                                                                                                          |
| Ocupação de áreas ribeirinhas e planícies de inundação                                                                                                                                                   | População diretamente exposta a inundações periódicas em áreas naturais de inundação; ampliação das áreas alagáveis, com a diminuição do espaço natural que deveria estar disponível para o armazenamento temporário e acomodação das cheias.                                      |
| Ocupação desordenada de encostas e favelização                                                                                                                                                           | Acréscimo dos volumes superficiais de escoamento, somados a grande quantidade de resíduos sólidos e lixo produzidos pelas encostas ocupadas; obstrução parcial ou total de dispositivos de drenagem; degradação da qualidade da água e população exposta a riscos de deslizamento. |
| Disposição de resíduos sólidos e de águas residuais na rede de drenagem                                                                                                                                  | Degradação da qualidade da água; degradação do ambiente natural e construído, proliferação de doenças; sedimentação na rede de canais e obstrução das captações de água de chuva.                                                                                                  |
| Interferências recíprocas entre redes de infraestrutura: pontes estreitas sobre rios, tubulações de água cortando galerias, entre outros, configurando singularidades locais que restringem o escoamento | Redução pontual da capacidade de escoamento dos condutos afetados, gerando remansos e alagamentos a montante.                                                                                                                                                                      |

Destaca-se, ainda, por fim, conforme Miguez *et al.* (2015), que as cheias urbanas são responsáveis pela degradação do ambiente construído, interferindo sobre vários outros sistemas urbanos. Elas geram danos a edificações e a equipamentos urbanos, desvalorizam áreas sujeitas a alagamento, geram perdas associadas à paralisação de negócios e serviços, interrompem a circulação de pedestres e de sistemas de transportes, são potenciais veículos de difusão de doenças, afetam e são afetadas pela coleta e disposição de esgotos e resíduos sólidos urbanos, dentre outros. Novamente aqui, como no caso rural, e ainda de forma potencializada, o sistema se fragiliza, os riscos e os prejuízos crescem, aumentando a degradação.

## 2.4 A ABORDAGEM SUSTENTÁVEL PARA A DRENAGEM URBANA

Como já mencionado, a preocupação com o meio ambiente, e, principalmente, com questões referentes às ações antrópicas sobre este, começou a se tornar cada vez maior a partir da segunda metade do século XX, fortalecendo o conceito de desenvolvimento sustentável, sendo este:

Aquele que atende as necessidades das gerações atuais sem comprometer a capacidade das gerações futuras de atenderem às suas necessidades e aspirações (UNITED NATIONS, 1987)

Na drenagem urbana, esse conceito foi materializado em diversas ações ao redor do mundo, como a criação de conceitos, medidas e/ou técnicas que passaram a nortear grande parte dos novos projetos de drenagem, de modo que os mesmos estivessem alinhados às preocupações com a preservação do meio ambiente e a saúde e bem-estar da população.

Tais ações, embora batizadas com diversas nomenclaturas em diferentes países do mundo, possuíam um objetivo comum, o de promover o gerenciamento eficiente da circulação das águas urbanas nas cidades, de modo a evitar os transtornos que estas causam. Porém, apesar deste objetivo comum, observa-se que essas ações podem variar, da simples preocupação com o manejo e tratamento das águas urbanas, até a instauração de ambientes integrados, com paisagens multifuncionais, em que o desenvolvimento do espaço é alinhado com concepções voltadas à preservação das águas, da biodiversidade e do bem-estar da sociedade.

Na América do Norte, no início da década de 70, de acordo com Urbonas e Stahre (1993), na tentativa de sanar boa parte das deficiências apresentadas pelos sistemas higienistas, começam a ser adotadas as “Melhores Práticas de Gestão de Águas Pluviais” (do inglês, *Best Management Practices* - *BMPs*), calcadas, de acordo com Andoh e Declerk (1999), na adoção de dispositivos que permitissem que a água voltasse ao meio ambiente através da recuperação de processos naturais, como a infiltração e percolação. As *BMPs* são definidas pela AMEC (2001) como um conjunto planejado de ações implementadas na bacia, com o objetivo de atenuar os impactos da urbanização, considerando não somente preocupações com a quantidade de água, mas também aspectos de qualidade das águas. Miguez *et al.* (2015) ressaltam que o conceito *BMP* surgiu a partir da necessidade de controlar a poluição de efluentes industriais nos Estados Unidos, podendo ser destacado, nesse contexto, o documento *Guidance Manual for*

*Developing Best Management Practices – BMP* (US EPA, 1993), elaborado com orientações para a implementação das *BMPs*.

Posteriormente, foram adicionados ao escopo das *BMPs* americanas outros enfoques, como o gerenciamento das águas pluviais, conforme demonstrado no documento *Stormwater Best Management Practices (BMP) Performance Analysis* (US EPA, 2010) e a conscientização de empreendedores e gestores, no âmbito de suas atividades, do uso racional da água, como pode ser observado no documento *WaterSense at Work - Best Management Practices for Commercial and Institutional Facilities* (US EPA, 2012).

Fletcher *et al.* (2014) apontam que já no final da década 70, em 1977, o termo “Desenvolvimento de Baixo Impacto” (do inglês, *Low Impact Development - LID*) foi usado em um relatório sobre uso e ocupação do solo, em Vermont, nos Estados Unidos.

De acordo com o *Unified Facilities Criteria (UFC): Low Impact Development Manual* (USDoD, 2010), *LID* é uma estratégia de gerenciamento de águas pluviais que busca manter os padrões hidrológicos de uma determinada área, a partir do reestabelecimento dos processos de infiltração, armazenamento e evaporação, que existiam antes da urbanização, de modo a evitar que ocorra excesso de escoamento superficial e fontes de poluição difusa.

Apesar de sua menção ter sido feita no final da década de 70, o termo *LID* foi tornar-se popular na década de 90, principalmente após as publicações do Condado de *Prince George* (PGDER, 1999a; PGDER, 1999b), em Maryland, nos EUA, que trazem o conceito *LID* como uma abordagem bastante diferente das convencionais adotadas na época. De acordo com Forgiarini (2010), a partir deste momento, o planejamento utilizando a abordagem do *LID* passou a ser uma realidade nos municípios americanos sendo já, em muitos casos, orientada por manuais municipais.

No Reino Unido, a necessidade da adoção de sistemas de drenagem mais sustentáveis surgiu um pouco antes da década de 80. Em meados dessa década, o conceito de “Controle na Fonte” (do inglês, *Source Control - SC*) começou a ganhar força em diversos setores, como em Companhias de Serviço de Água e Universidades, por exemplo (ANDOH e IWUGO, 2002). De acordo com Andoh e Declerck (1999), o objetivo da técnica de controle na fonte é promover uma solução preventiva para as cheias e para a poluição das águas urbanas através de dispositivos de retenção e tratamento de águas pluviais, distribuídos nas partes de montante das bacias, de modo a compensar os efeitos do aumento da impermeabilização dos espaços urbanos.

Na Austrália, o “Desenvolvimento Urbano Sensível à Água” (do inglês, *Water Sensitive Urban Design - WSUD*) é um conceito recente, do início da década de 90, adotado em projetos com o objetivo de, principalmente, minimizar os impactos nos componentes do ciclo hidrológico gerados pelo desenvolvimento urbano (MORISON e BROWN, 2011). Coombes *et al.* (1999) já definia, anteriormente, *WSUD* como uma solução local para problemas globais que surgiram devido à confiança que havia nos métodos antigos de controle da água nos espaços urbanos. Beecham e Chowdhury (2012) apontam que o comportamento hidrológico e hidráulico de “técnicas *WSUD*” frente às variabilidades temporais e espaciais da chuva ainda não foram devidamente estudadas na Austrália.

Outro termo, também nessa temática, utilizado na Austrália a partir da década de 90, é o de “Cidades Sensíveis à Água” (do inglês, *Water Sensitive City - WSC*) que consiste na busca em planejar e construir cidades resilientes, produtivas, sustentáveis e que forneça condições adequadas para a vida. São cidades que interagem com o ciclo hidrológico urbano, garantindo a segurança hídrica, essencial para o desenvolvimento econômico, a melhoria e proteção de corpos hídricos, a mitigação de risco de cheias e o estabelecimento de espaços públicos que acumulem, limpem e reciclem a água (CRCWSC, 2016).

No final do século XX, por volta do ano 2000, conforme Fletcher *et al.* (2014), é formalizado, no Reino Unido, o conceito de “Sistemas de Drenagem Urbana Sustentável” (do inglês, *Sustainable Urban Drainage Systems - SUDS*). De acordo com Zhou (2014), este conceito tem como foco principal a manutenção de boas condições de saúde pública, a proteção dos recursos hídricos da poluição e a preservação da biodiversidade e dos recursos naturais para as gerações futuras. O guia mais importante existente atualmente, que norteia o uso de práticas sustentáveis, é o *The SuDS Manual* (CIRIA, 2015).

Outro conceito importante, associado ao desenvolvimento sustentável, é o de “Infraestrutura Verde” (do inglês, *Green Infrastructure - GI*), que embora tenha sido mencionado pela primeira vez em 1995 por Walmsey (1995), somente agora tem ganhado maior expressividade. De acordo com US EPA (2013), *GI* é um termo adequado para descrever uma variedade de produtos, tecnologias e práticas que usam sistemas naturais, ou sistemas de engenharia que imitam processos naturais, para melhorar a qualidade do ambiente e promover benefícios à comunidade.

Outros termos também surgiram ao longo do período, como o de “Técnicas Compensatórias ou Alternativas” (do inglês, *Alternative Techniques - AT* ou

*Compensatory Techniques - CT*), “Gerenciamento Integrado de Águas Urbanas” (do inglês, *Integrated Urban Water Management – IUWM*) e “Medidas de Controle de Águas Pluviais” (do inglês, *Stormwater Control Measures – SCMs*).

De modo resumido, a Tabela 2.2 apresenta os termos relacionados à drenagem urbana sustentável mencionados até o momento, e algumas informações a respeito de cada um, como os locais em que os mesmos são adotados, a existência de manuais, entre outras informações pertinentes. No Quadro 2.2 são apresentadas as referências bibliográficas a partir das quais foram retiradas as informações da Tabela 2.2.

De acordo com Fletcher *et al.* (2014), existe uma significativa sobreposição entre todos esses termos utilizados para tratar da drenagem urbana sustentável, conforme ilustrado na Figura 2.14.

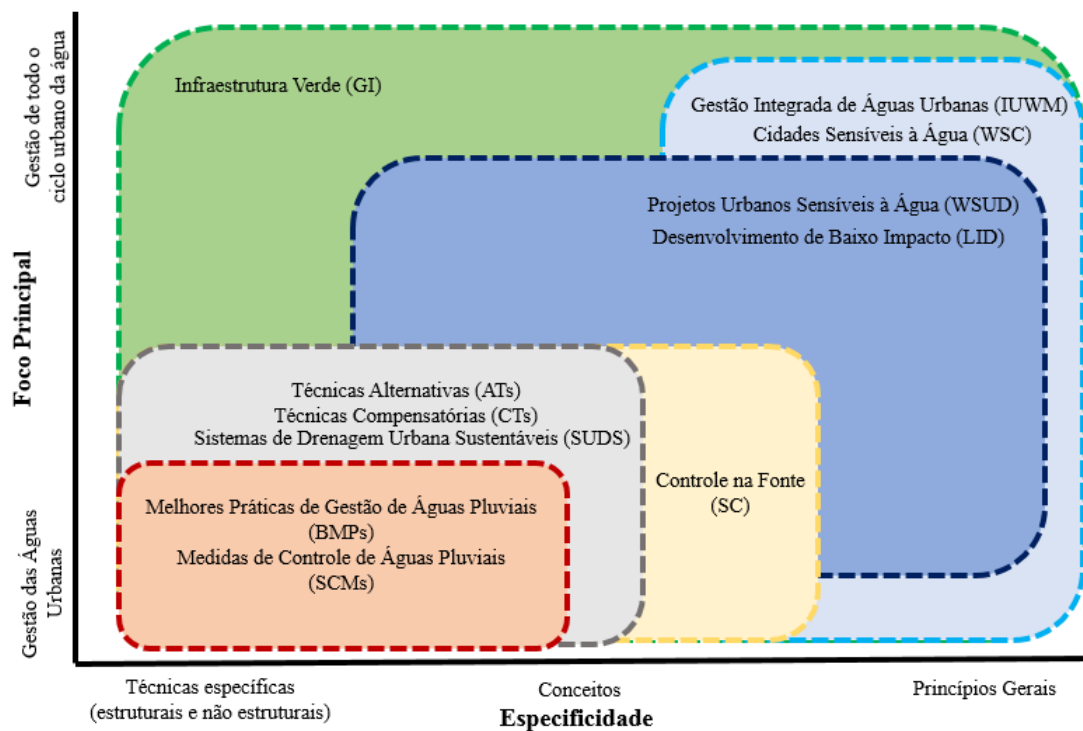


Figura 2.14 – Terminologias em drenagem urbana, de acordo com seu foco principal e especificidade.

Fonte: FLETCHER *et al.* (2014).

Tabela 2.2 – Informações sobre os termos existentes no âmbito da drenagem urbana sustentável.

Fonte: Diversas, conforme indicado na Tabela.

| Termo       | Significado                      | Primeira Referência | Objetivos                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                 | Locais adotados                       | Exemplos de Manuais                                                                                                                                                           | Observações                                                                                                                               | Referências        |
|-------------|----------------------------------|---------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------|
| <i>BMPs</i> | <i>Best Management Practices</i> | 1972                | Adotar práticas e técnicas que objetivam impedir a poluição e controlar os escoamentos superficiais das águas pluviais.                                                                                                                                                                                                                   | América do Norte (EUA e Canadá).      | <i>Guidance Manual for Developing Best Management Practices - BMP (EUA), Stormwater Management Planning (Canadá) e diversos manuais (Canadá).</i>                             | No Canadá, o Ministério de Agricultura, Alimentação e Assuntos Rurais elaborou diversos manuais, nos quais cada um apresenta uma prática. | [a], [p], [q], [r] |
| <i>LID</i>  | <i>Low Impact Development</i>    | 1977                | A intenção original era tentar reestabelecer as características do balanço hídrico do espaço existentes antes da urbanização, através do controle do uso e ocupação do solo e da adoção de medidas de controle integradas, assim, procura-se estabelecer os mesmos padrões de infiltração e evapotranspiração que existiam anteriormente. | EUA (origem), Canadá e Nova Zelândia. | <i>Low Impact Design Manual (Nova Zelândia), Low Impact Development Design Manual (USA), Low Impact Development Stormwater Management Planning and Design Guide (Canadá).</i> | Na Nova Zelândia, o foco é evitar a poluição, ao invés da gestão de águas pluviais.                                                       | [a], [b], [c]      |

Tabela 2.2 – Informações sobre os termos existentes no âmbito da drenagem urbana sustentável (Continuação).

Fonte: Diversas, conforme indicado na Tabela.

| Termo             | Significado                                              | Primeira Referência | Objetivos                                                                                                                                                                                                                                                                         | Locais adotados                  | Exemplos de Manuais      | Observações                                                                                                                                                  | Referências |
|-------------------|----------------------------------------------------------|---------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------|--------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------|
| <i>ATs ou CTs</i> | <i>Alternative Techniques ou Compensatory Techniques</i> | 1980                | Promover a solução para problemas de drenagem e poluição e buscar a melhoria da qualidade de vida da população.                                                                                                                                                                   | França (origem) e Brasil.        | Não foram identificados. | Trata-se de um conceito similar ao do <i>LID</i> e ao do <i>WSUD</i> , porém, sem considerar a conservação da água.                                          | [a]         |
| <i>SC</i>         | <i>Source Control</i>                                    | 1981                | Ajudar na mitigação dos impactos das águas de chuva promovendo, o mais próximo possível da fonte de geração de escoamento superficial, o armazenamento, a infiltração e evapotranspiração, minimizando, assim, os efeitos no ciclo hidrológico gerado pela urbanização do espaço. | América do Norte (EUA e Canadá). | Não foram identificados. | Atualmente, é incorporado dentro do escopo do <i>LID</i> , como práticas em escala pequena para reestabelecer as condições hidrológicas pré-desenvolvimento. | [a]         |

Tabela 2.2 – Informações sobre os termos existentes no âmbito da drenagem urbana sustentável (Continuação).

Fonte: Diversas, conforme indicado na Tabela.

| Termo       | Significado                         | Primeira Referência | Objetivos                                                                                                                                                                                                                                                                                                        | Locais adotados                                         | Exemplos de Manuais                                                                                                                                                                                                  | Observações                                                                                                              | Referências   |
|-------------|-------------------------------------|---------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------|
| <i>GI</i>   | <i>Green Infrastructure</i>         | 1990                | Promover a implantação de áreas verdes no espaço urbano, objetivando não só a redução da geração de escoamento superficial em eventos de chuvas intensas, mas também a criação de condições de desenvolvimento sustentável dos espaços, de modo a criar ambientes saudáveis que garantam benefícios à população. | EUA (origem) e está sendo disseminada por todo o mundo. | <i>Green Infrastructure Guide for Water Management: Ecosystem-based management approaches for water-related infrastructure projects</i> (EUA), <i>Green Infrastructure – Training manual for trainers</i> (Hungria). | Não só benéfico para a gestão de águas urbanas, mas também para a qualidade do ar, da vida das pessoas e biodiversidade. | [a], [u], [v] |
| <i>WSUD</i> | <i>Water Sensitive Urban Design</i> | 1992                | Gerenciar o balanço hídrico; manter e, onde for possível, melhorar a qualidade da água; promover a conservação da água e manter os ambientes relacionados com a água naturais e instaurar áreas de recreação.                                                                                                    | Austrália (origem), Reino Unido e Nova Zelândia.        | <i>Evaluating Options for Water Sensitive Urban Design A National Guide</i> (Austrália).                                                                                                                             | O termo WSUD é usado em paralelo com o termo <i>water sensitive cities (WSC)</i> .                                       | [a], [f], [g] |

Tabela 2.2 – Informações sobre os termos existentes no âmbito da drenagem urbana sustentável (Continuação).

Fonte: Diversas, conforme indicado na Tabela.

| Termo       | Significado                              | Primeira Referência | Objetivos                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                            | Locais adotados                                               | Exemplos de Manuais                                                                                                                                                                                                 | Observações                                                                                                     | Referências                  |
|-------------|------------------------------------------|---------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------|
| <i>WSC</i>  | <i>Water Sensitive Cities</i>            | 1994                | Planejar e construir cidades resilientes, produtivas, sustentáveis e que forneça condições adequadas para a vida. São cidades que interagem com o ciclo hidrológico urbano, garantindo a segurança hídrica, essencial para o desenvolvimento econômico, a melhoria e proteção de corpos hídricos, a mitigação de risco de cheias e o estabelecimento de espaços públicos que acumulem, limpem e reciclem a água.                                     | Austrália (origem) e está sendo disseminada por todo o mundo. | Não foram identificados.                                                                                                                                                                                            | Ambos os termos WSC e WSUD são usados na Austrália. Porém, WSC discorre sobre o objetivo, já o WSUD o processo. | [a], [w]                     |
| <i>IUWM</i> | <i>Integrated Urban Water Management</i> | 1995                | Planejar o espaço urbano, de modo estratégico, considerando os potenciais conflitos pelo uso da água que podem ocorrer em uma determinada bacia. A ideia é combinar as questões referentes ao abastecimento de água, à água subterrânea, aos esgotos e às águas de chuva, considerando todo o arcabouço legal existente e promovendo a interação entre as diversas instituições envolvidas, com o objetivo de gerenciar o ciclo da água nas cidades. | América Latina, Europa, Ásia Central e África.                | <i>Integrated Urban Water Management Planning Manual</i> (Sugere-se que seja adotado aos países que estão em fase de desenvolvimento deste conceito), <i>ToT Manual on Integrated Urban Water Management</i> (Irã). | É o termo que está mais associado aos termos WSUD, LID e <i>water sensitive cities</i> .                        | [a], [h], [i], [j], [k], [l] |

Tabela 2.2 – Informações sobre os termos existentes no âmbito da drenagem urbana sustentável (Continuação).

Fonte: Diversas, conforme indicado na Tabela.

| Termo        | Significado                                    | Primeira Referência | Objetivos                                                                                                                                                                                                                                                                                                              | Locais adotados | Exemplos de Manuais                           | Observações                                                                                                                                              | Referências       |
|--------------|------------------------------------------------|---------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------|-----------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------|
| <i>SUDS</i>  | <i>Sustainable Urban Drainage Systems</i>      | 1997                | Maximizar os benefícios que podem ser obtidos com a gestão da água em um determinado espaço, adotando técnicas diferentes das convencionais e buscando atuar no controle de escoamentos superficiais e da qualidade da água, na manutenção e expansão da biodiversidade e na promoção de lugares de lazer e recreação. | Reino Unido.    | <i>The SuDS Manual</i> (Reino Unido).         | Na Escócia, é obrigatório a adoção de técnicas SuDS em novos empreendimentos desde 2003, conforme <i>The Water Environment and Water Services (WEWS)</i> | [a], [m],[n], [o] |
| <i>LIUDD</i> | <i>Low Impact Urban Design and Development</i> | 2003                | Evitar o máximo possível os problemas gerados pelo desenvolvimento urbano convencional, que impactam o meio ambiente, a sociedade e a economia, e, ao mesmo tempo, proteger a integridade ecológica aquática e terrestre.                                                                                              | Nova Zelândia.  | <i>Urban Greening Manual</i> (Nova Zelândia). | É incorporado ao conceito os valores e práticas do povo indígena da Nova Zelândia, os Maoris.                                                            | [a], [d], [e]     |

Tabela 2.2 – Informações sobre os termos existentes no âmbito da drenagem urbana sustentável. (Continuação).

Fonte: Diversas, conforme indicado na Tabela.

| Termo | Significado                        | Primeira Referência | Objetivos                                                                                                                                                                                                                                                                              | Locais adotados                  | Exemplos de Manuais                                                                                                                                         | Observações                                                                                                                              | Referências   |
|-------|------------------------------------|---------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------|
| SCMs  | <i>Stormwater Control Measures</i> | 2008                | Abandonar o termo BMP, devido ao fato de que a maior parte do que foi construído não era a "melhor prática" e por ser um termo muito vago. Assim, o termo CSM refere-se às medidas estruturais e não estruturais adotadas como controle na fonte de geração de escoamento superficial. | América do Norte (EUA e Canadá). | <i>Ventura County Technical Guidance Manual for Stormwater Quality Control Measures</i> e <i>Stormwater Management Manual for Western Washington</i> (EUA). | O principal motivador para a criação desse termo foi que as BMPs adotadas, na maioria dos casos, não são as melhores ("best") almejadas. | [a], [s], [t] |

Quadro 2.2 – Referências bibliográficas consultadas para formular o Quadro 2.1.

- [a] FLETCHER *et al.* (2014)
- [b] <https://www.wbdg.org/>, acesso em 25/02/2016.
- [c] <http://www.creditvalleyca.ca/>, acesso em 25/02/2016.
- [d] VAN ROON *et al.* (2006)
- [e] <http://www.landcareresearch.co.nz/>, acesso em 25/02/2016.
- [f] <https://www.environment.gov.au/>, acesso em 25/02/2016.
- [g] WHELANS *et. al* (1994)
- [h] <http://www-wds.worldbank.org/external>, acesso em 25/02/2016.
- [i] <http://water.worldbank.org/iuwm>, acesso em 25/02/2016.
- [j] BARHI (2012). Disponível em: [http://www.gwp.org/Global/The%20Challenge/Resource%20material/GWP\\_TEC16.pdf](http://www.gwp.org/Global/The%20Challenge/Resource%20material/GWP_TEC16.pdf), acesso em 25/02/2016.
- [k] <https://publications.csiro.au/>, acesso em 25/02/2016.
- [l] <http://geoinfo.mrt.ac.lk/>, acesso em 25/02/2016.
- [m] CIRIA (2015). Disponível em: [http://www.ciria.org/Memberships/The\\_SuDS\\_Manual\\_C753\\_Chapters.aspx](http://www.ciria.org/Memberships/The_SuDS_Manual_C753_Chapters.aspx), acesso em 25/02/2016.
- [n] <http://www.susdrain.org/>, acesso em 25/02/2016.
- [o] <http://www.legislation.gov.uk/>, acesso em 25/02/2016.
- [p] <http://www3.epa.gov/>, acesso em 25/02/2016.
- [q] <http://www.omafra.gov.on.ca/>, acesso em 25/02/2016.
- [r] <https://www.fcm.ca/>, acesso em 25/02/2016.
- [s] <http://www.swrcb.ca.gov/>, acesso em 25/02/2016.
- [t] <https://fortress.wa.gov/>, acesso em 25/02/2016.
- [u] <http://www.unepdhi.org/>, acesso em 25/02/2016.
- [v] <http://www.europarc.org/>, acesso em 25/02/2016.
- [w] <http://watersensitivecities.org.au/>, acesso em 25/02/2016.

Assim como no mundo, no Brasil, também existem diversos termos que são adotados na temática de drenagem urbana sustentável, como “medidas não estruturais” (CANHOLI, 2014), “medidas de controle do escoamento” (TUCCI e GENZ, 2015) e “técnicas compensatórias em drenagem urbana” (BRASIL, 2006; BAPTISTA *et al.*, 2015; MIGUEZ *et al.*, 2015), sendo este último o mais referenciado atualmente.

De acordo com Baptista *et al.* (2015), técnicas compensatórias são medidas que visam compensar os efeitos da urbanização, e baseiam-se, essencialmente, na retenção e na infiltração das águas precipitadas, visando o rearranjo temporal das vazões e, eventualmente, a diminuição do volume escoado, reduzindo a probabilidade de inundações e possibilitando ganhos na qualidade das águas pluviais. Na Tabela 2.3 estão apresentados os principais exemplos de medidas de técnicas compensatórias que podem ser adotados em projetos de drenagem urbana com enfoque sustentável.

Tabela 2.3 – Técnicas compensatórias: características, responsabilidade e exemplos.

Fonte: Elaborado pelo autor, baseado em Baptista *et al.* (2015) e Miguez *et al.* (2015).

| Técnicas compensatórias |                                | Características                                                                                                              | Responsabilidade                 | Exemplos de medidas                                                               |
|-------------------------|--------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------|
| <b>Não Estruturais</b>  |                                | Disciplinam a ocupação e o uso do solo e a conscientização da população                                                      | Poder público e/ou população     | Criação de legislação; Racionalização do uso do solo urbano; e Educação ambiental |
| <b>Estruturais</b>      | De controle na fonte (Pontual) | Construção de estruturas destinadas a armazenar e/ou infiltrar na escala de um lote                                          | Proprietário da área             | Poços de infiltração; Reservatórios de lote; e Telhados verdes                    |
|                         | Linear                         | Implantação de medidas de armazenamento e infiltração em áreas maiores a serem drenadas, como ruas, estacionamentos e pátios | Proprietário da área e/ou Estado | Trincheiras de infiltração; Valas de infiltração e Pavimentos permeáveis          |
|                         | Controle centralizado (Bacia)  | Execução de estruturas de drenagem de grande porte                                                                           | Entidade pública e/ou privada    | Reservatórios de detenção e retenção; Medidas de infiltração em larga escala      |

Pode-se observar, neste ponto, que o telhado verde é um exemplo de tecnologia que é sugerida para ser adotada em praticamente todas as abordagens que existem no mundo para a concepção de projetos sustentáveis, não só no âmbito da drenagem pluvial, mas como também na construção civil. Apesar de ser considerado, com frequência, como uma técnica compensatória de infiltração (apesar da água não infiltrar para o lençol da bacia), o telhado verde, de acordo com seu projeto, pode funcionar também como uma medida

de armazenamento, se controladas as condições de saída da água drenada através das camadas do módulo da cobertura verde. Além disso, permite reter água por interceptação vegetal.

Considerando todos os conceitos e termos adotados, não só no Brasil, mas em todo mundo, mesmo com suas divergências, todos visam, conforme Canholi (2014), uma integração dos projetos de drenagem urbana com os planos de desenvolvimento urbano e a gestão da ocupação e uso do solo assim como o uso de técnicas preservacionistas. Essa visão propicia uma melhor abrangência temporal e espacial dos projetos de combate às inundações, uma vez que busca intervir não na consequência das grandes chuvas, mas nas causas das grandes inundações. A mudança para uma visão sustentável das soluções em drenagem urbana exige um compromisso com as consequências futuras das decisões tomadas no presente, portanto as soluções devem ser flexíveis o bastante para permitir possíveis modificações e adaptações no decorrer do desenvolvimento urbano.

Nesse contexto, destaca-se que a abordagem integrada aplicada ao plano de drenagem urbana consiste na vinculação, de forma simultânea, dos aspectos ligados ao manejo das águas pluviais com o projeto de ordenamento territorial, agregando soluções para problemas relacionados às águas pluviais, à valorização do espaço urbano ou, de forma inversa, buscando a adoção de padrões urbanísticos adequados ao manejo sustentável das águas pluviais. A nova visão acadêmica e técnica sobre as inundações urbanas salienta a importância do tratamento do problema em sua fonte, de uma maneira sistêmica, com ações distribuídas sobre a paisagem urbana, a fim de atenuar e retardar o pico de cheia, permitindo também, a recarga das águas subterrâneas pelo favorecimento da infiltração, procurando restabelecer, o quanto possível, as condições naturais de escoamento pré-urbanização (MASCARENHAS *et al.*, 2007)

Por fim, cabe destacar que, de acordo com Míguez *et al.* (2015), pode-se dizer, em princípio, que as novas tendências em drenagem urbana têm uma vocação mais sustentável e, de forma geral, seriam preferíveis às soluções tradicionais. Entretanto, a combinação das técnicas tradicionais com as técnicas compensatórias, realizadas em arranjos sistêmicos, focados em reorganização espacial dos escoamentos produzidos pela bacia, pode ser efetiva em algumas situações.

### 3 COBERTURAS VERDES

*“Pois não é verdadeiramente ilógico que a superfície inteira de uma cidade não seja utilizada, mas apenas reservada para que as ardósias dos telhados e as estrelas se contemplem mutuamente”*  
(Le Corbusier<sup>10</sup>)

#### 3.1 INTRODUÇÃO

A palavra *naturação* é um neologismo e baseia-se na terminologia latina *Natura*, que significa natureza em seu sentido mais amplo. Esta palavra encerra um conceito vasto, pois implica em envolver a vida urbana e rural em um meio ambiente onde a natureza recupere o protagonismo, através de espécies vegetais que melhorem as condições de vida de uma forma sustentável (BRIZ, 1999 *apud* ROLA, 2008).

O sistema de *naturação* é uma tecnologia de aplicação de vegetação sobre superfícies construídas, que, resgatando os princípios de tornar verdes as áreas edificadas, busca amenizar os impactos do desenvolvimento urbano, explorando cientificamente as respostas às demandas ambientais, e redirecionando as cidades para o desenvolvimento sustentável, obtendo assim uma maior integração entre espaço urbano – cidadão – natureza. A técnica de *naturação* pode ser aplicada em quaisquer áreas construídas, ou seja, coberturas, fachadas e vias (ROLA, 2008).

Um dos motivos pelo qual a *naturação* tem despertado tanto interesse na gestão pública de várias cidades, enquanto estratégia de sustentabilidade ambiental, advém do fato de possibilitarem a implantação de vegetação nas cidades sem entrar no mérito das disputas pelo uso e ocupação do solo, já que utilizam a cobertura e fachada de edifícios para este fim (CAETANO *et al.*, 2010).

Dentro do arcabouço da *naturação*, o presente trabalho desenvolve-se acerca de sua aplicação em telhados, conhecida popularmente como telhados verdes, também chamados de “lajes jardim, tetos vivos, tetos verdes, terraços jardim, coberturas verdes, jardins suspensos” (VERGARA *et al.*, 2009), “coberturas ecológicas, ajardinadas, vegetadas ou naturadas” (NASCIMENTO e SCHMID, 2008), “biotelhas, ecotelhas”

---

<sup>10</sup> **Charles-Edouard Jeanneret-Gris**, mais conhecido como **Le Corbusier**: Arquiteto, urbanista, escultor e pintor de origem suíça e naturalizado francês em 1930. É considerado um dos mais importantes arquitetos do século XX.  
(Fonte: WIKIPEDIA, 2016).

(OLIVEIRA, 2009), ou ainda como “*green roof, living roof, ecological roof, sod roof, turf roof e roofgarden*”, na língua inglesa (NASCIMENTO, 2015).

As coberturas verdes trazem consigo a ideia de recomposição da vegetação original retirada do solo, de forma a recuperar as propriedades superficiais originais. Para isto, tal tecnologia utiliza a cobertura das edificações, onde são implantadas camadas de vegetação, substrato, filtro, drenagem e impermeabilização, de modo a simular uma superfície de solo vegetado. Em certo sentido, as coberturas verdes podem ainda ser entendidas como uma forma de realocação da vegetação do solo retirada para a implantação da edificação (CAETANO *et al.*, 2010).

A ideia do retorno de áreas verdes, não só agradáveis esteticamente, mas também uteis em trazer à composição urbana parcelas importantes do ciclo hidrológico, perdidas em seu processo de consolidação, está totalmente alinhada com a abordagem sustentável para a qual a drenagem urbana vem evoluindo, como mencionado no capítulo anterior.

Assim, como técnica compensatória em drenagem urbana, Garrido Neto (2012) destaca que as chuvas que precipitam nas cidades impermeabilizadas podem ter seus efeitos atenuados pelas coberturas naturadas, nas quais ocorrem a interceptação vegetal, o consumo de água pela vegetação, a evapotranspiração, e o armazenamento de água no substrato, diminuindo, desta forma, a descarga das águas que chegam às galerias de drenagem das cidades em eventos de chuvas.

Como as áreas de coberturas representam significativa parte da superfície dos centros urbanos, nos quais praticamente não existem mais espaços para novas infraestruturas, as coberturas verdes podem ser consideradas como uma boa tecnologia para resolver problemas, na escala da bacia hidrográfica (VERSINI *et al.*, 2014).

Versini *et al.* (2014) concluem, em sua pesquisa, que a implantação de coberturas verdes apresenta significativa redução do escoamento superficial de águas urbanas, em termos de vazão de pico e de volume, sendo que tais vantagens estão associadas (e se modificam) tanto com a distribuição temporal da chuva quanto com o estado inicial de saturação do substrato.

Em países como Alemanha, Áustria e Noruega, o conceito de telhado verde já é amplamente difundido, havendo, inclusive, empresas especializadas no assunto, sobretudo, devido ao antigo interesse desses países em combater a degradação ambiental e a rápida devastação dos espaços verdes em áreas de desenvolvimento urbano acelerado (ARAÚJO, 2007).

A maior parte dos estudos empíricos sobre a tecnologia de telhados verdes são baseadas em coberturas naturadas, localizadas no Reino Unido, Europa, Estados Unidos e Nova Zelândia. Atualmente, pesquisas em países tropicais estão em crescimento, tendo grandes contribuições no tema em países como Singapura, Malásia e Tailândia (KASMIN *et al.*, 2014).

No Brasil, de acordo com Krebs e Sattler (2010), apesar do crescente interesse de profissionais e usuários pela temática de telhados verdes, o país não possui tradição nesta técnica construtiva. As coberturas vivas têm sido pouco contempladas nas publicações nacionais e, quando são, dificilmente demonstram experiências práticas ou evidenciam recomendações de projetos em diferentes situações.

Observa-se, neste ponto, a carência do desenvolvimento de pesquisas sobre esta tecnologia em países tropicais, bem como a falta de padronização de parâmetros de projeto devido às diversas configurações que uma cobertura verde pode assumir. As variáveis são diversas, passando pela própria escolha da vegetação, a espessura e composição do substrato, as diferentes concepções de configuração da estrutura do telhado verde como um todo, que podem favorecer retenções (ou não) no corpo da cobertura, em função da restrição da descarga do telhado, entre outras.

Este capítulo objetiva apresentar o estado da arte da natureza em coberturas. Primeiro, será apresentado um breve histórico sobre esta tecnologia, trazendo destaque para a evolução da mesma no mundo e no Brasil. Em seguida, serão apresentadas as classificações existentes, as vantagens e desvantagens das coberturas verdes. Também serão abordados alguns sistemas de natureza em coberturas que existem, os aspectos a serem considerados no projeto e na construção de coberturas verdes. Por fim, será apresentado o telhado verde como técnica compensatória em drenagem urbana.

## **3.2 ASPECTOS HISTÓRICOS**

### **3.2.1 No mundo**

No contexto histórico, os telhados verdes não constituem nenhuma inovação conceitual, pois há muitos séculos já se fazia uso desta técnica construtiva de estimável valor para a manutenção do ciclo hidrológico (VERGARA *et al.*, 2009).

De acordo com Osmundson (1999), não se sabe exatamente quando os telhados verdes surgiram, porém, as primeiras evidências históricas apontam a existência de jardins sobre terraços desde a época das Antigas Civilizações.

Os primeiros registros de edificações com coberturas vegetais datam de 2500 anos antes da era cristã, com templos na Antiga Mesopotâmia, conhecidos como zigurates (Figura 3.1), que, em formato escalonado, possibilitavam a aplicação de vegetação em diferentes níveis (OSMUNDSON, 1999).

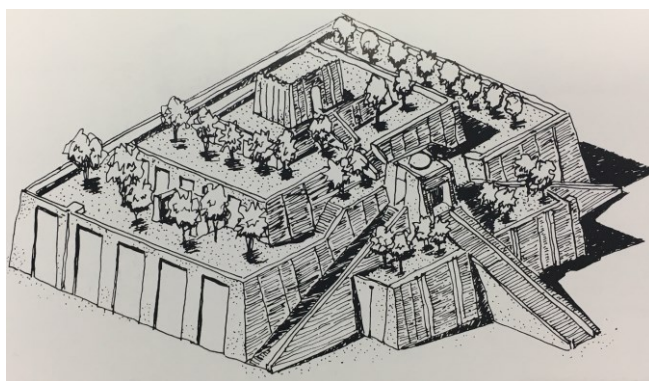


Figura 3.1 – Representação de um zigurarte na Antiga Cidade de Ur, na Babilônia.

Fonte: OSMUNDSON (1999).

Ainda na Mesopotâmia, há vários vestígios históricos da existência de outra edificação, também coberta com vegetação: um enorme templo chamado *Etemenanki*, um zigurate popularmente conhecido como Torre de Babel (Figura 3.2), que, em sumério, significa “casa que representa o céu na Terra” (LENDERING, 2015).



Figura 3.2 – Torre de Babel, na visão do pintor flamengo Pieter Brueghel.

Fonte: MORAES (2015).

Um dos exemplos mais famosos e considerados como uma das sete maravilhas do mundo Antigo, são os Jardins Suspensos da Babilônia (Figura 3.3). De acordo com Krystec (1998), possivelmente, estes Jardins foram construídos por volta do ano 600 a.C., a partir de ordem expressa do Rei Nabucodonosor II, com o objetivo de agradar e consolar a Rainha Amytis, que se encontrava acometida pela saudade das paisagens montanhosas e verdejantes de sua terra natal.



Figura 3.3 – Representação artística dos Jardins Suspensos da Babilônia.

Fonte: COURI (2015).

Os aspectos tecnológicos da natureza na Era Antiga derivam do que foram os Jardins Suspensos da Babilônia, que se supõe terem sido construídos sobre fileiras, abóbodas e terraços, suportados por vigas de pedra com uma camada de cana com piche, com duas fileiras de tijolo de barro montados com cimento e uma cobertura para evitar a infiltração da umidade do solo na estrutura (FINKEL, 1988 *apud* OSMUNDSON, 1999).

Na Idade Média e na Renascença, de acordo com Osmundson (1999), os exemplos mais expressivos são o *Mont Saint-Michel* (Figura 3.4), na França, localizado em uma ilha de pedra granítica, onde no topo está construída a Abadia Beneditina de Saint Michel. De arquitetura gótica e estruturado todo em pedra, trata-se de uma edificação em três andares com 22 salas, dentre elas, e localizada no primeiro andar, está a sala onde eram guardadas as provisões de alimentos, logo acima, no segundo andar, o *Scriptorium*, a sala de trabalho, e por sobre este, servindo de cobertura, há um claustro com colunas voltadas para um pátio onde se localiza um jardim a céu aberto, com plantas de porte médio ou arbustivas (Figura 3.5).



Figura 3.4 – *Mont-Saint-Michel*, na França.

Fonte: TRAVEL MONT SAINT MICHEL (2010).



Figura 3.5 – Foto do jardim do claustro da abadia de *Saint-Michel*, na França.

Fonte: LAFON (2002).

Outro exemplo é o *Palazzo Piccolomini* (Figura 3.6), em Pienza, na Itália, com um jardim de natureza intensiva, ainda preservado, desde meados do século XV. Ainda na Itália existem outros dois exemplos de coberturas verdes desse período: a Torre de Guinigi (Figura 3.7), em Lucca, que apresenta um jardim suspenso a uma altura de 36 m do nível da cidade, o qual é irrigado por um sistema subterrâneo, e o Jardim de Medici, em Careggi, densamente vegetado com espécies exóticas (OSMUNDSON, 1999).



Figura 3.6 – Fotografia do *Palazzo Piccolomini*, em Pienza, Itália.

Fonte: IL PARCO PIÙ BELLO D'ITALIA (2016).



Figura 3.7 – Fotografia da Torre de Guinigi com sete carvalhos, em Lucca, Itália.

Fonte: COLLINS (2014).

Nas Américas, no início do século XVI, destaca-se a grande cidade asteca de *Tenochtitlán* (Figura 3.8), onde atualmente é a Cidade do México, que é descrita como sendo uma cidade com cidadãos ricos cujas casas eram muito belas, com jardins. A cidade era praticamente composta por ilhas no lago *Texcoco*, o que limitava os espaços para jardins e áreas verdes de um modo geral. Assim, a adoção de jardins nas coberturas era uma das poucas opções de espaço para tê-los na cidade (OSMUNDSON, 1999).



Figura 3.8 – Ilustração da cidade asteca de *Tenochtitlán*.

Fonte: JUSSA (2013).

Os exemplos de coberturas vegetais dos anos 1600 a 1875 começam com a residência do cardeal Johan van Lamberg, em Passau, na Alemanha, seguindo, em 1733, pelo Palácio Kremlin (Figura 3.9), em Moscou, na Rússia, com 4 hectares de jardins com natureza intensiva construídos ao nível dos quartos da mansão. Outro exemplo é o Museu de Arte Hermitage (Figura 3.10), antigo palácio de inverno da Imperatriz Catarina II da Rússia, em Saint-Petersburg, na Rússia. Também são exemplos de coberturas verdes construídas nesse período, na Alemanha, o Jardim de Rabbitz, em Berlim, e o jardim do Rei Ludwig II, em Munique (OSMUNDSON, 1999).



Figura 3.9 – Vista do Grande Palácio do Kremlin, a partir do outro lado do rio Moscou, que corta a capital russa.

Fonte: COELHO e GARCIA (2009).

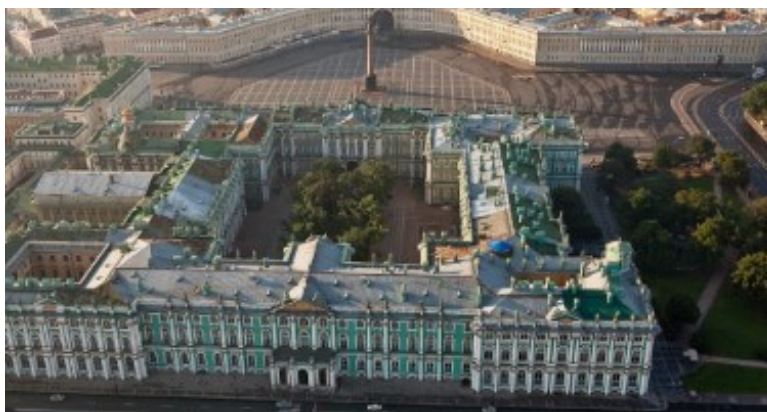


Figura 3.10 – Museu de Arte Hermitage, antigo palácio de inverno da Imperatriz Catarina II da Rússia, em Saint-Petersburg.

Fonte: Fotos do fotógrafo Rustem Adagamov disponibilizadas por CAMARGO (2013).

Dentre os exemplos mais famosos de construções com jardins nos terraços, de acordo com Osmundson (1999), da virada do século XIX para o século XX até a Segunda Guerra Mundial, estão os teatros nos Estados Unidos da América, como o Teatro Cassino, o Teatro Americano da Cidade de Nova Iorque, o *Oscar Hammerstein Olympia Music Hall*, o Teatro *Hammerstein Republic*, além de residências, restaurantes e hotéis, como o Domenico Restaurante, o Hotel Astor e alguns apartamentos que margeavam o Central Park, em Nova Iorque.

De acordo com Canero e Redondo (2010), o uso do telhado verde modernista, no passado mais recente, surgiu no início do século XIX com o arquiteto modernista Charles-Edouard Jeanneret-Gris, mais conhecido como Le Corbusier, e definido como conceito arquitetônico apenas em 1920, representando novo espaço fora da edificação para ser desfrutado. Solução também utilizada pelo arquiteto Frank Lloyd Wright, pai da arquitetura verde, para integrar os edifícios à paisagem. Após a Segunda Guerra Mundial, países como Alemanha, Suíça e Áustria adotaram esse modelo de forma intensa, mas só a partir das últimas décadas do século XX vem ganhando reconhecimento e importância, em razão dos benefícios proporcionados, sendo a Alemanha talvez seu principal expoente.

Como melhor exemplo do movimento modernista da época, Le Corbusier projeta e constrói, em Poissy, na França, a *Villa Savoye (les Heures Claires)*, entre os anos de 1928 a 1931 (Figura 3.11) (SBRIGLIO, 1999 *apud* ROLA, 2008).



Figura 3.11 – Fotos de *Villa Savoye*, na França, com vista para fachada e cobertura.

Fonte: ARCHIKEY (2016).

Wells e Grant (2004) destacam que, no século XIX, na Alemanha, as coberturas dos prédios de apartamentos de baixo custo recebiam uma camada de areia, cascalho e torrões de grama como proteção contra incêndios, resguardando as áreas próximas às saídas das chaminés. Tais coberturas foram naturalmente ocupadas por outros tipos de plantas e por isso tornaram-se percussoras das coberturas verdes.

Nos anos 1970, o movimento ecológico urbano, iniciado na Alemanha, ajudou a ocupar os telhados como forma de devolver o verde às cidades. Os remanescentes das antigas coberturas verdes dos apartamentos do século XIX perduram até hoje, e novamente atuaram como protótipos, desta vez para o início do movimento alemão de coberturas verdes (NASCIMENTO e SCHMID, 2008).

Conforme Kuhn e Peck (2003), o mercado da natureza da Alemanha expandiu-se rapidamente nos anos 1980, passando de 1 (um) para 10 milhões de m<sup>2</sup> construídos (10 km<sup>2</sup>). Este crescimento foi estimulado, em grande parte, pela adoção de legislação estatal, concessões municipais e incentivos fiscais por m<sup>2</sup> de cobertura naturada.

Um exemplo muito interessante, na Alemanha, é o prédio de apartamentos *Waldspirale* (Figura 3.12), projetado pelo arquiteto austríaco Friedensreich Hundertwasser, onde além de uma arquitetura orgânica ele adota o sistema de natureza intensiva. A obra foi concluída em 2000, pelo arquiteto Heinz M. Springmann, em Darmstad, Alemanha (ROLA, 2008).



Figura 3.12 – Foto do *Waldspirale*, em Darmstad, na Alemanha.

Fonte: ATLAS OBSCURA (2016).

Destaca-se ainda que a mais antiga regulamentação sobre telhados verdes, publicada na década de 90 do século XX, foi o *Guidelines for the planning, execution and upkeep of Green Roof sites*, na Alemanha (IGRA, 2015).

Na Áustria, de acordo com Oliveira (2009 *apud* Johnston, 1996), o subsídio para implantação de telhados verdes divide-se em três fases, sendo na pré-implantação, na construção e após três anos, a fim de garantir a manutenção do sistema e garantir seu pleno funcionamento, pois o maior interesse destes governos está no benefício qualitativo e quantitativo do gerenciamento das águas pluviais urbanas.

Antigamente, os jardins em coberturas eram, em maior parte, para mostrar riqueza e poder, como o caso dos “Jardins Suspensos da Babilônia” (HAKE, 2007). Rola (2008) destaca que, atualmente, percebe-se que tal tecnologia representa a busca por melhoria ambiental dos degradados núcleos densamente urbanizados.

Nesse sentido, observa-se que os principais manuais ao redor do mundo que discorrem sobre práticas sustentáveis em drenagem urbana atualmente, como o *The SuDS Manual* (CIRIA, 2015), no Reino Unido; o *Evaluating Options for Water Sensitive Urban Design – A National Guide* (JSCWSC, 2009), na Austrália; e o *Low Impact Development - Technical Guidance Manual for Puget Sound* (HINMAN e WASHINGTON STATE UNIVERSITY EXTENSION FACULTY, 2012), indicam a utilização de telhados verdes.

Assim, as coberturas verdes vêm ganhando, no mundo, cada vez mais espaço como prática sustentável que garante a áreas pouco utilizadas, como os telhados, a possibilidade

de recuperação de algumas características ambientais que existiam antes do processo de ocupação do espaço. Destaca-se, neste âmbito, além da possibilidade de incremento e/ou promoção de uma biodiversidade nos centros urbanos, o auxílio na drenagem urbana, atuando como técnica compensatória, e o aumento do conforto térmico, com economia de energia. Os telhados verdes contribuem para reestabelecer nos espaços urbanos, processos do ciclo hidrológico perdidos na urbanização, reduzindo, assim, os volumes e a vazão de pico que são direcionadas para a rede de drenagem urbana.

Os exemplos de coberturas verdes que foram construídos no mundo durante o século XXI estão apresentados nos Quadros a seguir (Quadro 3.1 ao Quadro 3.4). Nestes quadros, constam o nome dos projetos, o ano e o local em que foram construídos e os projetistas ou arquitetos que os elaboraram. Além disto, nos quadros também constam as fotos dessas obras construídas.

Quadro 3.1 – Exemplos de coberturas verdes construídas no século XXI (2001 – 2004).

Fonte: Elaborado pelo autor, baseado em GARRIDO NETO (2012).

|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                       |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                       |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <p><b>Ano:</b> 2001</p> <p><b>Projeto:</b> <i>Chicago City Hall</i></p> <p><b>Local:</b> Chicago, EUA</p> <p><b>Projetistas/Arquitetos</b> <i>McDonough; Partners</i></p>  <p>Figura 3.13 – Exemplo de telhado verde construído em 2001.</p> <p>Fonte:<br/> <a href="http://www.greenroofs.com/projects/chicago/chichall11.jpg">http://www.greenroofs.com/projects/chicago/chichall11.jpg</a>, acesso em novembro de 2015.</p>                       | <p><b>Ano:</b> 2002</p> <p><b>Projeto:</b> <i>Private Hospital Villa Nadia</i></p> <p><b>Local:</b> Pianoro, Itália</p> <p><b>Projetistas/Arquitetos</b> <i>Riccardo Rigolli</i></p>  <p>Figura 3.14 – Exemplo de telhado verde construído em 2002.</p> <p>Fonte:<br/> <a href="http://www.greenroofs.com/projects/private-hospital-villa-nadia/villa-nadia.php?id=626">http://www.greenroofs.com/projects/private-hospital-villa-nadia/villa-nadia.php?id=626</a>, acesso em novembro de 2015.</p> |
| <p><b>Ano:</b> 2003</p> <p><b>Projeto:</b> <i>Banco HSBC</i></p> <p><b>Local:</b> Cidade do México, México</p> <p><b>Projetistas/Arquitetos</b> <i>Helmuth Obata; Kassabaum, Inc.</i></p>  <p>Figura 3.15 – Exemplo de telhado verde construído em 2003.</p> <p>Fonte:<br/> <a href="http://www.greenroofs.com/projects/hsbc_bank/hsbc_bank8.gif">http://www.greenroofs.com/projects/hsbc_bank/hsbc_bank8.gif</a>, acesso em novembro de 2015.</p> | <p><b>Ano:</b> 2004</p> <p><b>Projeto:</b> <i>ROCH, Israel</i></p> <p><b>Local:</b> Petach Tikwa, Israel</p> <p><b>Projetistas/Arquitetos</b> <i>Arie Kutz, Studio Landscap Architecture Ltd.</i></p>  <p>Figura 3.16 – Exemplo de telhado verde construído em 2004.</p> <p>Fonte:<br/> <a href="http://www.greenroofs.com/projects/roch-israel/roch_israel9.gif">http://www.greenroofs.com/projects/roch_israel/roch_israel9.gif</a>, acesso em novembro de 2015.</p>                            |

Quadro 3.2 – Exemplos de coberturas verdes construídas no século XXI (2005 – 2008).

Fonte: Elaborado pelo autor, baseado em GARRIDO NETO (2012).

|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                  |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                    |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <p><b>Ano:</b> 2005<br/> <b>Projeto:</b> <i>Allen; Overy LLP HQ, Bishops Square</i><br/> <b>Local:</b> Londres, Inglaterra<br/> <b>Projetistas/Arquitetos:</b> <i>Foster; Partners</i></p>  <p>Figura 3.17 – Exemplo de telhado verde construído em 2005.</p> <p>Fonte:<br/> <a href="http://www.greenroofs.com/projects/pview.php?id=887">http://www.greenroofs.com/projects/pview.php?id=887</a>, acesso em novembro de 2015.</p>             | <p><b>Ano:</b> 2006<br/> <b>Projeto:</b> <i>School of Art, Design and Media</i><br/> <b>Local:</b> Nanyang Tech Univ, Singapura<br/> <b>Projetistas/Arquitetos:</b> <i>CPG Consultants Pte Ltd.</i></p>  <p>Figura 3.18 – Exemplo de telhado verde construído em 2006.</p> <p>Fonte:<br/> <a href="http://www.greenroofs.com/projects/pview.php?id=846">http://www.greenroofs.com/projects/pview.php?id=846</a>, acesso em novembro de 2015.</p> |
| <p><b>Ano:</b> 2007<br/> <b>Projeto:</b> <i>NYC Parks Five borough Adm Building</i><br/> <b>Local:</b> Nova Iorque, EUA<br/> <b>Projetistas/Arquitetos:</b> <i>Artie Rollins; John Robliotti</i></p>  <p>Figura 3.19 – Exemplo de telhado verde construído em 2007.</p> <p>Fonte:<br/> <a href="http://www.greenroofs.com/projects/pview.php?id=787">http://www.greenroofs.com/projects/pview.php?id=787</a>, acesso em novembro de 2015.</p> | <p><b>Ano:</b> 2008<br/> <b>Projeto:</b> <i>Marina Barrage</i><br/> <b>Local:</b> Singapura<br/> <b>Projetistas/Arquitetos:</b> <i>Architects Team 3 Pte Ltd.</i></p>  <p>Figura 3.20 – Exemplo de telhado verde construído em 2008.</p> <p>Fonte:<br/> <a href="http://www.greenroofs.com/projects/marina_barrage/">http://www.greenroofs.com/projects/marina_barrage/</a>, acesso em novembro de 2015.</p>                                   |

Quadro 3.3 – Exemplos de coberturas verdes construídas no século XXI (2009 – 2011).

Fonte: Elaborado pelo autor, baseado em GARRIDO NETO (2012).

|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                               |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <p><b>Ano:</b> 2009<br/> <b>Projeto:</b> <i>Vancouver 2010 Olympic Village</i><br/> <b>Local:</b> Vancouver, Canadá<br/> <b>Projetistas/Arquitetos:</b> <i>Durante Kreuk</i></p>  <p>Figura 3.21 – Exemplo de telhado verde construído em 2009.</p> <p>Fonte:<br/> <a href="http://www.greenroofs.com/projects/pview.php?id=523">http://www.greenroofs.com/projects/pview.php?id=523</a>, acesso em novembro de 2015.</p>                    | <p><b>Ano:</b> 2010<br/> <b>Projeto:</b> <i>8 House (8 Tallet)</i><br/> <b>Local:</b> Copenhagen, Dinamarca<br/> <b>Projetistas/Arquitetos:</b> <i>Bjarke Ingles Group (BIG)</i></p>  <p>Figura 3.22 – Exemplo de telhado verde construído em 2010.</p> <p>Fonte:<br/> <a href="http://www.greenroofs.com/projects/8house/8house10.gif">http://www.greenroofs.com/projects/8house/8house10.gif</a>, acesso em novembro de 2015.</p>          |
| <p><b>Ano:</b> 2011<br/> <b>Projeto:</b> <i>Breaking Ground ContractGreen Roof</i><br/> <b>Local:</b> Jacksonville, EUA<br/> <b>Projetistas/Arquitetos:</b> <i>Kevin Songer; MetroVerde</i></p>  <p>Figura 3.23 – Exemplo de telhado verde construído em 2011.</p> <p>Fonte:<br/> <a href="http://www.greenroofs.com/projects/pview.php?id=1304">http://www.greenroofs.com/projects/pview.php?id=1304</a>, acesso em novembro de 2015.</p> | <p><b>Ano:</b> 2011<br/> <b>Projeto:</b> <i>Sheet Metal Workers Local #36</i><br/> <b>Local:</b> St. Louis, EUA<br/> <b>Projetistas/Arquitetos:</b> <i>Kelly Luckett; Green Roof Blocks</i></p>  <p>Figura 3.24 – Exemplo de telhado verde construído em 2011.</p> <p>Fonte:<br/> <a href="http://www.greenroofs.com/projects/pview.php?id=1364">http://www.greenroofs.com/projects/pview.php?id=1364</a>, acesso em novembro de 2015.</p> |

Quadro 3.4 – Exemplos de coberturas verdes construídas no século XXI (2012 – 2015).

Fonte: Elaborado pelo autor, baseado em GREENROOFS (2016).

|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                  |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                  |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <p><b>Ano:</b> 2012</p> <p><b>Projeto:</b> <i>Casa Vallarta Greenroof</i></p> <p><b>Local:</b> Jalisco, Mexico</p> <p><b>Projetistas/Arquitetos:</b> <i>Cynthia Villalba, Zona Verde MX</i></p>  <p>Figura 3.25 – Exemplo de telhado verde construído em 2012.</p> <p>Fonte:<br/> <a href="http://www.greenroofs.com/projects/pview.php?id=1584">http://www.greenroofs.com/projects/pview.php?id=1584</a>, acesso em janeiro de 2016.</p>                       | <p><b>Ano:</b> 2013</p> <p><b>Projeto:</b> <i>U.S. Coast Guard Headquarters</i></p> <p><b>Local:</b> Washington, EUA</p> <p><b>Projetistas/Arquitetos:</b> <i>Perkins + Will</i></p>  <p>Figura 3.26 – Exemplo de telhado verde construído em 2013.</p> <p>Fonte:<br/> <a href="http://www.greenroofs.com/projects/pview.php?id=1385">http://www.greenroofs.com/projects/pview.php?id=1385</a>, acesso em janeiro de 2016.</p> |
| <p><b>Ano:</b> 2014</p> <p><b>Projeto:</b> <i>Public Administration Town</i></p> <p><b>Local:</b> Sejong, Coréia do Sul</p> <p><b>Projetistas/Arquitetos:</b> <i>H Associates, Inc. and Haeahn Architecture</i></p>  <p>Figura 3.27 – Exemplo de telhado verde construído em 2014.</p> <p>Fonte:<br/> <a href="http://www.greenroofs.com/projects/pview.php?id=1715">http://www.greenroofs.com/projects/pview.php?id=1715</a>, acesso em janeiro de 2016.</p> | <p><b>Ano:</b> 2015</p> <p><b>Projeto:</b> <i>Fenway Farms</i></p> <p><b>Local:</b> Boston, USA</p> <p><b>Projetistas/Arquitetos:</b> <i>Recover Green Roofs</i></p>  <p>Figura 3.28 – Exemplo de telhado verde construído em 2015.</p> <p>Fonte:<br/> <a href="http://www.greenroofs.com/projects/pview.php?id=1729">http://www.greenroofs.com/projects/pview.php?id=1729</a>, acesso em janeiro de 2016.</p>               |

### 3.2.2 No Brasil

No Brasil, os primeiros exemplos de coberturas vegetais derivam do Movimento Modernista na Arquitetura Brasileira iniciado na década de 1930, tendo como o seu mais expressivo arquétipo o prédio do Ministério da Educação e Saúde, no Rio de Janeiro, também conhecido como o Palácio Gustavo Capanema (Figura 3.29), que foi projetado arquitetonicamente por Le Corbusier, Oscar Niemeyer e Lucio Costa, com projeto paisagístico do terraço-jardim de Burle Max (ROLA, 2008).



Figura 3.29 – Fotos do terraço-jardim projetado por Burle Marx na cobertura do Palácio Gustavo Capanema, na cidade do Rio de Janeiro.

Fonte: AMBIENTALISTAS EM REDE (2015).

É importante observar que, apesar do crescente interesse de profissionais e usuários por este tipo de cobertura, o Brasil não possui tradição técnica construtiva e há, ainda, certa carência de informações na literatura nacional sobre o assunto (KREBS e SATTLER, 2010).

Destacam-se, nesse contexto, as pesquisas realizadas por Krebs *et al.* (2012), Kist (2011) e Nascimento *et al.* (2008), em estados da região sul do Brasil, que buscaram verificar a proximidade e aceitação da população e da área técnica brasileira com a tecnologia de telhados verdes.

A pesquisa de Krebs *et al.* (2012), que teve como objetivo analisar as vantagens e os problemas existentes no imaginário da população sobre as coberturas verdes, a partir da aplicação de questionários, dentro de um universo composto por pessoas ligadas ou não à área de construção civil, no Rio Grande do Sul, concluiu que faltam informações técnicas sobre assunto no Brasil. Ainda de acordo com os autores, há preocupações de toda a ordem, e em todas as fases (projeto, execução e manutenção). Se, por um lado, as coberturas vivas são cada vez mais conhecidas pela população, por outro, as questões técnicas devem ser mais bem difundidas.

Kist (2011) pesquisou a respeito da satisfação de moradores de edificações com coberturas verdes, de um condomínio em Porto Alegre. A pesquisa demonstrou que os moradores, em média, estão satisfeitos com o uso de suas coberturas, apesar do alto número de ocorrência de casos de manifestações patológicas nas coberturas. A maioria conceberia, novamente, suas edificações com coberturas verdes, e quase a totalidade recomendaria o uso de coberturas verdes iguais às existentes em sua edificação.

Já a pesquisa de Nascimento *et al.* (2008) teve como objetivo investigar o grau de conhecimento dos profissionais da Construção Civil (arquitetos e engenheiros), no Paraná, em relação aos benefícios da tecnologia das coberturas verdes. Os autores concluíram que os profissionais investigados não têm a exata dimensão do alcance da técnica das coberturas verdes e desconhecem as inovações incrementais por que passou a tecnologia nos últimos 40 anos.

Em reportagem da revista CREA-RJ, publicada em dezembro de 2008, na seção de meio ambiente, foi comentado o sucesso de implantação de um telhado verde numa comunidade carente no alto de um morro de uma favela carioca, cujos moradores sofriam com a falta d'água. O projeto do telhado verde teve como função recolher e armazenar água da chuva (reservatórios de detenção ou acumulação), para ser utilizada na creche (para fins não potáveis). Foi patrocinado pelo *Massachusetts Institute of Technology* (MIT), sendo o principal objetivo acabar com os problemas de abastecimento de água, tendo como executores os técnicos do Instituto Tibá – RJ. A reportagem ainda ressalta, que, além dos inúmeros benefícios ambientais, a técnica também possui um benefício do bem-estar (psicológico e estético) (OLIVEIRA, 2009).



Figura 3.30 – Telhado Verde Extensivo no Morro da Babilônia, Leme.

Fonte: OLIVEIRA (2009).

No Brasil, destacam-se a atuação de algumas empresas no ramo da construção de coberturas verdes, como a Ecotelhado, a Studio Cidade Jardim e a SkyGarden. Os *sites* dessas empresas estão apresentados nas referências bibliográficas deste trabalho.

Alguns exemplos de coberturas verdes implantadas no Brasil, no período de 2010 a 2014, estão apresentados no Quadro 3.5. Como exemplo mais recente, pode ser citado o telhado verde construído na Estação Jardim Oceânico, uma das estações que compõe a Linha 4 do metrô da cidade do Rio de Janeiro.

Quadro 3.5 – Exemplos de coberturas verdes construídas no Brasil entre 2010 e 2014.

Fonte: Elaborado pelo autor, baseado em STUDIO CIDADE JARDIM.

|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                   |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                     |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <p><b>Ano:</b> 2010</p> <p><b>Projeto:</b> <i>Schlumberger – Fundão</i></p> <p><b>Local:</b> Ilha do Fundão, RJ</p> <p><b>Projetistas/Arquitetos:</b> <i>Zanettini Arquitetura</i></p>  <p>Figura 3.31 – Exemplo de telhado verde construído em 2010.</p> <p>Fonte:</p> <p><a href="http://www.studiocidadejardim.com.br/telhado-verde">http://www.studiocidadejardim.com.br/telhado-verde</a>, acesso em novembro de 2015.</p>  | <p><b>Ano:</b> 2011</p> <p><b>Projeto:</b> <i>Casa M &amp; M</i></p> <p><b>Local:</b> Bragança Paulista, SP</p> <p><b>Projetistas/Arquitetos:</b> <i>Studio MK27</i></p>  <p>Figura 3.32 – Exemplo de telhado verde construído em 2011.</p> <p>Fonte:</p> <p><a href="http://www.studiocidadejardim.com.br/telhado-verde">http://www.studiocidadejardim.com.br/telhado-verde</a>, acesso em novembro de 2015.</p> |
| <p><b>Ano:</b> 2012</p> <p><b>Projeto:</b> <i>Village Mall</i></p> <p><b>Local:</b> Barra da Tijuca, RJ</p> <p><b>Projetistas/Arquitetos:</b> <i>Coutinho, Diegues e Cordeiro</i></p>  <p>Figura 3.33 – Exemplo de telhado verde construído em 2012.</p> <p>Fonte:</p> <p><a href="http://www.studiocidadejardim.com.br/telhado-verde">http://www.studiocidadejardim.com.br/telhado-verde</a>, acesso em novembro de 2015.</p> | <p><b>Ano:</b> 2013</p> <p><b>Projeto:</b> <i>Edifício Ana Costa</i></p> <p><b>Local:</b> Santos, São Paulo</p> <p><b>Projetistas/Arquitetos:</b> -</p>  <p>Figura 3.34 – Exemplo de telhado verde construído em 2013.</p> <p>Fonte:</p> <p><a href="http://www.studiocidadejardim.com.br/telhado-verde">http://www.studiocidadejardim.com.br/telhado-verde</a>, acesso em novembro de 2015.</p>                |



Figura 3.35 – Estação Jardim Oceânico (Linha 4 do metrô), na cidade do Rio de Janeiro.

Fonte: O GLOBO (2016f).

No Brasil, já houveram esforços para regulamentar o uso de telhados verdes em alguns locais, como no Estado do Rio de Janeiro, Lei nº 6.349 (RIO DE JANEIRO, 2012), de 30/11/2012, no Estado de Santa Catarina, Lei nº 12.243 (SANTA CATARINA, 2007), de 11/12/2007, no Município de Recife, Lei nº 18.112 (RECIFE, 2015), de 12/01/2015, e no Município de São Paulo, Lei nº 16.277 (SÃO PAULO, 2015), de 05/10/2015, que versam sobre a adoção desta tecnologia.

A Lei Estadual do Rio de Janeiro promove a construção de telhados verdes apenas em prédios públicos, autarquias e fundações do Estado do Rio de Janeiro, projetados a partir da promulgação da referida Lei. Já a Lei Estadual de Santa Catarina cria o Programa Estadual de Incentivo a Adoção de Telhados Verdes em espaços urbanos densamente urbanizados, porém não explicita em que ocasiões as coberturas verdes devem ser adotadas nos projetos.

A Lei Municipal de Recife impõe a implantação de coberturas verdes em edificações habitacionais multifamiliares com mais de 400 m<sup>2</sup> de área coberta. Já a Lei do Município de São Paulo não especifica em que locais devem ser previstos os telhados verdes, mesmo que no Projeto de Lei nº 115/2009 indicasse que os telhados verdes deveriam ser projetados em condomínios edificadas, residenciais ou não, com mais de 3 (três) unidades agrupadas verticalmente.

Encontra-se ainda em tramitação, o Projeto de Lei nº 011/2014, que obriga os projetos de construção e de reforma de edificações públicas do Município de Porto Alegre, preverem a instalação de telhado verde, ou ecotelhado.

### 3.3 OS SISTEMAS DE NATURAÇÃO

Observa-se que em muito variam as técnicas executivas para proporcionar a naturalização em superfícies construídas, ganhando destaque até algumas técnicas já patenteadas por empresas.

Basicamente, a naturalização pode ser sistematizada, conforme ilustrado na Figura 3.36 em três tipos convencionais: o completo, o modular e o de manta vegetativa pré-cultivada (OBERNDORFER *et al.*, 2007). A seguir será descrito, de modo mais detalhado, cada um desses sistemas.

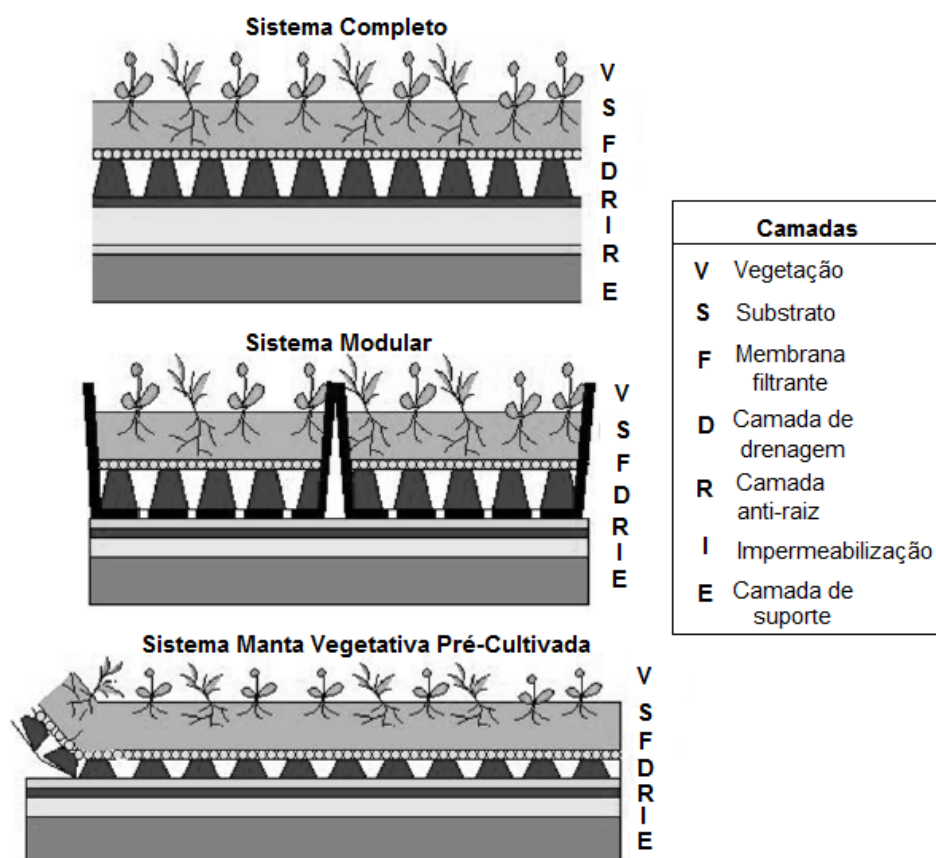


Figura 3.36 – Tipos de sistemas de telhados verdes.

Fonte: OBERNDORFER *et al.* (2007).

### 3.3.1 Sistema Completo

O sistema completo é o sistema mais comum em uso no mundo e é aplicado diretamente na superfície da estrutura de suporte (ROLA, 2008). Esse sistema é composto por uma série de camadas, dispostas sobre a estrutura de suporte, de baixo para cima, na seguinte ordem: impermeabilização, drenagem, filtro, substrato e vegetação. A Figura 3.37 apresenta um exemplo de uma cobertura verde com sistema completo que poderia ser implantada sobre uma estrutura de suporte.

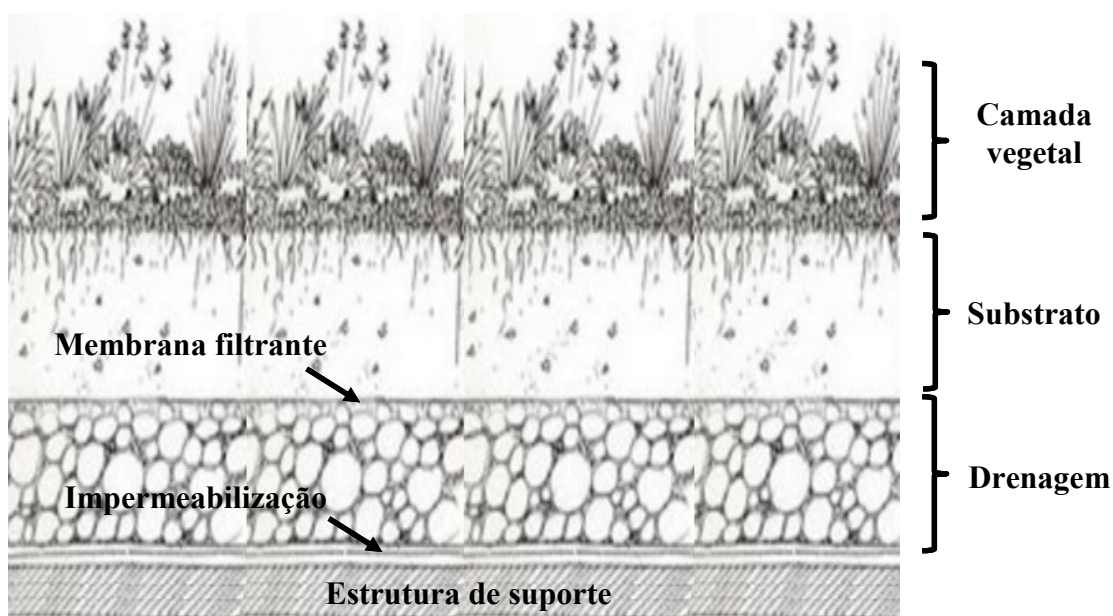


Figura 3.37 – Composição de telhado verde com sistema completo.

Fonte: DUNNET e KINGSBURRY (2004), adaptado pelo autor.

A construção de coberturas verdes deste tipo é realizada a partir da execução de cada camada (drenagem, filtragem, substrato), sobre a estrutura de suporte devidamente impermeabilizada e capaz de resistir ao peso adicional das camadas advindas da cobertura verde, e posterior plantio da camada de vegetação até que esta cresça ao tamanho necessário. Destaca-se que devem ser previstas sistemas de drenagem que recolham as águas drenadas pelas camadas do telhado e as direcionem para a rede de drenagem associada à edificação.

No Capítulo 4 será detalhada a construção de um protótipo de cobertura verde do tipo sistema completo. A seguir, serão detalhadas cada camada, representada na Figura 3.37 que compõe este sistema.

### **3.3.1.1 Estrutura de suporte**

A estrutura de suporte é aquela que receberá toda a carga advinda do peso das demais camadas, incluindo toda a água que é capaz de ficar retida no sistema do telhado.

De acordo com Ferraz e Leite (2011), a camada de suporte pode ser de madeira, bambu, metal ou concreto armado, desde que propriamente impermeabilizada e que resista à carga do tipo de cobertura escolhido, observando que a carga sobre a estrutura deve ser calculada considerando o peso das plantas em sua fase adulta, e a quantidade de água que pode ficar retida no sistema.

### **3.3.1.2 Camada de impermeabilização**

Esta camada, de acordo com Rola (2008), tem por função proteger a camada de suporte contra toda e qualquer umidade proveniente do meio externo, passando pelo sistema, assegurando a estanqueidade do mesmo. Esta camada é extremamente importante e demanda estudos específicos quanto ao tipo a ser utilizado para impermeabilizar adequadamente a base de suporte onde o sistema de natação deve ser aplicado.

Em alguns casos, pode ser necessário que a camada impermeabilizante apresente considerável resistência à perfuração, que pode ser eventualmente causado pela ação do crescimento das raízes. Nesses casos, é desejável que, a camada impermeabilizante apresente algum componente químico anti-raiz. Ferraz e Leite (2011) chamam a atenção para o fato de que apenas uma membrana anti-raiz não é impermeável, e não deve ser usada para substituir a manta impermeabilizante.

Destaca-se que, atualmente, existem diversos tipos de impermeabilizantes, devendo ser verificado, para cada caso específico, qual o melhor a ser adotado, sendo os usualmente mais utilizados em coberturas a manta de PVC e a manta asfáltica.

### **3.3.1.3 Camada de drenagem**

Esta camada tem por função recolher as precipitações e excedentes a regra em toda a superfície, conduzindo-as aos deságues. O material a ser utilizado nesta camada deve ser de origem mineral e o mais leve possível, de preferência poroso, e prioritariamente de

canto rolado (arredondado) para que não ofereça risco de perfuração para a membrana impermeabilizante e com corpúsculos de diâmetro não menor que 10 mm (ROLA, 2008). Um bom exemplo de material que pode ser utilizado nesta camada é a argila expandida.

Ferraz e Leite (2011) ainda apontam que a camada de drenagem pode ter funções adicionais, como armazenamento de água para uso na estiagem, aumento da área de raízes e espaço para a aeração do sistema. Pode-se acrescentar, como função desta camada, também a possibilidade de armazenamento temporário para controle de cheias, quando o volume de vazios pode funcionar como reservatório para o amortecimento das vazões entregues ao sistema de drenagem pluvial.

Cabe destacar, porém, que arquitetos e engenheiros, de um modo geral, não são favoráveis ao armazenamento prolongado (para usos posteriores) de água em coberturas, visto que isto pode causar algumas patologias, como a redução da vida útil da impermeabilização e, por consequência, o surgimento de infiltrações, além do aumento da carga sobre a estrutura de suporte. Porém, destaca-se que as coberturas verdes tendem a proporcionar um armazenamento apenas temporário.

#### **3.3.1.4 Camada separadora filtrante de proteção**

Trata-se de uma camada que tem como objetivo evitar que as partículas finas da camada de substrato sejam carreadas para a camada de drenagem, evitando, assim, que ocorram obstruções na camada de drenagem. O material mais comum utilizado para esta finalidade é a manta geotêxtil.

#### **3.3.1.5 Substrato de suporte de vida vegetal**

O substrato é uma mistura de elementos orgânicos e inorgânicos capazes de manter: o nível de nutrientes, umidade e oxigenação durante um período de tempo economicamente viável (ROLA, 2008).

A espessura adequada do substrato deve ser determinada de acordo com o tipo de cobertura e espécie vegetal adotada, observando sua necessidade de nutrientes e aeração. Dependendo do tipo de cobertura verde, uma grande variedade de substratos está disponível. As características dos substratos são: granulação, porcentagem de matéria orgânica, estabilidade estrutural, resistência à erosão pelo vento, permeabilidade, capacidade máxima de retenção de água, quantidade de nutrientes, aeração e pH. Junto

com a camada de drenagem, o substrato facilita a drenagem do excesso de águas pluviais (IGRA, 2015).

#### **3.3.1.6 Vegetação**

Dependendo da localização da superfície a ser naturada, algumas peculiaridades devem ser levadas em consideração como, por exemplo, o microclima e regime de chuvas do local, para que a seleção da vegetação seja a mais adequada possível, sendo sempre preferível a adoção de vegetação autóctone<sup>11</sup> (ROLA, 2008). A redução da necessidade de manutenção e, até mesmo de regas, pode ser um fator importante em determinados climas e funcionalmente, para o cumprimento de objetivos específicos.

#### **3.3.2 Sistema Modular**

O sistema modular é o “sistema completo” só que desenvolvido em pequenos módulos (caixas), onde quase todas as camadas do sistema completo, com exceção da impermeabilizante, são montadas de forma “completa” e, somente após a consolidação da vegetação é que os módulos são instalados em cima do telhado, já impermeabilizado. Este sistema apresenta-se em espessuras que vão de 7,5 cm a 30 cm (ROLA, 2008).

A construção de coberturas verdes deste tipo é realizada a partir da colocação dos módulos até cobrir toda a área da cobertura, que deve estar já devidamente impermeabilizada e dimensionada para receber a carga extra advinda da cobertura verde. Nos casos em que os módulos não se encaixem de modo a cobrir toda a área, os espaços entre os módulos podem ser preenchidos por brita ou por argila expandida, devendo a diferença entre os espaços dos módulos ser, preferencialmente, deslocadas para as bordas da superfície.

Na Figura 3.38 está ilustrado um módulo componente do sistema modular e na Figura 3.39 e Figura 3.40 estão apresentadas fotos com o processo de aplicação desse sistema em uma cobertura.

---

<sup>11</sup> **Autóctone**: originária do lugar em que habitam, presença natural em uma determinada região.



Figura 3.38 – Módulo de telhado verde de um sistema modular.

Fonte: STUDIO CIDADE JARDIM, acesso em 13 de novembro de 2015.



Figura 3.39 – Aplicação do sistema modular em uma cobertura.

Fonte: STUDIO CIDADE JARDIM, acesso em 13 de novembro de 2015.



Figura 3.40 – Aplicação do sistema modular em uma cobertura.

Fonte: STUDIO CIDADE JARDIM, acesso em 13 de novembro de 2015.

### 3.3.3 Sistema Manta Vegetativa Pré-Cultivada

O sistema da manta vegetativa pré-cultivada é a de menor espessura. É cultivado fora da área onde será implantado, o que possibilita a sua produção em larga escala (ROLA, 2008). Assemelha-se a um tapete de cobertura verde, a ser colocado sobre a área a ser naturada, possuindo, portanto, uma execução bastante simplificada. A Figura 3.41 apresenta fotos que ilustram este sistema de naturalização. As vantagens de aplicação, porém, levam também a uma menor capacidade de retenção de águas.



Figura 3.41 – Sistema da manta pré-cultivada aplicada em uma cobertura residencial.

Fonte: CITY OF TORONTO, acesso em 18 de janeiro de 2016.

## 3.4 CLASSIFICAÇÃO DAS COBERTURAS VERDES

Os telhados verdes podem ser classificados de diversos modos. Basicamente, cada modo de classificação considera como critério alguma característica específica que pode ser identificada na cobertura verde, como seu “porte”, sua declividade, sua acessibilidade, ou até mesmo o material da estrutura sobre a qual é apoiado o telhado verde.

A classificação mais comum das coberturas verdes é a que tenta associar uma espécie de “porte” a tal tecnologia. Assim, são levados em consideração fatores como a espessura das camadas, a necessidade de manutenção e o custo de implantação. Neste contexto, os telhados verdes podem ser classificados dos que apresentam “maior porte”, denominados intensivos, até os que possuem “menor porte”, conhecidos como extensivos, possuindo, ainda entre estas duas classificações, os de “porte intermediário”, nomeados de semi-intensivos.

A Tabela 3.1 apresenta as características das coberturas verdes ditas como intensivas, semi-intensivas e extensivas. A Figura 3.42 apresenta uma ilustração com a identificação de cada um desses tipos de telhados verdes.

Tabela 3.1 – Classificação dos sistemas de naturezação em coberturas, de acordo com seus componentes.

Fonte: ROLA (2008) e IGRA (2015).

| CLASSIFI-<br>CAÇÃO    | CARACTERÍSTICAS                                    |                     |                        |                    |                    |           |        |
|-----------------------|----------------------------------------------------|---------------------|------------------------|--------------------|--------------------|-----------|--------|
|                       | Carga superficial                                  | Espessura vegetal   | Espessura do substrato | Tipo de vegetação  | Manutenção         | Irrigação | Custos |
| <b>Intensiva</b>      | de 700 kg/m <sup>2</sup> a 1.200 kg/m <sup>2</sup> | superior a 250 cm   | maior que 20 cm        | arbóreo            | intensa            | regular   | alto   |
| <b>Semi-Intensiva</b> | de 100 kg/m <sup>2</sup> a 700 kg/m <sup>2</sup>   | entre 5 cm e 100 cm | entre 10 cm e 20 cm    | arbustivo          | Média ou periódica | periódica | médio  |
| <b>Extensiva</b>      | até 100 kg/m <sup>2</sup>                          | entre 5 cm e 15 cm  | até que 10 cm          | herbáceo extensivo | baixa ou nenhuma   | nenhuma   | baixo  |

**Obs.** Para o caso brasileiro, o tipo de vegetação apresenta classificações não definitivas, devido ao fato de que esta técnica ainda está em evolução, pela sua adaptação técnica e biológica às especificidades dos trópicos.

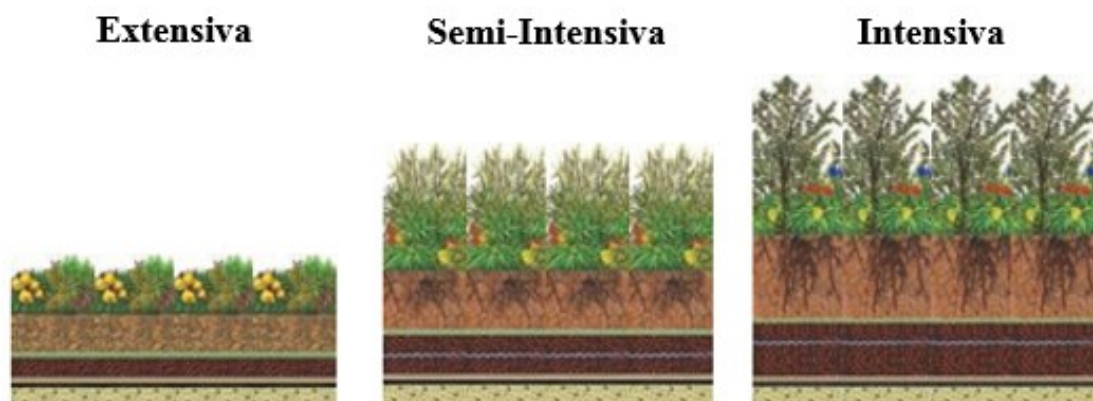


Figura 3.42 – Ilustração das camadas de coberturas verdes extensivas, semi-intensiva e intensiva.

Fonte: GRREN ROOF TECHNOLOGY, acesso em 18 de janeiro de 2016.

Minke (2004) diferencia os telhados verdes pela inclinação que estes apresentam. A Tabela 3.2 apresenta, de modo resumido, a classificação feita por Minke (2004), para cada faixa de inclinação que pode ter a cobertura verde, e as principais características destas.

Tabela 3.2 – Classificação dos telhados verdes de acordo com a declividade.

Fonte: Autor, baseado em Minke (2004).

| CLASSIFICAÇÃO               | CARACTERÍSTICAS            |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                       |
|-----------------------------|----------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
|                             | Inclinação                 | Aspectos construtivos                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                 |
| <b>Plano</b>                | até 5% (3°)                | Execução mais demorada do que os telhados verdes que apresentam inclinações moderadas, pois necessita de uma camada de drenagem especial para conduzir tanto o excedente, quanto a água que foi acumulada no telhado.                                                                                                                                                                 |
| <b>Inclinação moderada</b>  | de 5% (3°) até 36% (20°)   | Nesta faixa de inclinação, é possível uma fácil e econômica implantação de telhado verde. Não necessita de camada de drenagem, o substrato tanto armazena água como conduz o excedente, para isso, deve-se agregar material poroso, como pedra pomes, escória ou argila expandida. Geralmente, não é necessário a implantação de uma estrutura que evite o deslizamento do substrato. |
| <b>Inclinação acentuada</b> | de 36% (20°) até 84% (40°) | Assemelham-se com o de inclinação moderada, porém é necessária a implantação de estruturas que evitem o deslizamento do substrato, dimensionada em função da declividade e da altura do substrato.                                                                                                                                                                                    |
| <b>Íngreme</b>              | a partir de 84% (40°)      | Os projetos de telhados verdes íngremes devem possuir metodologia específica de projeto para implantação, não são funcionais os meios convencionais de estruturas que evitam o deslizamento do substrato.                                                                                                                                                                             |

Araújo (2007) ainda classifica as coberturas verdes como acessíveis e inacessíveis, sendo o primeiro uma área aberta ao uso de pessoas, como um jardim suspenso ou um terraço, proporcionando benefícios sociais aos seus usuários e agregando valor comercial ao edifício, e as inacessíveis, que não permitem a circulação de pessoas, podendo ser planas, curvas e com inclinações, cumprindo apenas funções de conforto térmico ou controle de escoamentos, por exemplo.

Outra classificação encontrada é a apresentada por Oliveira (2009), que classifica os telhados verdes como sendo “sobre laje” ou “sobre telha”, caracterizando a estrutura sobre a qual a natureza é implantada.

### 3.5 VANTAGENS E DESVANTAGENS DA NATURAÇÃO EM COBERTURAS

As coberturas verdes são capazes de proporcionar diversas vantagens que podem ser relacionadas com melhorias de aspectos sociais, ambientais e econômicos.

As vantagens relacionadas aos aspectos sociais, de acordo com Osmundson (1999), são as que se referem ao fato de que todo e qualquer bom projeto de espaço aberto no

meio da urbe caótica e barulhenta promove um repouso aos usuários, que pode ser sentido no seu entorno imediato, consequentemente, um jardim suspenso no topo de edificações é como uma “ilha paradisíaca em meio à selva urbana”. Tais jardins promovem um distanciamento da poluição sentida no nível das ruas, sendo um local potencial para ponto de encontro, de socialização e de eventos especiais.

Araújo (2007) destaca, ainda, que os telhados verdes possuem características positivas no que diz respeito ao conforto e bem-estar dos seus usuários, pois a cor verde atua de forma positiva no organismo humano, passando sensações de espaço, liberdade, harmonia e equilíbrio. Várias pesquisas em ambiência demonstram os resultados positivos ao se utilizarem coberturas verdes, refletindo no estado psicoemocional dos seus usuários. Proporciona também atividade terapêutica, como a jardinagem em si, envolvida na manutenção dos telhados verdes e a sensação de bem-estar por amenizar o ambiente urbano com a utilização de vegetação.

No que diz respeito às vantagens de cunho ambiental, a natureza tenta promover a restauração de parte da natureza que foi removida para o desenvolvimento das cidades. Isso contribui positivamente para a melhoria do microclima da região, para o aumento da biodiversidade local, com a presença de plantas e animais, e para a criação de superfícies permeáveis, que reduzem a descarga de águas pluviais que chega às redes de drenagem, o que pode minimizar problemas de enchentes.

As vantagens econômicas são às associadas ao fato de agregar valor à edificação na qual a cobertura verde está instalada. Além disso, a natureza garante a permanência de áreas verdes úteis, principalmente quando aplicada em áreas degradadas e superadensadas das cidades, podendo resultar na redução de impostos municipais, aumento no volume de negócios e geração de renda para a vizinhança. Outro ponto pertinente é que o aumento da inércia térmica de uma cobertura naturada resulta em uma redução do consumo de energia para ar-condicionado, o que a médio e longo prazo é um benefício econômico considerável (OSMUNDSON, 1999), já que a maior parte dos gastos energéticos de uma edificação está ao longo do seu uso (JONES, 2002 *apud* ROLA, 2008).

Ainda no contexto das vantagens econômicas, de acordo com Pimentel da Silva (2008), em telhados verdes podem ser desenvolvidas atividades de agricultura urbana, o que possibilita a geração de trabalho e renda. Além disso, Oliveira (2009), menciona que, em função da prática da agricultura periurbana e suas variadas modalidades de cultivo alinhadas com o conceito de natureza, atualmente podem ser observadas iniciativas em nível mundial de produção de alimentos em áreas até então inimagináveis de cultivo.

A jardinagem praticada para a manutenção dos telhados verdes também é uma atividade que, além de representar o lazer dos seus usuários, pode também ser uma prática de cultivo de espécies florísticas e até medicinais, podendo também essas espécies ser para fins culinários, como temperos, por exemplo (GOMEZ, 1998).

No que diz respeito a lucratividade, os telhados verdes apresentam um potencial econômico interessante, podendo ser cultivados nas coberturas plantas medicinais de pequeno porte, temperos domésticos e plantas ornamentais, entre outros. Para o bom desempenho da produção é necessária uma manutenção adequada a cada modelo produtivo, porém a venda dos futuros produtos pode sustentar os gastos com a manutenção do telhado no que diz respeito a irrigação e jardinagem (CORREA e GONZALEZ, 2002 *apud* ARAÚJO, 2007).

De forma sintetizada, o Quadro 3.6 apresenta as principais vantagens social, econômica e ambiental das coberturas verdes.

De acordo com a “Associação Internacional de Telhados Verdes” (do inglês, *International Green Roof Association - IGRA*), os benefícios do telhado verde ainda podem ser subdivididos em “benefícios públicos” e “benefícios privados”. Os públicos englobam o fato dos telhados verdes serem um habitat natural para animais e plantas, reterem parcela da água das chuvas, reduzir o efeito das “ilhas de calor” urbanas, reduzir a poeira e a poluição e poder servir como área de lazer e contato com a natureza em meio à urbanização. Já os privados estão associados ao aumento do tempo de vida útil da cobertura que recebe a natureza, redução dos níveis de barulhos, proporcionar conforto térmico e tornar a cobertura um espaço utilizável.

Quadro 3.6 – Vantagens dos telhados verdes.

Fonte: Elaborado pelo autor, baseado em Rola (2008) e em diversas referências.

| TIPO DE VANTAGEM | VANTAGEM                                                                                                                                                                                       |
|------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| SOCIAL           | O contato com o que se tem de essencial e primitivo - a vida vegetal, o mineral, a água, e animais - responsáveis pelo conforto psicológico                                                    |
|                  | Promoção da diversidade visual no ambiente urbano, uma vez que as coberturas verdes vivas se contrapõem à massa acinzentada construída da cidade                                               |
|                  | Criação de referenciais urbanos para promover a orientação dos habitantes da cidade                                                                                                            |
|                  | Medida compensatória que pode evitar que ocorram cheias urbanas, e também a mobilização da população local                                                                                     |
|                  | Promoção do bem-estar por ser paisagisticamente agradável de serem contemplados                                                                                                                |
| ECONÔMICA        | Economia de energia utilizada no aquecimento e resfriamento do ambiente interno, já que a amplitude térmica da cobertura com terra e vegetação é muito menor do que uma cobertura convencional |
|                  | Proteção da impermeabilização contra a radiação ultravioleta e os diferenciais extremos de temperatura, promovendo a eficiência energética e prolongando a vida útil                           |
|                  | Redução dos prejuízos gerados em eventos de cheias urbanas, visto que as coberturas verdes podem atuar na redução da magnitude e ocorrência desses eventos                                     |
|                  | Aumento do valor da propriedade                                                                                                                                                                |
|                  | Produção de alimentos em pequena escala                                                                                                                                                        |
|                  | Redução do dimensionamento das galerias pluviais devido à retenção da água precipitada promovida pelo telhado verde                                                                            |
| AMBIENTAL        | Atuação positiva no clima da cidade e da região proporcionada pela retenção de poeira e substâncias contaminantes suspensas no ar                                                              |
|                  | Melhora da termodinâmica urbana: entrada de ar fresco e saída de cargas de emissão                                                                                                             |
|                  | Aumento da área verde útil                                                                                                                                                                     |
|                  | Absorção do ruído                                                                                                                                                                              |
|                  | Redução do efeito da ilha de calor                                                                                                                                                             |
|                  | Total integração do edifício com o entorno                                                                                                                                                     |
|                  | Retenção da água de chuva pelo telhado verde                                                                                                                                                   |
|                  | Podem contribuir para que não ocorram cheias urbanas                                                                                                                                           |
|                  | Retenção do material particulado da poluição atmosférica urbana                                                                                                                                |
|                  | Criação de um ambiente propício para o desenvolvimento de plantas e animais, promovendo um ambiente com maior biodiversidade                                                                   |

As desvantagens das coberturas verdes estão apresentadas, por tipo intensivo, semi-intensivo e extensivo, no Quadro 3.7.

### Quadro 3.7 – Desvantagens das coberturas verdes.

Fonte: Elaborado pelo autor, baseado em Rola (2008) e em diversas referências.

| SISTEMA INTENSIVO                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                    | SISTEMA SEMI-INTENSIVO        | SISTEMA EXTENSIVO                                                                                            |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Alta sobrecarga na estrutura                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                         | Média sobrecarga na estrutura | Não são projetados para uso intenso de público                                                               |
| Requer reforço estrutural, o que encarece a obra                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                     |                               | Os materiais leves que compõem o sistema, quando não fabricados no país, tem na maioria seus custos elevados |
| Requer manutenção intensa, aumentando consideravelmente os custos                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                    |                               |                                                                                                              |
| Requer irrigação intensa ao longo de todo o seu ciclo de vida                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                        |                               |                                                                                                              |
| Necessidade de fertilização intensa o que compromete a água residual que carrega excessos de NPK, considerado poluente das águas pluviais                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                            |                               |                                                                                                              |
| Os sistemas de natureza tradicionais usados mais intensamente na década de 60 (mas ainda em uso, apesar de raramente) eram aplicados apenas em novas construções, as quais possuíam projeto de reforço estrutural, o que excluía a parte já consolidada da cidade                                                                                                                                                                                                                                                    |                               | O plantio deve ser feito em período de clima ameno                                                           |
| Biodiversidade indesejada. Dependendo do tipo de vegetação adotada, o telhado se torna um "lar" para a proliferação de insetos indesejáveis                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                          |                               |                                                                                                              |
| Possível alteração da aparência da vegetação com a mudança das estações do ano                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                       |                               |                                                                                                              |
| Necessidade de um estudo <i>a priori</i> dos aspectos bioclimáticos locais para a adequada seleção do sistema mais apropriado a ser aplicado, bem como a precisa triagem dos seus materiais constituintes e plantas autóctones. Este tempo para estudo prévio pode elevar os custos iniciais, mas se faz premente, pois aumenta as chances de longevidade da natureza. Por se tratar de um sistema vivo, quanto mais grande for a natureza instalada, maior é a garantia de durabilidade de sua estrutura de suporte |                               |                                                                                                              |
| Adaptação de telhados já existentes, que não são formados por lajes, para receber o sistema                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                          |                               |                                                                                                              |
| Alto custo inicial, que pode ser recuperado em até 3 anos                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                            |                               |                                                                                                              |

### 3.6 ASPECTOS A SEREM OBSERVADOS NA CONCEPÇÃO E CONSTRUÇÃO DE COBERTURAS VERDES

Independentemente do sistema de natureza a ser adotado na cobertura, o sucesso da implantação de um telhado verde é basicamente função da consideração de todos os fatores apresentados no Quadro 3.8.

Quadro 3.8 – Principais cuidados na concepção e/ou construção de telhados verdes.

Fonte: Elaborado pelo autor.

1. A estrutura de suporte deve estar preparada para receber o incremento de carga proveniente do telhado verde, devendo ser considerado, seu estado com todos os vazios existentes no sistema repletos de água;
2. Como telhados verdes possuem um grau de armazenamento de água em seu sistema, é de suma importância que a impermeabilização da estrutura de suporte seja bem executada, de modo a evitar futuros problemas de infiltrações;
3. Verificar a necessidade de execução de um componente de drenagem acessória para a retirada de água em excesso do sistema;
4. Promover a proteção da estrutura de suporte contra a penetração das raízes da vegetação adotada;
5. Em coberturas com declividade acentuada, implantar estruturas para conter eventuais deslizamentos do sistema ou de partes dele;
6. Avaliar a necessidade de adotar estruturas de contenção e proteção, para ocasiões de chuvas intensas e ventos fortes, que podem destruir o telhado;
7. As tubulações de drenagem de saída do sistema devem ser protegidas por telas ou membranas de modo a evitar seu entupimento devido ao carreamento de material particulado do substrato;
8. O substrato adotado deve ser adequado para o porte e tipo de vegetação a ser adotada, sendo capaz de proporcionar as condições necessárias para seu desenvolvimento;
9. A vegetação precisa ser cuidadosamente escolhida, sendo compatível com o clima e resistente às intempéries do local da cobertura;
10. Observar a necessidade de irrigação da vegetação e, nos casos em que tal procedimento for necessário, projetar sistemas adequados e eficientes para irrigar as plantas.

De acordo com KOK *et al.* (2014), a instalação de coberturas verdes com declividades acentuadas não é recomendada, visto que isto pode causar problemas de estabilidade das camadas, além de erosão do material. FM Global (2007) recomenda a adoção da declividade mínima de 2% (1,1°) para os telhados verdes instalados sobre estruturas de concreto e de 3% (1,8°) para os instalados sobre qualquer outro tipo de estrutura. Para declividades entre 20% (11°) e 40% (22°) é recomendada a utilização de sistemas de controle de erosão, e não é recomendada a adoção de declividades superiores a 40% (22°).

No que diz respeito à camada de drenagem, de acordo com Caetano *et al.* (2001), a argila expandida é um material com propriedades convenientes às coberturas verdes, pois absorve até 35% de seu próprio volume em água, liberando-a posteriormente de forma gradual para as plantas. Além disso, Dunnet e Kingsbury (2004) informam que a argila expansiva é um excelente material para ser utilizado em coberturas verdes, visto que melhoram as condições de drenagem e não contribuem com peso excessivo ao sistema. Além disso, sua forma arredondada diminui a possibilidade de danos à camada impermeabilizante.

Já sobre a vegetação a ser adotada, conforme Oberndorfer *et al.* (2007), na teoria, quase todo tipo de vegetação pode ser adotado em coberturas verdes, assumindo-se que esta é adequada para o clima da região, para seu desenvolvimento no substrato disponível e à uma dada demanda de irrigação.

Laar *et al.* (2001) realizaram uma pesquisa de identificação das plantas mais adequadas para compor a camada de vegetação de telhados verdes extensivos em cidades de clima tropical, tendo por base o Município do Rio de Janeiro. Para a pesquisa, foram escolhidas plantas que demandassem menor manutenção em termos de rega e poda, além de apresentarem nível de resistência capaz de suportar as condições climáticas e ambientais do Município do Rio de Janeiro, que enfrenta altas temperaturas no verão com ocorrência de chuvas de grande intensidade. Neste trabalho, destacam-se as seguintes vegetações como apropriadas para as intempéries do clima tropical: *Bulbine frutescens* (Bulbine), *Setcreasea purpurea* (Coração-roxo), *Portulaca grandiflora* (Onze horas), *Asparagus densiflorus* (Aspargo-pendente). Foi verificado, também que a *Sphagneticola trilobata* (vedélia, mal-me-quer) não foi considerada como apropriada no estudo.

Por fim, Oliveira (2009) ainda destaca que a boa implantação de um telhado verde depende do domínio técnico de seu executor, pois vários cuidados precisam ser tomados.

### **3.7 A QUALIDADE DA ÁGUA DRENADA POR TELHADOS VERDES**

A qualidade de água é expressa em função de diversos parâmetros, que indicam suas principais características químicas (pH, Fósforo, Nitrogênio, Zinco, entre outras), físicas (turbidez, cor, temperatura, entre outras) e biológicas (coliformes). Para um dado uso que é feito para a água, são definidos padrões de qualidade que a mesma deve apresentar para ser usada para tal fim. Os padrões devem ser cumpridos conforme previsto

na Resolução CONAMA nº 357/2005 (CONAMA, 2005) e, considerando o consumo humano, também a Portaria MS nº 518/2004 (BRASIL, 2004).

A qualidade da água pluvial coletada em um telhado urbano é afetada por diferentes fatores, tais como: condições ambientais do entorno (proximidade de áreas industriais, grandes rodovias, presença de pássaros ou roedores); condições meteorológicas (temperatura, períodos anteriores de seca e padrões de chuva, intensidade da chuva); material da cobertura do telhado (laje de concreto, telhas cerâmicas, metálica, coberturas verdes); condições de coleta e armazenamento (nível de sujeira do local, tempo de armazenamento da água no reservatório, material que é feito o reservatório) e existência de tratamento da água no processo de captação da água pluvial (emprego de dispositivos de descarte de água dos primeiros instantes da precipitação, de filtros para folhas, de processos de desinfecção por radiação, ultravioleta, cloração, filtro lento de areia). O tipo de tratamento, a ser conferido a água pluvial dependerá das características da água coletada e do uso final não potável pretendido (IBIAPINA *et al.*, 2010).

Em telhados naturados, de acordo com KOK *et al.* (2014), os principais fatores que influenciam na qualidade da água que é drenada por suas camadas são: a composição do substrato, o material utilizado na camada de drenagem, a espessura do substrato, o tipo de vegetação, o clima local, a dinâmica da precipitação, a existência de fontes de poluição, e as propriedades físico-químicas dos poluentes.

Diversos estudos indicam que a passagem da água de chuva pelas camadas componentes de uma cobertura verde pode melhorar a qualidade da água, como por exemplo, aumentando o pH das águas pluviais (TEEMUSK e MANDER, 2007; BERNDTSSON *et al.*, 2009; BLISS *et al.*, 2009; BERNDTSSON *et al.*, 2010; VIJAYARAGHAVANA *et al.*, 2012; KOK *et al.*, 2014), sendo, portanto um indicativo que as coberturas verdes podem diminuir o efeito do fenômeno das chuvas ácidas, que assolam algumas áreas densamente urbanizadas; e ajudando na retenção de concentrações de alguns metais, como o zinco (BERNDTSSON *et al.*, 2009; GALARZA-MOLINA *et al.*, 2014; SEIDL *et al.*, 2013), ferro e chumbo (BERNDTSSON *et al.*, 2009).

Por outro lado, também existem estudos que indicam uma perda de qualidade da água, devido à introdução de poluentes devido à utilização de fertilizantes, pesticidas e nutrientes para a vegetação (POLKOWSKA *et al.*, 2002; EMILSSON *et al.*, 2007).

No Brasil, as pesquisas desenvolvidas na temática de coberturas verdes ainda são bastante voltadas para aspectos quantitativos, fato característico de um país em

desenvolvimento, em que a preocupação com a qualidade das águas vem em segundo plano (uma vez que os problemas de quantidade são ainda gravíssimos).

Podem ser mencionados, no contexto nacional, os ensaios experimentais de Teixeira *et al.* (2011), em São Paulo, que indica que a qualidade de água drenada em coberturas verdes pode apresentar valores dos parâmetros de cor, fósforo total e coliformes totais acima dos limites estabelecidos para água de reuso para fins não potáveis em edificações; e de Budel (2014), no Paraná, que aponta que o telhado verde diminui a acidez natural da chuva.

### **3.8 TELHADOS VERDES COMO TÉCNICA COMPENSATÓRIA EM DRENAGEM URBANA**

Devido ao seu potencial em reter parcela do volume das águas de chuva e em atrasar e diminuir as vazões de pico que não lançadas nas redes pluviais urbanas, os telhados verdes são uma opção de técnica compensatória em drenagem urbana, voltada para as tendências atuais de desenvolvimento sustentável. Pode ser destacado que o efeito de sua ampla adoção pode ser expressivo, considerando que as coberturas representam grande parcela das áreas que são praticamente impermeáveis nos centros urbanos.

As coberturas verdes são capazes de reduzir a geração de escoamentos superficiais a partir da retomada de processos do ciclo hidrológico (retenção superficial, evapotranspiração, infiltração e armazenamento) que foram reduzidos significativamente, ou perdidos, com a impermeabilização dos espaços no processo de urbanização.

Apesar de todo o seu potencial, o uso de coberturas verdes, no âmbito da drenagem urbana sustentável, ainda carece de informações mais precisas sobre seu funcionamento, para a elaboração de projetos. De acordo com Poë *et al.* (2011), o uso desta técnica tem sido limitado pela falta de um modelo preditivo ou de um consenso sobre as expectativas de seu desempenho. Inúmeros programas de pesquisa sobre telhados verdes relataram níveis de retenção altamente variáveis, normalmente entre 30% e 100%. Essas variações são reflexo das diversas definições tomadas para “retenção” e das particularidades de cada ensaio, em que vários tipos de configurações podem ser estabelecidos para os protótipos, além das diferentes condições climáticas dos locais de realização.

Nesse contexto, observa-se que existem diversos fatores que afetam a performance de telhados verdes em sua aplicação como técnica compensatória. Pode ser destacado que esses fatores podem ser tanto de origem externa ao telhado, proveniente das características do meio em que a cobertura verde foi implantada, quanto intrínsecas do

próprio telhado verde, relacionadas ao sistema, concepção, materiais e vegetação adotados.

Como fatores do meio externo podem ser mencionadas tanto as condições climáticas específicas do local onde o telhado verde encontra-se instalado como, por exemplo, valores médios característicos de temperatura, umidade, incidência de sol e influência de ventos, quanto as características de um dado evento de chuva observado, como, por exemplo, a intensidade e duração da precipitação, e a ocorrência de eventos sucessivos.

No que diz respeito aos aspectos intrínsecos do telhado verde, influenciam na sua capacidade, como técnica compensatória: sua idade, o tipo de sistema adotado, as espessuras das camadas, a declividade do telhado, as características específicas do(s) material(is) constituinte(s) de cada camada, as condições de umidade inicial do substrato, e os valores de retenção superficial e evapotranspiração da vegetação adotada.

Palla *et al.* (2008) indicam que as variáveis mais importantes que governam o escoamento da água através de coberturas verdes são a chuva (intensidade, duração), o substrato (tipo, condutividade hidráulica e estágio de saturação) e o processo de perda de água do sistema (evapotranspiração). De acordo com Kasmim *et al.* (2014), durante um evento de chuva, os principais mecanismos hidrológicos em coberturas verdes são a interceptação e retenção da chuva pela vegetação, infiltração e retenção no substrato e armazenamento na camada de drenagem.

Versini *et al.* (2014) destacam que apesar do crescimento da adoção da tecnologia de telhados verdes, poucos trabalhos foram publicados acerca do uso de coberturas verdes para resolver os problemas de drenagem urbana, sendo que a maioria dos estudos e pesquisas desenvolvidas possuem como foco apenas nas considerações hidrológicas de telhados verdes na escala da edificação, onde os impactos acontecem inicialmente.

A capacidade de retenção ou de armazenamento de uma cobertura verde, de acordo com Kasmin *et al.* (2014), é a diferença existente entre a capacidade máxima do substrato em reter água, conhecida como capacidade de campo, e o mínimo de água que deve existir no substrato para a sobrevivência das plantas, denominado de ponto de murcha. Sendo assim, fica claro que a capacidade de armazenamento de uma cobertura verde é um valor finito.

A seguir são apresentados alguns dos principais fatores que influenciam na capacidade de retenção de água de coberturas verdes, com uma breve discussão sobre

estudos já realizados. Ao fim, a Tabela 3.4 apresenta uma compilação de estudos realizados sobre a capacidade de retenção de coberturas verdes.

### **3.8.1 A influência da intensidade de chuva**

A capacidade de retenção de água de chuva por coberturas verdes reduz com o aumento da intensidade de chuva. Os telhados verdes podem atrasar o tempo de início do escoamento superficial através da retenção da água de chuva pela camada de substrato antes deste saturar. Uma vez que o substrato fica saturado, a precipitação que incide sobre o telhado torna-se escoamento superficial (KOK *et al.*, 2014).

De acordo com a pesquisa realizada por Lee *et al.* (2013), nos EUA, o telhado verde apresenta elevada capacidade de retenção para precipitações com intensidades inferiores a 20 mm/h, no entanto, quando a intensidade da precipitação aumenta, a capacidade de retenção do telhado verde diminui.

### **3.8.2 A influência do clima local**

A temperatura, a velocidade do vento e outros fatores meteorológicos influenciam na evapotranspiração e, assim, acabam afetando a capacidade de armazenamento do sistema. Climas quentes apresentam altas taxas de evapotranspiração, assim a capacidade de retenção pode ser restaurada de maneira mais rápida, o que resulta em melhores disponibilidades de armazenamento no início de um evento de chuva. Essas relações são complexas, tornando a extrapolação de pesquisas realizadas em outras regiões climáticas um trabalho árduo (KASMIN *et al.*, 2014).

Ainda de acordo com Kasmin *et al.* (2014), estudos em telhados verdes realizados em escala real mostram que altos, porém significativamente variados, níveis de retenção de água de chuva podem ser obtidos, porém a caracterização precisa de seu funcionamento varia em função das condições climáticas locais.

### **3.8.3 A influência da declividade do telhado verde**

Sobre esse assunto, observa-se que existem divergências a respeito da influência da declividade do telhado verde na capacidade de retenção de água do mesmo.

As pesquisas de VanWoert *et al.* (2005) e Villareal e Bengtsson (2005) apontam que a declividade do telhado verde influencia na sua capacidade de retenção de água de chuva, já o estudo de Getter *et al.* (2007) constata que a declividade do telhado não afeta no volume de chuva que é retido. Na verdade, se a chuva é retida na camada drenante, a influência da declividade é nítida e direta, pois a água vai se armazenar em uma superfície inclinada de volume limitado por esta inclinação. Se a retenção ocorre no substrato, esse afeito é menor, pois a água fica, em certa medida, presa aos interstícios do solo.

#### 3.8.4 A influência do substrato

De acordo com Miller (2003 *apud* Poë *et al.*, 2011), a água irá sempre preencher os poros do substrato, devido a forças coesivas entre as moléculas de água. A estrutura do solo que compõe o substrato afeta na facilidade com que a água é retida pelos poros.

Poros de diferentes tamanhos proporcionam importantes funções, como as apresentadas na Tabela 3.3.

Tabela 3.3 – Funções dos diferentes tamanhos de poros em substratos.

Fonte: Autor, baseado em Rowell (1994 *apud* Poë *et al.*, 2011).

| <b>Tipo</b>   | <b>Tamanho</b>                                                      | <b>Função</b>                                                                        |
|---------------|---------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------|
| Transmissivo  | Maiores que 50 $\mu\text{m}$<br>( $50 \times 10^{-6} \text{ m}$ )   | Garante a drenagem na saturação, aeração na capacidade de campo e penetração da raiz |
| Armazenamento | Entre 0.2 e 50 $\mu\text{m}$                                        | Retém água para consumo da planta                                                    |
| Residual      | Menores que 0.2 $\mu\text{m}$<br>( $0.2 \times 10^{-6} \text{ m}$ ) | A capacidade de retenção de água é tão baixa, que não é recomendado para plantas     |

De acordo com Poë *et al.* (2011), substratos com maior quantidade de matéria orgânica e maior quantidade de partículas finas retém maiores volume de água, mas geralmente são demasiadamente lentos em restaurar a capacidade de água disponível antes do próximo evento.

Versini *et al.* (2014) destacam que a capacidade de reter água, apresentada pelo substrato no momento anterior a um evento de chuva, é um fator determinante na resposta de uma cobertura verde. Quanto mais saturado está o substrato, menos significativa é a influência de retenção de água do telhado verde, que passa a depender quase exclusivamente da interceptação vegetal.

Nesse contexto, Tassi *et al.* (2014) ressaltam que uma das hipóteses acerca da variabilidade da eficiência observada em telhados verdes está relacionada à umidade presente no substrato resultante de eventos anteriores de chuva. A umidade antecedente do solo pode ser analisada por meio do parâmetro “Umidade Antecedente do Solo – UAS” (do inglês, *Antecedent Rainfall Condition - ARC*) que varia de I a III de acordo com a “Precipitação Antecedente Total – PAT” (do inglês, *Total Antecedent Rainfall – TAR*) que corresponde ao volume precipitado acumulado nos 5 dias anteriores. Sendo ARC I para umidade antecedente de 0 a 18 mm; ARC II para valores de 18 a 28 mm e ARC III para valores superiores a 28 mm, conforme SCS (1997). Na pesquisa de Pinto *et al.* (2015), realizado a partir de um módulo experimental em Manaus, foi observada a existência de uma tendência à redução da eficiência de armazenamento no telhado verde em eventos com UAS maiores.

### **3.8.5 A influência da vegetação**

De acordo com Nascimento (2015), o tipo de vegetação dos telhados também pode influenciar na quantidade de água retida ou que escoar, em função da capacidade de interceptação, retenção e transpiração da planta.

Em experimentos realizados por VanWoert (2005) chegou-se à conclusão que a capacidade de retenção de água de chuva pela vegetação foi mínima, relativa ao efeito do substrato. No entanto, esta é uma conclusão que merece uma discussão mais longa. Existem plantas com grande capacidade de retenção de água e substratos que possuem capacidade muito baixa em retê-la, fato que pode inverter essa relação. De qualquer forma, a simples interceptação não é desprezível, em geral.

Nesse contexto, Vieira e Palmier (2006) apresentam um exemplo de estimativa experimental da interceptação por parte da vegetação em áreas florestadas, encontrando o valor de 23% da precipitação sendo retida pela camada da vegetação. Collischonn e Dornelles (2013) indicam que os valores estimados para perdas por interceptação de acordo com o tipo de vegetação são: prados, com campos ou passagens, de 5 a 10% da precipitação anual; bosques espessos, cerca de 25% da precipitação anual

Em relação às perdas por evapotranspiração, de acordo com Poë *et al.* (2011), estas estão relacionadas, primeiro, às características da planta, como por exemplo a área e formato da folha, que influencia no volume de água que é interceptado e pode evaporar

de volta para atmosfera, ou, segundo, à fisiologia da planta, que influi na taxa de transpiração de água dos poros do solo.

Ensaio realizado por Galarza-Molina *et al.* (2014), na Colômbia, constataram que dois tipos de vegetação, a *Batavia Lettuce* e a *Green Leaf Lettuce*, possuíam maior capacidade de reter água de chuva do que outro tipo, a *China Chard*, fato este que era esperado devido a discrepância entre o tamanho e a área de folhas entre estas.

Nagase e Dunnett (2012) concluíram que as gramíneas são mais efetivas na redução do escoamento das águas pluviais, seguido de flores silvestres (*forbs*) e de vegetação ornamental (*Sedum*).

Nos experimentos de Krishnan e Ahmad (2014), na Malásia, foram identificadas diferenças significativas na redução do escoamento superficial, de acordo com a vegetação, sendo a da classe *Filicopsida* a mais efetiva na redução de escoamento superficial.

### **3.8.6 Relações chuva-vazão em telhados verdes**

Lorenzin Neto *et al.* (2013) relatam que há poucos estudos com relação ao parâmetro *Curve Number* (CN) em telhados verdes, parâmetro este utilizado na conversão de chuva em vazão, pelo método do *Soil Conservation Service (SCS)*, muito difundido também no Brasil, e os estudos existentes apresentam valores com diferenças substanciais, entre 61 e 83, o que implica passar de um parâmetro que representa uma área rural/periurbana, para uma área urbanizada densa. Destacam ainda que o critério de utilização das perdas iniciais nos telhados verdes pode conduzir a resultados discutíveis, devido a reduzida capacidade de interceptação e retenção superficial desses sistemas.

No estudo de Ohnuma Júnior *et al.* (2014), em dois diferentes protótipos, o número CN foi 84 com gramíneas e 76 com herbáceas, sendo que o protótipo com gramínea apresentou armazenamento de água similar à de arruamentos, enquanto ao de herbáceas assemelhou-se às condições de pastos. Segundo esses autores, além da umidade antecedente do solo, outros dados que podem interferir no resultado da retenção hídrica e consequentemente no escoamento superficial são: a intensidade pluviométrica e a porosidade do solo. A eficiência dos telhados verdes nesse estudo quanto à absorção de água pluvial foi de 56% do volume precipitado comparado ao telhado convencional (telha).

Na pesquisa realizada por Nascimento (2015), que teve como objetivo determinar tanto o valor do coeficiente de *runoff* (C), utilizado no Método Racional para transformar chuva em escoamento superficial, quanto o valor do *Cuwer Number* (CN) do método do *Soil Conservation Service*, para diferentes módulos de telhados verdes, foi observado que os valores do coeficiente de escoamento superficial (C) variaram de 0,15 a 0,68, e o do *Cuwer Number* (CN) variaram de 86 a 98, sendo que esses valores variaram de acordo com estado de umidade inicial do substrato e da existência, ou não, de cobertura vegetal.

Tabela 3.4 – Pesquisas realizadas sobre a capacidade de retenção de água de chuva em telhados verdes.

Fonte: Diversas, conforme indicado na Tabela.

| Referência                 | Características do telhado verde                                                                                               |                                                                                                                                                                          |                                                                                                                                                               |                                 |                     |                        |                                               | Características do ensaio |                                 |                                        |                                     |
|----------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------|---------------------|------------------------|-----------------------------------------------|---------------------------|---------------------------------|----------------------------------------|-------------------------------------|
|                            | Gerais                                                                                                                         | Substrato                                                                                                                                                                | Vegetação                                                                                                                                                     | Área                            | Declividade         | Local                  | Chuva                                         | Período do ensaio         | Coef. de Retenção de volume (%) | Coef. de Retenção da vazão de pico (%) | Retardo da vazão máxima (min)       |
| Palla <i>et al.</i> (2008) | Um telhado de referência, e um telhado verde montado sobre o de referência                                                     | Camada de 20 cm. O telhado verde foi dividido em duas partes iguais, nas quais os quatro componentes que formam o substrato tiveram proporções diferentes em cada metade | Não foi identificada a vegetação utilizada                                                                                                                    | 350 m <sup>2</sup>              | Não foi apresentado | Genova, Itália         | 11 eventos de chuvas                          | Maio a setembro de 2007   | 9.5% - 100 %                    | 79% - 100%                             | 50 a 148 min                        |
| Oliveira (2009)            | Um telhado real, com dimensões de 7.0 m x 4.5 m, dividido em duas partes iguais: um com telha normal e outro com telhado verde | Camada de 10 cm de substrato agrícola comercial BIOMIX (composto orgânico, casca de pinus compostada, vermiculita expandida, enriquecida e neutralizada quimicamente)    | <i>Allium cepa</i> (cebolinha), <i>Liriopsis spicata</i> (liriope), <i>Lactuca sativa</i> (alface roxa) e <i>Lycopersicon esculentum</i> (tomate cereja anão) | 15.75 m <sup>2</sup> cada parte | 6%                  | Rio de Janeiro, Brasil | 8.77mm/h e 42 mm/h, com duração de 13 minutos | Fevereiro de 2009         | Não foi apresentado             | 55% (8.77 mm/h) e 56% (42 mm/h)        | 8 min (8.77 mm/h) e 6 min (42 mm/h) |
| Stovin (2010)              | 1 módulo: standard commercial (Alumasc/Zinco)                                                                                  | 80 mm de substrato                                                                                                                                                       | Sedum                                                                                                                                                         | 3m x 1m                         | Não foi apresentado | Sheffield, Reino Unido | 11 eventos de chuvas                          | Abril a junho 2006        | 34%                             | 56,9%                                  | Não foi apresentado                 |

Tabela 3.4 – Pesquisas realizadas sobre a capacidade de retenção de água de chuva em telhados verdes (Continuação).

Fonte: Diversas, conforme indicado na Tabela.

| Referência                  | Características do telhado verde                             |                                                                |                                                             |                                |                     |                        |                                    | Características do ensaio  |                                 |                                        |                               |
|-----------------------------|--------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------|--------------------------------|---------------------|------------------------|------------------------------------|----------------------------|---------------------------------|----------------------------------------|-------------------------------|
|                             | Gerais                                                       | Substrato                                                      | Vegetação                                                   | Área                           | Declividade         | Local                  | Chuva                              | Período do ensaio          | Coef. de Retenção de volume (%) | Coef. de Retenção da vazão de pico (%) | Retardo da vazão máxima (min) |
| Poë et al. (2011)           | Nove módulos com diferentes configurações de telhados verdes | Camada de 80 cm de três tipos de substratos: Sedum, H&L e LECA | Alumasc Sedum Carpet (3 módulos) e Meadow Flowe (3 módulos) | 3 m <sup>2</sup> cada          | Não foi apresentado | Sheffield, Reino Unido | 20.2 mm no dia 13 de junho de 2010 | 13 de Junho de 2010        | 23.7% - 95.8%                   | 36.9% - 91.3%                          | 75 a 175 minutos              |
| Ohnuma Junior et al. (2014) | 2 módulos                                                    | Substrato orgânico (menor que 15 cm de espessura)              | Plantio de culturas herbáceas com vegetação rasteira        | A: 2,8 x 4,2m<br>B: 1,6 x 5,9m | A: 0%<br>B: 3%      | Rio de Janeiro, Brasil | 13 eventos                         | Junho de 2004 a Julho 2005 | 56%                             | Não foi apresentado                    | Não foi apresentado           |
| Kok et al. (2014)           | Um único módulo de telhado verde extensivo                   | Camada de 10 cm de solo fertilizado e compactado               | Zoysia japonica (Japan Grass)                               | 80 m <sup>2</sup>              | 20°                 | Kuala Lumpur, Malásia  | Chuva do dia 16/08/12              | Julho e Agosto de 2012     | Não foi apresentado             | 26%                                    | Não foi apresentado           |

Tabela 3.4 – Pesquisas realizadas sobre a capacidade de retenção de água de chuva em telhados verde (Continuação).

Fonte: Diversas, conforme indicado na Tabela.

| Referência                   | Características do telhado verde                                                         |                                                                                                     |                                                                                                         |                                                                     |                     |                        | Características do ensaio              |                           |                                     |                                        |                               |
|------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------|---------------------|------------------------|----------------------------------------|---------------------------|-------------------------------------|----------------------------------------|-------------------------------|
|                              | Gerais                                                                                   | Substrato                                                                                           | Vegetação                                                                                               | Área                                                                | Declividade         | Local                  | Chuva                                  | Período do ensaio         | Coef. de Retenção de volume (%)     | Coef. de Retenção da vazão de pico (%) | Retardo da vazão máxima (min) |
| Galarza-Molina et al. (2014) | Seis módulos de ecotelhados e um módulo de referência                                    | Substrato com volume que ocupa uma garrafa de plástico reciclável de 3 litros                       | Batavia lettuce (2 módulos), Green Leaf Lettue (2 módulos) e China Chard (2 módulos)                    | 2.52 m <sup>2</sup>                                                 | 5%                  | Bogotá, Colombia       | Diversas chuvas, com diversas durações | Agosto a Novembro de 2013 | 38% - 100%                          | 20% - 100%                             | 2 à 19 minutos                |
| Nascimento (2015)            | Sete módulos: 1 módulo de controle (telha), 3 módulos sem vegetação, 3 módulos vegetados | Composto orgânico com 5 cm de espessura                                                             | Portulaca oleracea (Onze horas), Callisia repens (Dinheiro em penca) e Apnia cordfolia (Rosinha do sol) | 0.55 m <sup>2</sup> cada                                            | 6%                  | Rio de Janeiro, Brasil | 155 mm/h, com duração de 7 minutos     | Janeiro a Março de 2015   | Não foi apresentado                 | 58%                                    | 12 min                        |
| Silva et al. (2015)          | Telhado convencional (telha cerâmica) e 2 telhados verdes                                | Inferior a 12 cm (não é devidamente detalhado, esse valor corresponde a espessura total do sistema) | Aloe vera (Babosa) e Melocactus Zenteri (Coroa-de-Frade)                                                | 4.35 m <sup>2</sup> (Babosa) e 3.45 m <sup>2</sup> (Coroa-de-Frade) | Não foi apresentado | Pernambuco, Brasil     | 74.21 mm/h com duração de 58 minutos   | 3 de Setembro de 2014     | 77% (Babosa) e 98% (Coroa-de-Frade) | Não foi apresentado                    | Não foi apresentado           |

## 4 ENSAIOS EXPERIMENTAIS EM PROTÓTIPO DE TELHADO VERDE

*“Uma única demonstração impressiona-me mais do que cinquenta fatos”*

(Denis Diderot<sup>12</sup>)

### 4.1 CONCEPÇÃO DO PROTÓTIPO DE TELHADO VERDE

O local selecionado para a construção do protótipo de telhado verde foi o módulo 5 da bancada experimental apresentada no capítulo de introdução (Tópico 1.6) deste trabalho. Conforme indicado na Figura 4.1, este módulo possui formato retangular, com dimensões de 0,88 m x 2,02 m, totalizando uma área de 1,78 m<sup>2</sup>. As alturas das paredes da face leste a oeste variam, com a referência do topo nivelado ao fundo, respectivamente, de 27,5 cm à 23,5 cm, garantindo ao módulo uma declividade de cerca de 4,5% em direção à face leste, onde estão os tubos de drenagem do módulo.

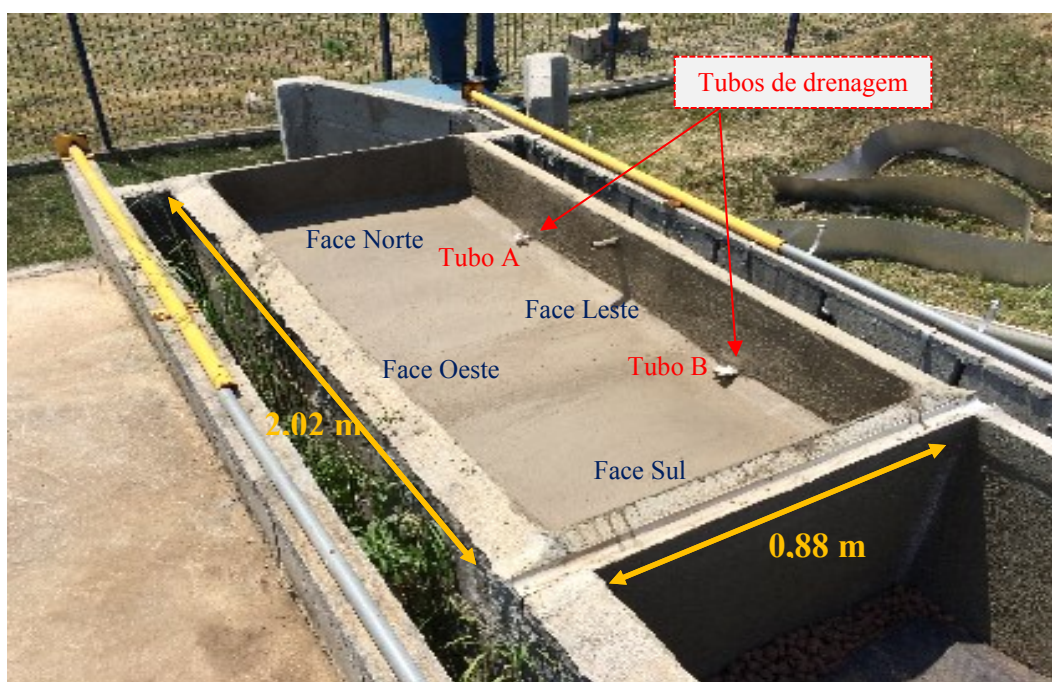


Figura 4.1 – Módulo 5 da bancada experimental.

Fonte: Acervo do autor (2015).

<sup>12</sup> **Denis Diderot:** filósofo, escritor, tradutor e enciclopedista francês que viveu na França no século XVIII. (Fonte: E-BIBLIOGRAFIAS, 2015).

Após a realização de pesquisas em publicações, de discussões entre os integrantes do grupo de pesquisa, e de conversas com o arquiteto paisagista Fernando Acylino, aluno de pós-graduação do PEU/UFRJ que possui experiência em projetos e construções de coberturas verdes, decidiu-se pela implantação de um telhado verde com a configuração de camadas conforme mostrado na Figura 4.2.

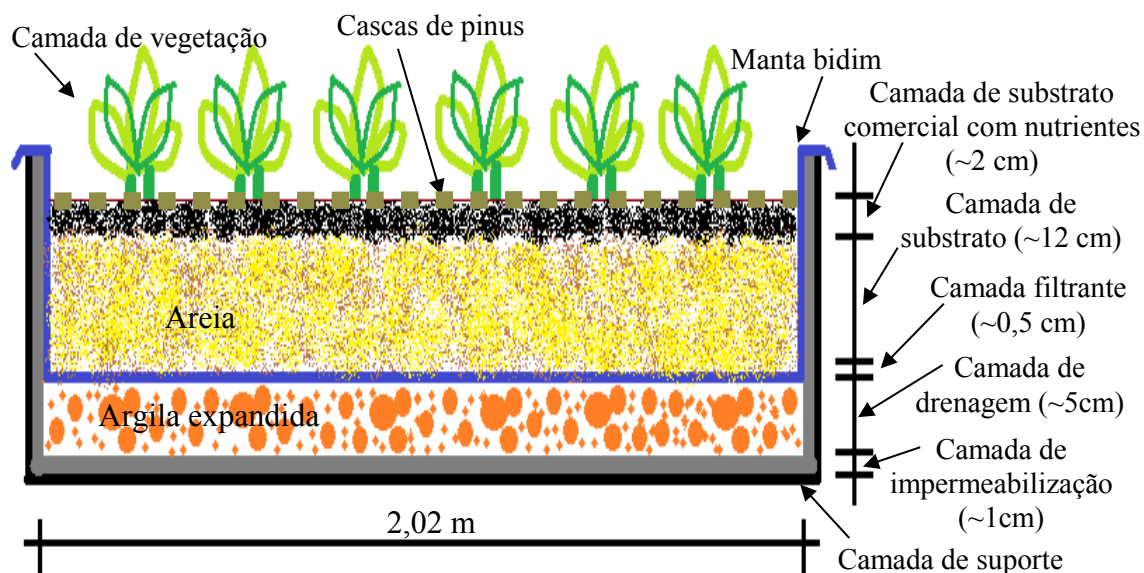


Figura 4.2 – Esquema ilustrativo das camadas do protótipo de cobertura verde.

Fonte: Elaborado pelo autor.

Para a camada de drenagem, optou-se pela escolha de argila expandida, como é sugerido em diversas referências brasileiras (OLIVEIRA, 2009; GUERRA JÚNIOR, 2013; NASCIMENTO, 2015; PINTO, 2015). A argila expandida tem a vantagem de ser leve e ter capacidade de reter uma parcela de água. Já para a camada filtrante, optou-se pela adoção de manta bidim, cujo objetivo é evitar que as partículas finas do substrato sejam carreadas para a camada de drenagem.

O substrato que foi adotado é composto por duas subcamadas: uma de areia, material facilmente obtido e com alta permeabilidade, sendo esses os principais fatores que levaram a sua escolha; e outra de substrato comercial, um tipo de “terra preta” enriquecida com nutrientes, para favorecer o desenvolvimento das plantas. Note-se que a areia foi escolhida em função do uso de bromélias, embora sua permeabilidade alta não seja a mais indicada para os objetivos de retenção para favorecer a drenagem.

As bromélias, por sua vez, foram escolhidas para compor a camada vegetal do protótipo de cobertura verde pelos motivos que serão melhor discutidos no próximo tópico deste capítulo.

Sobre o substrato, e no entorno das bromélias, foi lançado um fertilizante de liberação controlada e, nos espaços entre as bromélias, em que o substrato ficava aparente, foram lançadas cascas de pinus, com o objetivo de reduzir o impacto das gotas de chuva sobre o substrato exposto.

A água que chega à camada de drenagem do protótipo é escoada pelos tubos de drenagem A e B (apontados na Figura 4.1), ambos com diâmetro de 1”, que direcionam a água até duas torneiras (A e B), conforme indicado na Figura 4.3, por meio das quais a água do protótipo é liberada para a calha coletora, que conduz o escoamento proveniente da camada de drenagem do protótipo até a Caixa Pluviômetro.

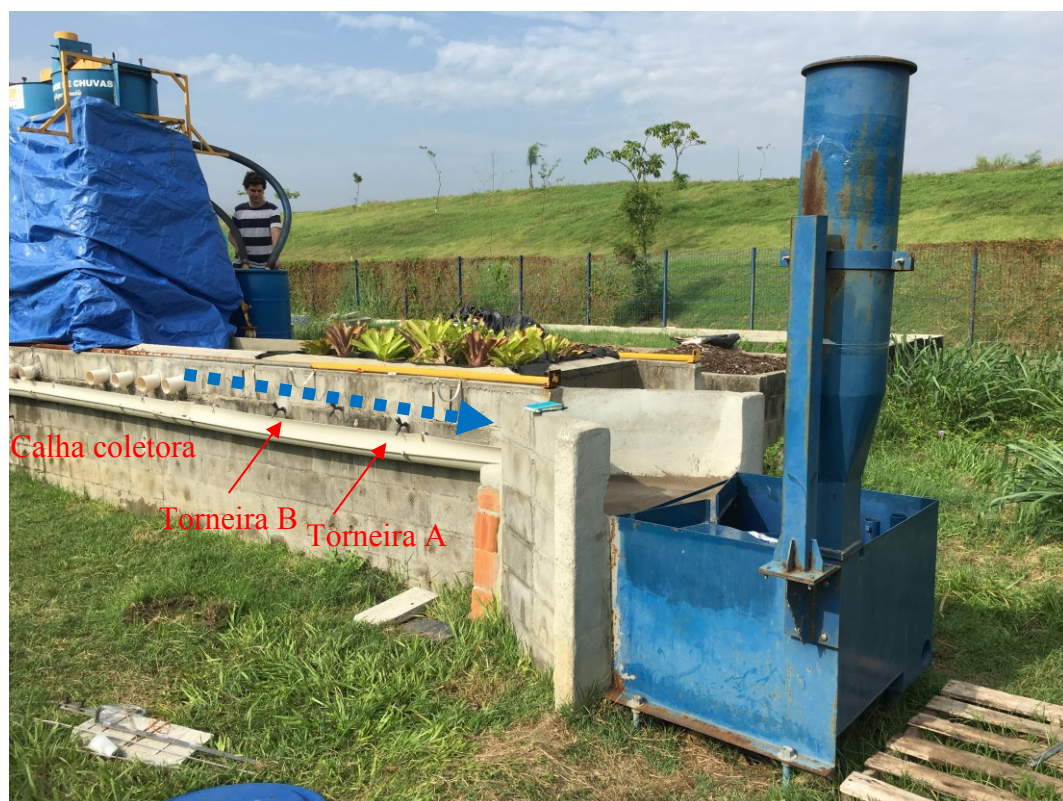


Figura 4.3 – Torneiras A e B que liberam a água para a calha coletora.

Fonte: Acervo do autor (2016).

## 4.2 BROMÉLIAS COMPONDO A CAMADA VEGETAL DO PROTÓTIPO DE TELHADO VERDE

A vegetação a ser adotada no protótipo de telhado verde utilizado na presente pesquisa foi um dos assuntos mais discutidos na etapa de concepção, pois a planta escolhida deveria ser adaptável ao local, necessitar de pouca manutenção, resistir à intensa radiação solar e, ainda, ter capacidade de reter água de chuva. Após diversas reuniões, pesquisas e conversas com profissionais de diversas áreas do conhecimento (engenharia, arquitetura, urbanismo e biologia), o grupo decidiu adotar bromélias para compor o protótipo.

As bromélias, nome popular das espécies da família Bromeliaceae, são plantas em geral com caule curto e oculto, em torno do qual as folhas dispõem-se em círculo, formando uma roseta<sup>13</sup> (COGLIATTI-CARVALHO e ROCHA, 1999). Trata-se de uma família que reúne plantas na sua maioria herbáceas, perenes, terrestres, epífitas<sup>14</sup> ou rupícolas<sup>15</sup> (SCHULTZ, 1990; JUDD *et al.*, 1999; SOUZA e LORENZI, 2005 *apud* AOYAMA *et al.*, 2012).

As bromélias são típicas das zonas tropicais e subtropicais das Américas, habitam quase todos os ecossistemas observados desde o Chile até a parte sul dos Estados Unidos, sendo a única exceção a *Pitcairnia feliciana*, exclusiva do Golfo de Guiné, na África. A Figura 4.4 ilustra a ocorrência de bromélias pelo mundo. Observa-se, assim, que as bromélias podem ser encontradas tanto ao nível do mar, quanto em altitudes acima de 4000 metros, em zonas de elevada precipitação, ou em áreas semiáridas e até desérticas (SMITH e DOWNS, 1974, 1977, 1979 *apud* FONTOURA e SANTOS, 2010; LEME 1984).

Rocha (2002) menciona que as espécies brasileiras de bromélias são extremamente apreciadas em todo o mundo, tanto pelas cores, formas e desenhos da própria planta, quanto pela sua inflorescência<sup>16</sup>. Vem daí o grande interesse ornamental que despertam, justificando o aumento de sua produção por muitos produtores rurais. Outro fator que contribuiu para essa popularidade, além de sua beleza, foi o fato de ser uma planta que não requer muitos cuidados e tem grande resistência.

---

<sup>13</sup> **Roseta:** Arranjo das folhas ao redor da base de um caule central, em formato aproximado a um círculo.

<sup>14</sup> **Epífita:** Planta que vive sobre outra, mas não é parasita, portanto, não retira dela alimento.

<sup>15</sup> **Rupícola:** Planta que cresce sobre rochas.

<sup>16</sup> **Inflorescência:** conjunto de flores; qualquer sistema de ramificação que termina em flores. (Fonte: BRASIL, 2009).



Figura 4.4 – As bromélias (em vermelho) no mundo.

Fonte: STEVENS (2016) e GIVNISH *et al.* (2004).

Atualmente, de acordo com Stevens (2016), a família Bromeliaceae está dividida em 8 (oito) subfamílias, ou grupos, a saber: Brocchinioideae, Lindmanioideae, Tillandsioideae, Hechtioideae, Navioideae, Pitcairnioideae, Puyoideae e Bromelioideae.

Além da subfamília Tillandsioideae, a subfamília Bromelioideae congrega espécies com grande capacidade de retenção de água (SMITH, 1974 *apud* OLIVEIRA *et al.*, 1994). As plantas que representam essas espécies são também conhecidas, conforme Lacerda e Hay (1982), como “bromélias-tanque”.

As bromélias-tanque possuem uma reserva de água a sua disposição, mantida em reservatórios formados pelo arranjo das folhas em sua porção basal<sup>17</sup>. Nessas espécies de bromélia, a folha tem tanto a função de disponibilizar quanto de consumir água e nutrientes, uma vez que estes são absorvidos pela folha no tanque e distribuídos para o restante da folha (NORTH *et al.*, 2013).

Devido a sua capacidade de formar tanques, as bromélias podem ser classificadas como organismos fitotélmicos (PANIZON *et al.*, 2014). A capacidade do armazenamento de água nesses tanques está relacionada com a forma de cone invertido e com a disposição espiralada e imbricada das folhas das bromélias (PICADO, 1913; BENZING e RENFOW, 1974 *apud* COGLIATTI-CARVALHO *et al.*, 2010).

---

<sup>17</sup> **Basal:** Relativo à base; parte de uma estrutura perto do ponto de união ou de origem. (Fonte: BRASIL, 2009).

A água disponível no interior do tanque das bromélias, em qualquer momento, é, basicamente, função de dois elementos: da arquitetura da planta, conforme mencionado no parágrafo anterior; e do efeito do clima local, que influencia na quantidade de chuva, na taxa de insolação e na taxa de evaporação (ZOTZ e THOMAZ, 1999 *apud* COGLIATTI-CARVALHO *et al.*, 2010).

Deste modo, ainda de acordo com Cogliatti-Carvalho *et al.* (2010), apesar da roseta da bromélia possuir uma capacidade máxima de armazenamento de água em seu interior (volume máximo armazenável), este é afetado pelas condições climáticas, podendo sofrer uma redução para o volume efetivamente disponível no seu interior (volume efetivo armazenado). Ferreira (1981) menciona que a água armazenada pelas bromélias pode variar de poucos decilitros a alguns litros, dependendo do tamanho e do grau de dilatação da base das folhas.

Dentre as espécies da subfamília Bromelioideae, destaca-se o gênero *Neoregelia*, que tem como uma das representantes a espécie *Neoregelia cruenta*, apresentada na Figura 4.5, cujas folhas, dispostas de modo espiralado, em forma de roseta, permitem o acúmulo de água tanto em suas bainhas<sup>18</sup> (porção basal da folha), quanto na parte central da planta, denominada tanque (LEME, 1984).



Figura 4.5 – *Neoregelia cruenta*.

Fonte: BETHMANN (2008).

---

<sup>18</sup> **Bainha:** Parte basal ou achatada da folha, que a prende ao caule. (Fonte: BRASIL, 2009).

De acordo com Matuano (2008), a espécie *Neoregelia cruenta* apresenta-se distribuída pelo sudeste brasileiro, conforme mostra a Figura 4.6, sendo facilmente encontrada no Estado do Rio de Janeiro. Na própria Cidade Universitária, Ilha do Fundão, observa-se que as bromélias foram adotadas como elemento paisagístico local, conforme mostrado na Figura 4.7 e na Figura 4.8.



Figura 4.6 – Distribuição geográfica da espécie *Neoregelia cruenta*.

Fonte: ARAUJO (2000 *apud* MATUANO, 2008).



Figura 4.7 – Bromélias no canteiro central da Avenida Athos da Silveira Ramos, em seu trecho entre o CT e o CCMN.

Fonte: Acervo do autor (2016).



Figura 4.8 – Bromélias em frente ao símbolo da Minerva no CT.

Fonte: Acervo do autor (2016).

Considerando o exposto, observa-se que o gênero *Neoregelia* atende os requisitos estipulados *a priori* para que a mesma fosse passível de ser adotada no protótipo de cobertura verde, visto que se trata de um gênero típico de clima tropical, apresentando considerável resistência à exposição ao sol e grande potencial na retenção de água de chuva. Por esses motivos, optou-se pela adoção de bromélias desse gênero para compor a cobertura verde objeto de estudo. A Figura 4.9 apresenta as bromélias do gênero *Neoregelia* que foram plantadas no módulo experimental de cobertura verde.

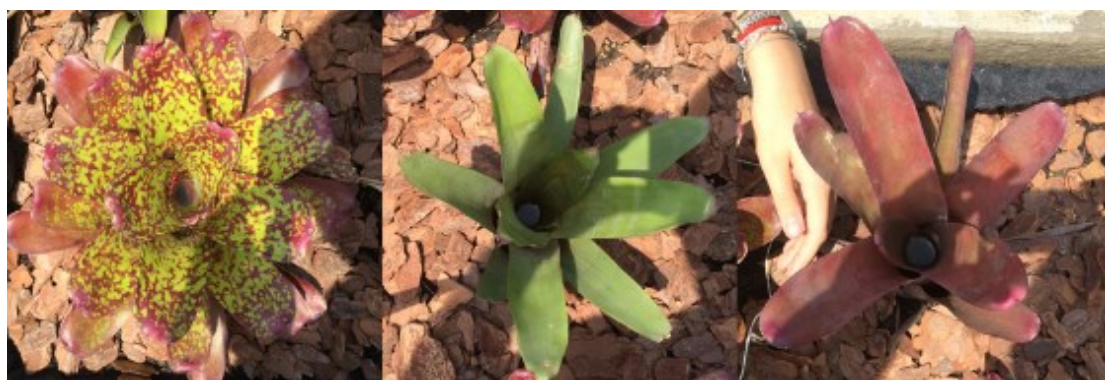


Figura 4.9 – Bromélias do gênero *Neoregelia* utilizadas no protótipo.

Fonte: Acervo do autor (2016).

Destaca-se também que, além dos aspectos positivos, apresentados até agora, que apontam a bromélia como sendo uma excelente opção para o protótipo de cobertura verde, foram também pesquisados todos os inconvenientes relacionados à sua adoção.

A principal desvantagem levantada foi o fato de que a água dos tanques das bromélias poderia facilitar a proliferação de mosquitos causadores de doenças que assolam o Município do Rio de Janeiro, como a dengue, zika e chikungunya. Todas essas três doenças podem ser adquiridas através da picada do mosquito *Aedes aegypti* sendo que a chikungunya ainda pode ser transmitida pelo *Aedes albopictus*.

Constata-se que ainda há uma certa carência de pesquisas que possuem como objetivo verificar se os tanques das bromélias fornecem condições favoráveis para o desenvolvimento de larvas dos mosquitos *Aedes aegypti* e *Aedes albopictus*, ou, mais precisamente, se estes tanques são locais de focos insignificantes.

No Brasil, as pesquisas de Cunha *et al.* (2002) e Forattini *et al.* (2000) indicam que os tanques das bromélias podem ser focos de criação de *Aedes aegypti*, e o estudo de Natal *et al.* (1997) aponta que as bromélias podem ser criadouras de larvas de *Aedes albopictus*. Em contrapartida, pesquisas mais recentes, como as desenvolvidas por Lopez *et al.* (2009), Mocellin *et al.* (2009) e Lopez *et al.* (2011), indicam que as bromélias não são locais de focos significativos dos mosquitos *Aedes aegypti* e *Aedes albopictus*.

#### **4.3 A CONSTRUÇÃO DO PROTÓTIPO DE TELHADO VERDE**

Conforme apresentado no histórico das atividades desempenhadas na bancada experimental, descrito no Apêndice A, em 06/11/2015, a primeira configuração para o protótipo de cobertura verde foi construída na bancada experimental, seguindo a metodologia construtiva detalhada a seguir.

Primeiro, parte da face leste e sul (indicadas na Figura 4.1), foram cobertas com manta bidim, de modo a cobrir os 2 (dois) tubos de drenagem do módulo, com a finalidade de evitar que as saídas de água da camada de drenagem fossem obstruídas por material proveniente das camadas do protótipo. Este processo está apresentado através da Figura 4.10 e Figura 4.11.



Figura 4.10 – Recorte da manta bidim para obter o tamanho necessário.

Fonte: Acervo do autor (2015).



Figura 4.11 – Colocação da manta bidim para proteger os tubos de drenagem.

Fonte: Acervo do autor (2015).

Em seguida, foi executada a camada de drenagem do protótipo. Para esta camada, foi utilizada argila expandida, como sugerido em algumas referências brasileiras (OLIVEIRA, 2009; GUERRA JÚNIOR, 2013; NASCIMENTO, 2015; PINTO, 2015) sobre o tema. As fotos da Figura 4.12 e Figura 4.13 apresentam, respectivamente, o processo de adequação da argila expandida no módulo e o resultado final da camada.

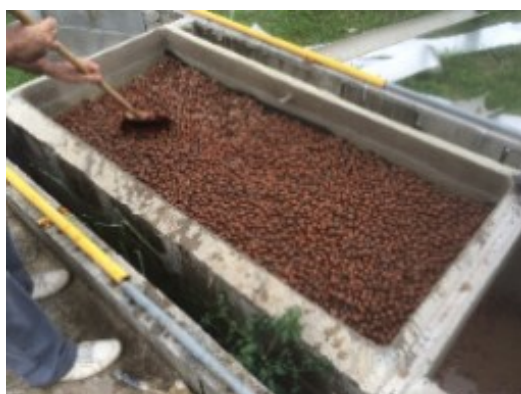


Figura 4.12 – Processo de colocação e adequação da argila expandida.

Fonte: Acervo do autor (2015).



Figura 4.13 – Camada de drenagem executada.

Fonte: Acervo do autor (2015).

Nesse ponto, cabe destacar que, próximo à face leste, a camada de drenagem apresentou espessura maior, tendo sua espessura diminuindo em direção à face oeste. Assim, procurou-se nivelar o topo dessa camada com o seu material constituinte, com o objetivo de que a camada drenante corrigisse a declividade da camada de suporte (laje de

fundo) para o assentamento das camadas superiores. Com isto, a camada de drenagem variou, de aproximadamente 5 cm na face leste, até cerca de 2,5 cm na face oeste do módulo e, desta forma, as camadas lançadas a partir desta serão praticamente planas.

Após o lançamento da argila expandida e conclusão da camada de drenagem, esta última foi coberta por uma manta bidim. Teve-se o cuidado, nesta etapa, em se cobrir as paredes de todas as faces do módulo. As fotos da Figura 4.14 e Figura 4.15 mostram, respectivamente, o processo de colocação da manta bidim e o módulo após a execução deste procedimento.



Figura 4.14 – Processo de colocação da manta bidim sobre a camada drenante.

Fonte: Acervo do autor (2015).



Figura 4.15 – Manta bidim colocada no módulo, abrangendo as paredes das faces.

Fonte: Acervo do autor (2015).

A etapa seguinte realizada referiu-se ao lançamento da camada de substrato, composta por duas subcamadas: uma de areia, com aproximadamente 12 cm, e outra, de cerca de 2 cm, composta pelo substrato comercial “Tropstrato Floreiras e Vasos”, fornecido pela empresa Vida Verde – Tecnologia em substratos, cujo *site* encontra-se apresentado na referência bibliográfica deste trabalho.

A subcamada de areia foi disposta no protótipo de acordo com as orientações do técnico do Laboratório de Geotecnia da Escola Politécnica da UFRJ, Gustavo Guimarães, seguindo os seguintes passos: primeiro, os sacos de areia foram dispostos em fileiras, um do lado do outro (Figura 4.16) e, após a disposição de todos, os fundos dos sacos foram rasgados e os sacos foram removidos por cima (Figura 4.17). Este procedimento de colocação da areia no protótipo garante um determinado padrão na compactação do material da camada, visto que as condições de lançamento (altura e espalhamento) da areia dos sacos foram executadas de forma similares.



Figura 4.16 – Primeira fileira de sacos com a areia que irá compor o substrato.

Fonte: Acervo do autor (2015).



Figura 4.17 – Processo de lançamento da areia dos sacos para o protótipo.

Fonte: Acervo do autor (2015).

A subcamada de areia foi regularizada, com o uso de uma vassoura, conforme mostra a foto da Figura 4.18. Após a regularização, lançou-se mais areia no protótipo, de modo a aumentar esta subcamada até atingir a espessura de cerca de 12 cm. Esta operação foi realizada com o mesmo procedimento descrito no parágrafo anterior e encontra-se ilustrada na Figura 4.19.

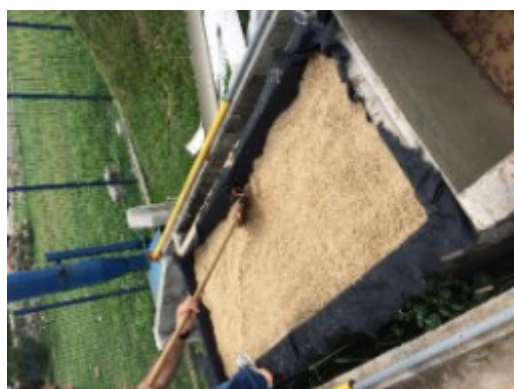


Figura 4.18 – Regularização da subcamada de areia do substrato.

Fonte: Acervo do autor (2015).



Figura 4.19 – Procedimento para aumentar a espessura da subcamada.

Fonte: Acervo do autor (2015).

Sobre a subcamada de areia, foi lançada a subcamada do substrato comercial “Tropstrato Floreiras e Vasos” (Figura 4.20 e Figura 4.21), à base de turfa, casca de pinus e enriquecido com macro e micronutrientes com uma espessura de, aproximadamente, 2 cm. Este substrato comercial foi indicado e doado pelo arquiteto paisagista Fernando

Acyllino, aluno de pós-graduação do PEU/UFRJ. Esta subcamada concluída é apresentada na Figura 4.22, finalizando, desta forma, a camada de substrato.



Figura 4.20 – Saco do substrato comercial “Tropstrato Floreiras e Vasos” (Frente).

Fonte: Acervo do autor (2015).



Figura 4.21– Saco do substrato comercial “Tropstrato Floreiras e Vasos” (Verso).

Fonte: Acervo do autor (2015).



Figura 4.22 – Protótipo de telhado verde, após lançamento da camada de substrato.

Fonte: Acervo do autor (2015).

Por fim, foram plantadas as bromélias na camada de substrato e, nos locais em que o substrato ficou exposto em torno delas, foi lançado o fertilizante de liberação controlada “Forth Cote 14.14.14” (Figura 4.23 e Figura 4.24), fornecido pela empresa Tecnutri do Brasil (*site* da empresa encontra-se na referência bibliográfica deste trabalho), e que tem como objetivo fornecer um aporte de nutrientes para os primeiros dias das bromélias no

protótipo. Também foi lançado, entre as bromélias, casca de pinus (Figura 4.25), para proteger o substrato da exposição a intempéries.



Figura 4.23 – Fertilizante Forth Cote 14.14.14 (Frente).

Fonte: Acervo do autor (2015).



Figura 4.24 – Fertilizante Forth Cote 14.14.14 (Verso).

Fonte: Acervo do autor (2015).



Figura 4.25 – Casca de pinus.

Fonte: Acervo do autor (2015).

O *layout* com a disposição das bromélias é apresentado na Figura 4.26. Buscou-se mesclar as 3 (três) variações de bromélias do gênero *Neoregelia* que foram doadas pelo arquiteto paisagista Fernando Acylino.



Figura 4.26 – Protótipo de telhado verde concluído em 06/11/2015.

Fonte: Acervo do autor (2015).

O protótipo de cobertura verde apresentado na Figura 4.26 possuía 20 (vinte) bromélias gênero *Neoregelia*, sendo, de um modo grosseiro de identificação, 10 (dez) de coloração roxa misturada com verde (Figura 4.27), 5 (cinco) de coloração verde (Figura 4.28) e 5 (cinco) de coloração vermelha (Figura 4.29).



Figura 4.27 – *Neoregelia* (mista).

Fonte: Acervo do autor (2015).



Figura 4.28 – *Neoregelia* (verde).

Fonte: Acervo do autor (2015).



Figura 4.29 – *Neoregelia* (roxa).

Fonte: Acervo do autor (2015).

O primeiro ensaio experimental, realizado para testar os equipamentos, ocorreu em 15/12/2015, utilizando a configuração de telhado verde descrita até aqui.

O protótipo ficou exposto ao sol e sem nenhum tipo de manutenção durante o recesso de final de ano da UFRJ, no período de 21/12/2015 até 03/01/2016. Verificou-se que, após esse período, algumas bromélias de coloração mista (Figura 4.27), não resistiram a intensa exposição ao sol, ficando com suas folhas bastante avariadas. O estado em que algumas bromélias deste tipo se encontravam é apresentado na Figura 4.30 e Figura 4.31.



Figura 4.30 – Exemplo de bromélia que não resistiu (1).

Fonte: Acervo do autor (2016).



Figura 4.31 – Exemplo de bromélia que não resistiu (2).

Fonte: Acervo do autor (2016).

Após a constatação de que 5 (cinco) bromélias de coloração mista haviam morrido, optou-se pela substituição das mesmas, bem como também pelo aumento da densidade de cobertura vegetal do protótipo, passando de 20 (vinte) bromélias para 31 (trinta e uma). Isso só foi possível com o apoio Professora Fernanda Reinert (CCS/UFRJ), que doou para esta pesquisa diversas mudas de bromélias.

A remoção das bromélias que haviam morrido, e o plantio de novas bromélias, foram realizadas em 11/02/2016, mudando a configuração da camada vegetal do protótipo. Assim, o *layout* final do protótipo de telhado verde, formado por bromélias do gênero *Neoregelia* e palco dos ensaios experimentais desta pesquisa, é o apresentado na Figura 4.32. É possível notar nesta Figura que algumas bromélias de coloração mista, embora avariadas, foram mantidas.



Figura 4.32 – Protótipo de telhado verde utilizado nos ensaios experimentais.

Fonte: Acervo do autor (2016).

#### 4.4 METODOLOGIA DOS ENSAIOS EXPERIMENTAIS

Os ensaios experimentais pretendem verificar o comportamento da cobertura verde, construída em escala piloto na bancada experimental, sob a ação de chuvas praticamente constantes, com intensidade e duração conhecidas.

Todos os ensaios realizados utilizaram os dois equipamentos acoplados à bancada experimental: o Simulador de Chuvas, devidamente descrito no Anexo I, para a geração de chuvas preestabelecidas; e a Caixa Pluviômetra, adequadamente descrita no Anexo II, para a medição das vazões de saída da camada de drenagem do protótipo.

Os procedimentos realizados no ensaio experimental estão ilustrados, de modo simples, na Figura 4.33 e o descritivo do passo-a-passo da execução de um ensaio experimental está apresentado no Quadro 4.1.

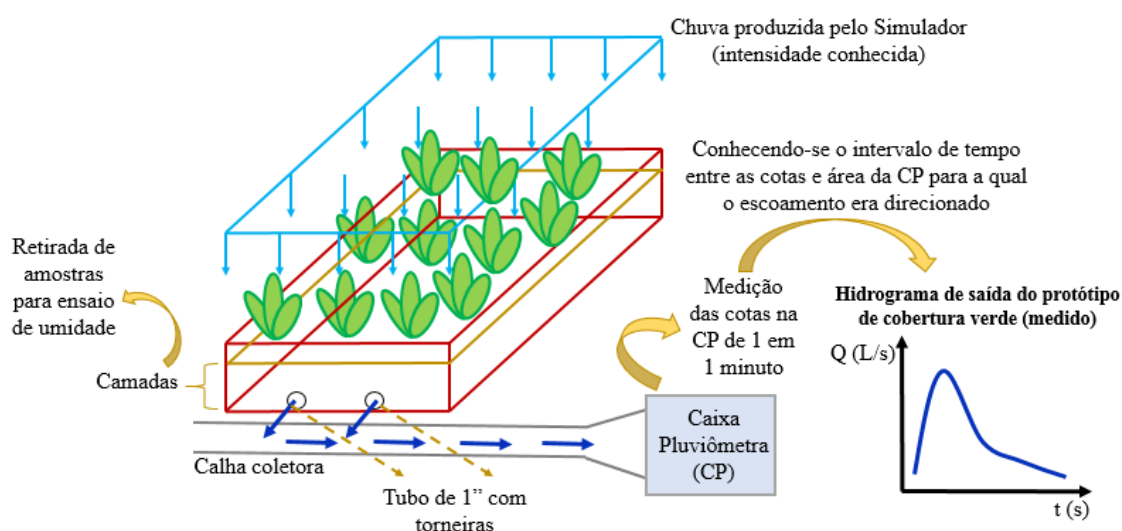


Figura 4.33 – Procedimento experimental da realização de ensaios no protótipo de telhado verde.

Fonte: Elaborado pelo autor.

Quadro 4.1 – Etapas para a execução do ensaio experimental.

| <b>Roteiro de execução dos ensaios experimentais</b>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                   |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <ol style="list-style-type: none"><li>1. Realizar a primeira medição de intensidade de chuva produzida pelo Simulador de Chuvas (antes do experimento), para fins de calibração do mesmo;</li><li>2. Retirar do protótipo e transportar amostra de substrato do CESA/UFRJ para o LT/COPPE;</li><li>3. Realizar o ensaio de laboratório para determinar a umidade inicial do substrato;</li><li>4. Ligar o Simulador de Água de Chuva sobre o telhado para que seja iniciada a chuva, com a duração já prevista;</li><li>5. Registrar, a cada minuto, a partir do início da chuva, as cotas medidas na Caixa Pluviômetra;</li><li>6. Desligar o Simulador de Água de Chuva após o tempo de duração de chuva preestabelecida;</li><li>7. Continuar registrando as cotas na Caixa Pluviômetra, para caracterizar o deplecionamento do sistema até que não haja mudança de cota por pelo menos 5 minutos;</li><li>8. Realizar a segunda medição de intensidade de chuva produzida pelo Simulador de Chuvas (após o experimento).</li></ol> |

Foram executados, ao todo, 13 (treze) ensaios experimentais válidos. Entretanto, apenas 10 (dez) foram considerados na análise da presente pesquisa, uma vez que 3 (três) foram desconsiderados por apresentarem incoerências grosseiras nos resultados, atreladas a algum tipo de problema no funcionamento dos equipamentos utilizados, e/ou a erros no processo das medições em campo.

Na Tabela 4.1 encontram-se listados todos os ensaios experimentais realizados, com suas respectivas datas de realização, intensidades de chuva que eram esperadas do Simulador de Chuvas, e condições iniciais de umidade do substrato que eram ensejadas *a priori* (por interpretação da ocorrência de chuvas naturais em dias anteriores ou pela proximidade da realização dos próprios ensaios). Também consta na referida Tabela os experimentos que foram utilizados na presente pesquisa, bem como os que foram descartados, com a respectiva explicação do descarte.

Nos dias 24/02/2016 e 22/03/2016 foi realizada a troca da intensidade produzida pelo Simulador de Chuvas, respectivamente, de 50 mm/h para 100 mm/h, e de 100 mm/h para 50 mm/h. Este procedimento é realizado a partir da abertura das do obturador rotativo ajustável do equipamento, conforme informado no Anexo I.

Tabela 4.1 – Ensaios realizados durante a campanha experimental.

| Dia        | Intensidade de chuva prevista (mm/h) | Condição inicial de umidade do substrato esperada | Ensaio considerado na pesquisa | Motivo do descarte                   |
|------------|--------------------------------------|---------------------------------------------------|--------------------------------|--------------------------------------|
| 15/02/2016 | 50                                   | Seco                                              | Sim                            | Experimento válido                   |
| 18/02/2016 | 50                                   | Úmido                                             | Sim                            | Experimento válido                   |
| 22/02/2016 | 50                                   | Úmido                                             | Sim                            | Experimento válido                   |
| 25/02/2016 | 100                                  | Seco                                              | Sim                            | Experimento válido                   |
| 01/03/2016 | 100                                  | Úmido                                             | Sim                            | Experimento válido                   |
| 03/03/2016 | 100                                  | Seco                                              | Sim                            | Experimento válido                   |
| 04/03/2016 | 100                                  | Seco                                              | Não                            | Incoerência grosseira nos resultados |
| 08/03/2016 | 100                                  | Úmido                                             | Sim                            | Experimento válido                   |
| 09/03/2016 | 100                                  | Úmido                                             | Sim                            | Experimento válido                   |
| 23/03/2016 | 50                                   | Seco                                              | Não                            | Incoerência grosseira nos resultados |
| 24/03/2016 | 50                                   | Úmido                                             | Sim                            | Experimento válido                   |
| 28/03/2016 | 50                                   | Seco                                              | Sim                            | Experimento válido                   |
| 30/03/2016 | 50                                   | Seco                                              | Não                            | Incoerência grosseira nos resultados |

Para a identificação do número de dias anteriores sem chuva, na ocasião de cada ensaio experimental, foram consultadas as informações de estações pluviométricas disponíveis no *site* Alerta Rio (<http://alertario.rio.rj.gov.br/>). Na Figura 4.34 é apresentada a localização das estações pluviométricas próximas ao protótipo (“telhado verde”).



Figura 4.34 – Localização das estações do Alerta Rio.

Fonte: Elaborado pelo autor, baseado nas informações do *site* Alerta Rio.

Considerando a proximidade das estações “Ilha do Governador” (nº 08), “Penha” (nº 09) e “São Cristovão” (nº 32) do local alvo de estudo, os dados existentes para estas estações foram avaliados. Após avaliação, decidiu-se ser mais apropriado utilizar os dados da estação “São Cristovão”.

A Tabela 4.2 apresenta os seguintes dados pluviométricos: número de dias sem chuva e chuvas acumuladas em 24 e em 96 horas antes, para cada dia em que foi realizado um ensaio experimental.

Tabela 4.2 – Dados pluviométricos da estação São Cristovão (nº 32) do Alerta Rio.

Fonte: Elaborado pelo autor, com base nas informações do Alerta Rio.

| Número do Ensaio | Dia de realização | Hora de início | Hora de término | Nº de dias anteriores sem chuva | Chuva Acum. 24 h antes do ensaio (mm) | Chuva Acum. 96 h antes do ensaio (mm) |
|------------------|-------------------|----------------|-----------------|---------------------------------|---------------------------------------|---------------------------------------|
| 1                | 25/02/2016        | 08:00          | 11:00           | 2                               | 0.0                                   | 75.4                                  |
| 2                | 01/03/2016        | 08:00          | 11:00           | 0                               | 51.0                                  | 51.0                                  |
| 3                | 03/03/2016        | 08:00          | 11:00           | 2                               | 0.0                                   | 51.0                                  |
| 4                | 08/03/2016        | 09:00          | 12:30           | 0                               | 0.0                                   | 0.2                                   |
| 5                | 09/03/2016        | 09:00          | 12:30           | 0*                              | 0.0                                   | 0.2                                   |
| 6                | 18/02/2016        | 07:30          | 10:30           | 0                               | 11.4                                  | 59.2                                  |
| 7                | 22/02/2016        | 08:00          | 11:00           | 0                               | 12.4                                  | 56.4                                  |
| 8                | 24/03/2016        | 13:00          | 16:00           | 0                               | 26.0                                  | 26.0                                  |
| 9                | 28/03/2016        | 14:00          | 16:30           | 2                               | 0.0                                   | 0.2                                   |
| 10               | 15/02/2016        | 08:00          | 11:30           | 4                               | 0.0                                   | 6.4                                   |

\* Foi realizado ensaio no dia anterior, logo, choveu no protótipo em menos de um dia.

A ideia básica dos experimentos realizados é caracterizar o hidrograma de resposta do módulo de telhado verde, estimado a partir das medições (realizadas na Caixa Pluvimômetra) dos deflúvios provenientes da camada de drenagem do protótipo. Cabe destacar que a saída da camada de drenagem é realizada por dois tubos com diâmetro de 1” e que cada tubo, em sua extremidade, antes do deságue na calha coletora, possui uma torneira.

Considerando a faixa de variação de chuva ofertada pelo Simulador de Chuvas e as dificuldades de trabalhar com os valores mais extremos dessa faixa de variação, estabeleceu-se que seriam simuladas as intensidades de 50 mm/h e 100 mm/h.

Para a duração da chuva sobre o protótipo de telhado verde, pensou-se em 3 horas, que é a duração crítica da bacia do rio Joana, para a qual se pretende estender os resultados

da bancada, simulando a resposta em escala de bacia. Porém, após a realização de alguns ensaios-teste, foi verificado que, para ambas intensidades estudadas, em menos de 30 minutos, era estabelecido um patamar no hidrograma de saída do protótipo. Deste modo, por praticidade, os ensaios foram realizados com chuva de duração de 1 hora e 30 minutos, sendo que, para considerar a resposta do protótipo sobre uma chuva de 3 horas de duração, bastaria apenas transladar o patamar do hidrograma de saída.

Tendo em vista que, além da intensidade e duração da chuva, a umidade inicial sob a qual se encontra o substrato é também um parâmetro que se espera que influencie na retenção de água de chuva por coberturas verdes, foi planejada a realização de ensaios para a caracterização da umidade do substrato imediatamente antes à realização de cada ensaio.

Nos tópicos seguintes serão detalhados os procedimentos de determinação da intensidade de chuva adotada nos ensaios, de caracterização da umidade inicial do substrato e das medições realizadas na Caixa Pluviômetro.

#### **4.4.1 Calibração da intensidade de chuva produzida pelo Simulador de Chuvas**

Embora tenham sido estipuladas as intensidades de 50 e 100 mm/h, como padrão para os ensaios, esses valores não são obtidos, de maneira exata e precisa, em campo com o Simulador de Chuvas. Isso ocorre por vários motivos, tais como: a própria imprecisão do equipamento, o método de ajuste da intensidade, que é feito de maneira manual (através da abertura das fendas dos obturadores), as avarias em peças ocasionadas pela intensa exposição do equipamento ao sol, o funcionamento inadequado da bomba ou da tubulação que recalca água para os interceptadores, entre outros. Ou seja, as intensidades dos ensaios não foram exatamente 50 e 100 mm/h e, sim, valores próximos a estes.

Sendo assim, a intensidade da chuva produzida pelo simulador, a ser adotada como representativa e constante durante um determinado ensaio, é obtida seguindo-se os passos que são descritos a seguir.

Primeiro, antes da realização do ensaio experimental, o Simulador de Chuvas é posicionado na bancada experimental em local fora da área de influência do protótipo. Em seguida, abaixo do simulador são dispostas duas bandejas de calibração (Figura 4.35), que são componentes acessórios ao Simulador de Chuvas e que, juntas, totalizam uma área de coleta de 1,8 m<sup>2</sup>.

Estando as bandejas posicionadas abaixo do simulador, liga-se o obturador e deixa o mesmo funcionando por cerca de 2 minutos e, decorrido este tempo, aciona-se a bomba para que a chuva se inicie.



Figura 4.35 – Bandejas de calibração para determinação da intensidade da chuva produzida pelo simulador.

Fonte: BRUNO (2016).

Seguindo as orientações que constam no Manual do Simulador de Chuvas *InfiAsper* – *Double* (ALVES SOBRINHO, 2012), para calibração do simulador, deve-se promover uma chuva com duração de, no mínimo, 6 minutos (0,1 h) sobre as bandejas de calibração. Esse tempo mínimo foi o adotado. Assim, chove sobre as bandejas durante 6 minutos, conforme ilustrado na Figura 4.36.



Figura 4.36 – Chuva com duração de 6 minutos sobre as bandejas de calibração.

Fonte: Acervo do autor (2016).

Após o término da chuva, o valor da intensidade de chuva produzida pelo Simulador de Chuvas, antes do experimento, é calculado através da Equação 4.1.

$$I_{chuva}^{antes} (mm/h) = \frac{Volume\ de\ água\ total\ coletado\ (litros)}{Área\ total\ de\ coleta\ (m^2)} \times \frac{1}{Duração\ da\ chuva\ (h)}$$

(Equação 4.1)

Observa-se que, com exceção do valor do volume de água total coletado pelas bandejas, todas as outras variáveis da Equação 4.1 são conhecidas: a área de coleta é 1,8 m<sup>2</sup>, e a duração da chuva é 6 minutos (0,1 hora). O volume de água coletado pelas bandejas é obtido realizando a transferência da água das duas bandejas para baldes graduados, conforme mostram a Figura 4.37 e Figura 4.38. Além dos baldes graduados, provetas também são utilizadas com o objetivo de medir o volume coletado de maneira mais precisa. Com isso, todas as parcelas da Equação 4.1 tornam-se conhecidas, sendo, portanto, possível estimar a intensidade da chuva produzida pelo simulador antes da realização do experimento.



Figura 4.37 – Transferência da água da bandeja para o balde graduado.

Fonte: Acervo do autor (2016).



Figura 4.38 – Balde graduado utilizado para verificar o volume precipitado.

Fonte: Acervo do autor (2016).

Tendo já determinado o valor da intensidade da chuva produzida pelo Simulador de Chuvas, antes da execução do experimento, o equipamento é transportado de modo a ficar sobre a área de influência do protótipo para que o ensaio experimental seja realizado.

Após a realização do ensaio experimental, o Simulador de Chuvas é novamente deslocado pela bancada experimental para uma posição fora da área de influência do

protótipo e o procedimento, que já havia sido realizado antes da execução do ensaio experimental, é reproduzido, seguindo-se os mesmos passos, com o objetivo de determinar a intensidade da chuva produzida pelo simulador após a execução do ensaio. Desta forma, de modo análogo, o valor da intensidade de chuva produzida pelo Simulador de Chuvas, após a realização do experimento, também pode ser calculado pela Equação 4.1, porém, ao invés de obter-se o  $I_{chuva}^{antes}$  (mm/h), será obtido o  $I_{chuva}^{após}$  (mm/h).

Por fim, a intensidade de chuva experimental, considerada como constante durante toda a duração da chuva sobre o protótipo, é representada pela média entre as intensidades obtidas antes e após a realização do experimento, conforme Equação 4.2.

$$I \text{ (mm/h)} = \frac{I_{chuva}^{antes} \text{ (mm/h)} + I_{chuva}^{após} \text{ (mm/h)}}{2} \quad \text{(Equação 4.2)}$$

A Tabela 4.3 apresenta os valores das intensidades iniciais, finais e adotadas para cada experimento considerado nesta pesquisa.

Tabela 4.3 – Intensidades de chuva consideradas para cada ensaio experimental.

| Número do Ensaio                                      | Dia de realização | i prevista (mm/h) | i antes do experimento (mm/h) | i depois do experimento (mm/h) | Intensidade adotada (mm/h) |
|-------------------------------------------------------|-------------------|-------------------|-------------------------------|--------------------------------|----------------------------|
| 1                                                     | 25/02/2016        | 100               | 106.1                         | 122.2                          | 114.2                      |
| 2                                                     | 01/03/2016        | 100               | 92.8                          | 92.2                           | 92.5                       |
| 3                                                     | 03/03/2016        | 100               | 103.9                         | 100                            | 101.9                      |
| 4                                                     | 08/03/2016        | 100               | 100.6                         | 95.0                           | 97.8                       |
| 5                                                     | 09/03/2016        | 100               | 96.1                          | 95.0                           | 95.6                       |
| 6                                                     | 18/02/2016        | 50                | 50.0                          | 51.7                           | 50.8                       |
| 7                                                     | 22/02/2016        | 50                | 50.6                          | 50.0                           | 50.3                       |
| 8                                                     | 24/03/2016        | 50                | 50.6                          | 49.0                           | 50.0                       |
| 9                                                     | 28/03/2016        | 50                | 48.9                          | 53.9                           | 51.4                       |
| 10                                                    | 15/02/2016        | 50                | 49.4                          | 52.8                           | 51.1                       |
| Média das intensidades próximas a 100 mm/h (em mm/h): |                   |                   |                               |                                | 100.4                      |
| Média das intensidades próximas a 50 mm/h (em mm/h):  |                   |                   |                               |                                | 50.7                       |

#### 4.4.2 Caracterização da condição inicial de umidade do substrato

Em cada ensaio, antes do início da chuva sobre o protótipo de telhado verde, eram recolhidas duas amostras do substrato para a realização de ensaios laboratoriais com o objetivo de caracterizar a umidade do substrato no momento imediatamente antes da execução do ensaio (umidade inicial do substrato). O motivo pelo qual eram recolhidas duas amostras para cada caso é devido ao fato do substrato da cobertura verde alvo deste estudo apresentar duas subcamadas: uma de areia e outra de terra com nutrientes, conforme descrito no item 4.1 deste capítulo.

As duas amostras eram retiradas de locais aleatórios da área do protótipo. Uma amostra era composta por todo o substrato (subcamadas de areia e terra com nutrientes) e obtida através da cravação de um pedaço de tubo PVC, com diâmetro de 1” e aproximadamente 12 cm de comprimento, na camada de substrato. Já a outra amostra era formada pela coleta de 3 (três) colheres de sopa, apenas da subcamada de areia do substrato, sendo cada uma das três colheradas coletadas em locais diferentes do protótipo.

A Figura 4.39 apresenta uma foto dos utensílios utilizados para a coleta das amostras. As amostras, assim que retiradas do protótipo, eram envolvidas por um pano umedecido (Figura 4.40), colocadas em um saco plástico e levadas ao Laboratório de Traçadores da COPPE – LT/COPPE, local onde o ensaio de umidade era realizado.



Figura 4.39 – Colheres e tubo de PVC utilizados para a coleta das amostras.

Fonte: Acervo do autor (2016).



Figura 4.40 – Panos umedecidos que acomodaram as amostras.

Fonte: Acervo do autor (2016).

Após a retirada da amostra do substrato com o tubo PVC eram repostos, no buraco formado no protótipo, tanto a areia quanto o substrato comercial “Tropstrato Floreiras e Vasos” (terra com nutrientes). Embora o volume retirado com o tubo PVC fosse pequeno (se comparado com o volume da camada de substrato), essa prática foi adotada em todos os ensaios.

No Quadro 4.2, apresentado a seguir, estão ilustradas as etapas de campo para a obtenção das amostras de substrato do protótipo até seu encaminhamento para o LT/COPPE.

Conforme já mencionado, a fase laboratorial da determinação da umidade inicial de cada amostra retirada do protótipo de telhado verde, para cada ensaio experimental executado, foi realizada no LT/COPPE.

O Laboratório de Traçadores (LT/COPPE), estabelecido desde 1972, é o pioneiro no Brasil no emprego de corantes fluorescentes como traçadores inativos, alternativa ao uso de traçadores radioativos artificiais. Além de se dedicar a pesquisas e estudos relacionados com a Hidrologia de Águas Superficiais, é também um dos laboratórios pioneiros, na COPPE/UFRJ, na abordagem experimental de problemas relacionados com o Meio Ambiente (retirado do *site* do Programa de Engenharia Civil – PEC/COPPE/UFRJ, acesso em 01/03/2016).

Quadro 4.2 – Etapas de campo para obtenção das amostras do substrato.

**Etapas de Campo para Coleta de Amostras do Substrato**

1. Retirar três colheradas da subcamada de areia do substrato (Figura 4.41) e colocá-las em um pano umedecido (Figura 4.42);



Figura 4.41 – Coleta de uma colherada de areia da subcamada do substrato.

Fonte: Acervo do autor (2016).



Figura 4.42 – Amostra da subcamada de areia em pano umedecido.

Fonte: Acervo do autor (2016).

2. Retirar, com o auxílio de um pedaço de tubo PVC, amostra de toda a camada de substrato (Figura 4.43) e colocá-la em um pano umedecido (Figura 4.44);



Figura 4.43 – Coleta de substrato com o auxílio de um tubo PVC.

Fonte: Acervo do autor (2016).



Figura 4.44 – Amostra do substrato em pano umedecido.

Fonte: Acervo do autor (2016).

Quadro 4.2 – Etapas de campo para obtenção das amostras do substrato (Continuação).

3. Cobrir as amostras retiradas do protótipo com o pano umedecido (Figura 4.45) e repor no protótipo o substrato que foi retirado (Figura 4.46);



Figura 4.45 – Amostras acomodadas em pano umedecido.

Fonte: Acervo do autor (2016).



Figura 4.46 – Reposição de areia que foi removida do protótipo.

Fonte: Acervo do autor (2016).

4. Ensacar as amostras e transportá-las, o mais rápido possível, do CESA/UFRJ para o LT/COPPE, conforme caminho representado na Figura 4.47.



Figura 4.47 – Caminho (cerca de 500 m) entre o CESA/UFRJ e o LT/UFRJ.

Fonte: Elaborado pelo autor, com imagem do Google Earth ® (2015).

A análise da umidade das amostras foi realizada baseando-se no “Manual de Métodos de análise de Solo” (EMBRAPA, 1997), elaborado pela Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. Basicamente, o ensaio possui o procedimento apresentado no **Erro! Autoreferência de indicador não válida.**, necessitando apenas dos seguintes equipamentos: balança, recipiente, que suporte altas temperaturas, para dispor as amostras (Figura 4.48) e estufa (Figura 4.49).

Quadro 4.3 – Procedimento de determinação da umidade para cada amostra.

Fonte: Elaborado pelo autor.

**Procedimento para Obtenção da Umidade das Amostras**

1. Pesar o recipiente ( $P_{Tara}$ ) que receberá a amostra de substrato do protótipo;
2. Pesar o recipiente com a amostra do substrato na condição original, assim que coletada em campo ( $P_{Tara+Úmido}$ );
3. Colocar o recipiente com a amostra em estufa;
4. Deixar a amostra secando na estufa, com temperatura de 105-110 °C, por 24 horas;
5. Após 24 horas, pesar o recipiente com a amostra seca ( $P_{Tara+Seco}$ );
6. Calcular a umidade através da (Equação 4.3).

$$U (\%) = \frac{100 \times (P_{Úmido} - P_{seco})}{(P_{seco})} = 100 \times \frac{(P_{Tara+Úmido}) - (P_{Tara+Seco})}{(P_{Tara+Seco} - P_{Tara})}$$

(Equação 4.3)



Figura 4.48 – Balança e recipientes.

Fonte: Acervo do autor (2016).



Figura 4.49 – Estufa.

Fonte: Acervo do autor (2016).

A Tabela 4.4 apresenta os valores de umidade obtidos, tanto para as amostras de todo o substrato ( $U_{\text{substrato}}$ ) quanto para as amostras com somente areia ( $U_{\text{areia}}$ ) em cada ensaio realizado.

Tabela 4.4 – Umidades para o substrato antes da realização dos ensaios considerados nesta pesquisa.

| Número do Ensaio | Dia de realização | Condição inicial de umidade do substrato esperada | $U_{\text{substrato}} (\%)$ | $U_{\text{areia}} (\%)$ |
|------------------|-------------------|---------------------------------------------------|-----------------------------|-------------------------|
| 1                | 25/02/2016        | Seco                                              | 13.7                        | 7.7                     |
| 2                | 01/03/2016        | Úmido                                             | 13.9                        | 7.8                     |
| 3                | 03/03/2016        | Seco                                              | 12.4                        | 6.6                     |
| 4                | 08/03/2016        | Úmido                                             | 14.4                        | 8.0                     |
| 5                | 09/03/2016        | Úmido                                             | 14.9                        | 8.4                     |
| 6                | 18/02/2016        | Úmido                                             | 14.3                        | 7.8                     |
| 7                | 22/02/2016        | Úmido                                             | 14.1                        | 7.9                     |
| 8                | 24/03/2016        | Úmido                                             | 14.7                        | 8.3                     |
| 9                | 28/03/2016        | Seco                                              | 12.9                        | 6.9                     |
| 10               | 15/02/2016        | Seco                                              | 12.1                        | 6.5                     |
| Valor médio (%): |                   |                                                   | 13.7                        | 7.6                     |

A diferença encontrada para as umidades das duas amostras pode estar associada à heterogeneidade do substrato, que contém duas subcamadas distintas, à diferença de capacidade que ambos possuem em preencher seus vazios com água, às diversas características de adesão de água por adsorção das partículas sólidas que os formam, entre outros. Entretanto, observando os valores de forma geral, percebe-se que a permeabilidade da areia e sua presença predominante rendem aos ensaios uma característica de condições progressas secas, marcadamente. Não é possível saber, porém, com precisão, quais eram as condições de retenção de água nas próprias bromélias. Portanto, as condições iniciais esperadas do substrato, nos diferentes dias de experimento, devem ser reinterpretadas, mas as condições das bromélias provavelmente seguem as estimativas iniciais.

#### 4.4.3 Medições na Caixa Pluviômetra

Como já mencionado, os experimentos realizados seguem a seguinte metodologia: uma chuva, de intensidade conhecida e assumida como constante, é induzida, através do Simulador de Chuvas, sobre o protótipo de cobertura verde durante um determinado tempo. A água que passa através das camadas da cobertura verde é direcionada para dois tubos de saída na camada de drenagem que lançam, através de torneiras, a água para uma calha que conduz o escoamento à CP suspensa.

A Caixa Pluviômetra possui 3 (três) compartimentos capazes de armazenar água: o pluviômetro, o reservatório maior e o reservatório menor. Cada compartimento é conectado a um tubo piezométrico. Conforme ilustrado na Figura 4.50, o tubo piezométrico 1 é conectado ao pluviômetro, o 2 ao reservatório menor e o 3 ao reservatório maior.

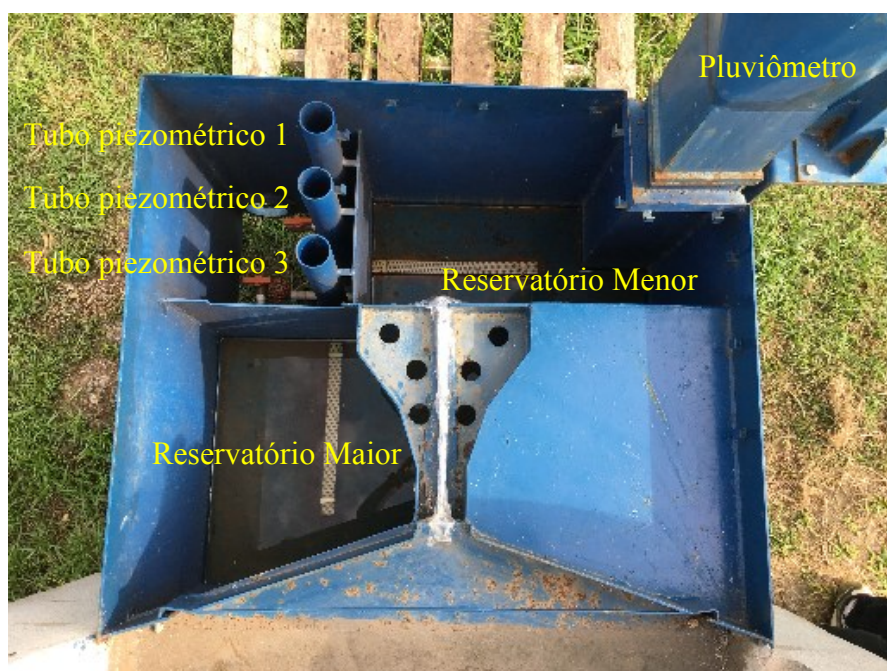


Figura 4.50 – Vista superior da CP suspensa.

Fonte: Acervo do autor (2016).

Esta pesquisa não irá analisar o comportamento do protótipo de cobertura verde em ocasiões de chuvas reais, portanto, o pluviômetro da CP não será utilizado.

Considerando que se pretende obter o hidrograma referente às vazões de saída do protótipo, que passaram através das camadas do telhado verde, que o escoamento desse

deflúvio é direcionado para a CP, e que os reservatórios maior e menor e os tubos piezométricos possuem áreas conhecidas, os volumes que afluem para a CP, em um determinado intervalo de tempo  $\Delta t$  pode ser obtido pela Equação 4.4.

$$V_{af.CP}(t + \Delta t) = [(A_{Res.Maior} + A_{Tubo3}) \times (h_{(t+\Delta t)}^{Tubo3} - h_{(t)}^{Tubo3})] + [(A_{Res.Menor} + A_{Tubo2}) \times (h_{(t+\Delta t)}^{Tubo2} - h_{(t)}^{Tubo2})]$$

(Equação 4.4)

Onde:

$V_{af.CP}(t+\Delta t)$  é o volume que afluíu para a CP no intervalo de tempo de  $t$  até  $t+\Delta t$ ;

$A_{Res.Maior}$  é a área do reservatório maior;

$A_{Tubo3}$  é a área do tubo piezométrico 3;

$h_{(t+\Delta t)}^{Tubo3}$  e  $h_{(t)}^{Tubo3}$  são, respectivamente, a cota no tubo piezométrico 3 nos instantes  $t+\Delta t$  e  $t$ ;

$A_{Res.Menor}$  é a área do reservatório menor;

$A_{Tubo2}$  é a área do tubo piezométrico 2;  $h_{(t+\Delta t)}^{Tubo2}$  e  $h_{(t)}^{Tubo2}$  são, respectivamente, a cota no tubo piezométrico 2 em  $t+\Delta t$  e  $t$ .

Como até o momento de elaboração desta pesquisa as leituras dos tubos piezométricos da CP suspensa não eram realizadas de maneira automatizada, através de sensores, utilizou-se o mesmo aparato adotado por Liberato (2015) para medir os níveis de água nos compartimentos da CP.

Este aparato, conforme descrito por Liberato (2015), é uma estrutura em ferro galvanizado com 0,81 m de comprimento e 0,02 m de largura (Figura 4.51). Ao longo de seu comprimento foi fixada uma régua graduada de 0,625 m, conforme apresentado na Figura 4.52. O instrumento possui dois parafusos para sua fixação na parede do tubo piezométrico. Colado na régua graduada fica um tubo de acrílico, rígido, transparente e com 3,0 mm de diâmetro interno, por onde percorre uma vareta em aço inox com 0,70 m de comprimento e 2,0 mm de diâmetro. Numa ponta dessa vareta fica colada uma esfera de isopor com 35,0 mm de diâmetro e que flutua quando posta em contato com o nível d'água dentro do tubo piezométrico. Na outra ponta da vareta de aço foi feita uma marcação visível para que, quando o nível dentro do reservatório, comunicado com os tubos piezométricos, variar, seja possível notar essa variação e assim realizar a medição.

A Figura 4.53 apresenta o aparato instalado em um dos tubos piezométricos, preso com os parafusos.

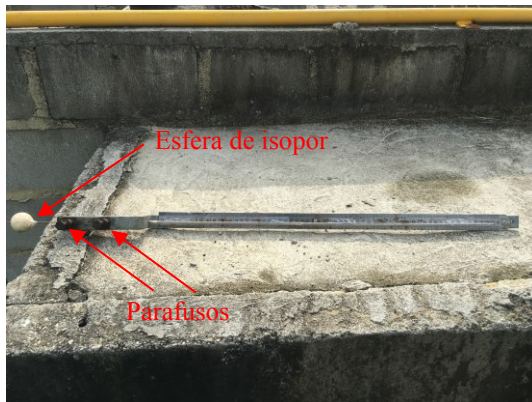


Figura 4.51 – Medidor de nível.

Fonte: Acervo do autor (2016).



Figura 4.52 – Régua do Medidor de nível.

Fonte: Acervo do autor (2016).



Figura 4.53 – Aparato para medição de nível dentro do tubo piezométrico, destacando os parafusos como mecanismo de prisão.

Fonte: Acervo do autor (2016).

Assim, para discretizar o hidrograma com as vazões de saída do protótipo de telhado verde ao longo do tempo, bastaria realizar, a cada minuto, a leitura das cotas apresentadas nos tubos piezométricos 2 e 3, referentes aos reservatórios menor e maior, respectivamente. Entretanto, com o objetivo de reduzir o dispendioso trabalho de realizar duas leituras a cada minuto, e reduzir a imprecisão dessas medições, pois não há como,

no mesmo instante, observar e anotar duas leituras, a entrada para o reservatório menor foi obstruída (Figura 4.54), propositalmente, com fita adesiva (que posteriormente poderia ser removida), com o objetivo de que só o reservatório maior da CP suspensa recebesse contribuição dos deflúvios do protótipo de telhado verde. Desta forma, ao longo do experimento, só seria necessário realizar a leitura do tubo piezométrico 3 e a Equação 4.4 passaria a ser expressa pela Equação 4.5.



Figura 4.54 – Obstrução da entrada de água no reservatório pequeno com fita.

Fonte: Acervo do autor (2016).

$$V_{af.CP}(t + \Delta t) = [(A_{Res.Maior} + A_{Tubo3}) \times (h_{(t+\Delta t)}^{Tubo3} - h_{(t)}^{Tubo3})] \quad (\text{Equação 4.5})$$

No Apêndice B, no qual estão acostadas as folhas de campo, constam todas as leituras realizadas em cada ensaio experimental.

## 4.5 METODOLOGIA PARA CARACTERIZAR MATEMATICAMENTE O COMPORTAMENTO DO MÓDULO DE TELHADO VERDE

### 4.5.1 Descrição física do processo

O caminho da água da chuva artificial produzida pelo simulador, nos ensaios experimentais realizados, pode ser descrito da seguinte maneira: a água incide sobre a área da cobertura verde e, em um primeiro momento, parte dessa água fica retida nas folhas e no tanque das bromélias, bem como aderida à camada de pinus que cobre o substrato; já uma outra parte dessa água, que não encontra esses obstáculos, consegue alcançar a camada superior do substrato e infiltrar-se, iniciando, assim, seu percurso (percolação), através das camadas que compõem o telhado verde (substrato e membrana filtrante), até chegar na camada de drenagem, onde é possível o seu escoamento para fora do módulo, a partir de dois tubos, com 1” de diâmetro, situados no fundo da parede da face leste do módulo. Esses tubos, por meio de torneiras dispostas em suas extremidades (com saída de 8 milímetros de diâmetro), descarregam a água para a calha coletora que, por sua vez, conduz a água para a Caixa Pluviômetro.

Destaca-se que, considerando a configuração do protótipo objeto de estudo, em qualquer experimento, toda a água direcionada para a Caixa Pluviômetro seria a água que iria para a rede de drenagem local, ou seja, a que geraria escoamento superficial.

Com a continuidade da chuva, a capacidade de armazenamento nas plantas e na parte superficial da cobertura verde (camada de pinus e depressões) diminui, até que a água passa a escoar também destas para o substrato, iniciando-se, assim, o processo de infiltração e percolação até a camada de drenagem, conforme já descrito. Destaca-se que, nesse processo, além de ocupar e transpassar os vazios do meio poroso, a água também pode ficar retida no solo. De acordo com Libardi (2012), a retenção da água no solo pode ser explicada a partir da atuação das forças capilares<sup>19</sup> e de adsorção<sup>20</sup>. Não se espera, porém, que haja qualquer retenção importante na camada de areia. A principal retenção neste processo se dará por interceptação vegetal.

---

<sup>19</sup> **Forças capilares:** as que ocorrem como consequência da tensão superficial da água interagindo com as paredes dos poros (LIBARDI, 2012).

<sup>20</sup> **Forças de adsorção:** as relacionadas a carga eletrostática atuando entre as partículas do solo e as moléculas de água, ou de íons presentes na água, que resultam na manutenção de um filme muito fino de água sobre a superfície das partículas do solo (LIBARDI, 2012).

Nesse ponto, e complementarmente, cabe mencionar que a camada de drenagem é composta por um material que possui uma capacidade expressiva de absorção e retenção de água, a argila expandida. Essa alternativa deve introduzir uma capacidade adicional de retenção de água ao protótipo. Avaliando as pesquisas realizadas por Eriksson (2013), Silva (2007) e Moravia *et al.* (2006), pode-se verificar que as argilas expansivas, de diâmetro aproximado de 2 cm (iguais as utilizadas no protótipo), têm capacidade de retenção de água que pode variar de 7% até 30%.

#### **4.5.2 Princípios para a modelação matemática do comportamento do protótipo de cobertura verde**

Como complemento da metodologia experimental, cabe destacar que esta dissertação pretende adaptar um modelo matemático para representação dos experimentos, aprendendo com estes e gerando a possibilidade de expandir a interpretação dos ensaios locais para a modelagem na escala de bacias.

Antes de descrever a metodologia adotada para caracterizar, matematicamente, os hidrogramas de resposta do protótipo de cobertura verde, que traduzem seu comportamento em termos de geração de escoamento superficial, cabe destacar os dados medidos, que foram obtidos a partir da realização de cada experimento. São eles:

- a) A intensidade média de chuva, a partir de duas medições, realizadas no início e no fim do experimento, conforme descrito no item 4.4.1;
- b) Os volumes afluentes à CP, a cada minuto, desde o início da chuva até que as variações de volume dentro da CP fossem inexpressíveis, conforme descrito no item 4.4.3. Sendo assim, para cada experimento, foi obtido um hidrograma de resposta do protótipo ao evento.

Sobre o item (a), cabe mencionar que, em todos os experimentos, a duração da chuva foi de 1 hora e 30 minutos (1,5 h), e as intensidades das chuvas induzidas pelo simulador foram consideradas constantes, e com valores na faixa de 50 mm/h, em 5 (cinco) ensaios, e na faixa de 100 mm/h, nos outros 5 (cinco) ensaios.

Sobre o item (b), destaca-se que cada um dos 10 (dez) ensaios experimentais realizados teve como resultado um hidrograma de resposta ao evento, que será devidamente apresentado no próximo capítulo, que trata dos resultados da parte experimental da presente pesquisa.

A modelagem matemática realizada para calcular os hidrogramas de resposta do protótipo de telhado verde, para chuvas de intensidades próximas à 50 mm/h e 100 mm/h, foi realizada a partir do Princípio de Conservação da Massa; da Equação da Hidráulica Clássica para Orifícios, Bocais e Tubos Curtos; das hipóteses assumidas *a priori* que estão elencadas no Quadro 4.4; além de algumas considerações adicionais e ajustes feitos a partir da avaliação dos hidrogramas que foram medidos em campo na campanha de ensaios. De forma geral, a partir da observação dos hidrogramas, os efeitos modelados foram sendo interpretados e adaptados para que os resultados do modelo convergissem para os resultados medidos.

Quadro 4.4 – Hipóteses adotadas *a priori* na modelagem matemática do comportamento do protótipo de telhado verde.

1. O simulador de chuva é um equipamento capaz de produzir uma chuva com intensidade constante durante todo o tempo de ensaio;
2. Não existem perdas de água no sistema, visto que as paredes e fundo encontram-se impermeabilizadas, sendo, portanto, os orifícios existentes na camada de drenagem a única forma de saída de água do sistema;
3. Em qualquer evento, as únicas possibilidades de retenção de água no sistema são:
  - 3.1. A interceptação realizada pelas folhas das bromélias e o armazenamento de água em seus tanques;
  - 3.2. Retenção de água no substrato (tanto na sua camada superficial, quanto ao longo de sua espessura) e na camada de drenagem;
4. A saída da água do sistema, pelos orifícios, pode ser descrita através da Equação da Hidráulica Clássica para Orifícios, Bocais e Tubos Curtos;
5. Pelo fato da saída do sistema pela camada de drenagem ocorrer através de tubos com 1" de diâmetro e que, em suas extremidades, possuem torneiras de 8 mm de diâmetro, considerou-se:
  - 5.1. A carga hidráulica, a ser utilizada na Equação de Orifícios, Bocais e Tubos Curto é a altura da lâmina d'água dentro do protótipo junto à face leste, corrigida por um fator,  $I_v$  (Índice de vazios), que considera que não existe somente água dentro do protótipo;
  - 5.2. A área da seção de escoamento é a área referente ao diâmetro de 8 mm, pois é através da qual sai o escoamento;
  - 5.3. O Coeficiente de descarga  $C_d$  é 0,61, valor comumente encontrado na bibliografia. Entretanto, esse foi considerado o valor de partida, sujeito a ajuste no modelo, devido à perda de carga na torneira e à presença da camada drenante na entrada do orifício que leva à torneira.

A seguir, serão explicados os princípios utilizados para descrever matematicamente o comportamento do protótipo de cobertura verde.

#### 4.5.2.1 O Princípio de Conservação da Massa

De acordo com o Lei de Conservação da Massa, a massa de um corpo é uma constante e independe do tempo. Assim, em termos de volume, o balanço de massa (ou hídrico) do sistema (protótipo de cobertura verde), pode ser descrito pela Equação 4.6.

$$V^{armaz}_{t_i} = V^{armaz}_{t_{i-1}} + (V^{entra}_{t_i} - V^{sai}_{t_i}) \quad (\text{Equação 4.6})$$

Onde:

$V^{armaz}_{t_i}$ ,  $V^{entra}_{t_i}$ , e  $V^{sai}_{t_i}$  são, respectivamente, o volume de água (em m<sup>3</sup>) que é armazenado dentro do módulo, que entra no módulo e que sai pelas torneiras, em um determinado instante i;

$V^{armaz}_{t_{i-1}}$  é o volume de água (em m<sup>3</sup>) que existia no módulo em um instante anterior.

O valor do volume de água que aflui para o sistema,  $V^{entra}_{t_i}$ , em cada instante, pode ser calculado pela Equação 4.7.

$$V^{entra}_{t_i} = A_{TV} \times i_{média} \times (t_i - t_{i-1}) \times \frac{1}{3600 \times 1000} \quad (\text{Equação 4.7})$$

Onde:

$A_{TV}$  é a área do telhado verde (em m<sup>2</sup>);

$i_{média}$  é a intensidade média da chuva produzida pelo simulador (em mm/h) considerada em um ensaio;

t refere-se ao instante considerado.

#### 4.5.2.2 Relação Cota-Volume no protótipo

Conforme já descrito previamente no item 4.5.1 do presente capítulo, o protótipo apresenta as dimensões conforme ilustrado na Figura 4.55.

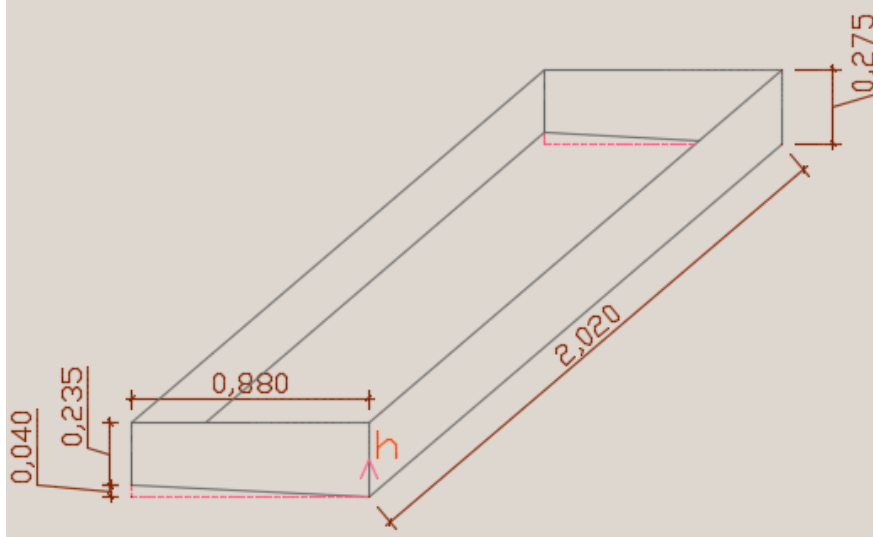


Figura 4.55 – Dimensões do protótipo.

Fonte: Elaborado pelo autor.

Considerando somente a existência de água dentro do protótipo, os volumes de água, em função de uma determinada lâmina d'água de altura  $h$ , junto a face leste, dentro do módulo, podem ser estimados a partir das Equações 4.8 e 4.9.

$$V(h \leq d) = \frac{1}{3} \times [2,02 \times h] \times \left[ \frac{0,88}{0,04} h \right] = 14,8133 \times h^2 \quad (\text{Equação 4.8})$$

$$\begin{aligned} V(h > d) &= \left\{ \frac{1}{3} \times [2,02 \times d] \times \left[ \frac{0,88}{0,04} d \right] \right\} + [2,02 \times 0,88 \times (h - d)] \\ &= [14,8133 \times d^2] + [1,7776 \times (h - d)] \end{aligned} \quad (\text{Equação 4.9})$$

Onde:

$d$  (em m) é o desnível existente entre as faces oeste e leste do módulo, de 0,04 metros;

$V$  (em  $m^3$ ) é o volume de água dentro do protótipo, considerando somente a existência de água neste;

$h$  (em metros) é a altura da lâmina de água em relação ao fundo do protótipo junto a face leste correspondente a este volume.

Com o auxílio do *software CurveExpert Professional 2.4.0 for Windows*, foram ajustadas duas equações para descrever a Curva Cota-Volume do protótipo: a primeira equação, válida para quando o volume de água armazenado dentro do protótipo não ultrapassa o valor de  $0,0237 \text{ m}^3$  (que corresponde ao volume de água dentro do protótipo quando  $h = d$ ), e a segunda, válida para quando o volume de água dentro do módulo for superior à  $0,0237 \text{ m}^3$ .

As equações ajustadas foram do tipo “DR-Weibull-Zerobackground” (Equação 4.10), para o primeiro caso, e do tipo “Linear” (Equação 4.11), para o segundo.

$$h(V \leq 0,237 \text{ m}^3) = 1 - e^{-0,270462 V^{0.505639}} \quad (\text{Equação 4.10})$$

$$h(V > 0,0237 \text{ m}^3) = 0,026667 + 0,562556 V \quad (\text{Equação 4.11})$$

#### 4.5.2.3 Representação hidráulica do escoamento na saída da camada de drenagem

A equação que descreve a saída de água do protótipo, por cada torneira, é a Equação de Orifícios, Bocais e Tubos Curtos (Equação 4.12).

$$Q^{sai} = C_d A \sqrt{2 g h} \quad (\text{Equação 4.12})$$

Onde:

$Q^{sai}$  é a descarga de saída pela torneira (em  $\text{m}^3/\text{s}$ );

$C_d$  é o coeficiente de descarga;

$A$  é a área disponível para escoamento (em  $\text{m}^2$ );

$g$  é a aceleração da gravidade ( $9,81 \text{ m/s}^2$ );

$h$  é a carga hidráulica (em metros) sobre o centro da seção de área  $A$ .

Sobre a utilização da Equação 4.12, no caso em tela, cabe destacar alguns pontos. O primeiro ponto é que os orifícios de saída do protótipo, formados por tubos de 1” de diâmetro, se encontram nivelados ao fundo da face leste do módulo. Esses tubos, denominados A e B (Figura 4.1), possuem declividade em direção à calha coletora. Ao final de cada tubo, existe uma torneira, conforme pode ser observado na Figura 4.56, cujo diâmetro de saída é 8 milímetros.



Figura 4.56 – Saídas da camada de drenagem do módulo experimental.

Fonte: Acervo do autor (2016).

Sendo assim, observa-se que a área disponível (A) para o escoamento de saída do protótipo, através de cada torneira, é a área referente ao diâmetro de saída da torneira (ou seja, igual a  $5 \times 10^{-5} \text{ m}^2$ ).

O segundo ponto a ser destacado é que, pelo posicionamento da torneira (com sua saída virada para baixo, na horizontal), pode-se considerar que a carga hidráulica que influencia na descarga é o nível d'água junto à face leste existente no módulo experimental.

O terceiro, e último ponto a ser levado em consideração, é que, dentro do protótipo, não existe somente água, mas também os materiais constituintes de cada camada. Assim, o nível d'água existente, junto à face leste do protótipo, tende a aumentar devido a existência de outros materiais, que ocupam espaço. Na Figura 4.57 está ilustrada essa situação.

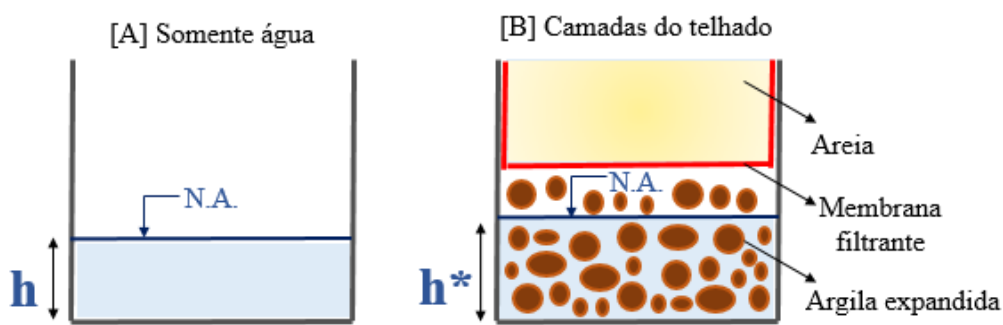


Figura 4.57 – Representação do aumento do nível de água (N.A.) no fundo do protótipo, devido a existência de outros materiais constituintes da camada.

Fonte: Elaborado pelo autor.

De modo a considerar esse efeito na representação da carga hidráulica das descargas, foi adotado um fator, denominado  $I_v$  (Índice de vazios), para corrigir os valores de  $h$ . Este fator está relacionado aos vazios existentes que podem ser ocupados pela água. A Equação 4.13 indica como a correção foi realizada.

$$h^* = \frac{h}{I_v} \quad (\text{Equação 4.13})$$

Onde:

$h$  (em metros) é a altura da lâmina de água em relação ao fundo do protótipo, para um dado volume de água, considerando que não existem outros materiais;

$h^*$  (em metros) é a correção do valor de  $h$ , correspondente ao mesmo volume proporcionado por  $h$ , só que considerando a existência de outros materiais nas camadas do protótipo, que proporcionam o aumento do nível da água;

$I_v$  é o fator de ajuste, relacionado aos vazios existentes na camada.

Considerando a hipótese de que a camada de drenagem é a que mais sofre essa influência do acúmulo de água, o valor considerado para o Índice de vazios ( $I_v$ ) foi de 0,44, conforme indicado em pesquisas (FERRARA *et al.*, 2016 e ERIKSSON, 2013) já realizadas com argila expandida similares à existente no protótipo (diâmetro aproximado de 2 cm)

Considerando o exposto até o momento, pode-se verificar que o volume de água que sai do protótipo,  $V_{t_i}^{sai}$ , em cada instante, considerando a existência de 2 (duas) torneiras pode ser determinado pela Equação 4.15.

$$V_{t_i}^{sai} = 2 C_d A \sqrt{2 g h_{t_{i-1}}^*} \times (t_i - t_{i-1}) \quad (\text{Equação 4.14})$$

#### 4.5.2.4 Hidrograma de saída estimado a partir de cálculos do Balanço Hídrico

Considerando o Princípio de Conservação da Massa; a Relação Cota-Volume do protótipo; e a Equação Hidráulica para o escoamento de saída da camada de drenagem do módulo, foi elaborada, com o auxílio do *software Excel* uma planilha com as colunas conforme apresentado no Quadro 4.5, com o objetivo de estimar, a partir de cálculos matemáticos, o hidrograma de reposta do protótipo, para cada ensaio.

Para cada hidrograma, no eixo x constam os valores da coluna “t(s)”, variando de 0s até 8000s, e, no eixo y, os valores da coluna “ $V^{sai} (m^3)$ ”, divididos por 1s, o que representa “ $Q^{sai} (m^3/s)$ ”, que são os mesmos valores da coluna “ $V^{sai} (m^3)$ ”.

Quadro 4.5 – Balanço hídrico no sistema, em volumes, para estimativa do hidrograma de saída.

| t (s) | V <sub>entra</sub> (m <sup>3</sup> )                                                                                                        | V <sub>sai</sub> (m <sup>3</sup> )                                                                               | V <sub>armaz</sub> (m <sup>3</sup> )                                                                           | h (m)                                                                                                                                                                                                                             | h <sub>corrigido</sub> (m)        |
|-------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------|
| 0     | $V_{t_0}^{entra} = 0$                                                                                                                       | $V_{t_0}^{sai} = 0$                                                                                              | $V_{t_0}^{armaz} = 0$                                                                                          | $h_{t_0} = 0$                                                                                                                                                                                                                     | $h_{t_0}^* = 0$                   |
| 1     | $\begin{aligned} &V_{t_1}^{entra} \\ &= A_{TV} \times i_{média} \\ &\times (t_1 - t_0) \\ &\times \frac{1}{3600 \times 1000} \end{aligned}$ | $\begin{aligned} &V_{t_1}^{sai} \\ &= 2 C_d A \sqrt{2 g h_{t_0}^*} \\ &\times (t_1 - t_0) \end{aligned}$         | $\begin{aligned} &V_{t_1}^{armaz} \\ &= V_{t_0}^{armaz} \\ &+ (V_{t_1}^{entra} - V_{t_1}^{sai}) \end{aligned}$ | $\begin{aligned} &h_{t_1} \\ &= \begin{cases} se V_{t_1}^{armaz} \leq 0,0237 m^3 = 1 - e^{-0,270462 V_{t_1}^{armaz} 0.505639} \\ se V_{t_1}^{armaz} > 0,0237 m^3 = 0,026667 + 0,562556 V_{t_1}^{armaz} \end{cases} \end{aligned}$ | $h_{t_1}^* = \frac{h_{t_1}}{I_V}$ |
| 2     | $\begin{aligned} &V_{t_2}^{entra} \\ &= A_{TV} \times i_{média} \\ &\times (t_2 - t_1) \\ &\times \frac{1}{3600 \times 1000} \end{aligned}$ | $\begin{aligned} &V_{t_2}^{sai} \\ &= 2 C_d A \sqrt{2 g h_{t_1}^*} \\ &\times (t_2 - t_1) \end{aligned}$         | $\begin{aligned} &V_{t_2}^{armaz} \\ &= V_{t_1}^{armaz} \\ &+ (V_{t_2}^{entra} - V_{t_2}^{sai}) \end{aligned}$ | $\begin{aligned} &h_{t_2} \\ &= \begin{cases} se V_{t_2}^{armaz} \leq 0,0237 m^3 = 1 - e^{-0,270462 V_{t_2}^{armaz} 0.505639} \\ se V_{t_2}^{armaz} > 0,0237 m^3 = 0,026667 + 0,562556 V_{t_2}^{armaz} \end{cases} \end{aligned}$ | $h_{t_2}^* = \frac{h_{t_2}}{I_V}$ |
| p*    | $V_{t_p}^{entra} = 0$                                                                                                                       | $\begin{aligned} &V_{t_p}^{sai} \\ &= 2 C_d A \sqrt{2 g h_{t_{p-1}}^*} \\ &\times (t_p - t_{p-1}) \end{aligned}$ | $\begin{aligned} &V_{t_p}^{armaz} \\ &= V_{t_{p-1}}^{armaz} - V_{t_p}^{sai} \end{aligned}$                     | $\begin{aligned} &h_{t_p} \\ &= \begin{cases} se V_{t_p}^{armaz} \leq 0,0237 m^3 = 1 - e^{-0,270462 V_{t_p}^{armaz} 0.505639} \\ se V_{t_p}^{armaz} > 0,0237 m^3 = 0,026667 + 0,562556 V_{t_p}^{armaz} \end{cases} \end{aligned}$ | $h_{t_p}^* = \frac{h_{t_p}}{I_V}$ |
| q*    | $V_{t_q}^{entra} = 0$                                                                                                                       | $\begin{aligned} &V_{t_q}^{sai} \\ &= 2 C_d A \sqrt{2 g h_{t_{q-1}}^*} \\ &\times (t_q - t_{q-1}) \end{aligned}$ | $\begin{aligned} &V_{t_q}^{armaz} \\ &= V_{t_{q-1}}^{armaz} - V_{t_q}^{sai} \end{aligned}$                     | $\begin{aligned} &h_{t_q} \\ &= \begin{cases} se V_{t_q}^{armaz} \leq 0,0237 m^3 = 1 - e^{-0,270462 V_{t_q}^{armaz} 0.505639} \\ se V_{t_q}^{armaz} > 0,0237 m^3 = 0,026667 + 0,562556 V_{t_q}^{armaz} \end{cases} \end{aligned}$ | $h_{t_q}^* = \frac{h_{t_q}}{I_V}$ |

\*Onde “p” é o instante em que a chuva cessa e “q” é quando termina o escoamento nas torneiras.

### 4.5.3 Determinação do coeficiente de escoamento (runoff) do protótipo de telhado verde (C<sub>TV</sub>)

Para a determinação do coeficiente de escoamento (*runoff*), associado ao protótipo de cobertura verde estudado, cabe mencionar novamente que se considerou como escoamento superficial (águas que seriam direcionadas para a rede de drenagem) a água descartada pela camada de drenagem do módulo, através dos orifícios e, conseqüentemente, das torneiras.

Esclarecido esse ponto, o coeficiente de *runoff* na cobertura verde foi determinado de quatro maneiras distintas, através da razão entre:

- a) O volume total que foi direcionado para a Caixa Pluviômetra, obtido a partir da integral do hidrograma formado pelos dados medidos; e o volume total precipitado;
- b) O volume total que foi obtido a partir da integral do hidrograma calculado utilizando o modelo que descreve o protótipo; e o volume total precipitado;
- c) A vazão máxima de saída do protótipo, obtido a partir da observação do valor máximo do hidrograma formado pelos dados medidos; e a vazão máxima afluente ao sistema, proveniente do Simulador de Chuvas;
- d) A vazão máxima de saída do protótipo, obtido a partir da observação do valor máximo do hidrograma calculado utilizando o modelo que descreve o protótipo; e a vazão afluente ao sistema, proveniente do Simulador de Chuvas.

Após a apresentação de como obter cada fator que compõe esses quatro coeficientes, os mesmos serão apresentados no formato de fórmula no tópico 4.5.3.7.

#### 4.5.3.1 Cálculo do volume total precipitado

Para cada experimento, o volume total de água precipitado pode ser calculado utilizando a Equação 4.15.

$$V_{precipitado} = A_{TV} \times i_{média} \times d \times 10^{-3} \quad (\text{Equação 4.15})$$

Onde:

$V_{precipitado}$  é o volume total de água precipitada durante o ensaio (em m<sup>3</sup>);

$A_{TV}$  é a área do telhado verde (em m<sup>2</sup>);

$i_{média}$  é a intensidade média da chuva produzida pelo simulador (em mm/h) considerada em um ensaio;

$d$  é a duração da chuva (em horas).

#### 4.5.3.2 Cálculo do volume de água direcionado para a Caixa Pluviômetro

Toda a água advinda das torneiras de saída da camada de drenagem do módulo de cobertura verde era direcionada à Caixa Pluviômetro, assim, para determinar o volume de água descartado pelo telhado bastou realizar a integral do hidrograma medido, encontrado como resposta, para cada ensaio, conforme estabelecido na Equação 4.16.

$$V_{CP} = \int_{t_i}^{t_f} Q(t) dt \quad (\text{Equação 4.16})$$

Onde:

$V_{CP}$  é o volume de água que passa através das camadas do telhado verde e que é direcionada à CP (em m<sup>3</sup>);

$t_i$  é o instante em que começa a chuva sobre o módulo (em segundos);

$t_f$  é o instante em que as variações de volume na CP se tornam imperceptíveis (em segundos);

$Q(t)$  é a função que representa o hidrograma resposta de um dado ensaio;

$dt$  significa que a integral é em relação ao tempo.

Para o cálculo da Equação 4.16 foi utilizado o “Método dos Trapézios”, que se traduz na Equação 4.17.

$$V_{CP} = \sum_{t_i}^{t_f} \frac{1}{2} (Q_{t_i}^{Afl.CP} + Q_{t_{i-1}}^{Afl.CP}) (t_i - t_{i-1}) \quad (\text{Equação 4.17})$$

Onde:

$Q_{t_i}^{Afl.CP}$  é a vazão que aflui para a CP no instante  $t_i$ ;

$Q_{t_{i-1}}^{Afl.CP}$  é a vazão que aflui para a CP no instante  $t_{i-1}$ .

#### 4.5.3.3 Cálculo do volume de água obtido a partir do hidrograma calculado

De modo análogo ao item anterior, a integral do hidrograma calculado, utilizando o modelo que descreve o protótipo, representa o volume defluente do mesmo em um dado ensaio que pode ser calculado conforme estabelecido na Equação 4.18.

$$V_{calc} = \int_{t_i}^{t_f} Q_{calc}(t) dt \quad (\text{Equação 4.18})$$

Onde:

$V_{calc}$  é o volume de água defluente do módulo obtido a partir do hidrograma calculado (em m<sup>3</sup>);

$t_i$  é o instante em que começa a chuva sobre o módulo (em segundos);

$t_f$  é o instante em que termina o cálculo da vazão (em segundos);

$Q_{calc}$  é a função que representa o hidrograma obtido a partir do modelo que descreve o comportamento do protótipo;

$dt$  significa que a integral é em relação ao tempo.

Para o cálculo da Equação 4.18 foi utilizado o “Método dos Trapézios”, que se traduz na Equação 4.19.

$$V_{calc} = \sum_{t_i}^{t_f} \frac{1}{2} (Q_{t_i}^{calculado} + Q_{t_{i-1}}^{calculado}) (t_i - t_{i-1}) \quad (\text{Equação 4.19})$$

Onde:

$Q_{t_i}^{calculado}$  é a vazão calculada para o instante  $t_i$ ;

$Q_{t_{i-1}}^{calculado}$  é a vazão calculada para o instante  $t_{i-1}$ .

#### 4.5.3.4 Cálculo da vazão máxima (constante) afluyente ao sistema

A vazão afluyente ao sistema, para cada experimento, pode ser calculada utilizando a Equação 4.20.

$$Q_{m\acute{a}x}^{entra} = A_{TV} \times i_{m\acute{e}dia} \times \frac{1}{3600} \quad (\text{Equação 4.20})$$

Onde:

$Q_{m\acute{a}x}^{entra}$  é a vazão máxima, mantida constante, que incide na área do protótipo (em m<sup>3</sup>/s).

#### 4.5.3.5 Cálculo da vazão máxima de saída do protótipo medida na CP

O valor da vazão máxima de saída do protótipo, medido na CP, foi obtido a partir da análise dos hidrogramas de resposta, obtidos para cada ensaio realizado. Na Figura 4.58 é possível observar como foi obtido o valor da vazão máxima para o ensaio nº 1, por exemplo, utilizando o hidrograma resultante das medições realizadas na CP na ocasião do referido ensaio.

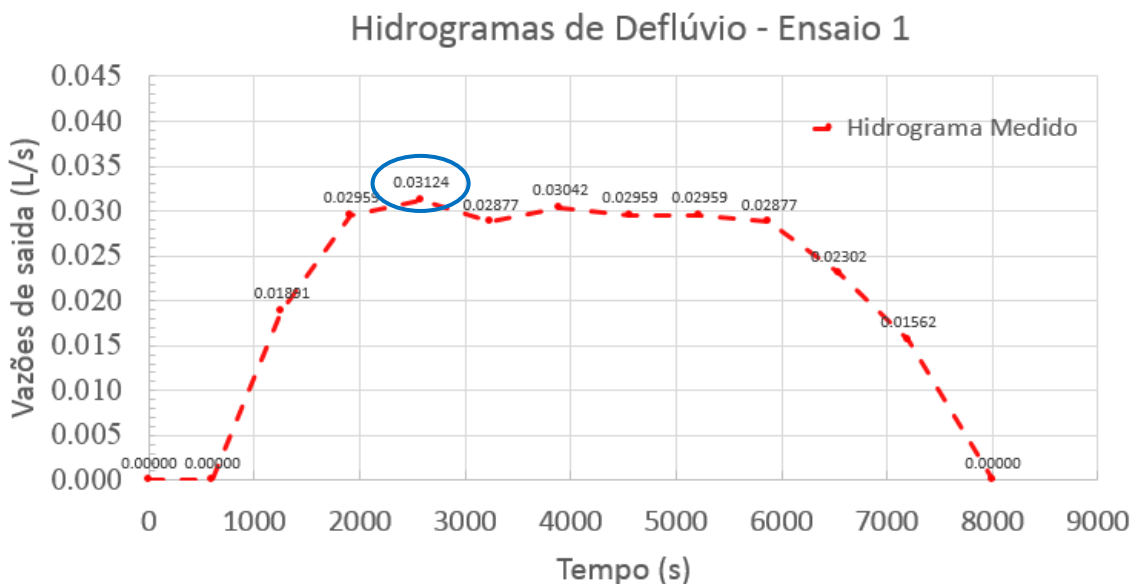


Figura 4.58 – Vazão máxima obtida a partir da observação do hidrograma proveniente das medições na CP no ensaio 1.

#### 4.5.3.6 Cálculo da vazão máxima de saída do protótipo calculada

De modo similar ao descrito no item anterior, o valor da vazão máxima de saída do protótipo, pelos cálculos realizados, foi obtido a partir dos hidrogramas elaborados a partir dos valores das vazões calculadas, conforme metodologia descrita até aqui nos itens que se seguem deste tópico. Na Figura 4.59 é possível observar como foi obtido o valor da vazão máxima para o ensaio nº 2, por exemplo, utilizando o hidrograma elaborado a partir dos cálculos realizados para descrever o referido evento.

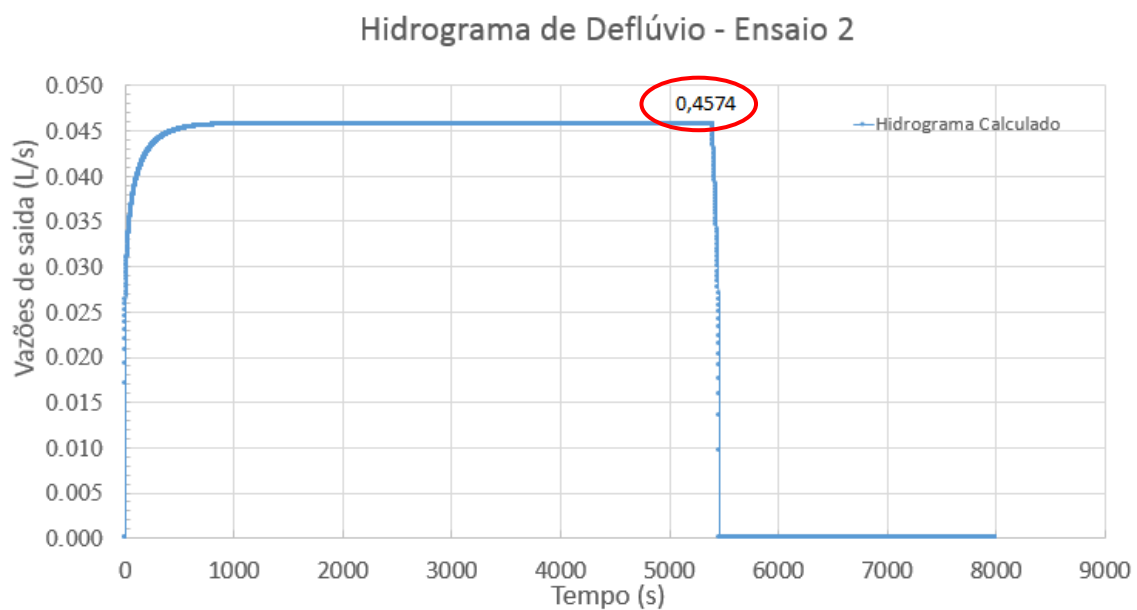


Figura 4.59 – Vazão máxima obtida a partir da observação do hidrograma proveniente dos cálculos realizados para descrever o ensaio 2.

#### 4.5.3.7 Coeficiente de escoamento (*runoff*) do módulo de cobertura verde

Considerando o exposto nos itens anteriores desse tópico, as equações com os modos de cálculo do coeficiente de *runoff* do telhado verde ( $C_{TV}$ ) estão apresentadas no Quadro 4.6.

Quadro 4.6 – Valores de coeficiente de escoamento determinados.

| $C_{TV}$         | Definição                                                                                                                                                                       | Equação                                                                               |
|------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------|
| $C_{TV}^{(I)}$   | Razão entre o volume direcionado e medido na CP e o volume total precipitado                                                                                                    | $C_{TV}^{(I)} = \frac{V_{CP}}{V_{precipitado}}$ (Equação 4.21)                        |
| $C_{TV}^{(II)}$  | Quociente entre o volume total obtido a partir da integral do hidrograma calculado e o volume total precipitado                                                                 | $C_{TV}^{(II)} = \frac{V_{calc}}{V_{precipitado}}$ (Equação 4.22)                     |
| $C_{TV}^{(III)}$ | Razão entre a vazão máxima de saída do protótipo observada e medida e a vazão máxima afluyente ao sistema advinda do simulador                                                  | $C_{TV}^{(III)} = \frac{Q_{máx}^{sai, medida na CP}}{Q_{máx}^{entra}}$ (Equação 4.23) |
| $C_{TV}^{(IV)}$  | Quociente entre a vazão máxima de saída do protótipo, obtido a partir da observação do valor máximo do hidrograma calculado e a vazão afluyente ao sistema advinda do simulador | $C_{TV}^{(IV)} = \frac{Q_{máx}^{sai, calculada}}{Q_{máx}^{entra}}$ (Equação 4.24)     |

#### 4.5.4 Ajustes na modelação matemática do comportamento do protótipo de cobertura verde considerando os resultados experimentais obtidos

Este item irá adiantar, em parte, alguns dos resultados obtidos na etapa experimental desta pesquisa, pois a observação dos mesmos fez com que a metodologia, até aqui apresentada, fosse readequada em alguns pontos, a partir da interpretação das observações, de forma a ajustar o modelo às medições. Esses ajustes metodológicos, em grande parte, têm por objetivo calibrar o modelo proposto às medições experimentais, revendo algumas das premissas inicialmente assumidas.

As discussões apresentadas nos itens a seguir referem-se aos valores médios encontrados nos 10 (dez) ensaios, sendo dividido em 5 (cinco) ensaios realizados na faixa de intensidade de chuva simulada de 100 mm/h, e 5 (cinco) ensaios, na faixa de 50 mm/h.

##### 4.5.4.1 Consideração de interceptação vegetal na metodologia apresentada até o momento a partir da análise dos $C_{TV}$ obtidos experimentalmente

A Tabela 4.5 apresenta os valores médios encontrados, a partir dos dados obtidos nos ensaios experimentais, para as intensidade de chuva e para os coeficientes de *runoff*  $C_{TV}^{(I)}$  (Equação 4.21) e  $C_{TV}^{(III)}$  (Equação 4.23). Ressalta-se que esses valores foram medidos

experimentalmente, sendo, portanto, expressão da realidade de funcionamento do telhado implantado. Na mesma tabela, também são apresentados os valores de  $C_{TV}^{(II)}$  (Equação 4.22) e  $C_{TV}^{(IV)}$  (Equação 4.24), além da altura da lâmina d'água máxima dentro do protótipo ( $h_{\text{máx. calculada}}$ ), valores estimados a partir da metodologia de cálculo descrita até o momento e que representa o ponto de partida da modelagem do telhado, conforme interpretação preliminar.

Tabela 4.5 – Coeficientes de escoamento superficial obtidos e altura máxima de lâmina d'água no protótipo calculada – 1ª aproximação.

| Intensidade (mm/h) | $C_{TV}^{(I)}$ | $C_{TV}^{(II)}$ | $C_{TV}^{(III)}$ | $C_{TV}^{(IV)}$ | $h_{\text{máx. calculada}}^*$ (cm) |
|--------------------|----------------|-----------------|------------------|-----------------|------------------------------------|
| 100.4              | 0.65           | 1.00            | 0.65             | 1.00            | 3.4                                |
| 50.7               | 0.85           | 1.00            | 0.98             | 1.00            | 0.9                                |

Observando esses resultados, em princípio, três pontos chamam a atenção:

a) A diferença marcante entre os valores medidos e calculados (entre  $C_{TV}^{(I)}$  e  $C_{TV}^{(II)}$ , em termos de volume, e  $C_{TV}^{(III)}$  e  $C_{TV}^{(IV)}$ , em termos de vazão de pico), para os ensaios na faixa de 100 mm/h, indicando falha no modelo proposto para as chuvas de intensidades dessa ordem;

b) O fato de que a relação de vazões máximas, de entrada e saída, obtidas a partir dos cálculos do modelo proposto, se aproxima de 1 para os eventos de chuvas longas (o que poderia ser esperado pela saturação do módulo e utilização de toda a sua capacidade de retenção);

c) A verificação, através dos ensaios experimentais, de que precipitações com intensidades maiores geram coeficientes de *runoff* menores, o que a princípio foge a lógica esperada.

Nas precipitações na faixa de 50 mm/h, pelos altos coeficientes de *runoff* do tipo  $C_{TV}^{(III)}$  e  $C_{TV}^{(IV)}$ , relacionados com as vazões máximas, pode-se observar que o telhado verde praticamente não funciona para amortecer as vazões de pico, ou seja, após preenchida a interceptação vegetal, praticamente tudo o que chove chega ao substrato e consegue ser escoado pelos orifícios. Somado a isso, a partir da observação do coeficiente de *runoff* do tipo  $C_{TV}^{(I)}$ , obtido pela análise do volume precipitado que virou escoamento superficial, verifica-se que 15% do volume de água que afluiu ao sistema (em média) ficou retido no mesmo.

Considerando que a areia tem muito baixa capacidade de retenção de água e o fato de que as alturas da lâmina d'água no interior do protótipo calculadas, para intensidades na faixa de 50 mm/h, não foram relevantes (inferiores a 1 cm), o que indica que praticamente não houve processo significativo de reservação na camada de drenagem, pode-se assumir que a perda de volume precipitado, de 15%, é associado à interceptação vegetal promovida pelas bromélias que compõem a camada vegetal da cobertura verde. Este valor de acúmulo de água encontrado, para bromélias, é coerente com pesquisa realizada por Cogliatti-Carvalho *et al.* (2010). Cabe mencionar que se trata de um valor médio, influenciado por diversos fatores como, por exemplo, a quantidade de água preexistente nos tanques das bromélias antes da realização do experimento, além das diferenças de crescimento vegetativo dos diferentes pés de bromélia e a própria diversidade na geometria das bromélias.

Neste sentido, a partir dos eventos de chuvas simuladas na faixa de 50 mm/h, pode ser observado que o efeito das bromélias, que cobrem praticamente toda a bancada, é o de interceptar as primeiras chuvas, tanto nessa faixa de precipitações quanto na de 100 mm/h, até o limite de sua capacidade. Essa remoção inicial de um volume de chuva por interceptação é coerente com o fato da vazão de pico não mudar, dado que em uma chuva longa a capacidade de interceptação vegetal já terá sido esgotada e não age no momento do pico. Este limite, identificado nos ensaios com precipitações da ordem de 50 mm/h, equivale a 0,02031 m<sup>3</sup>, valor obtido utilizando a Equação 4.25.

$$V^{interceptação} = 15\% \times i_{média} \times d \times A_{TV} = 0,15 \times 50,7 \times 1,5 \times 1,78 \quad (\text{Equação 4.25})$$

Assim, a água precipitada começa a afluir para as camadas do substrato apenas quando o volume de água de chuva acumulado durante o evento supera o valor da capacidade de retenção das bromélias. Esta consideração foi incorporada na rotina de cálculo apresentada no Quadro 4.10, sendo o V<sup>entra</sup> (m<sup>3</sup>) contabilizado apenas quando a chuva acumulada no evento passa a ser superior a 0,02031 m<sup>3</sup>.

Com esta consideração, a Tabela 4.5 pode ser atualizada para a Tabela 4.6. Observa-se que, com esta alteração, o C<sup>(II)</sup><sub>TV</sub> calculado ficou equivalente ao obtido com as medições na CP, para as chuvas na faixa de 50 mm/h e reduziu, em parte, para as chuvas da ordem de 100 mm/h.

Tabela 4.6 – Coeficientes de escoamento superficial obtidos e altura máxima de lâmina d'água no protótipo calculada – 2ª aproximação.

| <b>Intensidade (mm/h)</b> | <b>C<sup>(I)</sup><sub>TV</sub></b> | <b>C<sup>(II)</sup><sub>TV</sub></b> | <b>C<sup>(III)</sup><sub>TV</sub></b> | <b>C<sup>(IV)</sup><sub>TV</sub></b> | <b>h*<sub>máx.calculada</sub> (cm)</b> |
|---------------------------|-------------------------------------|--------------------------------------|---------------------------------------|--------------------------------------|----------------------------------------|
| 100.4                     | 0.65                                | 0.92                                 | 0.65                                  | 1.00                                 | 3.4                                    |
| 50.7                      | 0.85                                | 0.85                                 | 0.98                                  | 1.00                                 | 0.9                                    |

#### **4.5.4.2 Consideração da absorção de água pela argila expandida da camada drenante na metodologia até então apresentada**

Observando os valores apresentados na Tabela 4.6, é possível constatar que, nas precipitações mais intensas (da ordem de 100 mm/h) ainda há perda de volume no sistema que ainda não foi considerada no modelo matemático que descreve o comportamento do protótipo. Como se trata de uma informação medida, média de 5 eventos, é preciso rever as hipóteses adotadas e reinterpretar o funcionamento do sistema.

Cabe destacar, neste ponto, que, conforme cálculos realizados até o momento, nos ensaios com precipitações maiores, na faixa de 100 mm/h, a altura da lâmina de água obtida dentro do protótipo foi bastante superior (cerca de 4 vezes) do que nos ensaios com intensidades de chuvas menores, em torno de 50 mm/h.

Isso indica que o protótipo de telhado verde, com a configuração em tela, acaba tendo um efeito de armazenamento interno, promovido pelo controle hidráulico das condições de saída de escoamento da camada de drenagem, em chuvas de maior intensidade. Assim, a água passa a acumular nas camadas internas da cobertura verde, podendo encharcar as camadas de drenagem (argila expansiva) e do substrato (areia). É verdade que, como está sendo feita uma integral do hidrograma, o amortecimento em si não gera perda de volume e não explicaria esta redução, embora pudesse atuar na redução de pico. Dessa forma, é necessário encontrar uma explicação para uma retenção mais longa, que não participa da integral que está sendo feita, pois, essa água, retida nas camadas, não é possível de ser observada nos hidrogramas de respostas medidos, visto que o esvaziamento dessa água absorvida do sistema é demorado comparado com a janela de tempo do ensaio experimental.

Considerando que a argila expansiva é um material que possui considerável capacidade de absorção de água, verificou-se que tal absorção deveria ser considerada no modelo.

De acordo com a relação cota-volume, tem-se que o volume correspondente à altura de 5 cm (toda camada de argila) é 0,041477 m³. Ou seja, se a água atingir esta altura, toda a camada de argila estará encharcada. Considerando este fato, para cada faixa de intensidades de chuva (50 e 100 mm/h), foram atribuídos 6 (seis) intervalos de alturas de nível d'água, dentro do protótipo, que estão associadas a um determinado nível de encharcamento da camada de argila, representado este pelo fator  $K_{\text{encharcamento}}$ . Note-se que a chuva de 100 mm/h preenche a camada drenante e permanece com nível d'água alto por longo tempo. Eventuais ajustes de parâmetros do modelo, para ajuste das curvas medidas e calculadas, que façam a altura d'água subir também no caso de 50 mm/h, mas por um tempo mais curto, não deverão ter o mesmo efeito de encharcamento que o caso de uma chuva mais longa, com preenchimento prolongado. No caso de um preenchimento mais rápido e de menor porte no reservatório, considera-se que a água de passagem tem menos chance de ser absorvida e ficar retida na argila. Essa distinção de comportamento se mostrou importante para os ajustes, como será visto com mais detalhes no próximo capítulo.

Assim, o volume de água absorvida pela argila expansiva, na camada drenante, pode ser descrita conforme Equação 4.26.

$$V_{t_i}^{\text{absorvido}} = [(k_{\text{encharcamento}}(h_{t_{i-1}}^*) \times k_{\text{absorção da argila}})] V_{t_i}^{\text{entra}} \quad (\text{Equação 4.26})$$

Onde:

$V_{t_i}^{\text{absorvido}}$  é o volume de água absorvido pela argila expansiva

$k_{\text{encharcamento}}$  é o nível de encharcamento da camada drenante, em função da altura da lâmina d'água ( $h^*$ ), conforme Tabelas 4.7 e 4.8;

$h_{t_{i-1}}^*$  é a altura da lâmina d'água no instante  $t_{i-1}$ ;

$k_{\text{absorção da argila}}$  é o fator de absorção da argila;

$V_{t_i}^{\text{entra}}$  é o volume que entra na camada no instante  $t_i$ .

Em consulta as referências bibliográficas, foi verificado que o valor do fator de absorção a argila expandida, com diâmetro aproximado de 2 cm, como a utilizada no protótipo, varia de 7 a 30%, conforme Eriksson (2013), Silva (2007) e Moravia *et al.*

(2006). Sendo assim, foi adotado, para o modelo em questão, o valor de 0,30 para o fator  $k_{\text{absorção da argila}}$ , que parece se ajustar bem aos valores medidos.

Tabela 4.7 – Nível de encharcamento da camada drenante, para  $i_{\text{média}} = 50,7 \text{ mm/h}$ .

| Altura da camada de argila (m) | Volume encharcado ( $\text{m}^3$ ) | $k_{\text{encharcamento}}$ (% do volume encharcado) | Considerações                                                 |
|--------------------------------|------------------------------------|-----------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------|
| Inferior a 0.10                | 0.000000                           | 0.00                                                | Sem encharcamento até a altura do tubo de saída               |
| 0.10 - 0.20                    | 0.000000                           | 0.00                                                | Sem encharcamento até a altura do tubo de saída               |
| 0.20 - 0.30                    | 0.000000                           | 0.00                                                | Sem encharcamento até a altura do tubo de saída               |
| 0.30 - 0.40                    | 0.005925                           | 0.14                                                | 1/4 da retenção prevista, devido ao pouco tempo de contato    |
| 0.40 - 0.50                    | 0.018072                           | 0.44                                                | Metade da retenção prevista, devido ao pouco tempo de contato |
| Superior a 0.50                | 0.041477                           | 1.00                                                | Retenção integral - reservatório pleno e afogado              |

Tabela 4.8 – Nível de encharcamento da camada drenante, para  $i_{\text{média}} = 100,4 \text{ mm/h}$ .

| Altura da camada de argila (m) | Volume encharcado ( $\text{m}^3$ ) | $k_{\text{encharcamento}}$ (% do volume encharcado) | Considerações                                                                                        |
|--------------------------------|------------------------------------|-----------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Inferior a 0.10                | 0.000000                           | 0.00                                                | Sem encharcamento                                                                                    |
| 0.10 - 0.20                    | 0.001481                           | 0.04                                                | $0.001481 \text{ m}^3$ (valor obtido na relação cota-volume para $h=0.10$ ) / $0.041477 \text{ m}^3$ |
| 0.20 - 0.30                    | 0.005925                           | 0.14                                                | $0.005925 \text{ m}^3$ (valor obtido na relação cota-volume para $h=0.20$ ) / $0.041477 \text{ m}^3$ |
| 0.30 - 0.40                    | 0.013332                           | 0.32                                                | $0.013332 \text{ m}^3$ (valor obtido na relação cota-volume para $h=0.30$ ) / $0.041477 \text{ m}^3$ |
| 0.40 - 0.50                    | 0.023701                           | 0.57                                                | $0.023701 \text{ m}^3$ (valor obtido na relação cota-volume para $h=0.40$ ) / $0.041477 \text{ m}^3$ |
| Superior a 0.50                | 0.041477                           | 1.00                                                | Retenção integral - reservatório pleno e afogado                                                     |

Desta forma, considerando que:

- A água precipitada começa a contribuir para as camadas do substrato apenas quando o volume de água de chuva acumulado supera o valor de  $0,02031 \text{ m}^3$ ;
- O  $V^{\text{entra}}$  ( $\text{m}^3$ ) precisa ser subtraído do valor que é absorvido pela argila expandida;

O valor de  $V^{\text{entra}}$  ( $\text{m}^3$ ) apresentado no Quadro 4.5 pode ser substituído pelo valor apresentado na Equação 4.27.

$$V_{t_i}^{entra} = \begin{cases} \text{se } V_{t_i}^{chuva acumulada} \leq 0,02031 \text{ m}^3 = 0 \\ \text{se } V_{t_i}^{chuva acumulada} > 0,02031 \text{ m}^3 = [1 - (k_{encharcamento}(h_{t_{i-1}}^*) \times k_{absorção da argila})] V_{t_i}^{entra} \end{cases}$$

(Equação 4.27)

Onde:

$V_{t_i}^{chuva acumulada}$  é o volume de chuva precipitada acumulada desde o início da chuva até o instante  $t_i$ .

Com esta consideração, a Tabela 4.6 pode ser atualizada para a Tabela 4.9. Observa-se que, com esta alteração, o  $C^{(II)}_{TV}$  calculado, para chuvas da ordem de 100 mm/h, reduziu, ficando mais próximo do obtido com as medições na CP, porém a relação entre as vazões máximas defluentes e afluentes, nesta faixa de intensidades, representadas pelo  $C^{(IV)}_{TV}$  calculado, indicam que o modelo ainda precisa de adequações para aproximar-se do que foi obtido nos ensaios.

Tabela 4.9 – Coeficientes de escoamento superficial obtidos e altura máxima de lâmina d'água no protótipo calculada – 3ª aproximação.

| Intensidade (mm/h) | $C^{(I)}_{TV}$ | $C^{(II)}_{TV}$ | $C^{(III)}_{TV}$ | $C^{(IV)}_{TV}$ | $h^*_{\text{máx. calculada}} \text{ (cm)}$ |
|--------------------|----------------|-----------------|------------------|-----------------|--------------------------------------------|
| 100.4              | 0.65           | 0.87            | 0.65             | 0.94            | 3.0                                        |
| 50.7               | 0.85           | 0.85            | 0.98             | 1.00            | 0.9                                        |

#### 4.5.4.3 Correção do valor do coeficiente de descarga $C_d$

Conforme mencionado no Quadro 4.4, o coeficiente de descarga,  $C_d$ , considerado para os orifícios do protótipo foi de 0,61. Esse valor é relativamente alto, para o caso em tela, devido a alguns fatores listados a seguir:

- Os orifícios de saída da camada de drenagem, são cobertos, por dentro, pela face leste do protótipo, por manta bidim e argila expansiva, o que restringe a área de escoamento;
- Não foram encontrados, na literatura, valores de referência para o coeficiente de descarga ( $C_d$ ) em torneiras. Porém, observa-se que a transição do tubo de 1" para a torneira traz uma perda de carga e uma restrição ao escoamento.

A partir dos hidrogramas obtidos por meio das medições realizadas, para cada ensaio, verificou-se que o valor mais ajustável para descrever as vazões de saída do protótipo estudado seria o coeficiente de descarga com valor de 0,27.

Sendo assim, considerando o valor do coeficiente de descarga atualizado,  $C_d^*$ , igual a 0,27, a Tabela 4.9 pode ser atualizada para a Tabela 4.10, na qual é possível verificar que os ajustes realizados, conforme descrito neste tópico, no modelo pensado *a priori*, tornaram os valores dos coeficientes de *runoff* calculados coerentes com os medidos na campanha experimental.

Destaca-se que a restrição de saída, fazendo o nível da água subir no interior do telhado verde, fez com que aumentasse o contato com a camada de argila expandida, aumentando a absorção. As vazões de saída também se ajustaram em consequência desta modificação.

Tabela 4.10 – Coeficientes de escoamento superficial obtidos e altura máxima de lâmina d’água no protótipo calculada – 4ª e última aproximação (modelo ajustado).

| <b>Intensidade (mm/h)</b> | <b><math>C^{(I)}_{TV}</math></b> | <b><math>C^{(II)}_{TV}</math></b> | <b><math>C^{(III)}_{TV}</math></b> | <b><math>C^{(IV)}_{TV}</math></b> | <b><math>h^*_{\text{máx. calculada}} \text{ (cm)}</math></b> |
|---------------------------|----------------------------------|-----------------------------------|------------------------------------|-----------------------------------|--------------------------------------------------------------|
| 100.4                     | 0.65                             | 0.67                              | 0.65                               | 0.66                              | 7.5                                                          |
| 50.7                      | 0.85                             | 0.82                              | 0.98                               | 0.95                              | 3.9                                                          |

#### 4.5.4.4 Hidrograma de saída estimado a partir dos ajustes realizados

A partir de uma tabela formada com as colunas representadas no Quadro 4.7, foram estimados novos hidrogramas de resposta, para cada ensaio, considerando os ajustes apontados neste tópico, de modo análogo ao apresentado no item 4.5.2.4, constando, no eixo x, os valores da coluna “t(s)”, e, no eixo y, os valores de “ $Q^{\text{sai}} \text{ (m}^3/\text{s)}$ ”, que são os mesmos valores da coluna “ $V^{\text{sai}} \text{ (m}^3)$ ”.

Quadro 4.7 – Balanço hídrico no sistema (ajustado), em volumes, para estimativa do hidrograma de saída.

| t (s) | V <sub>entra</sub> (m <sup>3</sup> ) | V <sub>chuva acumulada</sub> (m <sup>3</sup> )                                      | V <sub>sai</sub> (m <sup>3</sup> )                                                    | V <sub>armaz</sub> (m <sup>3</sup> )                                              | h* (m)                                                                                                                                                                                                                                         |
|-------|--------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 0     | $V_{t_0}^{entra} = 0$                | $V_{t_0}^{chuva acumulada} = 0$                                                     | $V_{t_0}^{sai} = 0$                                                                   | $V_{t_0}^{armaz} = 0$                                                             | $h_{t_0}^* = 0$                                                                                                                                                                                                                                |
| 1     | [Equação 4.27]                       | $V_{t_1}^{chuva acumulada}$<br>$= V_{t_0}^{chuva acumulada}$<br>$+ V_{t_1}^{entra}$ | $V_{t_1}^{sai}$<br>$= 2 C_d * A \sqrt{2 g h_{t_0}^*}$<br>$\times (t_1 - t_0)$         | $V_{t_1}^{armaz}$<br>$= V_{t_0}^{armaz}$<br>$+ (V_{t_1}^{entra} - V_{t_1}^{sai})$ | $h_{t_1}^*$<br>$= \begin{cases} se V_{t_1}^{armaz} \leq 0,0237 m^3 = 1 - e^{-0,270462 \left( \frac{V_{t_1}^{armaz}}{I_v} \right)^{0.505639}} \\ se V_{t_1}^{armaz} > 0,0237 m^3 = 0,026667 + 0,562556 \frac{V_{t_1}^{armaz}}{I_v} \end{cases}$ |
| 2     | [Equação 4.27]                       | $V_{t_2}^{chuva acumulada}$<br>$= V_{t_1}^{chuva acumulada}$<br>$+ V_{t_2}^{entra}$ | $V_{t_2}^{sai}$<br>$= 2 C_d * A \sqrt{2 g h_{t_1}^*}$<br>$\times (t_2 - t_1)$         | $V_{t_2}^{armaz}$<br>$= V_{t_1}^{armaz}$<br>$+ (V_{t_2}^{entra} - V_{t_2}^{sai})$ | $h_{t_2}^*$<br>$= \begin{cases} se V_{t_2}^{armaz} \leq 0,0237 m^3 = 1 - e^{-0,270462 \left( \frac{V_{t_2}^{armaz}}{I_v} \right)^{0.505639}} \\ se V_{t_2}^{armaz} > 0,0237 m^3 = 0,026667 + 0,562556 \frac{V_{t_2}^{armaz}}{I_v} \end{cases}$ |
| p*    | $V_{t_p}^{entra} = 0$                | $V_{t_p}^{chuva acumulada}$<br>$= V_{t_{p-1}}^{chuva acumulada}$                    | $V_{t_p}^{sai}$<br>$= 2 C_d * A \sqrt{2 g h_{t_{p-1}}^*}$<br>$\times (t_p - t_{p-1})$ | $V_{t_p}^{armaz}$<br>$= V_{t_{p-1}}^{armaz}$<br>$- V_{t_p}^{sai}$                 | $h_{t_p}^*$<br>$= \begin{cases} se V_{t_p}^{armaz} \leq 0,0237 m^3 = 1 - e^{-0,270462 \left( \frac{V_{t_p}^{armaz}}{I_v} \right)^{0.505639}} \\ se V_{t_p}^{armaz} > 0,0237 m^3 = 0,026667 + 0,562556 \frac{V_{t_p}^{armaz}}{I_v} \end{cases}$ |
| q*    | $V_{t_q}^{entra} = 0$                | $V_{t_q}^{chuva acumulada}$<br>$= V_{t_p}^{chuva acumulada}$                        | $V_{t_q}^{sai}$<br>$= 2 C_d * A \sqrt{2 g h_{t_{q-1}}^*}$<br>$\times (t_q - t_{q-1})$ | $V_{t_q}^{armaz}$<br>$= V_{t_{q-1}}^{armaz}$<br>$- V_{t_q}^{sai}$                 | $h_{t_q}^*$<br>$= \begin{cases} se V_{t_q}^{armaz} \leq 0,0237 m^3 = 1 - e^{-0,270462 \left( \frac{V_{t_q}^{armaz}}{I_v} \right)^{0.505639}} \\ se V_{t_q}^{armaz} > 0,0237 m^3 = 0,026667 + 0,562556 \frac{V_{t_q}^{armaz}}{I_v} \end{cases}$ |

## 5 RESULTADOS DOS ENSAIOS EXPERIMENTAIS

Os principais resultados dos ensaios experimentais são:

a) As seguintes medições diretas, realizadas em campo, para cada experimento: intensidade média da chuva gerada pelo simulador, condição de umidade inicial do substrato, tempo de início de escoamento, e as leituras da régua da Caixa Pluviômetro, registradas a cada minuto de ensaio, a partir do início da chuva induzida;

b) Os hidrogramas de resposta do protótipo à cada evento de chuva, tanto a partir das variações de volume constatadas na Caixa Pluviômetro, a cada instante medido, ou seja, a partir das medições experimentais, quanto pela modelação matemática estabelecida para descrever o comportamento do módulo de telhado verde com aquela configuração específica;

c) A determinação dos coeficientes de *runoff* do protótipo, para chuvas simuladas com intensidades média constantes na faixa de 50 mm/h e 100 mm/h.

A seguir, serão apresentados os resultados obtidos, bem como uma discussão sobre os mesmos.

### 5.1 MEDIÇÕES EM CAMPO

#### 5.1.1 Resultados obtidos

A partir da metodologia de realização dos ensaios experimentais, devidamente descrita no item 4.4 do Capítulo 4, foram obtidos os resultados de intensidade de chuva, umidade inicial do substrato (como um todo e só da subcamada de areia) e o tempo que leva, a partir do princípio da chuva induzida, para o início do escoamento das torneiras de saída da camada de drenagem.

Esses resultados foram divididos em duas tabelas, sendo que uma refere-se aos ensaios em que o Simulador de Chuvas estava calibrado para induzir precipitações na intensidade de 100 mm/h (Tabela 5.1), e outra refere-se aos experimentos em que o mesmo simulador estava calibrado para simular precipitações na com intensidades na faixa de 50 mm/h (Tabela 5.2).

Tabela 5.1 – Resultados obtidos nos experimentos com simulador calibrado para gerar uma intensidade de 100 mm/h.

| Número do Ensaio       | Dia de realização | Intensidade média (mm/h) | Nº de dias anteriores sem chuva | U <sub>substrato</sub> (%) | U <sub>areia</sub> (%) | T <sub>início do escoamento</sub> (min) |
|------------------------|-------------------|--------------------------|---------------------------------|----------------------------|------------------------|-----------------------------------------|
| 1                      | 25/02/2016        | 114.2                    | 2                               | 13.7                       | 7.7                    | 12                                      |
| 2                      | 01/03/2016        | 92.5                     | 0                               | 13.9                       | 7.8                    | 6                                       |
| 3                      | 03/03/2016        | 101.9                    | 2                               | 12.4                       | 6.6                    | 10                                      |
| 4                      | 08/03/2016        | 97.8                     | 0                               | 14.4                       | 8.0                    | 7                                       |
| 5                      | 09/03/2016        | 95.6                     | 0                               | 14.9                       | 8.4                    | 5                                       |
| <b>Valores médios:</b> |                   | 100.4                    | -                               | 13.9                       | 7.7                    | 8                                       |

Tabela 5.2 – Resultados obtidos nos experimentos com simulador calibrado para gerar uma intensidade de 50 mm/h.

| Número do Ensaio       | Dia de realização | Intensidade média (mm/h) | Nº de dias anteriores sem chuva | U <sub>substrato</sub> (%) | U <sub>areia</sub> (%) | T <sub>início do escoamento</sub> (min) |
|------------------------|-------------------|--------------------------|---------------------------------|----------------------------|------------------------|-----------------------------------------|
| 6                      | 18/02/2016        | 50.8                     | 0                               | 14.3                       | 7.8                    | 13                                      |
| 7                      | 22/02/2016        | 50.3                     | 0                               | 14.1                       | 7.9                    | 12                                      |
| 8                      | 24/03/2016        | 50.0                     | 0                               | 14.7                       | 8.3                    | 10                                      |
| 9                      | 28/03/2016        | 51.4                     | 2                               | 12.9                       | 6.9                    | 16                                      |
| 10                     | 15/02/2016        | 51.1                     | 4                               | 12.1                       | 6.5                    | 13                                      |
| <b>Valores médios:</b> |                   | 50.7                     | -                               | 13.6                       | 7.5                    | 13                                      |

Os resultados das leituras da régua na Caixa Pluviômetro, registradas a cada minuto estão, para cada ensaio experimental, estão nas folhas de campo acostadas no Apêndice B deste trabalho.

### 5.1.2 Discussão e comentários sobre os resultados

Os valores das intensidades média das chuvas induzidas pelo simulador variou de 92,5 mm/h até 114,2 mm/h, quando se esperava 100 mm/h, e de 50,0 mm/h até 51,4 mm/h, quando se esperava 50 mm/h. Isso pode ser um indicativo de que o equipamento possui instabilidade mais significativa na geração de chuvas que requerem maiores volumes precipitados. Considerando a média dos 5 ensaios realizados, para cada intensidade prevista, pode-se verificar que os valores de 100,4 mm/h e 50,7 mm/h são próximos ao esperado.

Sobre a umidade do substrato, verificada antes da realização de cada experimento, considerando tanto um cilindro com as duas subcamadas do substrato (terra e areia), quanto apenas algumas colheradas de areia, observa-se que os valores pouco variam, de 12,1% a 14,9% no primeiro caso, e de 6,9% a 8,4%, no segundo. Constatou-se o que era esperado: o fato da umidade do substrato como um todo fosse superior à da camada de areia somente.

Outro aspecto interessante que pode ser observado nas tabelas apresentadas é que nos experimentos realizados nos dias 15/02/2016, 25/02/2016, 03/03/2016 e 28/03/2016 foram verificadas as menores umidades no substrato, sendo que foi observado que, nesses dias específicos, não havia ocorrido chuva no local havia pelo menos 2 dias, considerando os dados da Estação de São Cristovão do Sistema Alerta Rio. Trata-se de um fato coerente observado, apesar dos valores das umidades aferidos, de um modo geral, em todos os ensaios, serem próximo (devido à grande capacidade drenante da areia).

O último aspecto que merece destaque é que, conforme esperado, em média, as chuvas na faixa de 100 mm/h, ou seja, com maiores intensidades, geram escoamento superficial mais rapidamente, levando 8 minutos para começar, em média, contra 13 minutos, também em média, para os ensaios com chuvas em torno de 50 mm/h. Porém, comparando os 10 ensaios entre si, pode-se inferir que não é somente a intensidade de chuva que influencia no tempo em que se inicia o escoamento superficial, o que indica que existem outras variáveis que influenciam nesse tempo.

## **5.2 HIDROGRAMAS DE RESPOSTA PARA O ESCOAMENTO SUPERFICIAL GERADO PELO MÓDULO**

### **5.2.1 Resultados obtidos**

Para cada ensaio experimental foram obtidos dois hidrogramas: um a partir dos dados medidos em campo, e outro estimado através de modelação matemática criada para descrever o comportamento do protótipo de cobertura verde nos eventos.

Os hidrogramas obtidos a partir das medições de volumes afluentes à Caixa Pluviômetra, em cada experimento, foram discretizados em 1, 5 e 10 minutos. As medições foram feitas a cada minuto, porém, nesta desratização, há oscilações de

medição. As médias de 5 e 10 minutos foram tomadas para melhor visualização (e representação) do fenômeno real, que não tem oscilações bruscas.

Assim, nas próximas figuras, serão apresentados 4 (quatro) hidrogramas de resposta para cada ensaio, sendo que 3 (três) representam o encontrado experimentalmente (nas discretizações de 1, 5 e 10 minutos), e 1 (um) corresponde ao que foi estimado a partir da modelagem matemática criada para o comportamento do protótipo.

As figuras que seguem (Figura 5.1 até Figura 5.10) apresentam os hidrogramas provenientes dos dados obtidos em cada experimento, e os estimados a partir de planilha criada, com o auxílio do *software* Excel, com o procedimento e fórmulas descrito no Quadro 4.7 do Capítulo 4.

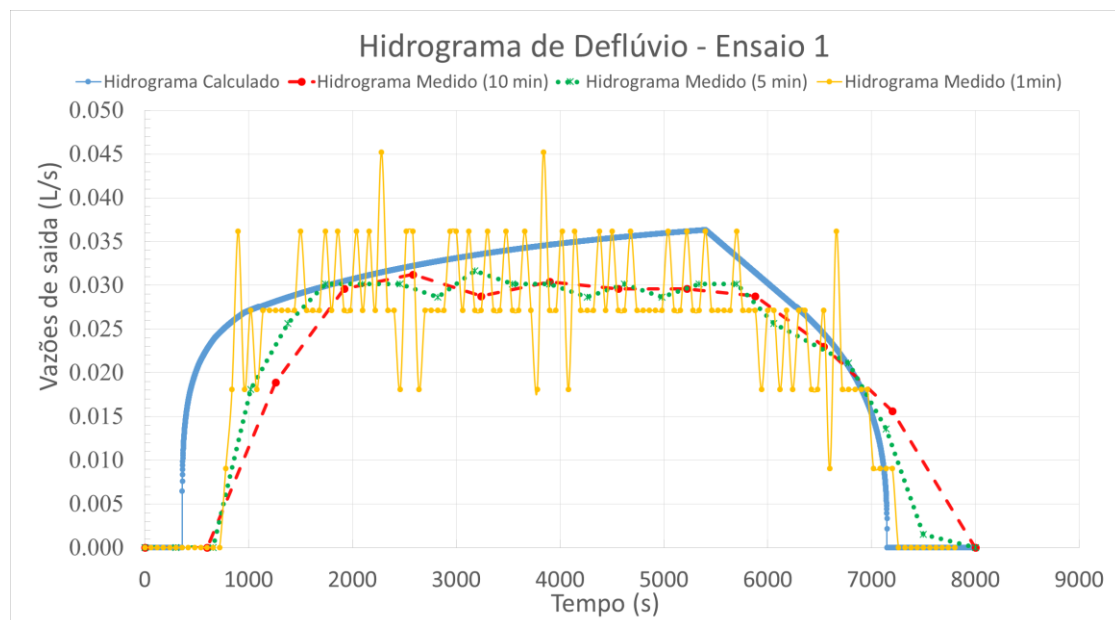


Figura 5.1 – Ensaio 1 ( $i_{\text{média}} = 114,2 \text{ mm/h}$ ): Hidrogramas medido e calculado.

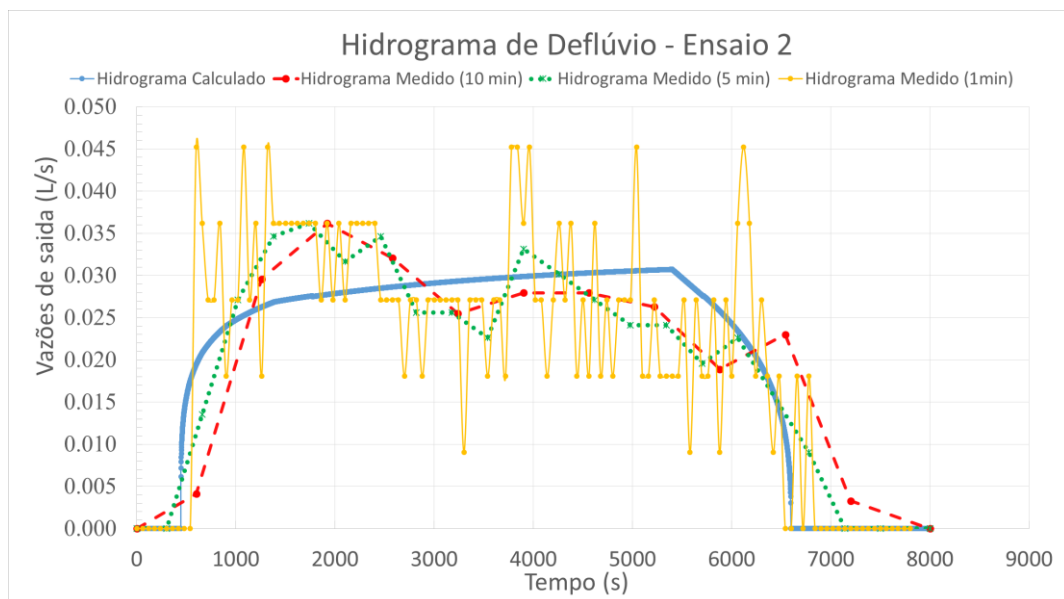


Figura 5.2 – Ensaio 2 ( $i_{\text{média}} = 92,5 \text{ mm/h}$ ): Hidrogramas medido e calculado.

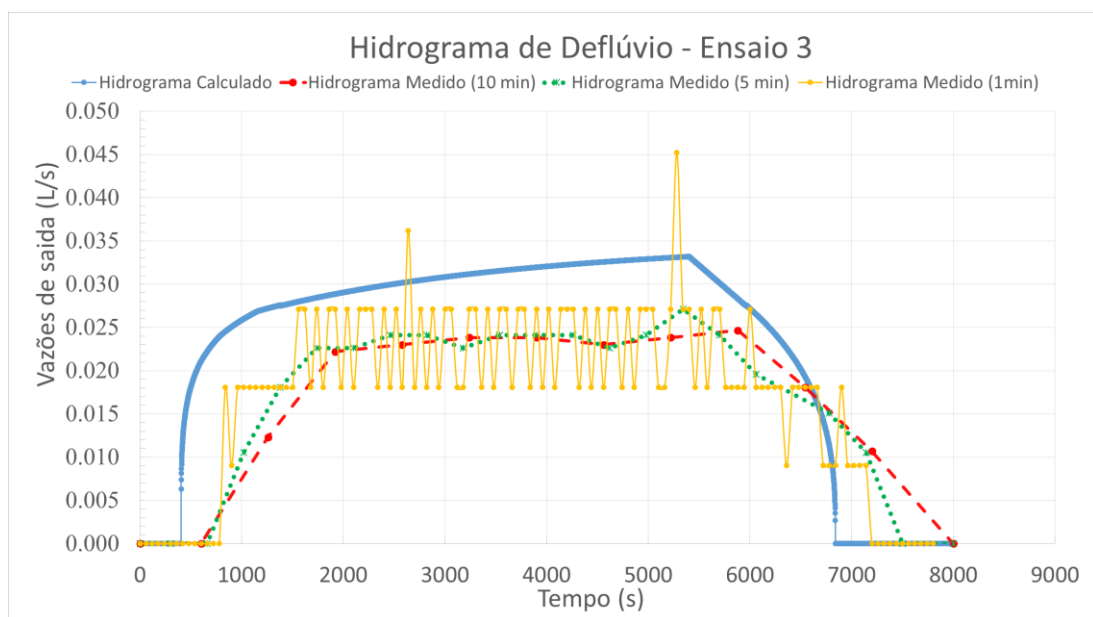


Figura 5.3 – Ensaio 3 ( $i_{\text{média}} = 101,9 \text{ mm/h}$ ): Hidrogramas medido e calculado.

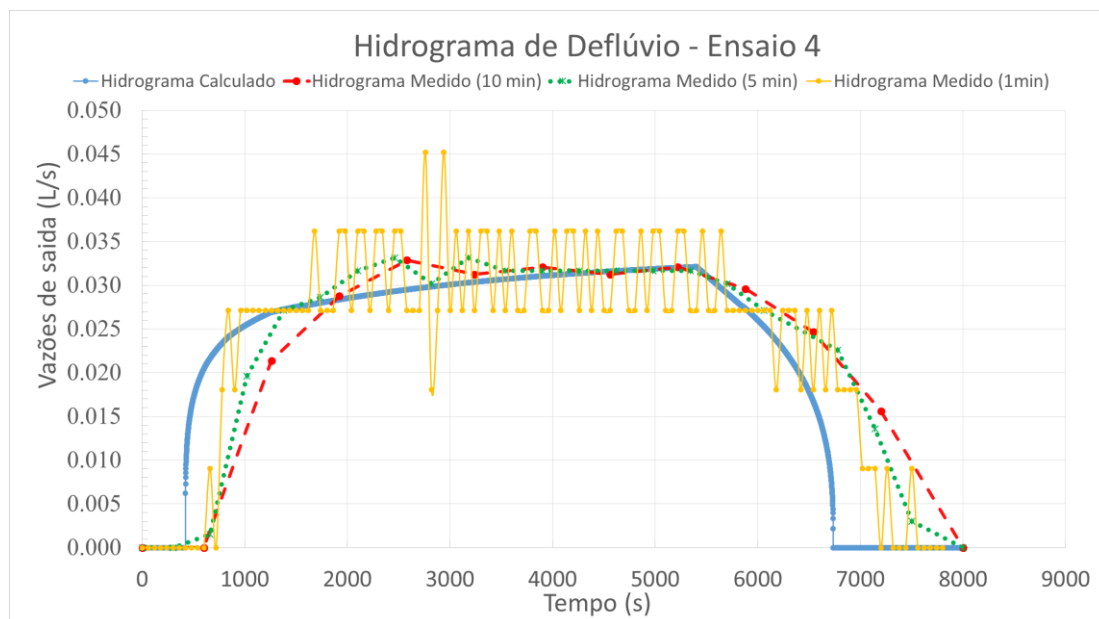


Figura 5.4 – Ensaio 4 ( $i_{\text{média}} = 97,8 \text{ mm/h}$ ): Hidrogramas medido e calculado.

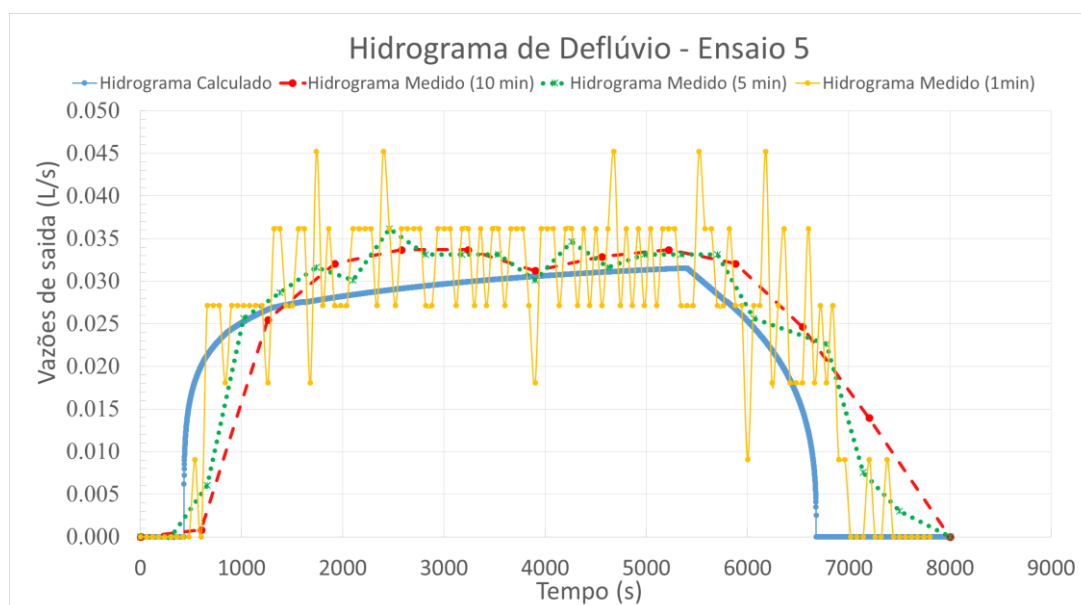


Figura 5.5 – Ensaio 5 ( $i_{\text{média}} = 95,6 \text{ mm/h}$ ): Hidrogramas medido e calculado.

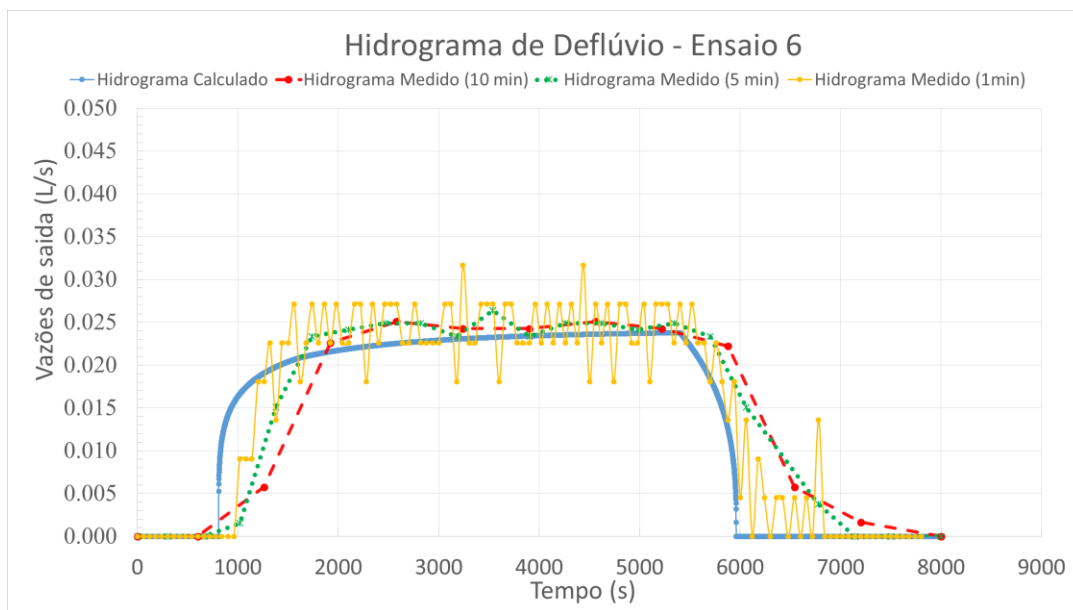


Figura 5.6 – Ensaio 6 ( $i_{\text{média}} = 50,8 \text{ mm/h}$ ): Hidrogramas medido e calculado.

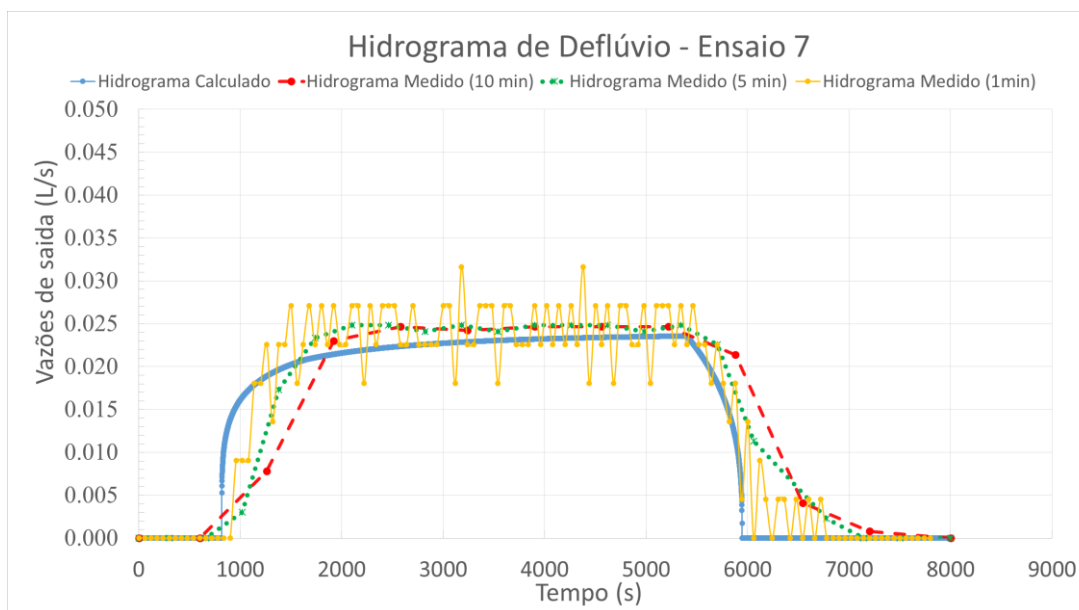


Figura 5.7 – Ensaio 7 ( $i_{\text{média}} = 50,3 \text{ mm/h}$ ): Hidrogramas medido e calculado.

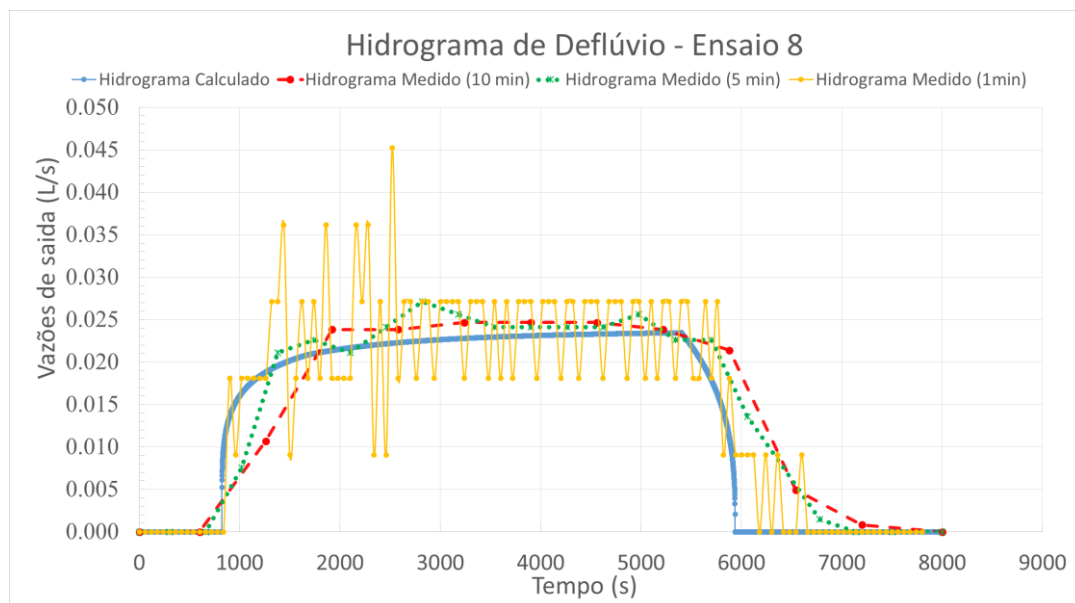


Figura 5.8 – Ensaio 8 ( $i_{\text{média}} = 50,0 \text{ mm/h}$ ): Hidrogramas medido e calculado.

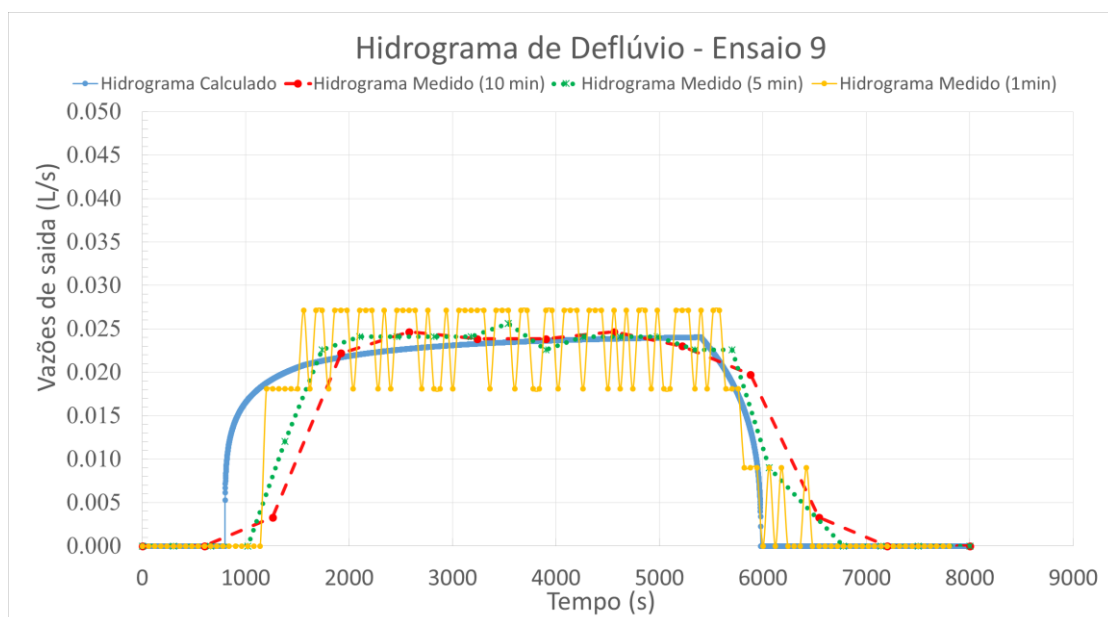


Figura 5.9 – Ensaio 9 ( $i_{\text{média}} = 51,4 \text{ mm/h}$ ): Hidrogramas medido e calculado.

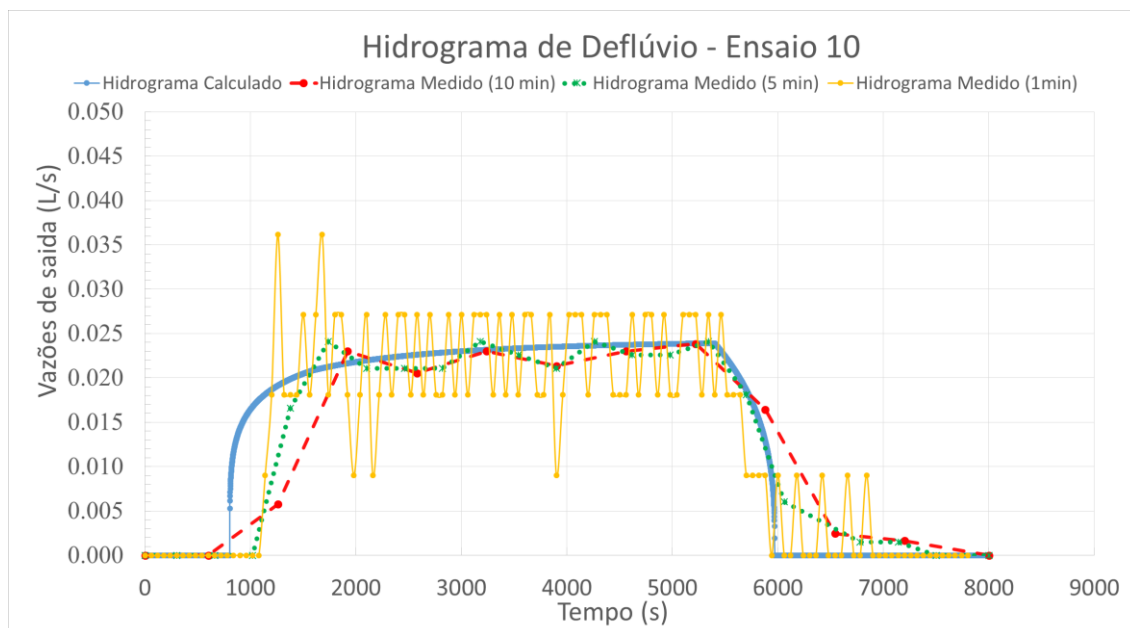


Figura 5.10 – Ensaio 10 ( $i_{média} = 51,1$  mm/h): Hidrogramas medido e calculado.

### 5.2.2 Discussão e comentários sobre os resultados

No que diz respeito aos hidrogramas traçados a partir dos dados aferidos em campo, pode-se observar (conforme antecipado) que as medições realizadas a cada minuto apresentam oscilações. Isso pode acontecer devido a vários fatores, tais como:

- a) Erros na leitura da cota na régua, que podem ser causados pela mudança de posição em que se observava a mesma, pelo fato da bola de isopor ter ficado eventualmente presa no cilindro em algum instante, pelo fato de ter existido um revezamento de pessoas observando a régua, devido ao longo período de ensaio;
- b) Erros de leitura da escala, uma vez que a régua só registra variação de volume a partir de diferenças de altura de 1 milímetro, sendo que, às vezes, em um minuto essa variação pode acabar não sendo observada e passando o residual para o próximo instante;
- c) Eventuais perdas no percurso da água até a chegada à CP em um determinado instante específico, seja pelas conexões da calha coletora, seja por um momentâneo entupimento da torneira, entre outros fatores.

Dentre essas possibilidades, parece que a mais provável é a relatada no item (b).

Ao considerar uma discretização de 5 em 5, ou de 10 em 10, minutos, é possível verificar a função  $Q(t)$  com o aspecto de hidrograma, sem tantas oscilações.

Já a respeito dos hidrogramas estimados, ao compará-los com os hidrogramas obtidos a partir das medições experimentais, observa-se que:

a) Todos os hidrogramas obtidos a partir do modelo de cálculo apresentam uma ascensão e recessão mais rápidas do que os obtidos a partir das médias de 5 e 10 minutos das medições em campo, mas se parecem bastante com a ascensão e (um pouco menos) com a recessão dos hidrogramas de 1 minuto;

b) Os hidrogramas obtidos a partir dos cálculos que tentaram descrever o comportamento do protótipo de cobertura verde apresentam-se bem próximos dos medidos em campo, em uma avaliação qualitativa de ordem geral. Tal semelhança garante uma representação adequada e aceitável dos valores de volumes e de vazões máximas;

c) Tal proximidade deve-se em parte aos diversos ajustes que foram feitos, conforme descrito no item 4.5.4, de modo a compatibilizar a rotina de cálculo com o que foi medido nos ensaios experimentais.

### **5.3 COEFICIENTE DE ESCOAMENTO SUPERFICIAL DO PROTÓTIPO DE COBERTURA VERDE**

#### **5.3.1 Resultados obtidos**

O coeficiente de *runoff* para o protótipo de cobertura verde foi determinado a partir de 4 (quatro) maneiras distintas: a primeira ( $C^{(I)}_{TV}$ ) e a segunda ( $C^{(II)}_{TV}$ ), referem-se, respectivamente, à simples razão entre o volume direcionado para a CP verificado a partir dos ensaios experimentais e o volume total precipitado, e à razão entre o volume calculado a partir do hidrograma modelado para descrever o comportamento do protótipo, também com o volume total. A terceira ( $C^{(III)}_{TV}$ ) e a quarta ( $C^{(IV)}_{TV}$ ) são os quocientes das vazões máximas de saída do protótipo, medidas na CP e calculadas matematicamente, respectivamente, pela vazão máxima afluenta ao sistema, proveniente do simulador.

Para cada ensaio, os valores dos volumes de água total precipitado, dos obtidos a partir dos dados medidos na CP e do hidrograma modelado, além das vazões máximas afluenta ( $Q^{afluente}_{máx}$ ), e máximas de saída, tanto medida ( $Q^{medida}_{máx}$ ), quanto calculada ( $Q^{calculada}_{máx}$ ), estão apresentadas na Tabela 5.3, para os experimentos com chuvas induzidas na faixa de 100 mm/h, e na Tabela 5.4, para os com chuvas na faixa de 50 mm/h. Os valores dos coeficientes  $C^{(I)}_{TV}$ ,  $C^{(II)}_{TV}$ ,  $C^{(III)}_{TV}$  e  $C^{(IV)}_{TV}$ , referidos a cada ensaio experimental, também estão apresentados nas referidas tabelas.

Tabela 5.3 – Resultados obtidos (medido e calculado), para chuvas na faixa de 100 mm/h.

| Número do Ensaio | Intensidade média (mm/h) | Volume total precipitado (L) | Volume total que vai pra CP (L) | Volume total calculado (L) | Q <sub>afluente</sub> máx (L/s) | Q <sub>medida</sub> máx (L/s) | Q <sub>calculada</sub> máx (L/s) | h <sub>calculada</sub> máx (cm) | C <sup>(I)</sup> <sub>TV</sub> | C <sup>(II)</sup> <sub>TV</sub> | C <sup>(III)</sup> <sub>TV</sub> | C <sup>(IV)</sup> <sub>TV</sub> |
|------------------|--------------------------|------------------------------|---------------------------------|----------------------------|---------------------------------|-------------------------------|----------------------------------|---------------------------------|--------------------------------|---------------------------------|----------------------------------|---------------------------------|
| 1                | 114.2                    | 304.9                        | 175.2                           | 205.5                      | 0.0565                          | 0.0312                        | 0.0363                           | 9.1                             | 0.57                           | 0.67                            | 0.55                             | 0.64                            |
| 2                | 92.5                     | 247.0                        | 168.2                           | 166.5                      | 0.0457                          | 0.0362                        | 0.0307                           | 6.5                             | 0.68                           | 0.67                            | 0.79                             | 0.67                            |
| 3                | 101.9                    | 272.1                        | 135.6                           | 183.2                      | 0.0504                          | 0.0247                        | 0.0332                           | 7.6                             | 0.50                           | 0.67                            | 0.49                             | 0.66                            |
| 4                | 97.8                     | 261.1                        | 185.6                           | 175.8                      | 0.0484                          | 0.0329                        | 0.0321                           | 7.1                             | 0.71                           | 0.67                            | 0.68                             | 0.66                            |
| 5                | 95.6                     | 255.3                        | 194.8                           | 172.0                      | 0.0473                          | 0.0337                        | 0.0315                           | 6.9                             | 0.76                           | 0.67                            | 0.71                             | 0.67                            |
| Média:           | 100.4                    | 268.1                        | 171.9                           | 180.6                      | 0.0496                          | 0.0317                        | 0.0328                           | 7.5                             | 0.65                           | 0.67                            | 0.65                             | 0.66                            |

Tabela 5.4 – Resultados obtidos (medido e calculado), para chuvas na faixa de 50 mm/h.

| Número do Ensaio | Intensidade média (mm/h) | Volume total precipitado (L) | Volume total que vai pra CP (L) | Volume total calculado (L) | Q <sub>afluente</sub> máx (L/s) | Q <sub>Medida</sub> máx (L/s) | Q <sub>calculada</sub> máx (L/s) | h <sub>calculada</sub> máx (cm) | C <sup>(I)</sup> <sub>TV</sub> | C <sup>(II)</sup> <sub>TV</sub> | C <sup>(III)</sup> <sub>TV</sub> | C <sup>(IV)</sup> <sub>TV</sub> |
|------------------|--------------------------|------------------------------|---------------------------------|----------------------------|---------------------------------|-------------------------------|----------------------------------|---------------------------------|--------------------------------|---------------------------------|----------------------------------|---------------------------------|
| 6                | 50.8                     | 135.6                        | 119.4                           | 111.3                      | 0.0251                          | 0.0251                        | 0.0238                           | 3.9                             | 0.88                           | 0.82                            | 1.00                             | 0.95                            |
| 7                | 50.3                     | 134.3                        | 118.8                           | 110.0                      | 0.0249                          | 0.0247                        | 0.0236                           | 3.8                             | 0.88                           | 0.82                            | 0.99                             | 0.95                            |
| 8                | 50.0                     | 133.5                        | 121.0                           | 109.3                      | 0.0247                          | 0.0247                        | 0.0234                           | 3.8                             | 0.91                           | 0.82                            | 1.00                             | 0.95                            |
| 9                | 51.4                     | 137.2                        | 111.2                           | 112.8                      | 0.0254                          | 0.0247                        | 0.0240                           | 4.0                             | 0.81                           | 0.82                            | 0.97                             | 0.95                            |
| 10               | 51.1                     | 136.4                        | 106.3                           | 112.0                      | 0.0253                          | 0.0238                        | 0.0239                           | 4.0                             | 0.78                           | 0.82                            | 0.94                             | 0.95                            |
| Média:           | 50.7                     | 135.4                        | 115.3                           | 111.1                      | 0.0251                          | 0.0246                        | 0.0237                           | 3.9                             | 0.85                           | 0.82                            | 0.98                             | 0.95                            |

### 5.3.2 Discussão e comentários sobre os resultados

Aqui encontra-se o resultado que mais chamou a atenção do autor nesta pesquisa: observando os valores médios do coeficiente de *runoff*  $C^{(I)}_{TV}$  e  $C^{(II)}_{TV}$ , referente aos volumes, para as chuvas da ordem de 50 e 100 mm/h, constata-se que, o protótipo de cobertura verde foi capaz de armazenar mais água em seu sistema nos eventos de chuvas próximas à intensidade de 100 mm/h do que nos de intensidade na faixa de 50 mm/h. De acordo com os resultados, para chuvas na faixa de 100 mm/h, o valor médio do  $C^{(I)}_{TV}$  é 0,65, enquanto que, para as chuvas da ordem de 50 mm/h, o valor médio deste mesmo coeficiente é 0,85.

Em princípio, este resultado pareceu incoerente, visto que vai contra ao que é constatado em referências bibliográficas sobre estudos experimentais em coberturas verdes. Além disso, de maneira lógica, é de se esperar que chuvas mais intensas gerem maiores escoamentos superficiais.

A partir desta constatação experimental, procurou-se buscar entender o que acontecia, dentro desse sistema experimental, que explicasse esse fato identificado. A justificativa encontrada baseia-se no seguinte: os orifícios existentes na camada de drenagem do protótipo conseguem escoar as vazões de entrada no módulo provenientes de chuvas da ordem de 50 mm/h, sem formar uma grande lâmina de água armazenada dentro do sistema (trata-se de uma lâmina de aproximadamente 4 cm, conforme valor de  $h^{calculada}_{máx}$  na Tabela 5.4), ou seja, não há grandes acúmulos de água dentro do protótipo; porém, já no caso de chuvas próximas à intensidade de 100 mm/h, os orifícios existentes não são capazes de escoar as vazões afluentes referentes a esta intensidade sem acabar ocasionando um efeito de reservatório dentro do protótipo, chegando a formar uma lâmina de água dentro do protótipo da ordem de 7,5 cm, conforme valor de  $h^{calculada}_{máx}$  na Tabela 5.3, o que indica que a água, além de cobrir a camada de drenagem, ainda atingiu uma pequena camada de areia do substrato.

Cabe destacar, neste ponto, que a argila expansiva, material que compõe a camada de drenagem, possui uma capacidade expressiva (dentro da escala de estudo) de absorção de água. De acordo com estudos realizados por Eriksson (2013), Silva (2007) e Moravia *et al.* (2006), as argilas expansivas, de diâmetro aproximado de 2 cm (semelhantes às utilizadas no protótipo), têm capacidade de retenção de água que pode variar de 7% até 30%.

Conforme observado nos hidrogramas de resposta dos ensaios para as intensidades de chuva próximas à 100 mm/h, apresentados nas Figuras 5.1 à 5.5 do item 5.2.1, na janela de tempo em que foram realizados os ensaios experimentais, não foi possível identificar a liberação dessa água absorvida pelas camadas de argila expansiva e areia, o que refletiu em menores coeficientes  $C^{(I)}_{TV}$  e  $C^{(II)}_{TV}$  que relacionam os volumes precipitados com os que viraram escoamento superficial.

Sendo assim, considerando que:

- a) O telhado verde é um sistema heterogêneo, formado por uma série de camadas compostas por diversos materiais;
- b) Não foram executados ensaios específicos, com cada material que compõe o telhado verde, com vistas a identificar sua capacidade de absorção de água;
- c) Não existe aparato para a realização de medições do nível de água que consta, a cada instante, dentro do protótipo;

Esta pesquisa não se aprofundou nestas questões, ficando a sugestão de que essas considerações sejam avaliadas em trabalhos futuros a serem desenvolvidos no módulo experimental em tela, buscando descrever de modo mais preciso o fenômeno físico que ocorre no protótipo.

Observa-se, também, que os altos coeficientes de *runoff* do tipo  $C^{(III)}_{TV}$  e  $C^{(IV)}_{TV}$  relacionado às vazões máximas liberadas pelo sistema de drenagem do protótipo com as vazões máximas afluentes de chuva, indicam que para precipitações na faixa de 50 mm/h, o telhado verde não funciona para amortecer as vazões de pico, ou seja, praticamente o que chove consegue ser escoado pelos orifícios, após preenchida a interceptação vegetal.. Neste caso, observando-se também os coeficientes de *runoff* do tipo  $C^{(I)}_{TV}$ , obtido pela análise do volume precipitado e do volume que virou escoamento superficial (medido), pode-se assumir que 15% do volume de água que afluiu ao sistema ficou retida no telhado verde. Conforme já explicado no item 4.5.4 do Capítulo 4, este valor foi associado à capacidade de interceptação vegetal das bromélias.

Cabe mencionar que este valor de interceptação vegetal de 15% pode variar, devido a diversos fatores, como por exemplo, a ocorrência de chuvas anteriores que enchem os tanques das bromélias, as taxas de evapotranspiração, a incidência solar, entre outros. Considerando isso, é possível verificar que a interceptação vegetal, acusada como sendo o fator predominante de retenção de água nas precipitações na faixa de 50 mm/h, variou de 8% a 22%.

No que diz respeito aos coeficientes de *runoff* obtidos a partir da razão entre as vazões máximas obtidas diretamente dos hidrogramas referentes aos ensaios experimentais e dos hidrogramas calculados, pela vazão máxima afluente ao sistema, respectivamente,  $C^{(III)}_{TV}$  e  $C^{(IV)}_{TV}$ , verifica-se que o amortecimento da vazão de pico é maior nas chuvas da ordem de 100 mm/h do que de 50 mm/h. Isso provavelmente ocorre devido ao efeito de reservação que existe no sistema, devido à insuficiência hidráulica dos orifícios, em ocasiões de chuvas de intensidades próximas a 100 mm/h e à capacidade de retenção da argila expandida, que é plenamente utilizada, quando a água se armazena no telhado.

#### 5.4 COMENTÁRIOS GERAIS A RESPEITO DA CAMPANHA EXPERIMENTAL E RESULTADOS OBTIDOS

Sobre a campanha experimental, cabe destacar que foram diversas as dificuldades enfrentadas pela equipe de pesquisa ao longo de toda a campanha, iniciada em meados de fevereiro e terminada no início de abril do ano de 2016, época em que as temperaturas são relativamente altas na cidade do Rio de Janeiro. As principais dificuldades encontradas na realização dos experimentos estão relacionadas no Quadro 5.1.

Quadro 5.1 – Principais dificuldades enfrentadas durante a campanha de ensaios.

| <b>Dificuldades enfrentadas</b>                                                                                                                                                                                                                                                                        |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 1. O protótipo foi construído em área externa, sem cobertura, que fica muito exposta ao sol. Assim, o trabalho no local é bastante cansativo e penoso;                                                                                                                                                 |
| 2. A Caixa Pluviômetra utilizada (suspensa) não era dotada de sensores que tornassem as medições automatizadas, o que melhoraria significativamente a precisão dos dados obtidos;                                                                                                                      |
| 3. Dificuldade no deslocamento do simulador de chuva, muito pesado, pelo fato do mesmo possuir estruturas acopladas (galão e bomba) difíceis de serem transportadas. Além disso, há um pequeno desalinhamento nos trilhos, que traz um certo risco para o procedimento, além de exigir esforço físico; |
| 4. O procedimento para a troca de intensidade de chuva não é simples, devendo ser realizados testes com diversas aberturas de fendas, até encontrar a adequada;                                                                                                                                        |
| 5. A metodologia para determinar a intensidade da precipitação é simples, mas trabalhosa de ser executada, em função do peso das placas com água, também podendo gerar acidentes e retrabalho;                                                                                                         |

Quadro 5.1 – Principais dificuldades enfrentadas durante a campanha de ensaios  
(Continuação).

| <b>Dificuldades enfrentadas</b>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                    |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 6. Como os ensaios são feitos a partir de chuvas com intensidades conhecidas e tidas como constante durante todo ensaio, em dias de chuva não era possível realizar o ensaio experimental;                                                                                                                                                                                                                                                         |
| 7. Não é possível realizar experimentos a partir de chuvas reais. A exposição do local não conta com abrigo para a equipe de ensaio. Além disso, nessas ocasiões, haveria contabilização de escoamentos provenientes não só da área do protótipo, mas também da calha de escoamento e da própria Caixa Pluviômetra, que ficariam expostas a chuva sem nenhuma proteção, adicionando um volume significativo, quando comparado com a área ensaiada. |

Além do exposto no Quadro 5.1, destaca-se também como ponto negativo de preocupação a necessidade da disponibilização dos equipamentos utilizados para a caracterização da umidade inicial do substrato (balança, estufa e recipientes) no próprio CESA/UFRJ, de modo a evitar o transporte da amostra do protótipo até um outro laboratório, visto que neste transporte a amostra poderia perder suas características de umidade (daí as medidas adicionais de controle, com a introdução do pano úmido protegendo as amostras).

Sobre os resultados obtidos, a partir dos experimentos realizados com a intensidade de chuva próxima à 50 mm/h, foi possível estimar um fator de interceptação vegetal no valor de 15%. Trata-se de um valor coerente, conforme estudo de Cogliatti-Carvalho *et al.* (2010), porém esse valor merece ser melhor avaliado especificamente para a composição de bromélias existentes no protótipo em tela.

Ao contrário do que era esperado, o protótipo de cobertura verde mostrou-se mais eficiente em eventos de chuvas nas faixas de intensidades maiores, devido, principalmente, à restrição hidráulica no escoamento de saída, existente na camada de drenagem do módulo. Isso faz com que precipitações com intensidades maiores fiquem com água armazenada dentro do sistema, que possui materiais, como a argila expandida, que absorvem água e acaba liberando-a de forma lenta, comparado a janela de observação experimental. Esse efeito, porém, mostrou que o funcionamento dos telhados verdes (cuja eficiência em literatura apresenta uma gama de variação amplíssima) pode ser otimizado, se acrescida da função de armazenamento e se utilizada argila expandida como material

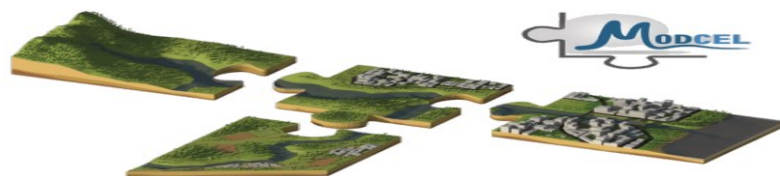
da camada drenante. Pode-se dizer que estes achados foram uma espécie de efeito colateral, mas com implicações interessantes para definir diretrizes de projeto.

Esse fenômeno de absorção de água por materiais que compõem o sistema, porém, deve ser alvo de estudos mais aprofundados, com objetivo de descrever de modo ainda mais adequado o comportamento para o protótipo que foi proposto a priori neste estudo.

Outro ponto que merece destaque é que não foi verificada nenhuma relação entre a umidade inicial do substrato com os coeficientes de *runoff* observados, nem com as vazões máximas medidas observadas – fato que certamente não se manterá constante se o substrato for terra vegetal ou outro material diferente da areia.

Sendo assim, para o cenário que considera a adoção de telhados verdes em coberturas na bacia do rio Joana, será adotado, no modelo matemático, o valor de coeficiente de *runoff* de 0,65 para as áreas em que é possível a implantação de coberturas verdes. Foi escolhido este valor devido ao mesmo se referir a média dos valores dos coeficientes de *runoff* obtidos experimentalmente para as maiores intensidades simuladas experimentalmente.

## 6 ESTUDO DE CASO: APLICAÇÃO DE TELHADOS VERDES EM ESCALA DE BACIA, COM APOIO DE MODELO MATEMÁTICO, NA BACIA DO RIO JOANA - RJ



(Imagem esquemática para o modelo de células MODCEL, obtida no *site* da empresa AquaFluxus<sup>21</sup>)

### 6.1 LEVANTAMENTO DE DADOS E INFORMAÇÕES DA BACIA DO RIO JOANA

A bacia do rio Joana é uma sub-bacia do canal do Mangue que já foi palco de diversos projetos e estudos desenvolvidos pela UFRJ. Destaca-se que o modelo de células para a bacia do canal do Mangue foi originalmente desenvolvido por Miguez (2001) e foi alvo de atualizações e revisões neste ano pela equipe do Laboratório de Hidráulica Computacional da Universidade Federal do Rio de Janeiro – LHC/UFRJ, conforme consta no trabalho Guimarães (2016). Todos os aspectos referentes ao Modelo de Células – MODCEL, utilizado como ferramenta de modelagem matemática hidrodinâmica nesta pesquisa, estão devidamente apresentados no Anexo III deste trabalho.

A nova versão do modelo de células da bacia do canal do Mangue, ainda de acordo com Guimarães (2016), apresenta 1027 células e foi calibrada a partir de um evento de chuva que ocorreu em 16 de fevereiro de 2000, com início às 19:30 e duração de 9 horas. Este modelo calibrado foi validado com o evento ocorrido em 19 de março de 2000, com início às 22:30 e duração de 5 horas.

Para a modelagem aqui proposta será utilizada esta última versão do modelo do canal do Mangue (calibrado e ajustado), porém, com propostas de ajustes no modelo apenas nas células que compõem bacia do rio Joana.

A topologia e condições de contorno adotadas nesta pesquisa, portanto, referem-se a última versão do modelo da bacia do canal do Mangue, apresentada por Guimarães (2016). Nesse modelo, a sub-bacia do rio Joana conta com 251 células, dispostas conforme ilustrado na Figura 6.1.

---

<sup>21</sup> <http://www.aquafluxus.com.br/o-modelo-de-celulas-de-escoamento/>, acesso em 01/10/2016.



Figura 6.1 – Bacia do rio Joana dividida em células de escoamento para a modelagem.

Fonte: Elaborado pelo autor, com imagem do Google Earth ® (2016).

Cabe destacar que a versão do modelo da bacia do canal do Mangue utilizada nesta pesquisa ainda não contempla as intervenções (Praças da Bandeira, Niterói e Varnhagem) que foram realizadas na bacia pela Prefeitura do Rio e mencionadas no tópico 1.7 do capítulo introdutório.

## 6.2 CHUVAS DE PROJETO CONSIDERADAS

As chuvas de projeto, referente aos tempos de recorrência de 10 e 25 anos, foram obtidas a partir da equação IDF – intensidade, duração e frequência, estabelecida para o posto pluviométrico “Sabóia Lima” (Equação 6.1) pela Rio-Águas (2010).

$$i = \frac{a T_R^b}{(t + c)^b} \quad (\text{Equação 6.1})$$

Onde:

$i$  é a intensidade pluviométrica em mm/h;

$T_R$  é o tempo de recorrência em anos;

$t$  é o tempo de duração da precipitação em minutos.

$a$ ,  $b$ ,  $c$  e  $d$  são os valores dos coeficientes conforme apresentado na Tabela 6.1.

Tabela 6.1 – Coeficientes da IDF para o posto Sabóia Lima.

Fonte: Rio Águas (2010).

| Pluviômetro | a        | b     | c     | d     |
|-------------|----------|-------|-------|-------|
| Sabóia Lima | 1.782,78 | 0,178 | 16,60 | 0,841 |

## 6.3 METODOLOGIA ADOTADA

No modelo da bacia do canal do Mangue, foram realizadas alterações somente nas células de planície urbana (Tipo 2) pertencentes à sub-bacia do rio Joana, de modo a considerar a adoção de telhados verdes na área da bacia. Basicamente, a metodologia seguiu as etapas apresentadas no Quadro 6.1.

Quadro 6.1 – Metodologia para aplicação de telhados verdes em bacia urbana.

| <b>Etapas para Consideração da Aplicação de Coberturas Verdes na Bacia do Rio Joana</b>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                              |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <ol style="list-style-type: none"><li>1. Avaliar cada célula que compõe a sub-bacia do rio Joana, no modelo da bacia do canal do Manguê, com vistas a mapear as áreas em que telhados verdes poderiam ser aplicados;</li><li>2. Estimar, para cada célula, os valores das seguintes áreas: total da célula, de telhados existentes, e de locais onde poderiam ser instaladas coberturas verdes;</li><li>3. Em cada célula da bacia, ponderar o coeficiente de transformação de chuva em vazão, <math>C</math>, considerando a adoção de telhados verdes com o coeficiente de <i>runoff</i> mais favorável encontrado nos ensaios experimentais;</li><li>4. Com o auxílio do MODCEL, simular os cenários atual e contemplando a adoção de coberturas verdes nas áreas da bacia onde é possível;</li><li>5. Comparar os resultados das manchas de inundação considerando os dois cenários frente a chuvas de projeto com TR de 10 e 25 anos.</li></ol> |

A avaliação das áreas com potencial para a aplicação de telhados verdes, nas células da bacia do rio Joana, foi realizada a partir de imagens de satélite fornecidas pelo Google Earth®, e também pelo conhecimento que o autor possui dos bairros que compõe a bacia. Cabe ressaltar que esta avaliação só foi executada para as células de planície urbanizada (Tipo 2), visto que estas que tratam dos locais onde existem mais edificações.

Foram considerados como locais viáveis de aplicação de coberturas verdes: prédios públicos, como por exemplo, hospitais, escolas e a Universidade do Estado do Rio de Janeiro – UERJ; prédios de condomínios que possuem grandes áreas de cobertura com pouco uso; postos de gasolina; supermercados; clubes; pátios de estacionamento cobertos; residências e prédios com laje em concreto, sem telhado. Foram descartadas as coberturas que apresentavam telhados com duas ou mais águas; coberturas com formato curvado; ou com estruturas de suporte aparentemente sem capacidade de resistir ao peso de um telhado verde. Além destas, também foram desconsideradas as áreas com pouca ocupação e com favelas.

A partir dessas considerações, a Figura 6.2 ilustra o mapeamento das áreas com potencial para a aplicação de telhados verdes na área urbana da bacia do rio Joana.

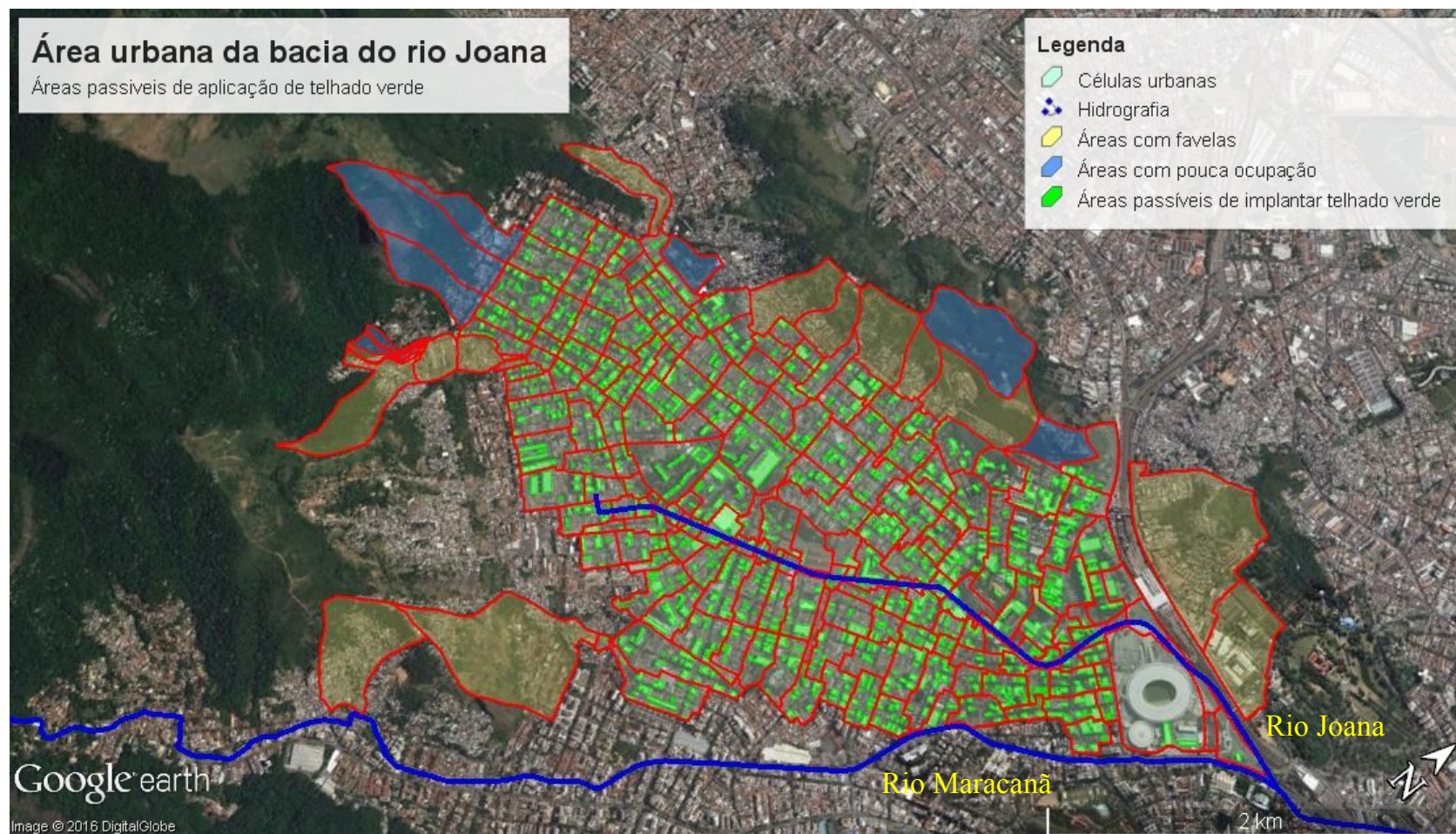


Figura 6.2 – Parte urbana da bacia do rio Joana, com a indicação do mapeamento das áreas propícias à instalação de coberturas verdes.

Fonte: Elaborado pelo autor, com imagem do Google Earth ® (2016).

O modelo, com as células já delimitadas, traz consigo os valores das áreas de cada célula e qual parcela dessa área é ocupada por telhados, de um modo geral. No caso da bacia em questão, as coberturas representam, em média, 70% das áreas das células ocupadas por coberturas. Sendo assim, considerando essa informação somada às estimativas das áreas em que é possível a adoção de coberturas verdes, realizada para cada célula, conforme descrito, o valor do coeficiente de transformação de chuva em vazão das células, C, foi atualizado em cada uma do seguinte modo:

a) Estabeleceu-se que os coeficientes de escoamento C seriam de 0,95, para as áreas com telhados comuns e de 0,65, para as áreas com telhados verdes, valor este compatível com o encontrado nos ensaios experimentais com chuvas na faixa de 100 mm/h;

b) O coeficiente de escoamento de cada célula seria atualizado como sendo:

$$C_{\text{célula}}^{\text{atualizado}} = \frac{(A_{TV} \times C_{TV}) + (A_{\text{sem TV}} \times C_{\text{telhado}}) + (A_{\text{restante da célula}} \times C_{\text{restante da célula}})}{A_{\text{célula}}}$$

(Equação 6.2)

Sendo que:

$$C_{\text{restante da célula}} = \frac{(C_{\text{célula}}^{\text{existente}} \times A_{\text{célula}}) - (A_{\text{telhado}} \times C_{\text{telhado}})}{A_{\text{restante da célula}}}$$

(Equação 6.3)

Onde:

$C_{\text{célula}}^{\text{atualizado}}$  é o coeficiente de escoamento, considerando a adoção de telhados verdes, que substituirá o existente;

$A_{TV}$  é a área de telhado verde;

$C_{TV}$  é o coeficiente de *runoff* do telhado verde (0,65);

$A_{\text{sem TV}}$  corresponde à área de cobertura sem natureza;

$C_{\text{telhado}}$  é o coeficiente de *runoff* do telhado comum (0,95);

$A_{\text{restante da célula}}$  é a área da célula que não possui telhado;

$C_{\text{restante da célula}}$  é o coeficiente de *runoff* médio característico da área da célula sem nenhum tipo de cobertura;

$A_{\text{célula}}$  é a área da célula;

$C_{\text{célula}}^{\text{existente}}$  é o coeficiente de escoamento da célula existente, sem considerar a implantação de coberturas verde.

Após a atualização dos valores do coeficiente de escoamento C nas células da bacia do rio Joana, foram feitas as simulações no modelo do canal do Mangue, para as chuvas de projeto associadas aos tempos de recorrência de 10 e 25 anos. Assim, os cenários simulados são os apresentados no Quadro 6.2.

Quadro 6.2 – Cenários avaliados.

| <b>Simulações Realizadas</b>                                                         |
|--------------------------------------------------------------------------------------|
| <b>Cenário 1:</b> Chuva de projeto (TR 10 anos), considerando a situação atual;      |
| <b>Cenário 2:</b> Chuva de projeto (TR 10 anos), aplicando telhados verdes na bacia; |
| <b>Cenário 3:</b> Chuva de projeto (TR 25 anos), considerando a situação atual;      |
| <b>Cenário 4:</b> Chuva de projeto (TR 25 anos), aplicando telhados verdes na bacia. |

Cabe destacar que a modelagem da bacia em tela, considerando a aplicação de telhados verdes possui as seguintes limitações:

- a) Os experimentos foram realizados para chuvas consideradas constantes nas faixas de 50 e 100 mm/h, não sendo chuvas correspondentes às chuvas de projetos reais, associadas aos tempos de recorrência de 10 e 25 anos aqui utilizados na modelagem. Considerando tratar-se de chuva intensa, foi adotado para o valor de C correspondente às áreas de telhados verdes, o valor mais favorável encontrado na fase experimental, de 0,65. Observa-se que se trata de um fator que não é constante durante toda a chuva;
- b) A suposição feita em (a) considera que os telhados podem ser otimizados para garantir que a camada drenante de argila funcione como reservatório e gere uma retenção por absorção na argila expansiva – para isso é preciso regular a saída do telhado, de modo a controlar a vazão para as chuvas de projeto consideradas.
- c) As áreas de telhado de cada célula e, destas, as que podem ser implantados coberturas verdes são apenas uma estimativa, podendo os valores serem alvo de uma avaliação melhor, a partir de novas considerações, observações locais, novas construções para a área, etc.;
- d) Na simulação em questão, é considerado que em todos os locais onde poderiam ser instalados telhados verdes, os mesmos seriam implantados de modo igual, e apresentando o mesmo coeficiente de *runoff* de 0,65, situação muito pouco provável de acontecer.

## **7 RESULTADOS DO ESTUDO DE CASO**

### **7.1 MAPAS DE INUNDAÇÃO DA BACIA PARA OS CENÁRIOS CONSIDERADOS**

As figuras que seguem (Figura 7.1 até Figura 7.4) apresentam os mapas de inundação da sub-bacia do rio Joana, a partir do modelo calibrado e validado já existente para a bacia do canal do Mangue, frente às chuvas de projeto associadas aos tempos de recorrência de 10 e 25 anos, para o cenário atual (Figuras 7.1 e 7.3) e com as alterações propostas (Figuras 7.2 e 7.4), considerando a instalação de coberturas verdes, conforme metodologia descrita no item 6.3 deste trabalho.

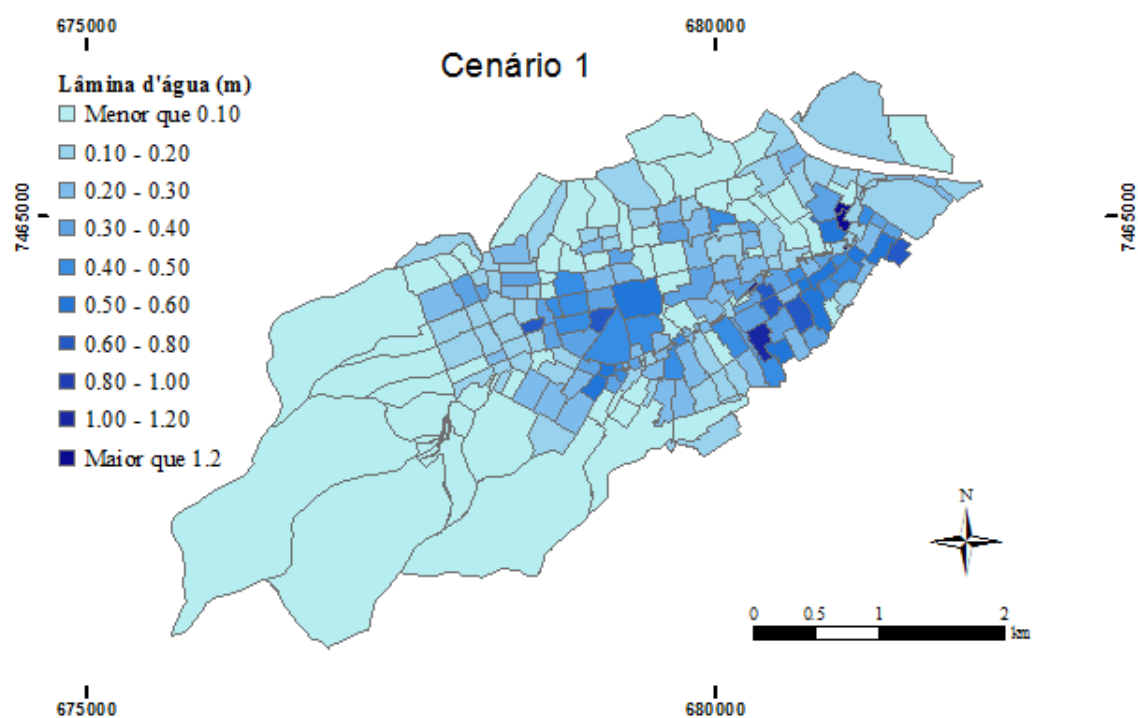


Figura 7.1 – Cenário 1 (Chuva TR10, situação atual).

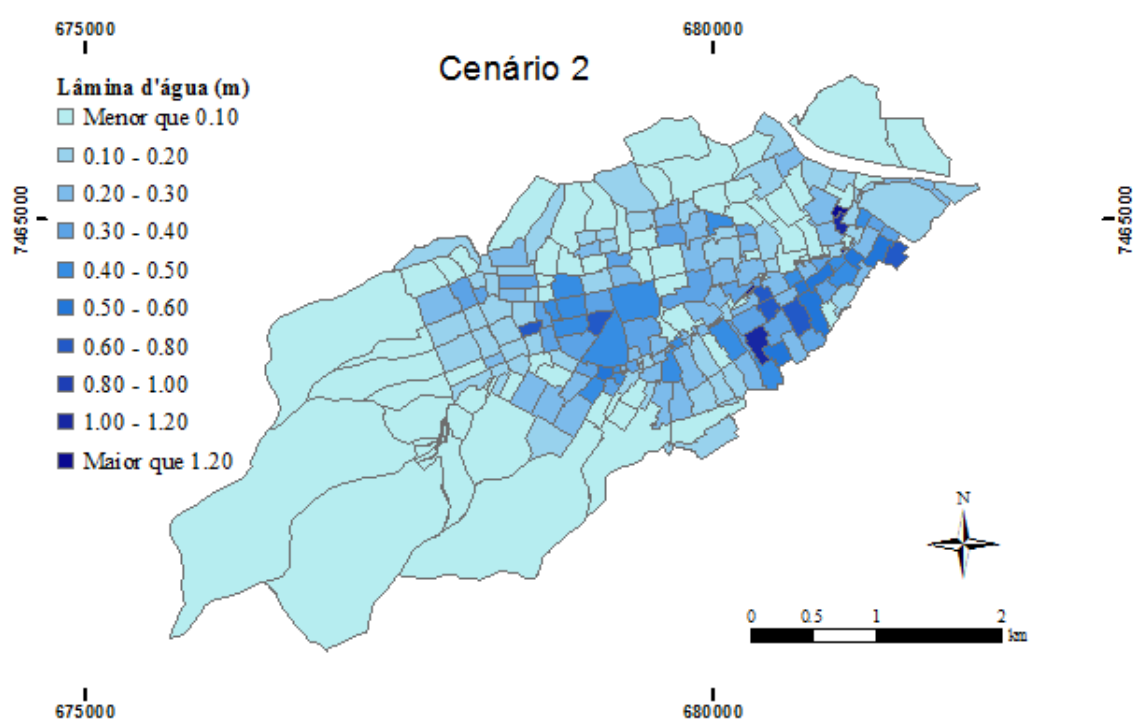


Figura 7.2 – Cenário 2 (Chuva TR10, considerando a adoção de telhados verdes).

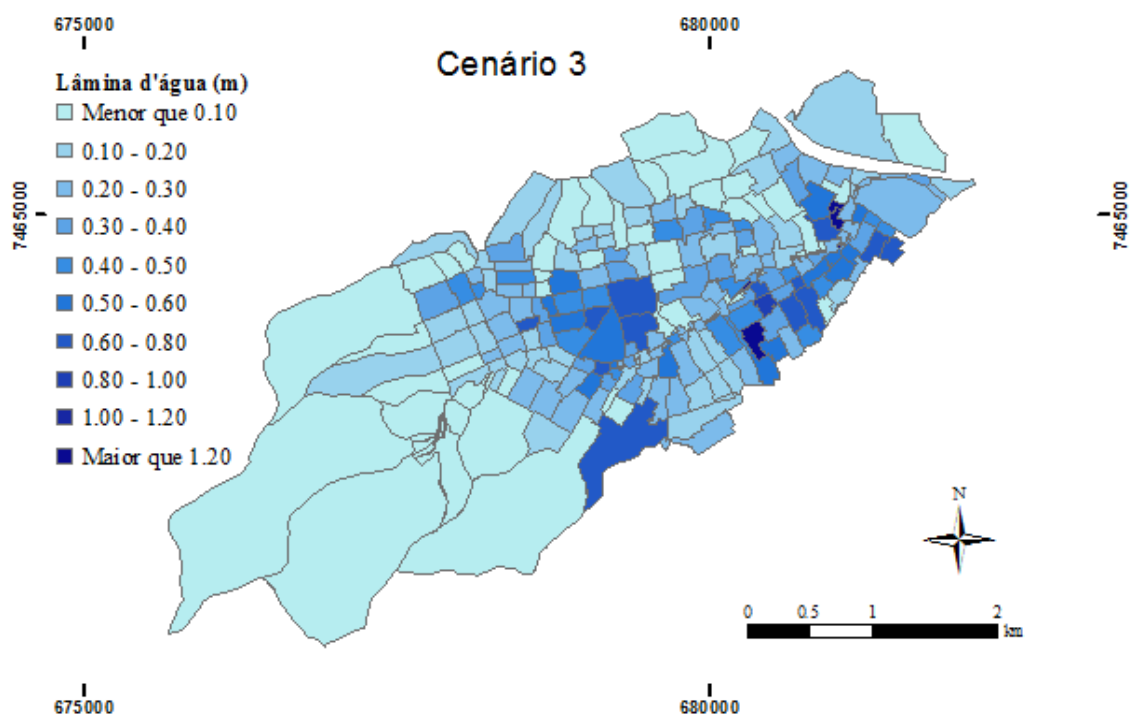


Figura 7.3 – Cenário 3 (Chuva TR25, situação atual).

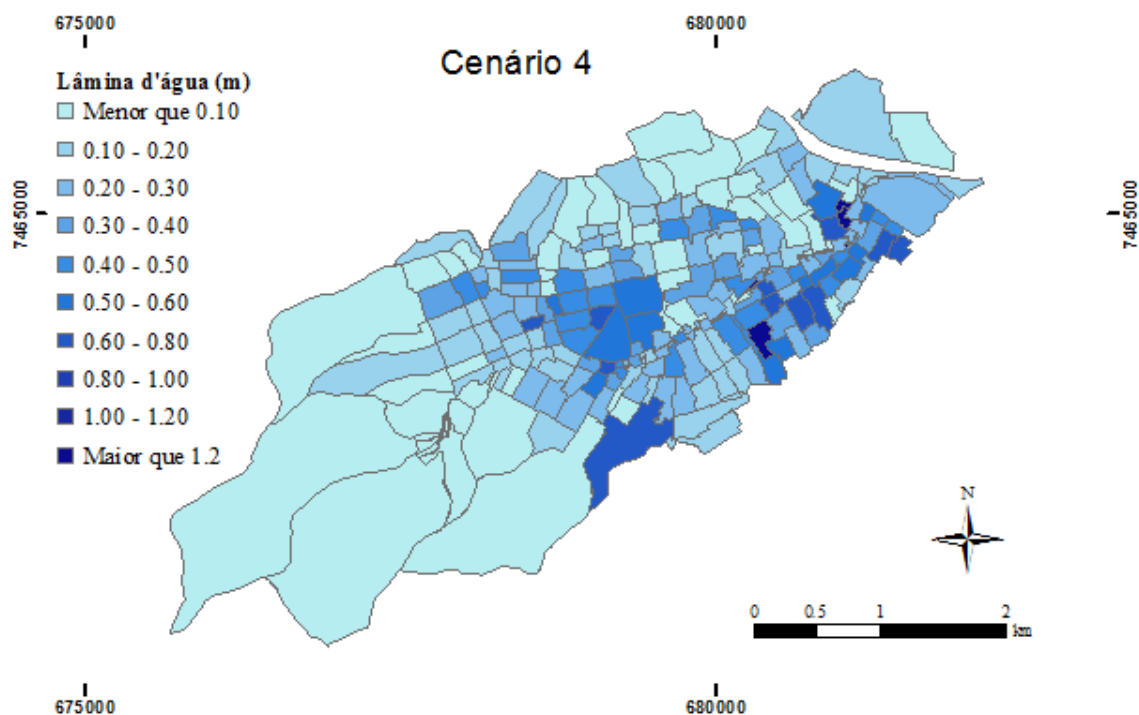


Figura 7.4 – Cenário 4 (Chuva TR25, considerando a adoção de telhados verdes).

## **7.2 DISCUSSÃO E COMENTÁRIOS GERAIS SOBRE OS RESULTADOS OBTIDOS PARA A BACIA**

Observando os mapas com as manchas de inundação para os cenários estabelecidos, pode-se constatar que a influência dos telhados verdes, considerando apenas sua capacidade de transformar chuva em escoamento superficial, é pouca, na escala da bacia alvo de estudo. Destacam-se apenas poucas células isoladas que tiveram uma mudança significativa em sua lâmina d'água.

Sobre essa constatação cabe destacar que a bacia estudada é uma bacia crítica, que devido à alta densidade de ocupação em sua área de planície e ao subdimensionamento atual das redes de drenagem existentes, a mesma torna-se uma área com graves problemas de inundações. Sendo assim, pode-se dizer que já era esperado que apenas uma medida com efeito concentrado apenas na escala dos lotes, que é o proposto neste trabalho, não seria, de modo isolado, suficiente para resolver a problemática da bacia em tela. Porém, é uma medida de apoio que pode, ao longo do tempo, dar suporte aos projetos de drenagem urbana sustentável, reduzindo a contribuição de novos empreendimentos para o sistema de drenagem.

Acredita-se que o efeito das coberturas verdes na bacia pode ser potencializado se for considerado no modelo os atrasos na geração de escoamento superficial, promovidos por estes tipos de coberturas e se for incentivado o uso desta medida em mais larga escala, inclusive com a substituição, ao longo do tempo, de telhados hoje inapropriados para sua implantação.

Pode-se supor que o efeito dos telhados verdes poderá ser maior para chuvas de menor volume e a própria configuração do telhado precisa ser otimizada para maiores retenções. Testes com novas alturas de camada drenante, outras plantas e outros substratos podem ser testados – há uma diversidade de possibilidades a ser explorada.

## **8 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES**

### **8.1 CONSIDERAÇÕES GERAIS**

O presente estudo pretendeu apresentar o impacto da adoção de coberturas verdes em uma bacia hidrográfica situada no município do Rio de Janeiro. Para isto, esta pesquisa dividiu-se em duas partes: uma experimental, com o objetivo de descrever o comportamento de um protótipo de cobertura verde, construído para a presente pesquisa e, outra, de modelagem matemática, para apresentar a implicação da adoção de telhados verdes similares ao construído em escala piloto na bacia hidrográfica do rio Joana, situada na Região Metropolitana da Cidade do Rio de Janeiro.

Cabe destacar que os resultados apresentados nesta pesquisa se referem a um telhado verde específico, com uma dada configuração de camadas estabelecida. Mesmo que este se assemelhe em muito a configurações extensivas que são implantadas em alguns locais, a extrapolação dos resultados aqui obtidos para valores a serem adotados em projeto não é recomendável, visto que cada telhado verde tem um determinado comportamento, de acordo com sua concepção. Na verdade, uma questão que se destaca nesta pesquisa é a percepção de como cada decisão de projeto sobre a configuração do telhado verde pode afetar seu resultado: a vegetação escolhida, o tipo e altura do substrato, o tipo e altura do material drenante, a possibilidade de incorporar o efeito de amortecimento, por exemplo, são elementos capazes de alterar significativamente o comportamento de cada telhado verde.

### **8.2 CONSIDERAÇÕES ESPECÍFICAS**

Diversas são as referências bibliográficas que trazem as coberturas verdes como sendo, além de uma prática sustentável na construção civil, uma técnica compensatória em drenagem urbana, que busca trazer ao contexto urbano recuperação de parcelas do ciclo hidrológico que foram perdidas (interceptação vegetal, evapotranspiração e infiltração) com a impermeabilização dos espaços no processo de urbanização, e atuar na redução da geração de escoamentos superficiais em eventos de chuvas intensas, que, sem tal redução (ou até com ela), acabam provocando as enchentes, que são responsáveis por perdas econômicas, ambientais e, nos piores casos, de vidas humanas.

A pesquisa aqui desenvolvida buscou descrever o comportamento, em escala experimental, de um protótipo de cobertura verde, no que diz respeito aos seus aspectos como técnica compensatória em drenagem urbana, e verificar, a partir de modelagem matemática, o impacto da adoção desta técnica em uma bacia urbanizada.

### **8.2.1 Sobre a parte experimental**

Considerando a configuração de camadas específicas do protótipo de cobertura verde objeto da presente pesquisa, e considerando ainda que na campanha experimental foram validados 10 (dez) ensaios, dos quais 5 (cinco) foram realizados a partir de chuvas constantes com intensidade próxima a 100 mm/h e, outros 5 (cinco), praticados com intensidades de chuva da ordem de 50 mm/h, sendo todas as chuvas com duração de 1 hora e 30 minutos; a partir dos resultados obtidos, pode-se concluir que:

a) Para a caracterização matemática do comportamento da cobertura verde, frente aos eventos simulados, tinha-se conhecimento da intensidade de chuva incidida e do hidrograma de resposta medido em campo. Assim, o problema tratava-se de uma chuva conhecida que entrava em uma “caixa preta” que gerava como resposta um hidrograma proveniente dos dispositivos de saída da camada de drenagem da cobertura verde. A utilização do Princípio de Conservação de Massa; a consideração de um índice de vazios (Iv) característico para a camada de drenagem; a adoção da equação da Hidráulica Clássica para Orifícios, Bocais e Tubos Curtos; e a consideração da capacidade de absorção de água da argila expandida mostrou-se um conjunto de hipóteses e ferramentas razoável para descrever matematicamente o comportamento do protótipo de cobertura verde estudado. Porém, há algumas ressalvas conhecidas e descritas a seguir que podem, futuramente, serem ajustadas de modo mais adequado:

a.1) O índice de vazios (Iv) foi adotado como um fator constante e igual a 0,44. Este valor foi obtido a partir de consulta a referências bibliográficas (FERRARA *et al.*, 2016; ERIKSSON, 2013) que realizaram experimentos com argila expandida similar à adotada no protótipo. Cabe destacar que, para as faixas de intensidade de 50 mm/h, esse valor pode ser considerado válido, visto que somente a camada de drenagem (composta por argila expandida) é atingida pelo nível de água que é formado dentro do protótipo. Porém, para intensidades na faixa de 100 mm/h, verifica-se que o nível d'água ultrapassa a camada de drenagem, chegando a atingir a areia do substrato, portanto, este valor deveria ser corrigido na medida em que o nível de água, devido ao acúmulo da mesma

dentro do protótipo, sobe. Para esta correção ser feita de modo adequado, recomenda-se que o protótipo seja equipado com um aparato capaz de fornecer, a cada instante, a cota de água existentes dentro da CP para validação dos resultados e que ensaios com os materiais (argila expandida e areia) sejam realizados, de modo a validar o valor de seus índices de vazios;

a.2) O coeficiente de descarga ( $C_d$ ), adotado no valor de 0,27, não é um valor encontrado em referências bibliográficas, embora seja razoável o seu ajuste, em função de perdas de carga esperadas para a configuração do experimento realizado: para o caso em tela destaca-se que os orifícios de saída da camada de drenagem, são cobertos, por dentro, pela face leste do protótipo, por manta bidim e argila expansiva, o que restringe a área de escoamento e que, além disso, após percorrer um percurso de aproximadamente 10 cm em tubulação PVC com diâmetro de 1", a água escoar para a calha coletora através de uma torneira, que restringe o escoamento para uma seção com diâmetro de 8 mm. Considerando isso, o coeficiente  $C_d$  foi ajustado a partir da observação dos hidrogramas medidos nos ensaios experimentais. Portanto, o coeficiente foi utilizado como objeto de calibração do modelo, para representação das condições medidas. As condições hidráulicas de saída de água do protótipo, pela configuração existente, pode ser alvo de estudos mais detalhados, mas, para uma primeira análise, a proposta apresentada nesta pesquisa mostra-se aceitável.

b) Para fins de projeto, pode-se concluir que:

b.1) Para as chuvas na faixa de 50 mm/h, não há significativo amortecimento da vazão de pico, só uma redução do volume escoado devido à interceptação vegetal, estimado, em média, no valor 15%. Assim, a partir do momento em que a capacidade de retenção das bromélias é superada, as vazões que precipitam ao sistema são praticamente as mesmas escoadas para a rede de drenagem. Portanto, para otimizar esta configuração, seria necessário restringir a saída do telhado, provendo dispositivos de saída com menor capacidade de descarga, de modo a potencializar o efeito de reservatório;

b.2) Para as chuvas com intensidades na ordem de 100 mm/h, é possível considerar que há um amortecimento da vazão de pico e uma retenção adicional (promovida pela argila expandida), em média da ordem de 35% (que, de acordo com os ensaios experimentais, variou de 33% à 35%). Esse resultado decorre da insuficiência hidráulica das saídas existentes na camada de drenagem, que fazem com que a água acumule dentro do sistema, sendo, absorvida, em parte, pelos materiais que constituem o telhado verde.

### 8.2.2 Sobre a parte de modelagem matemática da bacia do rio Joana

Somente a simples substituição do coeficiente de *runoff*, para um valor menor, nas áreas em que se propõe a instalação de coberturas verdes é uma simplificação que pode ser considerada uma primeira aproximação, para fins de modelagem na escala da bacia.

Vale fazer uma breve comparação entre os valores de coeficientes de *runoff* adotados nas simulações realizadas e aqueles encontrados na literatura. Cada célula tem uma composição entre áreas construídas diversas, áreas livres e resquícios de áreas verdes naturais. Para cada célula, então, faz-se uma composição de coeficientes de *runoff* em função de cada área e atribui-se um valor médio representativo. Com o objetivo de utilizar o valor experimental obtido em bancada, foram avaliadas, em cada célula, as áreas que correspondem às coberturas, de forma geral, e as áreas dentre as de cobertura que poderiam ser naturadas. Os resultados experimentais apontaram o valor de 0,65 para o coeficiente de *runoff* referente ao módulo de cobertura verde estudado, valor este adotado nas áreas correspondentes a coberturas verdes no modelo matemático, em substituição à parcela que antes era ponderada com coeficiente de *runoff* igual a 0,95 (coberturas tradicionais impermeáveis). Nota-se que este valor de 0,65, de acordo com Wilken (1978), corresponde a “urbanização não muito densa, com partes residenciais de baixa densidade de habitações, mas com ruas e calçadas pavimentadas”, ou seja, trata-se de um valor ainda tipicamente urbano, embora reduza o peso da impermeabilização completa dada por coberturas tradicionais. Portanto, a substituição de coberturas tradicionais por verdes, em uma cidade, é um fator de melhora do quadro geral, com vários outros possíveis benefícios, mas não se pode esperar que, sozinho, seja capaz de equacionar o problema de inundações.

Assim, observa-se que o fenômeno é mais complexo e poderia ser representado de forma mais sofisticada em uma pesquisa que focasse apenas no detalhamento do modelo em escala de bacia.

Pode-se também concluir que outras considerações e formas de representar os telhados verdes no modelo matemático da bacia devem ser pensadas, de modo que transpareça, nos mapas de inundação, uma representação mais efetiva (inclusive com tempos de retardo, que não foram introduzidos na representação simulada).

Outro ponto que merece destaque é que a bacia estudada trata de uma região que, historicamente, apresenta graves problemas de drenagem urbana e que já era previamente considerado que apenas a solução aqui proposta (de adoção de coberturas verdes) não

seria suficiente para a solução da problemática. Outras práticas, mais robustas e integradas, de manejo de águas urbanas na bacia devem ser pensadas e projetadas.

### **8.3 CONTRIBUIÇÕES**

Esta pesquisa tem como contribuições: o relato da experiência de construção de um telhado verde, mesmo que em escala experimental; e a descrição de ensaios experimentais que podem ser realizados em módulos de coberturas verdes, com a apresentação de diversas dificuldades que podem ser enfrentadas na campanha experimental. A compreensão do funcionamento do telhado e a representação do ensaio através de um modelo matemático trouxeram novos argumentos para discussão – como a capacidade de retenção das argilas, atuando significativamente no resultado de redução de vazão, quando a interceptação vegetal estava esgotada e a longa e intensa chuva tenderia a produzir vazões de saída iguais às vazões de entrada no protótipo. Além disso, apresentou uma aplicação desta tecnologia, na escala da bacia hidrográfica, o que ainda não é comum de ser observada no país.

Para a realização de trabalhos futuros no módulo experimental estudado, esta pesquisa contribui pelo fato de já apresentar: as características geométricas do módulo e a composição de cada camada; uma proposta inicial de modelo matemático para caracterizar o comportamento do protótipo frente aos eventos considerados; os hidrogramas de resposta medidos na CP para eventos de chuvas nas faixas de 50 e 100 mm/h, com duração de 1,5 horas; e o cálculo dos valores de coeficientes de *runoff* para esses eventos. A discussão está aberta e a comparação com outras configurações é uma sugestão para ganhar ainda mais aprendizagem nesta técnica.

### **8.4 RECOMENDAÇÕES E SUGESTÕES PARA PESQUISAS FUTURAS**

#### **8.4.1 Sobre a parte experimental**

Como recomendações para realização de uma melhor caracterização do comportamento do protótipo de telhado verde alvo da presente pesquisa, visto as diversas variáveis que influenciam na sua capacidade de retenção de água de chuva, sugere-se que:

- a) Seja quantificado o volume total de água que pode ser retido nas bromélias existentes no módulo de telhado verde. Este volume pode ser obtido através do preenchimento total das bromélias com água e retirada, com uma seringa graduada de toda a água existente em seus tanques;
- b) A partir do item (a), seja estabelecido um índice de armazenamento das bromélias por m<sup>2</sup> de telhado verde;
- c) Outros parâmetros que caracterizem o substrato sejam obtidos, como o índice de vazios e porosidade, com o objetivo de verificar a influência desses parâmetros na resposta do telhado verde a um dado evento de chuva;
- d) Seja verificada, a partir de ensaios somente com a argila expansiva, a capacidade que este material tem em reter água;
- e) Realizar ensaios experimentais para verificação do valor do coeficiente de descarga “C<sub>d</sub>” associado a torneiras;
- f) Em parceria com o Laboratório de Fisiologia Vegetal do Departamento de Botânica do Instituto de Biologia da UFRJ, seja verificada a possibilidade da realização de ensaios para caracterizar os valores de evapotranspiração das bromélias, para que o mesmo seja considerado no balanço hídrico do sistema.

Destaca-se que existem diversos estudos que podem ser realizados utilizando o módulo de cobertura verde construído no âmbito da presente pesquisa. Como recomendações para a realização de pesquisas futuras, sugere-se:

- a) A realização de ensaios experimentais considerando outros eventos de chuva, com intensidades e durações diferentes das realizadas no presente estudo;
- b) A realização de ensaios experimentais com uma das torneiras fechadas, para as condições de chuva já ensaiadas nesta pesquisa, para avaliar o efeito de armazenamento que pode ser conseguido com esta restrição de descarga;
- c) O estabelecimento de um coeficiente de escoamento do telhado verde em função do tempo de chuva, ou seja, um C(t);
- d) A utilização de equações de infiltração (Green e Ampt, Kostikov, Horton, Philip, por exemplo) para descrever o comportamento da água no substrato;
- e) Buscar relações entre variáveis meteorológicas e o comportamento da cobertura verde;
- f) A melhoria do modelo matemático estabelecido nesta pesquisa para descrever o comportamento do protótipo, adicionando outras variáveis que influenciem na descarga de escoamento superficial pela cobertura verde;

g) Avaliar o custo-benefício associado à adoção desta tecnologia, através da verificação do custo de implantação de um telhado verde com esta configuração e dos benefícios que o mesmo pode trazer;

h) A verificação, a partir de amostras de água coletadas dos tanques das bromélias no verão, da existência, ou não de larvas de mosquitos que transmitem a dengue. A análise das amostras da água armazenada no tanque das bromélias pode ser feita em parceria com o Laboratório de Fisiologia Vegetal do Departamento de Botânica do Instituto de Biologia da UFRJ.

A partir da experiência com os ensaios experimentais realizados no âmbito da presente pesquisa, caso exista a possibilidade da execução de algumas alterações na configuração do protótipo construído, sugere-se:

a) A execução de um protótipo de telhado de referência (telha, laje de concreto, etc.) para a comparação dos valores de escoamento superficial obtidos entre os dois protótipos;

b) A automatização das medições na Caixa Pluviômetro, por sensores, o que reduziria de modo significativo os erros de leituras obtidos atualmente na régua acoplada;

c) Instalação de estação meteorológica no CESA/UFRJ, que indique valores de temperatura, umidade e evaporação;

d) A cobertura da calha coletora, bem como da Caixa Pluviômetro e de sua entrada, para a realização de experimentos com chuvas reais;

e) O aumento das tubulações de saída da camada de drenagem da cobertura verde, podendo até ser considerada a implantação de mais saídas;

f) A instalação de um aparato para a medição das alturas da lâmina d'água no interior do protótipo.

Adicionalmente, novas configurações de telhado devem também ser testadas, na busca por uma configuração que possa otimizar a redução do coeficiente de *runoff*.

#### **8.4.2 Sobre a parte de modelagem matemática**

No que diz respeito a modelagem matemática realizada para estudar a influência da adoção de coberturas verdes em uma bacia hidrográfica, recomenda-se para pesquisas futuras:

a) A consideração das obras de drenagem implantadas na bacia do canal do Manguê no modelo matemático da bacia;

b) A utilização de telhados verdes não só com a configuração apresentada nesta pesquisa, mas também com outras configurações, espalhados pela bacia, de modo a representar um cenário mais factível;

c) Além de considerar apenas a adoção de coberturas verdes, também sejam simulados cenários considerando a adoção de outras técnicas compensatórias, como, por exemplo, pavimentos permeáveis, para completar a ação de redução de escoamentos em escala local, mas também a introdução de reservatórios, de detenção e/ou retenção, para avaliar a complementariedade destas medidas;

d) A inserção, no modelo matemático, de um valor de coeficiente de escoamento superficial que possa ser variável com o tempo.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABDEL-DAYEM, S., ABDEL-GAWAD, S., FAHMY, H., 2007, “Drainage in Egypt: A story of determination, continuity, and success”, *Irrigation and Drainage*, v. 56, p. S101-S-222.

ALERTA RIO. Disponível em: <<http://alertario.rio.rj.gov.br/>>, acesso em 05 de maio de 2016.

ALVES SOBRINHO, T. A., FERREIRA, P. A., PRUSKI, F. F., 2002, “Desenvolvimento de um infiltrômetro de aspersão portátil”, *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, v. 6, n. 2, p. 337-344, Campina Grande, PB, Brasil.

ALVES SOBRINHO, T. A., GÓMEZ-MACPHERSON, H., GÓMEZ, J. A., 2008, “A portable integrated rainfall and overland flow simulator”, *Soil Use and Management*, v. 24, p. 163-170.

ALVES SOBRINHO, T. A., 2012, *Manual do Simulador de Chuva Portátil InfiAsper – Double*, UFMS, Campo Grande, MS, Brasil.

AMBIENTALISTAS EM REDE, 2015, *O telhado verde de Le Corbusier*. Disponível em: <<http://ambientalistasemrede.org/o-telhado-verde-de-le-corbusier/>>, acesso em 3 de novembro de 2015.

AMEC – Earth and Environmental Center for Watershed Protection, 2001, *Georgia Stormwater Management Manual*, v. 2, First Edition, Atlanta, GA, USA. Disponível em: <<http://documents.atlantaregional.com/gastormwater/GSMMVol2.pdf>>, acesso em 10/09/2015.

ANDOH, R. Y. G., DECLERCK, C., 1999, “Source Control and Distributed Storage – A Cost Effective Approach to Urban Drainage for the New Millennium?”, In: *Proceedings of the 8th International Conference on Urban Storm Drainage*, Sydney, AUS.

ANDOH, R. Y. G., IWUGO, K. O., 2002, “Sustainable Urban Drainage Systems: A UK Perspective”. In: *Proceedings of the 9th International Conference on Urban Drainage*, Portland, Oregon, USA.

ANGELAKIS, A. N., KOUTSOYIANNIS, D., 2003, “Urban water resources management in Ancient Greek times”, In: *The Encycl. Of Water Sci.*, Markel Dekker Inc., B. A. Stewart and T. Howell (eds), New York, USA, p. 999-1008.

ANGELAKIS, A. N., KOUTSOYIANNIS, D., PAPANICOLAOU, P., 2012, “On the Geometry of the Minoan Water Conducts”, In: *IWA Specialized Conference on Water & Wastewater Technologies in ancient Civilizations*, Istanbul, TR.

ANGELAKIS, A. N., ZHENG, X. Y., 2015, “Evolution of Water Supply, sanitation, Wastewater, and Stormwater Technologies Globally”, *Water*, 7, p. 455-463.

AOYAMA, E. M., GONTIJO, A. B. P. L., FARIA, D. V., 2012, “Propagação em Bromeliaceae: Germinação de sementes e cultivo in vitro”, *Enciclopédia Biosfera*, Centro Científico Conhecer, v. 8, n. 15, p. 1452-1471, Goiânia, GO, Brasil.

ARAÚJO, T. C., 2011, *Civilização Mesopotâmica*. Disponível em: <<http://vivendo-historia.blogspot.com.br/2011/04/1-ano-mesopotamia.html>>, acesso em 12 de dezembro de 2015.

ARAÚJO, S. R., 2007, *As funções dos telhados verdes no meio urbano, na gestão e no planejamento de recursos hídricos*, Projeto Final de Graduação, Instituto de Florestas/UFRJ, Seropédica, RJ, Brasil.

ARCHIKEY, [entre 2000 e 2016], *Villa Savoye (image by Nick)*. Disponível em: <<http://archikey.com/building/read/2763/Villa-Savoye/555/>>, acesso em 9 de janeiro de 2016.

ARRUDA, J. J. A., PILLETI, N., 2000, *Toda a História: História Geral e História do Brasil*, 8ª edição, São Paulo: Editora Ática.

ASCSA Digital Collections, [1997?], *Agora Image: 1997.04.0289 (85-342): Section of the Great Drain opposite the Eponymous Heroes, interior view*. Disponível em: <<http://agora.ascsa.net/id/agora/image/1997.04.0289>>, acesso em 12 de dezembro de 2015.

ASCSA Digital Collections, [2000?], *Agora Image: 2000.03.0008: Aerial view of the Monument of the Eponymous Heroes at right; the Main Channel of the Great Drain at left*. Disponível em: <<http://agora.ascsa.net/id/agora/image/2000.03.0008>>, acesso em 12 de dezembro de 2015.

ASCSA Digital Collections, [2000?], *Agora Image: 2000.03.0008: Aerial view of the Monument of the Eponymous Heroes at right; the Main Channel of the Great Drain at left*. Disponível em: <<http://agora.ascsa.net/id/agora/image/2000.03.0008>>, acesso em 12 de dezembro de 2015.

AS CIVILIZAÇÕES DOS GRANDES RIOS, 2012. Disponível em: <<http://28navegadores.blogspot.com.br/2012/11/as-civilizacoes-dos-grandes-rios.html>>, acesso em 13 de novembro de 2015.

ATLAS HISTÓRICO, 1977, São Paulo: Encyclopaedia Britannica.

ATLAS OBSCURA, 2016, *Waldspirale - A German apartment building hosting as many trees as human occupants*. Disponível em: <<http://www.atlasobscura.com/places/waldspirale>>, acesso em 9 de janeiro de 2016.

BAHIENSE, J. M., 2013, *Avaliação de técnicas compensatórias em drenagem urbana baseadas no conceito de desenvolvimento de baixo impacto, com o apoio de modelagem matemática*, Dissertação de Mestrado, COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.

BAHRI, A., 2012, Integrated Urban Water Management, *Global Water Partnership (GWP) Technical Committee (TEC) Background Paper No 16*, Global Water Partnership, Stockholm, Sweden.

BAIK, J., KWAK, K., PARK, S., RYU, Y., 2012, “Effects of building roof greening on air quality in street canyons”, *Atmospheric Environment*, v. 61, p. 48-55.

BAPTISTA, M. B., NASCIMENTO, N. O., 2002, “Aspectos Institucionais e de Financiamento dos Sistemas de Drenagem Urbana”, *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, v. 7, n. 1, p. 29-49.

BAPTISTA, M. B., NASCIMENTO, N. O., BARRAUD, S., 2005, *Técnicas Compensatórias em Drenagem Urbana*, 1ª edição, ABRH, Porto Alegre, RS, Brasil.

BAPTISTA, M. B., NASCIMENTO, N. O., BARRAUD, S., 2015, *Técnicas Compensatórias em Drenagem Urbana*, 2ª reimpressão da 2ª edição, ABRH, ISBN 9788588686311, Porto Alegre, RS, Brasil.

BEECHAM, S., CHOWDHURY, R., 2012, “Effects of changing rainfall patterns on WSUD in Australia”, *Water Management*, v. 165, p. 285-298.

BENEVOLO, L., 2015, *História da Cidade*, 6ª edição, Editora Perspectiva, ISBN 978-85-273-0100-8, São Paulo, SP, Brasil.

BERARDI, U., GHAFARIANHOSEINI, A., GHAFARIANHOSEINI, A., 2014, “State-of-the-Art Analysis of the Environmental benefits of Green Roofs”, *Applied Energy*, v. 115, p. 411-428.

BERNDTSSON, J. C., BENGTSSON, L., JINNO, K., 2009, “Runoff water quality from intensive and extensive vegetated roofs”, *Ecological Engineering*, v. 35, p. 369-380.

BERNDTSSON, J. C., 2010, “Green roof performance towards management of runoff water quantity and quality: A review”, *Ecological Engineering*, v. 36, p. 351-360.

BETHMANN, N., [entre 2007 e 2013], *Neoregelia unknown* (maybe pascoalina x marmorata) - Trade from neighbor (200806). Disponível em: <[http://www.bocabromeliads.com/nick/Neoregelia/unknown\\_p\\_m/](http://www.bocabromeliads.com/nick/Neoregelia/unknown_p_m/)>, acesso em 28 de março de 2016.

BIBLIA ONLINE, 2015a, *Deuteronômio* 23. Disponível em: <<https://www.bibliaonline.com.br/nvi/dt/23>>, acesso em 12 de dezembro de 2015.

BIBLIA ONLINE, 2015b, *O Livro de Deuteronômio*. Disponível em: <<http://www.bibliaonline.net/esboco/colecao.cgi?5>>, acesso em 12 de dezembro de 2015.

BLISS, D. J., NEUFELD, R. D., RIES, R. J., 2009, “Storm water runoff mitigation using a green roof”, *Environmental Engineering Science*, v. 26, p. 407-417.

BONFIGLIOLI, G., 2011, “Stuttgart tem 60% de cobertura verde”, *Estadão*. Disponível em: <<http://sustentabilidade.estadao.com.br/noticias/geral,stuttgart-tem-60-de-cobertura-verde,683174>>, acesso em 13 de novembro de 2015.

BORGES, S. R. G., 2013, *Intervenções em Bacias Hidrográficas Urbanas no Rio de Janeiro: O Desvio do Rio Joana e Reservatórios*, Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-graduação em Engenharia Urbana e Ambiental/PUC-Rio, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.

BRAGA, B., ESPANHOL, I., CONEJO, J. G. L., MIERZWA, J. C., BARROS, M. T. L., SPENCER, M., PORTO, M., NUCCI, N., JULIANO, N., EIGER, S., 2005, *Introdução a Engenharia Ambiental: O desafio do desenvolvimento sustentável*, 2ª edição, Pearson Prentice Hall, ISBN 978-85-7650-041-4, São Paulo, SP, Brasil. Disponível em: <<http://pt.slideshare.net/IcaroAbreu/eng-introducao-a-engenharia-ambiental-benedito-braga>>, acesso em 10/09/2015.

BRASIL, Ministério da Saúde, 2004, Portaria MS nº 518, de 25 de março de 2004, que estabelece os procedimentos e responsabilidades relativos ao controle e vigilância da qualidade da água para consumo humano e seu padrão de potabilidade, e dá outras providências.

BRASIL, Ministério das Cidades, 2006, *Programa Drenagem Urbana Sustentável*, Manual para apresentação de propostas. 23 p.

BRASIL, 2007, *Lei Federal 11.445*, de 5 de janeiro de 2007, que estabelece diretrizes nacionais para o saneamento básico.

BRASIL, Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento, 2009, *Glossário ilustrado de morfologia*. Disponível em: <[http://www.agricultura.gov.br/arq\\_editor/file/10829\\_glossario\\_ilustrado\\_morfologia-2.pdf](http://www.agricultura.gov.br/arq_editor/file/10829_glossario_ilustrado_morfologia-2.pdf)>, acesso em 28 de março de 2016.

BRASIL, 2012, *Lei Federal 12.651*, de 25 de maio de 2012, que dispõe sobre a proteção da vegetação nativa; altera as Leis nos 6.938, de 31 de agosto de 1981, 9.393, de 19 de dezembro de 1996, e 11.428, de 22 de dezembro de 2006; revoga as Leis nos 4.771, de 15 de setembro de 1965, e 7.754, de 14 de abril de 1989, e a Medida Provisória no 2.166-67, de 24 de agosto de 2001; e dá outras providências.

BRASIL, 2016, *Lei Federal 13.308*, de 6 de julho de 2016, que altera a Lei nº 11.445, de 5 de janeiro de 2007, que estabelece diretrizes nacionais para o saneamento básico, determinando a manutenção preventiva das redes de drenagem pluvial.

BRUNI, J. C., 1994, A água e a vida, *Tempo Social*, Rev. Sociol. USP, São Paulo, 5(1-2): 53-65. Disponível em: <<http://www.fflch.usp.br/sociologia/temposocial/site/>>, acesso em 10/09/2015.

BRUNO, M., 2016, *Projeto da bancada experimental de telhado verde para estudo de retenção e retardo de águas pluviais*, Projeto Final de Graduação, Escola Politécnica/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.

BUDEL, M. A., 2014, *Estudo Comparativo da Qualidade da Água de Chuva Coletada em Cobertura Convencional e em Telhado Verde*, Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil/UTFPR, Curitiba, PR, Brasil

BURIAN, S. J., EDWARDS, F. G., 2002, “Historical Perspectives of Urban Drainage”, *Global Solutions for Urban Drainage*, p. 1-16, Portland, OR, USA.

BUTLER, D., DAVIES, J. W., 2004, *Urban Drainage*, 2ª edição, ISBN 0203149696, Londres e Nova Iorque.

CAETANO, F. D. N., TIBIRIÇÁ, A. C. G., SANTOS, G. L. A. A., 2010, “Sistema de cobertura verde para uma edificação na área de saúde numa IFES”, *XIII Encontro Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído*, Canela, RS, Brasil.

CAMARGO, C., 2013, *O Palácio de Inverno dos Czars somente para você!* Disponível em: <<http://www.sendocry.com/2013/08/hermitage.html>>, acesso em 9 de janeiro de 2016.

CAMPOS, R. O. G., 2001, *Inundações Urbanas: Considerações Gerais e Modelação Matemática com Incorporação da Obstrução por Resíduos Sólidos*, Dissertação de Mestrado, COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 2001.

CANERO, R. F., REDONDO, P. G., 2010, “Green Roof as a Habitat for Birds: A Review”, *Journal of Animal and Veterinary Advances*, v. 15, p. 2041-2052. Disponível em: <<http://www.medwelljournals.com/fulltext/?doi=javaa.2010.2041.2052>>, acesso em 11/11/2015.

CANNIZZARO, P. R., 2014, *As maravilhas do Império Romano – Parte 4* (Publicada em 24/03/2014). Disponível em: <<http://www.paulocannizzaro.com.br/post.asp?id=103&t=as-maravilhas-do-imprio-romano-parte-4>>, acesso em 12 de dezembro de 2015.

CANHOLI, A. P., 2014, *Drenagem urbana e controle de enchentes*, 2ª edição, Oficina de Textos, ISBN 978-85-7975-160-8, São Paulo, SP, Brasil.

CARNEIRO, P. R. F., MIGUEZ, M. G., 2011, *Controle de Inundações em Bacias Hidrográficas Metropolitanas*, 1ª edição, Annablume, ISBN 978-85-391-0227-3, São Paulo, SP, Brasil.

CARVALHO JÚNIOR, M. M., 2013, *Metodologia para Determinação das Áreas De Preservação Permanente das Margens de Cursos D'água: Um Estudo de Caso na Bacia do Rio Piabanha*, Dissertação de Mestrado, COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.

CATUZZO, H., 2013, *Telhado Verde: Impacto Positivo na Temperatura e Umidade do Ar. O Caso da Cidade de São Paulo*, Tese de Doutorado, Faculdade de Filosofia, Letras e Ciências Humanas/USP, São Paulo, SP, Brasil.

CHINEN, N., CABRA, P. L., 2002, *Os Rios e As Cidades: The Rivers and the cities*, Comemoração à Inauguração do Novo Edifício BankBoston, Forma Comunicação, São Paulo, SP, Brasil.

CHIOTIS, E. D., CHIOTI, L. E., 2014, “Drainage and Sewerage Systems at Ancient Athens, Greece”, In: *Evolution of Sanitation and Wastewater Technologies through the Centuries*, Angelakis, A. N., Rose, J. B. (eds.), IWA Publishing, ISBN 9781780404844, London, UK.

CHOW, V. T., MAIDMENT, D. R., MAYES, L. W., 1994, *Hidrología Aplicada*, McGraw-Hill Interamericana, ISBN 958-600-171-7, Santafé de Bogotá, Colombia.

CIRF – Centro Italiano per la Riqualificazione Fluviale, 2006, *La riqualificazione fluviale in Italia: Linee guida, strumenti ed esperienze per gestire i corsi d'acqua e il territorio*, 1ª ed. A. Nardini, G. Sansoni (curatori) e collaboratori, Mazzanti editore, Venezia, Italia. Disponível em: <[http://www.gruppo183.org/images/files/estratto\\_manuale\\_cirf2006.pdf](http://www.gruppo183.org/images/files/estratto_manuale_cirf2006.pdf)>, acesso em 21/02/2016.

CIRIA – Construction Industry Research and Information Association, 2015, *The SuDS Manual*, London, UK, CIRIA Report No. C753. Disponível em: <[http://www.ciria.org/Memberships/The\\_SuDS\\_Manual\\_C753\\_Chapters.aspx](http://www.ciria.org/Memberships/The_SuDS_Manual_C753_Chapters.aspx)>, acesso em 20/12/2015.

CITY OF TORONTO, [1998-2016], *Green Roofs*. Disponível em: <<http://www1.toronto.ca/wps/portal/contentonly?vgnextoid=3a7a036318061410VgnVCM10000071d60f89RCRD>>, acesso em 18 de janeiro de 2016.

COELHO, L., GARCIA, R., 2009, “Parques e praças são microcosmo de Moscou”, *Folha de São Paulo*. Disponível em: <<http://www1.folha.uol.com.br/folha/turismo/noticias/ult338u609149.shtml>>, acesso em 9 de janeiro de 2016.

COGLIATTI-CARVALHO, L., ROCHA, C. F. D., 1999, “Forma da bromélia depende da luz”, *Ciência Hoje*, v. 26, n. 155, p. 72-74.

COGLIATTI-CARVALHO, L., ROCHA-PESSOA, T. C., NUNES-FREITAS, A. F., ROCHA, C. F. D., 2010, “Volume de água armazenado no tanque de bromélias, em restingas da costa brasileira”, *Acta Botanica Brasilica*, v. 24, n. 1, p. 84-95.

COLLINS, V., 2014, *A Bird's Eye View of Some Treasures of Tuscany*. Disponível em: <<http://valery-collins.co.uk/blog/post/2014-09-28-a-birds-eye-view-of-some-treasures-of-tuscany>>, acesso em 9 de janeiro de 2016.

COMA, J., PÉREZ, G., SOLÉ, C., CASTELL, A., CABZA, L. F., 2016, Thermal assessment of extensive green roofs as passive tool for energy savings in buildings, *Renewable Energy*, v. 85, p. 1106-1115.

CONAMA – Conselho Nacional do Meio Ambiente, 2005, *Resolução nº 357*, de 17 de março de 2005, que dispõe sobre a classificação dos corpos de água e diretrizes ambientais para o seu enquadramento, bem como estabelece as condições e padrões de lançamento de efluentes, e dá outras providências.

CONNELLY, M., HODGSON, M., 2013, “Experimental investigation of the sound transmission of vegetated roofs”, *Applied Acoustics*, v. 74, p. 1136-1143.

CONNELLY, M., HODGSON, M., 2015, “Experimental investigation of the sound absorption characteristics of vegetated roofs”, *Building and Environment*, v. 92, p. 335-346.

COOMBES, P. J., ARGUE, J. R., KUCZERA, G., 1999, “Figtree Place: a case study in water sensitive urban development (WSUD)”, *Urban Water*, v. 1, p. 335-543.

COURI, A., 2015, *Babilônia – Uma civilização contemporânea no passado* (Blog da disciplina História das Artes Visuais 1 da Escola de Belas Artes da UFRJ). Disponível em: <<https://hav120151.wordpress.com/2015/11/27/babilonia-uma-civilizacao-contemporanea-no-passado-2/>>, acesso em 8 de janeiro de 2016.

CRCWSC - Cooperative Research Centre for Water Sensitive Cities, [entre 2012 e 2016]. Disponível em: <<https://watersensitivecities.org.au/>>, acesso em 9 de janeiro de 2016.

CRUZ, M. A. S., SOUZA, C. F., TUCCI, C. E. M., 2007, “Controle da drenagem urbana no brasil: avanços e mecanismos para sua sustentabilidade”, *XVII Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos*, São Paulo, SP, Brasil.

CUNHA, S. P., ALVES, J. R. C., LIMA, M. M., DUARTE, J. R., BARROS, L. C. V., SILVA, J. L., GAMMARO, A. T., MONTEIRO FILHO, O. S., WANZELER, A. R., 2002, “Presença de *Aedes aegypti* em Bromeliaceae e depósitos com plantas no Município do Rio de Janeiro, RJ”, *Revista Saúde Pública*, v. 36, n. 2, p. 244-245, São Paulo, SP, Brasil.

D’ÁLTERIO, C. F. V., 2004, *Metodologia de Cenários Combinados para Controle de Cheias Urbanas com Aplicação à Bacia do Rio Joana*, Dissertação de Mestrado, COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.

DAEE – Departamento de Águas e Energia Elétrica do Estado de São Paulo, CETESB – Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental, 1980, *Drenagem Urbana*, 2ª edição corrigida, São Paulo, SP, Brasil.

DE FEO, G., ANTONIOU, G., FARDIN, H. F., EL-HOGARY, F., ZHENG, X. Y., REKLAITYTE, I., BUTLER, D., YANNOPOULOS, S., AGELAKIS, A. N., 2014, “The Historical Development of Sewers Worldwide”, *Sustainability*, v. 6, p. 3936-3974.

DICIONARIO INFORMAL, [2015?]. Disponível em: <<http://www.dicionarioinformal.com.br/>>, acesso em 13 de novembro de 2015.

DUNNET, N., KINGSBURY, N., 2004, *Planting Green Roofs and Living Walls*, Timber Press, Cambridge, UK.

EMBRAPA – Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária, 1997, *Manual de Métodos de Análise de Solo*, 2ª edição rev. atual., Rio de Janeiro, RJ, Brasil.

E-BIBLIOGRAFIAS, 2014, *Bibliografia Raul Seixas* (Última atualização em 28/08/2014). Disponível em: <[http://www.e-biografias.net/raul\\_seixas/](http://www.e-biografias.net/raul_seixas/)>, acesso em 12 de dezembro de 2015.

E-BIBLIOGRAFIAS, 2015, *Bibliografia Denis Diderot* (Última atualização em 29/10/2015). Disponível em: <[http://www.e-biografias.net/denis\\_diderot/](http://www.e-biografias.net/denis_diderot/)>, acesso em 28 de abril de 2016.

ECOTELHADO. Disponível em: <<https://ecotelhado.com/>>, acesso em 13 de novembro de 2015.

EMILSSON, T., BERNDTSSON, J. C., MATTSON, J. E., ROLF, K., 2007, “Effect of using conventional and controlled release fertiliser on nutrient runoff from various vegetated roof systems”, *Ecological Engineering*, v. 29, p. 260-271.

ENCYCLOPÆDIA BRITANNICA, 2016, *Bertolt Brecht* (Última atualização em 08/02/2016). Disponível em: <<http://www.britannica.com/biography/Bertolt-Brecht>>, acesso em 13 de novembro de 2015.

EP/UFRJ – Escola Politécnica da Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2015. Disponível em: <<http://www.saneamento.poli.ufrj.br/site/pt-br/cesa-ufrj/>>, acesso em 20/12/2015.

ERIKSSON, A. O., 2013, *Water Runoff Properties for Expanded Clay LWA in Green Roofs*, Dissertation, Norwegian University of Science and Technology, Department of Civil and Transport Engineering, Trondheim, NOR. Disponível em: <<http://www.diva-portal.org/smash/get/diva2:661112/FULLTEXT01.pdf>>, acesso em 31/10/2015.

EVANS, T. D., ORMAN, N., 2013, *Urban Drainage and the Water Environment: a Sustainable Future?*, 2ª edição, Foundation for Water Research, Marlow, Inglaterra. Disponível em: <<http://www.fwr.org/urbandnge.pdf>>, acesso em 26/12/2015.

FERRARA, L., CAVERZAN, A., PELED, A., 2016, “Collapsible lightweight aggregate concrete. Part I: material concept and preliminary characterization under static loadings”, *Materials and Structures*, v. 49, p. 1733-1745.

FERREIRA, C. P., 1981, *Fauna associada às bromélias Cannistrum aff. giganteum (Baker) L. B. Smith e Neoregelia cruenta (R. Graham) L. B. Smith de restinga do litoral norte do Estado de São Paulo*, Dissertação de Mestrado, Instituto de Biologia, UNICAMP, Campinas, SP, Brasil.

FLETCHER, T. D., SHUSTER, W., HUNT, W. F., ASHLEY, R., BUTLER, D., ARTHUR, S., TROWSDALE, S., BARRAUD, S., SEMADENI-DAVIES, A., BERTRAND-KRAJEWSKI, J., MIKKELSEN, P. S., RIVARD, G., UHL, M., DAGENAIS, D., VIKLANDER, M., 2014, “SUDS, LID, BMPs, WSUD and more – The Evolution and Application of Terminology Surrounding Urban Drainage”, *Urban Water Journal*, Volume 12, Issue 7, p. 525-542. Disponível em: <<http://www.tandfonline.com/doi/full/10.1080/1573062X.2014.916314>>, acesso em 26/12/2015.

FERNANDES, S. Z., 2015, *Sustentabilidade em Projetos de Construção: Uma Matriz Multicritérios Baseada em Riscos*, Projeto Final de Graduação, Escola Politécnica/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.

FERRAZ, I. L., LEITE, B. C. C., 2011, “Amendoim no telhado: O comportamento da grama-amendoim (*Arachis repens*) na cobertura verde extensiva”, *VI Encontro Nacional e IV Encontro Latino-americano sobre Edificações e Comunidades Sustentáveis*, Vitória, ES, Brasil.

FERRAZ, I. L., 2012, *O desempenho Térmico de um Sistema de Cobertura Verde em Comparação ao Sistema Tradicional de Cobertura com Telha Cerâmica*, Dissertação de Mestrado, Escola Politécnica/USP, São Paulo, SP, Brasil.

FEUERSTEIN, G., KAK, S., FRAWLEY, D., 2011, *In Search of the Cradle of Civilization: New Light on Ancient India*, Quest Books Theosophical Publishing House, Wheaton, Illinois, USA. Disponível em: [http://demo.bsmbharat.org/Encyc/2015/2/16/334\\_01\\_36\\_15\\_5\\_\\_In\\_Search\\_of\\_the\\_Cradle\\_of\\_Civilization\\_by\\_Subhash\\_Kak.pdf](http://demo.bsmbharat.org/Encyc/2015/2/16/334_01_36_15_5__In_Search_of_the_Cradle_of_Civilization_by_Subhash_Kak.pdf), acesso em 20/10/2015.

FM GLOBAL, 2007, *Property Loss Prevention Data Sheets: Green Roof Systems*. Disponível em: [http://www.ci.berkeley.ca.us/uploadedFiles/Planning\\_and\\_Development/Level\\_3\\_-\\_Energy\\_and\\_Sustainable\\_Development/Factory%20Mutual%20Green%20Roof%20System.pdf](http://www.ci.berkeley.ca.us/uploadedFiles/Planning_and_Development/Level_3_-_Energy_and_Sustainable_Development/Factory%20Mutual%20Green%20Roof%20System.pdf), acesso em 20/10/2015.

FONTOURA, T., SANTOS, F. A. M., 2010, “Geographic distribution of epiphytic bromeliads of the Una region, Northeastern Brazil”, *Biota Neotrop.*, v.10, n. 4. Disponível em: <http://www.biotaneotropica.org.br/v10n4/en/abstract?article+bn02310042010>, acesso em 19/04/2016.

FORATTINI, O. P, MARQUES, G. R. A. M., 2000, “Nota sobre o encontro de **Aedes aegypti** em bromélias”, *Revista Saúde Pública*, v. 34, n. 5, p. 543-544, São Paulo, SP, Brasil.

FORGIARINI, F. R., SOUZA, C. F., SILVEIRA, A. L. L., SILVEIRA, G. L., TUCCI, C. E. M., 2007, “Avaliação de cenários de cobrança pela drenagem urbana de águas pluviais”, *XVII Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos*, São Paulo, SP, Brasil.

FORGIARINI, F. R., 2010, *Incentivos econômicos à sustentabilidade da drenagem urbana: O caso de Porto Alegre - RS*, Tese de Doutorado, Programa de Pós-Graduação em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental, UFRGS, Porto Alegre, RS, Brasil.

G1, 2015, *Praça da Bandeira, na Zona Norte do Rio, é reinaugurada após obras* (Publicada em 07/02/2015). Disponível em: < <http://g1.globo.com/rio-de-janeiro/noticia/2015/02/praca-da-bandeira-na-zona-norte-do-rio-e-reinaugurada-apos-obras.html/>>, acesso em 13 de novembro de 2015.

GALARZA-MOLINA, S., TORRES, A., RENGIFO, P., PUENTES, A., CÁRCAMO-HERNÁNDEZ, E., 2014, “The Hydrological Behaviour of an Eco-Productive Green Roof in Bogota, Colombia”, In: *Proceedings of the 13th International Congress On Urban Drainage*, Kuching, Sarawak, MY.

GARRIDO NETO, P. S., 2012, *Telhados verdes associados com sistema de aproveitamento de água de chuva: projeto de dois protótipos para futuros estudos sobre esta técnica compensatória em drenagem urbana e prática sustentável na construção civil*, Projeto Final de Graduação, Escola Politécnica/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.

GEORGE, A. R., 2015, “On Babylonian Lavatories and Sewers”, *Iraq*, v. 77, p. 75-106.

GETTER, K. L., ROWE, D. B., ANDRESEN, J. A., 2007, “Quantifying the effect of slope on extensive green roof stormwater retention”, *Ecological Engineering*, v. 31, p. 225-231.

GIVNISH, T. J., MILLAM, K. C., EVANS, T. M., HALL, J. C., PIRES, J. C., BERRY, P. E., SYTSMA, K. J., 2004, “Ancient vicariance or recent long-distance dispersal? Inferences about phylogeny and South American-African disjunctions in Rapateaceae and Bromeliaceae based on ndhF sequence data”, *Internat. Journal of Plant Science*, 165(4 Suppl.), p. S35-S54. Disponível em: <<http://www.botany.wisc.edu/givnish/pdfs/IJPS%20BromRapatBiogeogr2004.pdf>>, acesso em 20/03/2016.

GOMEZ, F., GAJA, E., REIG, A., 1998, "Vegetation and climatic changes in a city", *Ecological Engineering*, v. 10, p. 355-360.

GOOGLE EARTH ®

GREENROOFS, [entre 1999 e 2016]. Disponível em: <<http://www.greenroofs.com/>>, acesso em 13 de novembro de 2015.

GREEN ROOF TECHNOLOGY, [entre 1999 e 2016], *Green Roof Systems*. Disponível em: <<http://www.greenrooftechology.com/greenroof-system>>, acesso em 13 de novembro de 2015.

GUERRA JÚNIOR, J. C., 2013, *Coberturas vivas, algumas observações técnicas para a sua implantação*, Dissertação de Mestrado, Pós-Graduação da Faculdade de Arquitetura e Urbanismo, USP, São Paulo, SP, Brasil.

GUIMARÃES, L. F., 2016, *Metodologia para avaliação da capacidade de recuperação em função de prejuízos de sucessivos eventos de inundação*, Dissertação de Mestrado, COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.

HAKE, A., 2007, *Promoting Sustainable Green Roofs Through Leadership in energy and Environmental Design (LED)*, Dissertation, Kansas State University, Manhattan, Kansas, USA. Disponível em: <<http://krex.k-state.edu/dspace/bitstream/handle/2097/324/aubreyhake2007.pdf?sequence=1>>, acesso em 31/10/2015.

HINMAN, C., WASHINGTON STATE UNIVERSITY EXTENSION FACULTY, 2012, *Low Impact Development - Technical Guidance Manual for Puget Sound*, Washington, USA. Disponível em: <[http://www.psp.wa.gov/downloads/LID/20121221\\_LIDmanual\\_FINAL\\_secure.pdf](http://www.psp.wa.gov/downloads/LID/20121221_LIDmanual_FINAL_secure.pdf)>, acesso em 06/04/2016.

HOGAN, D. J., MARANDOLA JÚNIOR, E., OJIMA, R., 2010, *População e Ambiente: desafios à sustentabilidade*, Série Sustentabilidade / organizado por José Goldemberg, v. 1, Blucher, ISBN 978-85-212-0575-1, São Paulo, SP, Brasil.

IGRA – International Green Roof Association, 2015, *New Online Database for Green Roof Policies*. Disponível em: <<http://www.igra-world.com/index.php>>, acesso em 12/11/2015.

IBIAPINA, M. B., SILVA, V. G., ILHA, M. S. O., KOWALTOWSKI, D. C. C. K., 2010, “Pesquisa Experimental para avaliar a qualidade da água e a capacidade de retenção de água pluvial em coberturas verdes em Campinas – Brasil”, *Simpósio Brasileiro de Construção Sustentável*, São Paulo, SP, Brasil.

IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística, 2010. *Censo Demográfico 2010*.

IL PARCO PIÙ BELLO D’ITALIA, 2016, *Palazzo Piccolomini*. Disponível em: <<http://www.ilparcopiubello.it/index.php/park/dettaglio/550>>, acesso em 9 de janeiro de 2016.

IPEA – Instituto de Pesquisa e Economia Aplicada, 2006, *Texto para Discussão 1155 - Um Exame dos Padrões de Crescimento das Cidades Brasileiras*. Disponível em: <[http://www.ipea.gov.br/portal/index.php?option=com\\_content&view=article&id=4322&Itemid=1](http://www.ipea.gov.br/portal/index.php?option=com_content&view=article&id=4322&Itemid=1)>, acesso em 31/10/2015.

IUCN, UNEP, WWF, 1991, *Caring for the Earth. A Strategy for Sustainable Living*, Gland, Switzerland. Disponível em: <<https://portals.iucn.org/library/efiles/edocs/CFE-003.pdf>>, acesso em 31/10/2015.

JESUS, V. D., 2014, *Medidas Adotadas em Projetos de Edificações que otimizam a Sustentabilidade na Construção*, Projeto Final de Graduação, Escola Politécnica/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.

JHA, A. K., BLOCH, R., LAMOND, J., 2012, *Cities and Flooding. A Guide to Integrated Urban Flood Risk Management for the 21st Century*, Washington, D.C.: The World

Bank. Disponível em: <<https://openknowledge.worldbank.org/handle/10986/2241>>, acesso em 12/11/2015.

JSCWSC – Joint Steering Committee for Water Sensitive Cities, 2009, *Evaluating Options for Water Sensitive Urban Design – A National Guide*, Austrália. Disponível em: <<https://www.environment.gov.au/system/files/resources/1873905a-f5b7-4e3c-8f45-0259a32a94b1/files/wsud-guidelines.pdf>>, acesso em 12/11/2015.

JUSSA, 2013, *Tenochtitlán: O Planejamento Urbano Asteca*. Disponível em: <<https://ensaiosfragmentados.com/2013/05/09/tenochtitlan-o-planejamento-urbano-asteca/>>, acesso em 9 de janeiro de 2016.

KASMIN, H., STOVIN, V., DE-VILLE, M. R., 2014, “Evaluation of Green roof hydrological Performance in a Malaysian Context”, In: *Proceedings of the 13th International Congress On Urban Drainage*, Kuching, Sarawak, MY.

KIBERT, C. J., 1994, “Establishing principles and a Model for Sustainable Construction”, In: *Proceedings of First International Conference of CIB TG 16 on Sustainable Construction*, Tampa, Florida, USA. Disponível em: <[https://www.irbnet.de/daten/iconda/CIB\\_DC24773.pdf](https://www.irbnet.de/daten/iconda/CIB_DC24773.pdf)>, acesso em 12/11/2015.

KIST, R. C., 2011, *Coberturas verdes sobre edificações: avaliação de satisfação de moradores de um condomínio horizontal na cidade de Porto Alegre*, Projeto Final de Graduação, UFRGS, Porto Alegre, RS, Brasil.

KREBS, L. F., FONTES, P. W., FEDRIZZI, B., 2012, “Percepção ambiental no ambiente construído: Um estudo exploratório sobre coberturas vivas”, *XIV Encontro Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído*, Juiz de Fora, MG, Brasil. Disponível em: <<http://www.infohab.org.br/entac2014/2012/docs/1273.pdf>>, acesso em 12/11/2015.

KREBS, L. F., SATTTLER, M. A., 2010, “Coberturas vivas extensivas: Análise da utilização em projetos na região metropolitana de Porto Alegre e Serra Gaúcha”, *XIII Encontro Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído*, Canela, RS, Brasil.

KRISHNAN, R., AHMAD, H., 2014, "Influence of low growing vegetation in reducing stormwater runoff on green roofs", *International Journal of High-Rise Buildings*, v. 3, n. 4, p. 1-6.

KRYSTEC, L., 1998, *The Hanging Gardens of Babylon*. Disponível em: <<http://www.unmuseum.org/hangg.htm>>, acesso em 30 de janeiro de 2016.

KOK, K. H., SIDEK, L. M., ZAINALABIDIN, M. R., 2014, "Evaluation of Green Roof as Green Technology for Urban Stormwater Quantity and Quality Controls", In: *Proceedings of the 13th International Congress On Urban Drainage*, Kuching, Sarawak, MY.

KUHN, M., PECK, S., 2003, *Design Guidelines for Green Roofs*, Ontario Association of Architects, Canada. Disponível em: <<http://www.eugene-or.gov/DocumentView.aspx?DID=1049>>, acesso em 31/10/2015.

LAAR, M., SOUZA, C. G., ASSUNÇÃO PAIVA, V. L., AUGUSTA DE AMIGO, N., TAVARES, S., GRIMME, F. W. GUSMÃO, F., KÖHLER, M., SCHMIDT, M., 2001, "Estudo de Aplicação de Plantas em Telados Verdes Extensivos em Cidades de Clima Tropical", *VI Encontro Nacional de Conforto no Ambiente Construído*, São Pedro, SP, Brasil.

LACERDA, L. D., HAY, J. D., 1982, "Habitat of *Neoregelia cruenta* (Bromeliaceae) in coastal sand dunes of Marica, Brazil", *Revista de Biología Tropical*, v.30, n.2, p. 171-173.

LAFON, Y, [2001 ou 2002], *Mont Saint-Michel / Abbaye du Mont Saint-Michel*, Disponível em: <<http://www.raubacapeu.net/people/yves/pictures/2001/06/06/dsc20010606037.jpg>>, acesso em 9 de janeiro de 2016.

LEE, J. Y., MOON, H. J., KIM, T. I., KIM, H. W., HAN, M. Y., 2013, "Quantitative analysis on the urban flood mitigation effect by the extensive green roof system", *Environmental Pollution*, v. 181, p. 257-261.

LEME, E. M. C., 1984, “Bromélias”, *Ciência Hoje*, v. 3, n. 14, p. 66-72.

LENDERING, J., 2015, *Etemenanki (the “Tower of Babel”)*. Disponível em: <<http://www.livius.org/articles/place/etemenanki/>>, acesso em 30 de outubro de 2015.

LIBARDI, P. L., 2012, *Dinâmica da água no solo*, 2ª edição, EDUSP, ISBN 8531413842, São Paulo, SP, Brasil.

LIBERATO, D. B., 2015, *Avaliação da Caixa Pluviômetro: Um novo equipamento desenvolvido para medir a precipitação, infiltração de chuva, escoamento superficial e índice de erosão em terrenos com diversos tipos de cobertura*, Dissertação de Mestrado, COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.

LIBERATO, D. B., OTTONI FILHO, T. B., MIGUEZ, M. G., 2015, “Caixa Pluviômetro: Novo equipamento para medir a chuva de uma forma completa”, *XXI Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos*, Brasília, DF, Brasil.

LINSLEY, R. K., KOHLER, M. A., PAULHUS, J. L. H., 1958, *Hydrology for Engineers*, Mc Graw-Hill, USA. Disponível em: <<http://krishikosh.egranth.ac.in/bitstream/1/2034177/1/253.pdf>>, acesso em 18/11/2015.

LOFRANO, G., BROWN, J., 2010, “Wastewater management through the ages: A history of mankind”, *Science of the Total Environment*, v. 408, p. 5254-5264.

LOPES, D. A. R., 2007, *Análise do Comportamento Térmico de uma Cobertura Verde Leve (CVL) e Diferentes Sistemas de Cobertura*, Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-Graduação em Ciências da Engenharia Ambiental, Escola de Engenharia de São Carlos, USP, São Carlos, SP, Brasil.

LOPES, A. L. B., 2012, *O engenheiro Saturnino de Brito e o Urbanismo sanitaria* (Última atualização em 04/04/2012). Disponível em: <<http://archive.is/20131203201703/www.historiaehistoria.com.br/materia.cfm#selection-463.0-463.57>>, acesso em 13 de novembro de 2015.

LOPEZ, L. C. S., ALVES, R. R. N., RIOS, R. I., 2009, “Micro-environmental factors and the endemismo of bromeliad aquatic fauna”, *Hydrobiologia*, v. 625, p. 151-156.

LOPEZ, L. C. S., SILVA, E. G. B., BELTRÃO, M. G., LEANDRO, R. S., BARBOSA, J. E. L., BESERRA, E. D., 2011, “Effect of tank bromeliad micro-environment on **Aedes aegypti** larval mortality”, *Hydrobiologia*, v. 665, p. 257-261.

LOREZIN NETO, F., TASSI, R., TASSINARI, L., BASSO, R., 2013, “Calibração e simulação hidrológica de um telhado verde utilizando o Método da Curva-Número do SCS”, *XX Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos*, Bento Gonçalves, RS, Brasil.

LUNDHOLM, J. T., 2015, “Green roof plant species diversity improves ecosystem multifunctionality”, *Journal of Applied Ecology*, v. 52, p. 726-734.

MASCARENHAS, F. C. B., MIGUEZ, M. G., 2002, “Urban flood control through a mathematical flow cell model”, *Water International*, v. 27, n.2, p.208–218.

MASCARENHAS, F. C. B., MIGUEZ, M. G., MAGALHÃES, L. P. C., PRODANOFF, J. H. A., 2007, Comparison of different multifunctional landscapes approaches for flood control in developing countries. In: *Proceedings of NOVATECH 2007*, p. 83-90, Lyon, FRA.

MATEUS, R. F. M. S., 2004, *Novas Tecnologias Construtivas com Vista à Sustentabilidade da Construção*, Dissertação de Mestrado, Escola de Engenharia/Universidade do Minho, Guimarães, Portugal. Disponível em: <<http://repositorium.sdum.uminho.pt/handle/1822/817>>, acesso em 18/11/2015.

MATUANO, D. G., 2008, *Crescimento clonal em Neoregelia cruenta na Restinga de Jurubatiba: estrutura populacional, plasticidade morfo-anatômica e integração fisiológica*, Tese de Doutorado em Botânica, Programa de Pós-Graduação em Botânica, Instituto de Pesquisas Jardim Botânico do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.

MATOS, J. S., 2003, “Aspectos Históricos e Actuais da Evolução da Drenagem de Águas Residuais em Meio Urbano”, *Engenharia Civil UM*, n. 16, Lisboa, Portugal. Disponível em: <<http://www.civil.uminho.pt/cec/revista/Num16/Pag%2013-23.pdf>>, acesso em 18/11/2015.

MEADOWS, D. H., MEADOWS, D. L., RANDERS, J., BERHRENS III, W. W., 1972, *The Limits to Growth*, Universe Books, ISBN 0-87663-165-0, New York, USA.

MELANI, M. R. A., 2006, *Projeto Araribá: História*, São Paulo: Moderna, p. 209. Disponível em: <[http://historiapublica.blogspot.com.br/2009\\_05\\_01\\_archive.html](http://historiapublica.blogspot.com.br/2009_05_01_archive.html)>, acesso em 13 de novembro de 2015.

MELLO, L. I. A., COSTA, L. C. A., 1999, *História Moderna e Contemporânea*, 5ª edição, Scipione, ISBN 85-262-1879-4, São Paulo, SP, Brasil.

MIGUEZ, M. G., 1994, *Modelação Matemática de Grandes Planícies de Inundação, Através de um Esquema de Células de Escoamento com Aplicação ao Pantanal Matogrossense*, Dissertação em Engenharia Civil, COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.

MIGUEZ, M. G., 2001, *Modelo Matemático de Células de Escoamento para Bacias Urbanas*, Tese de Doutorado em Engenharia Civil, COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.

MIGUEZ, M.G., MASCARENHAS, F.C.B., MAGALHÃES, L.P.C., 2007, “Multifunctional Landscapes for Urban Flood Control In Developing Countries”, *International Journal of Sustainable Development and Planning*, v. 2, n. 2, p. 153-166.

MIGUEZ, M. G., MAGALHÃES, L. P. C., 2010, “Urban Flood Control, Simulation and Management – an Integrated Approach”, In: A. C. Pina Filho, A. C. de Pina. (Org.), *Methods and Techniques in Urban Engineering*, 1ed.Viena, INTECH Education and Publishing, v. 1, p. 131-160.

MIGUEZ, M. G., MASCARENHAS, F. C. B., VERÓL, A. P., 2011, “MODCEL: A Mathematical Model for Urban Flood Simulation and Integrated Flood Control Design”, In: *Acqua e Città - 4° Convegno Nazionale di Idraulica Urbana*, Veneza, Italia.

MIGUEZ, M. G., VERÓL, A. P., REZENDE, O. M., 2015, *Drenagem Urbana: Do Projeto Tradicional à Sustentabilidade*, 1ª edição, Elsevier, ISBN 978-85-352-7746-3, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.

MINKE, G., 2004, *Tectos verdes. Planificación, ejecución, consejos prácticos*, Editorial Fin de Siglo, Montevideo, Uruguai.

MOCELLIN, M. G., SIMÕES, T. C., NASCIMENTO, T. F. S., TEIXEIRA, M. L. F., LOUNIBOS, L. P., OLIVEIRA, R. L., 2009, “Bromeliad-inhabiting mosquitoes in an urban botanical garden of dengue endemic Rio de Janeiro. Are bromeliads productive habitats for the invasive vectors *Aedes aegypti* and *Aedes albopictus*?”, *Memórias do Instituto Oswaldo Cruz*, v. 104, n. 8, p. 1171-1176, Rio de Janeiro, RJ, Brasil. Disponível em: <<http://www.scielo.br/pdf/mioc/v104n8/15.pdf>>, acesso em 04/04/2016.

MORAES, E. C., 2015, *A Torre de Babel e os Frutos da Terra*. Disponível em: <<https://acasadevidro.com/2015/05/22/a-torre-de-babel-e-os-frutos-da-terra/>>, acesso em 8 de janeiro de 2016.

MORAVIA, W. G., OLIVEIRA, C. A. S., GUMIERI, A. G., VASCONCELOS, W. L., 2006, “Caracterização microestrutural da argila expandida para aplicação como agregado em concreto estrutural leve”, *Cerâmica*, v. 52, p. 193-199.

MORISON, P. J., BROWN, R. R., 2011, “Understanding the nature of publics and local policy commitment to Water Sensitive Urban Design”, *Landscape and Urban Planning*, v. 99, p. 83-92.

NAGASE, A., DUNNETT, N., 2012, “Amount of water runoff from different vegetation types on extensive green roofs: Effects of plants species, diversity and plants structure”, *Landscape and Urban Planning*, v. 104, p. 356-363.

NAGEM, F. R., M., 2008, *Avaliação Econômica dos Prejuízos Causados pelas Cheias Urbanas*, Dissertação de Mestrado, COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.

NASCIMENTO, C. M. N., 2015, *Avaliação das relações chuva-vazão em telhados verdes modulares sob chuva simulada induzida*, Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental, UERJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.

NASCIMENTO, W. C., SCHMID, A. L., 2008, “Coberturas verdes na região metropolitana de Curitiba – Barreiras e potencial de estabelecimento na visão dos profissionais da construção civil”, *XII Encontro Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído*, Fortaleza, CE, Brasil.

NASCIMENTO, W. C., FREITAS, M. C. D., SCHMID, A. L., 2008, “Coberturas verdes – A renovação de uma ideia”, *XII Encontro Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído*, Fortaleza, CE, Brasil.

NATAL, D., URBINATTI, P. R., TAÍPE-LAGOS, C. B., CERETI-JÚNIOR, W., DIEDERUSCHSEN, A. T. B., SOUZA, R. G., SOUZA, R. P., 1997, “Encontro de **Aedes (Stegomyia) albopictus** (Skuse) em Bromeliaceae na periferia de São Paulo”, *Revista Saúde Pública*, v. 31, n. 5, p. 517-518, São Paulo, SP, Brasil.

NIEMCZYNOWICZ, J., 1999, “Urban hydrology and water management - present and future challenges”, *Urban Water*, v. 1, p. 1-14.

NORTH, G. B., LYNCH, F. H., MAHARAJ, F. D. R., PHILIPS, C. A., WOODSIDE, W. T., 2013, “Leaf hydraulic conductance for a tank bromeliad: axial and radial pathways for moving and conserving water”, *Frontiers in Plant Science*, v. 4, p. 1-10.

O DIA, 2015, *Reinauguração da Praça Niterói, no Maracanã, acontece neste domingo* (Publicada em 23/10/2015). Disponível em: <<http://odia.ig.com.br/noticia/rio-de-janeiro/2015-10-23/reinauguracao-da-praca-niteroi-no-maracana-acontece-neste-domingo.html>>, acesso em 05 de maio de 2016.

O GLOBO, 2013, *Rio Joana transborda e invade a radial oeste* (Publicada em 22/01/2013). Disponível em: <<http://oglobo.globo.com/rio/rio-joana-transborda-invade-radial-oeste-7363796>>, acesso em 05 de maio de 2016.

O GLOBO, 2016a, *Chuva forte chega ao rio no fim do dia* (Publicada em 21/02/2016). Disponível em: <<http://oglobo.globo.com/rio/chuva-forte-chega-ao-rio-no-fim-do-dia-18719629>>, acesso em 05 de maio de 2016.

O GLOBO, 2016b, *Chuva causa alagamento em dois andares da Biblioteca Nacional* (Publicada em 21/02/2016). Disponível em: <http://oglobo.globo.com/rio/chuva-causa-alagamento-em-dois-andares-da-biblioteca-nacional-18719713>>, acesso em 05 de maio de 2016.

O GLOBO, 2016c, *Sirenes da Defesa Civil são acionadas em sete comunidades do Rio por causa da chuva* (Publicada em 22/02/2016). Disponível em: <<http://oglobo.globo.com/rio/sirenes-da-defesa-civil-sao-acionadas-em-sete-comunidades-do-rio-por-causa-da-chuva-18727035>>, acesso em 05 de maio de 2016.

O GLOBO, 2016d, *Após chuva, Rio volta ao estágio de normalidade* (Publicada em 23/02/2016). Disponível em: <<http://oglobo.globo.com/rio/apos-chuva-rio-volta-ao-estagio-de-normalidade-18734576>>, acesso em 05 de maio de 2016.

O GLOBO, 2016e, *Desvio do Rio Joana só deve ser concluído dois meses depois dos Jogos de 2016* (Publicada em 10/04/2016). Disponível em: <<http://oglobo.globo.com/rio/desvio-do-rio-joana-so-deve-ser-concluido-dois-meses-depois-dos-jogos-de-2016-15830325>>, acesso em 05 de maio de 2016.

O GLOBO, 2016f, *A Nova Estação Jardim Oceânico Do Metrô Do Rio*. Disponível em: <<http://oglobo.globo.com/rio/a-nova-estacao-jardim-oceanico-do-metro-do-rio-19614574>>, acesso em outubro de 2016.

OBERNDORFER, E., LUNDHOLM, J., BASS, B., COFFMAN, R. R., DOSHI, H., DUNNET, N., GAFFIN, S., KÖHLER, M., LIU, K. K. Y., ROWE, B., 2007, “Green

Roofs as Urban Ecosystems: Ecological Structures, Functions, and Services”, *BioScience*, v. 57, n. 10, p. 823-833.

OLIVEIRA, E. W. N., 2009, *Telhados verdes para habitação de interesse social: retenção das águas pluviais e conforto térmico*, Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental, UERJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.

OLIVEIRA, M. G. N., ROCHA, C. f. D., BAGNALL, T., 1994, “A comunidade animal associada a bromélia-tanque **Neoregelia cruenta** (R. Graham) L. B. Smith”, *Bromélia* 1, n. 1, p. 22-29.

OHNUMA JR. A. A., ALMEIDA NETO, P., MEDIONDO, E. M., 2014, “Análise da retenção hídrica em telhados verdes a partir da eficiência do Coeficiente de Escoamento”, *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, v. 19, n. 2, p. 41-52.

OHNUMA JR. A. A., SILVA, L. P., GOMES, M. M., 2015, “O efeito das condições climáticas em telhados verdes”, *XXI Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos*, Brasília, DF, Brasil.

OSMUNDSON, T., 1999, *Roof Gardens: History, Design, and Construction*, W. W. Norton & Company, ISBN 0-393-73012-3, New York, USA.

PALLA, A., LANZA, L. G., LA BARABERA, P., 2008, “A green roof experimental site in the Mediterranean climate”, In: *Proceedings of the 11th International Congress On Urban Drainage*, Edinburgh, Scotland, UK.

PANIZON, M., OLIVEIRA, E., BOSA, C. R., 2014, “Macrofauna associada à **Nidularium Lem.** (Bromeliaceae) de diferentes estratos verticais em um fragmento de Floresta com Araucaria, Curitiba, Paraná, Brasil”, *Estudos de Biologia: Ambiente e Diversidade*, v. 36, n.86, p.133-147, Curitiba, PR, Brasil. Disponível em: <[www2.pucpr.br/reol/index.php/BS?ddl=14542&ddl99=pdf](http://www2.pucpr.br/reol/index.php/BS?ddl=14542&ddl99=pdf)>, acesso em 20/03/2016.

PEC/COPPE/UFRJ – Programa de Engenharia Civil do Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós-Graduação e Pesquisa de Engenharia da Universidade Federal do Rio de Janeiro,

Laboratório de Traçadores. Disponível em: <  
[http://www.coc.ufrr.br/index.php?option=com\\_content&view=article&id=2282&lang=pt-br](http://www.coc.ufrr.br/index.php?option=com_content&view=article&id=2282&lang=pt-br)>, acesso em 1 de março de 2016.

PEEL, M. C., FINLAYSON, B. L., MCMAHON, T.A., 2007, “Updated world map of the Köppen-Geiger climate classification”, *Hydrology and Earth System Sciences*, v. 11, p. 1633-1644.

PÉRES, G., VILA, A., COMA, J., CASTELL, A., CABEZA, L. F., 2015, “The thermal behaviour of extensive green roofs under low plant coverage conditions”, *Energy Efficiency*, v. 8, p. 881–894.

PFAFSTETTER, O., 1957, *Chuvas intensas no Brasil*, Departamento Nacional de Obras de Saneamento, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.

PGDER – Prince George’s County, Department of Environmental Resources, 1999a, *Low-Impact Development Design Strategies: An Integrated Design Approach*, Maryland, USA. Disponível em:  
<<http://www.princegeorgescountymd.gov/DocumentCenter/Home/View/86>>, acesso em 21/02/2016.

PGDER – Prince George’s County, Department of Environmental Resources, 1999b, *Low-Impact Development Hydrologic Analysis*, Maryland, USA. Disponível em:  
<<http://www.princegeorgescountymd.gov/DocumentCenter/Home/View/87>>, acesso em 21/02/2016.

PIMENTEL DA SILVA, L. *et al.*, 2008, “HIDROCIDADES – Métodos Não Convencionais na Conservação de Água em Bacias Peri-Urbanas”, *VIII Encontro Nacional de Águas Urbanas*, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.

PIMENTEL DA SILVA, L., MARY, W., MARCOLINO, T., ACCIOLY DA SILVA, W., ROSSAFA, B., 2011, “Green Roof for Social Interest Habitation Regarding Flood Control and Plant Growth as Means of Generating Employment and Income”, In:

*Proceedings of the 12th International Conference On Urban Drainage*, Porto Alegre, RS, Brasil.

PINHEIRO, M. D., 2003, “Construção sustentável – Mito ou Realidade”, *VII Congresso Nacional de Engenharia do Ambiente*, Lisboa, Portugal.

PINTO, L. A., SILVA, J. S., CALMANT, S., 2015, “Análise experimental da retenção de águas pluviais em protótipo de telhado verde extensivo”, *XXI Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos*, Brasília, DF, Brasil.

POË, S., STOVIN, V., DUNZIGER, Z., 2011, “The Impact of Green Roof Configuration on Hydrological Performance”, In: *Proceedings of the 12th International Congress On Urban Drainage*, Porto Alegre, RS, Brasil.

POLETO, C. SILVEIRA, A. L. L., CARDOSO, A. R., GOLDENFUM, J. A., DORNELLES, F., TASSI, R., MOURA, P. M., 2015, Introdução às Águas Urbanas, *Águas Urbanas* / organizado por Cristiano Poleto, André L. L. da Silveira, Alice R. Cardoso, Joel A. Goldenfum, Fernando Dornelles, Rutinéia Tassi, Priscilla Macedo Moura, 1ª edição, ABRH, v. 1, ISBN 978-85-88686-38-0, Porto Alegre, RS, Brasil, p. 10-21.

POLKOWSKA, Z., GÓRECHI, T., NAMIESNISK, J., 2002, “Quality of roof waters from an urban region (Gdansk, Poland)”, *Chemosphere*, v. 49, p. 1275-1283.

PONTES, K. L. F., 2013, *Estudo de caso da construção de um protótipo experimental para ensaios sobre técnicas compensatórias em drenagem urbana: pavimentos permeáveis e telhados verdes*, Projeto Final de Graduação, Escola Politécnica/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.

QIN, X., WU, X., CHIEW, Y., LI, Y., 2012, “A Green Roof Test Bed for Stormwater Management and Reduction of Urban Heat Island Effect in Singapore”, *British Journal of Environment and Climate Change*, v. 2, n. 4, p. 410–420.

RECIFE, 2015, *Lei nº 18.112*, de 12 de janeiro de 2015, que dispõe sobre a melhoria da qualidade ambiental das edificações por meio da obrigatoriedade de instalação do "telhado verde", e construção de reservatórios de acúmulo ou de retardo do escoamento das águas pluviais para a rede de drenagem e dá outras providências.

RENTERGHEM, T. V., BOTTELDOOREN D., 2009, "Reducing the acoustical façade load from road traffic with green roofs", *Building and Environment*, v. 44, p. 1081-1087.

RIO-ÁGUAS – Fundação Instituto das Águas do Município do Rio de Janeiro, 2010, *Instruções Técnicas para Elaboração de Estudos Hidrológicos e Dimensionamento Hidráulico de Sistemas de Drenagem Urbana*, 1ª versão.

RIO-ÁGUAS – Fundação Instituto das Águas do Município do Rio de Janeiro, 2016a, *Grandes obras de drenagem e esgotamento sanitário e parceria com os governos Federal e Estadual – Obras de combate a enchentes na Grande Tijuca e no Maracanã*. Disponível em: <<http://www.rio.rj.gov.br/web/rio-aguas/obras-e-parcerias>>, acesso em 1 de outubro de 2016.

RIO-ÁGUAS – Fundação Instituto das Águas do Município do Rio de Janeiro, 2016b, *Prefeito entrega reservatório de águas pluviais da nova Praça Varnhagen* (Publicada em 13/06/2016). Disponível em: <<http://www.rio.rj.gov.br/web/rio-aguas/exibeconteudo?id=6198733>>, acesso em 1 de outubro de 2016.

RIO DE JANEIRO, 2012, *Lei nº 6.349*, de 30 de novembro de 2012, que dispõe sobre a obrigatoriedade da instalação do "telhado verde" nos locais que especifica e dá outras providências.

ROCHA, P. K., 2002, *Desenvolvimento de bromélias em ambientes protegidos com diferentes alturas e níveis de sombreamento*, Dissertação de Mestrado, Escola superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", USP, Piracicaba, SP, Brasil.

ROLA, S. M., MACHADO, L. F. C., BARROSO-KRAUSE, C. M. L., 2003, *Naturação, água e o futuro das cidades no contexto das mudanças ambientais globais*, CBA – Congresso Brasileiro de Arquitetos, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.

ROLA, S. M., 2008, *A Natureza como ferramenta para a sustentabilidade de cidades: Estudo da capacidade do sistema de natureza em filtrar a água de chuva*, Tese de Doutorado, COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.

ROWE, D. B., 2011, "Green Roofs as a Means of Pollution Abatement", *Environmental Pollution*, v. 159, p. 2100-2110.

SANTA CATARINA, 2007, *Lei nº 12.234*, de 11 de dezembro de 2007, que dispõe sobre a implementação de sistemas de natureza através da criação de telhados verdes em espaços urbanos de Santa Catarina.

SANTAMOURIS, M., 2014, "Cooling the cities – A review of reflective and green roof mitigation technologies to fight heat island and improve comfort in urban environments", *Solar Energy*, v. 103, p. 682-703.

SANTOS NETO, G. M., BARROS, A. B., 2003, "A história do saneamento da Cidade do Rio de Janeiro", *Comum (FACHA)*, v. 7, p. 175-191.

SÃO PAULO, 2015, *Lei nº 16.277*, de 5 de outubro de 2015, que dispõe sobre a obrigatoriedade da instalação do "Telhado Verde" nos locais que especifica e dá outras providências.

SEIDL, M., GROMAIRE, M. C., SAAD, M., GOUVELLO, B., 2013, "Effect of substrate depth and rain-event history on the pollutant abatement of green roofs", *Environmental Pollution*, v. 183, p. 195-203.

SCHUELER, T. R., 1987, *Controlling Urban Runoff: A Practical Manual for Planning and Designing Urban BMPs*, Edição 87703 de Publication Metropolitan Washington Council of Governments, Washington, D.C., USA.

SCS - Soil Conservation Service, 1997, *Hydrology Tools for Wetland Determination, Engineering Field Handbook*, Chapter 19, 63p.

SILVA, B. M. M., 2007, *Betão Leve Estrutural com Agregados de Argila Expandida*, Dissertação de Mestrado, FEUP – Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Departamento de Engenharia Civil, Porto, PRT.

SILVA, T. F., PAIVA, A. L. R., SANTOS, S. M., 2015, “Capacidade de retenção de água em um telhado verde: Estudo de caso em Caruaru”, *XXI Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos*, Brasília, DF, Brasil.

SILVEIRA, A. L. L., 1998, “Hidrologia Urbana no Brasil”, In: *Drenagem Urbana: Gerenciamento, Simulação, Controle* / organizado por Benedito Braga, Carlos E. M. Tucci, Marcos Tozzi, ABRH Publicações, n. 3, ISBN 85-7025-442-3, Editora da Universidade, Porto Alegre, RS, Brasil.

SILVEIRA, A. L. L., 2002, *Drenagem Urbana: Aspectos de Gestão*, Gestores Regionais de Recursos Hídricos, Instituto de Pesquisas Hidráulicas da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, UFRGS, Porto Alegre, RS, Brasil.

SILVEIRA, A. L. L., 2013, “Ciclo hidrológico e bacia hidrográfica”, In: *Hidrologia: ciência e aplicação* / organizado por Carlos E. M. Tucci, André L. L. da Silveira... [et al.], 5ª reimpressão da 4ª edição, Coleção ABRH de Recursos Hídricos, v. 4, ISBN 978-85-7025-924-0, Porto Alegre, RS, Brasil, p. 35-51.

SKYGARDEN. Disponível em: <<http://www.skygarden.com.br/>>, acesso em 13 de novembro de 2015.

SÓ HISTÓRIA, [entre 2009 e 2016], *Civilização Chinesa*. Disponível em: <<http://www.sohistoria.com.br/ef2/china/p1.php>>, acesso em 12 de dezembro de 2015.

SOUZA, C. F., DAMASIO, C. P., 1990, “Os primórdios do urbanismo moderno: Porto Alegre na administração Otávio Rocha”, In: *Seminários de História da Cidade e Urbanismo*, v.1, n.1, 379 p., p. 203-217. Disponível em: <<http://unuhospedagem.com.br/revista/rbeur/index.php/shcu/article/view/313/289>>, acesso em 18/11/2015.

SOUZA, C. F., DAMASIO, C. P., 1993, “Os primórdios do urbanismo moderno: Porto Alegre na administração Otávio Rocha”. In: *Estudos urbanos: Porto Alegre e seu planejamento*, Panizzi, W. M., Rovatti, J. F. (eds.), Porto Alegre: Editora da Universidade, Porto Alegre, RS, Brasil p. 133-145.

SOUZA, C. F., TUCCI, C. E. M., POMPÊO, C. A., 2005, “Diretrizes para o estabelecimento de loteamentos urbanos sustentáveis”, *VI Encontro Nacional de Águas Urbanas*, Belo Horizonte, MG, Brasil.

SOUZA, C. F., CRUZ, M. A. S., TUCCI, C. E., 2012, “Desenvolvimento Urbano de Baixo Impacto: Planejamento e Tecnologias verdes para a Sustentabilidade das Águas Urbanas”, *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, v. 17, n. 2, p. 9-18.

SPEAK, A. F., ROTHWELL, J. J., LINDLEY, S. J., SMITH, C. L., 2012, “Urban particulate pollution reduction by four species of green roof vegetation in a UK city”, *Atmospheric Environment*, v. 61, p. 283-293.

STEVENS, P. F., 2016, *Agiosperm Phylogeny Website*, Version 13, última atualização em 19/01/2016. Disponível em: <http://www.mobot.org/MOBOT/research/APweb/>, acesso em 06/04/2016.

STOVIN, V., 2010, “The potential of green roofs to manage Urban Stormwater”, *Water and Environment Journal*, v. 24, p. 192-199.

STUDIO CIDADE JARDIM. Disponível em: <http://www.studiocidadejardim.com.br/>, acesso em 13 de novembro de 2015.

SUSCA, T., GRAFFIN, S. R., DELL’OSSO, G. R., 2011, “Positive effects of vegetation: Urban heat island and green roofs”, *Environmental Pollution*, v. 159, p. 2119-2126.

TASSI, R., TASSINARI, L. C. S., PICCILLI, D. G. A., PERSCH, C. G., 2014, “Telhado verde: uma alternativa sustentável para a gestão das águas pluviais”, *Ambiente Construído*, v. 14, n. 1, p. 139-154.

TECNUTRI DO BRASIL, *Produtos – Forth Cote 14.14.14*. Disponível em: <<http://www.forthjardim.com.br/produtos/55/forth-cote-141414>>, acesso em 15 de março de 2016.

TEEMUSK, A., MANDER, U., 2007, “Rainwater runoff quantity and quality performance from a greenroof: The effects of short-term events”, *Ecological Engineering*, v. 30, p. 271-277.

TEIXEIRA, P. C., ILHA, M. S. O., REIS, R. P. A., 2011, “Análise da qualidade da água de chuva drenada por coberturas verdes: Estudo piloto”, *XII Simpósio Nacional de Sistemas Prediais*, Passo Fundo, RS, Brasil.

TRAVEL MONT SAINT MICHEL, [2010?]. Disponível em: <<http://travellhappyland.blogspot.com.br/2011/10/travel-mont-saint-michel.html>>, acesso em 8 de janeiro de 2016.

TUCCI, C. E. M., 2005, *Gestão de Águas Pluviais*, Ministério das Cidades, *Global Water Partnership - World Bank – Unesco*.

TUCCI, C. E. M., GENZ, F., 2015, “Controle do Impacto da Urbanização”, In: *Drenagem Urbana* / organizado por Carlos E. M. Tucci, Rubem La Laina Porto, Mário T. de Bastos., reimpressão da 1ª edição, Coleção ABRH de Recursos Hídricos, v. 5, ISBN 978-7025-364-4, Porto Alegre, RS, Brasil, p. 277-347.

UFRJ – Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2003, *Modelação de cheias urbanas – Manual do usuário do Modelo de Células de Escoamento*, Versão 5.0.

UNITED NATIONS, 1987, *Report of the World Commission on Environment and Development: Our Common Future (Relatório Brundland)*. Disponível em: <<http://www.onu.org.br/rio20/img/2012/01/N8718467.pdf>>, acesso em 15/12/2015.

UNITED NATIONS, Department of Economic and Social Affairs, Population Division, 2013, *World Urbanization Prospects: The 2012 Revision, Volume I: Comprehensive Tables*, (ST/ESA/SER.A/336). Disponível em:

<[http://esa.un.org/unpd/wpp/Publications/Files/WPP2012\\_Volume-I\\_Comprehensive-Tables.pdf](http://esa.un.org/unpd/wpp/Publications/Files/WPP2012_Volume-I_Comprehensive-Tables.pdf)>, acesso em 15/12/2015.

UNITED NATIONS, Department of Economic and Social Affairs, Population Division, 2015, *World Urbanization Prospects: The 2014 Revision*, (ST/ESA/SER.A/366). Disponível em: <<http://esa.un.org/unpd/wup/Publications/Files/WUP2014-Report.pdf>>, acesso em 15/12/2015.

UNITED STATES, Department of Defense [USDoD], 2010, *Unified Facilities Criteria (UFC): Low Impact Development Manual*. Disponível em: <<http://www.stewart.army.mil/515/docs/Low%20Impact%20Development%20Manual%20for%20DoD%20Facilities.pdf>>, acesso em 02/08/2016.

US EPA - United States Environmental Protection Agency, 1993, *Guidance Manual for Developing Best Management Practices (BMP)*, USA. Disponível em: <<https://www3.epa.gov/npdes/pubs/owm0274.pdf>>, acesso em 02/08/2016.

US EPA - United States Environmental Protection Agency, 2010, *Stormwater Best Management Practices (BMP) Performance Analysis*, USA. Disponível em: <<https://www3.epa.gov/region1/npdes/stormwater/assets/pdfs/BMP-Performance-Analysis-Report.pdf>>, acesso em 02/08/2016.

US EPA - United States Environmental Protection Agency, 2012, *WaterSense at Work - Best Management Practices for Commercial and Institutional Facilities*, USA. Disponível em: <[https://www3.epa.gov/watersense/docs/ws-at-work\\_bmpcommercialandinstitutional\\_508.pdf](https://www3.epa.gov/watersense/docs/ws-at-work_bmpcommercialandinstitutional_508.pdf)>, acesso em 02/08/2016.

US EPA - United States Environmental Protection Agency, 2013, *Greening EPA Glossary - Terminology Services: Vocabulary Catalog List Detail Report*, USA.

URBONAS, B., STAHR, P., 1993, *Stormwater: Best management practices and detention for water quality, drainage, and CSO management*, Englewood Cliffs, New Jersey: Prentice-Hall.

VAN RON, M., 2007, “Water localisation and reclamation: Steps towards low impact urban design and development”, *Journal of Environmental Management*, v. 83, p. 437-447.

VANWOERT, N. D., ROWE, D.B., ANDRESEN, J.A., RUGH, C.L., FERNANDEZ, R.T., XIAO, L., 2005, “Green Roof Stormwater Retention: Effects of Roof Surface, Slope, and Media Depth”, *Journal of Environmental Quality*, v. 34, p. 1036-1044.

VERGARA, L. G. L., PIPPI, L. G. A., BARBOSA, A. R., 2009, “Experiência de execução de telhado verde: maior integração da edificação à paisagem natural”, *V Encontro Nacional e III Encontro Latino-americano sobre Edificações e Comunidades Sustentáveis*, Recife, PE, Brasil.

VERÓL, A. P., 2013, *Requalificação Fluvial integrada ao manejo de águas urbanas para cidades mais resilientes*, Tese de Doutorado, COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.

VERÓL, A. P., MIGUEZ, M. G., MASCARENHAS, F. C. B., 2013, “Propagação da Onda de Ruptura de Barragem Através de um Modelo quase-2D”, *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, v. 18, n. 1, p. 165-176.

VERSINI, P., GIRES, A., ABBES, J., GIANGOLA-MURZYN, A., TCHINGUIRINSKAIA, I., SCHERTZER, D., 2014, “Simulation of Green Roof Impact at Basin Scale by Using a Distributed Rainfall-Runoff Model”, In: *Proceedings of the 13th International Congress On Urban Drainage*, Kuching, Sarawak, MY.

VIDA VERDE – Tecnologia em substratos, [entre 2012 e 2016], *Tropstrato Floreiras e Vasos*. Disponível em: <[http://www.vidaverde.agr.br/produtos\\_floreiras.htm](http://www.vidaverde.agr.br/produtos_floreiras.htm)>, acesso em 15 de março de 2016.

VIEIRA, C. P., PALMIER, L. R., 2006, “Medida e Modelagem da Interceptação da Chuva em uma Área Florestada na Região Metropolitana de Belo Horizonte, Minas Gerais”, *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, v. 11, n. 3, p. 101-112.

VIJAYARAGHAVAN, K., JOSHI, U. M., BALASUBRAMANIAN, R., 2012, “A field study to evaluate runoff quality from green roofs”, *Water Research*, v. 46, p.1337-1345.

VILLAREAL, E. L., BENGTSSON, L., 2005, “Response of a Sedum green-roof to individual rain events”, *Ecological Engineering*, v. 25, p. 1-7.

WALMSLEY, A., 1995, Greenways and the making of urban form, *Landscape and Urban Planning*, v. 33, p. 81–127.

WELLS, M., GRANT, G., 2004, “Biodiverse Vegetated Architecture Worldwide: Status, Research and Advances”, *Proceedings of IEEM Conference On Sustainable New Housing and Major Development: Rising to the Ecological Challenges*, Bournemouth, Dorset, England.

WHELANS, HALPERN GLICK MAUNSELL, THOMPSON PALMER e MURDOCH UNIVERSITY, 1994, *Planning and Management Guidelines for Water Sensitive Urban (Residential) Design*, prepared for the Department of Planning and Urban Development, Water Authority of Western Australia and the Environment Protection Authority.

WIKIPEDIA, 2016, *Le Corbusier* (Última atualização em 14/10/2016). Disponível em: <[https://pt.wikipedia.org/wiki/Le\\_Corbusier](https://pt.wikipedia.org/wiki/Le_Corbusier)>, acesso em 8 de janeiro de 2016.

WILKEN, P. S., 1978, *Engenharia de drenagem superficial*, Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental, São Paulo, SP, Brasil.

WILLIAMS, N. S. G., LUNDHOLM, J., MACLVOR, J. S., 2014, “Do green roofs help urban diversity conservation?”, *Journal of Applied Ecology*, v. 51, p. 1643-1649.

ZAMBARDINO, A., 2012, *Foro Romano - Tramo de la Cloaca Máxima* (Publicada em 23/11/2012). Disponível em: <[http://www.nationalgeographic.com.es/historia/grandes-reportajes/foro-romano\\_6628/19](http://www.nationalgeographic.com.es/historia/grandes-reportajes/foro-romano_6628/19)>, acesso em 12 de dezembro de 2015.

ZAMPRONIO, G. B., 2009, *Integração de Técnicas para Apoio à Gestão de sistemas de Drenagem Urbana Aplicada a uma Bacia Hidrográfica no Município do Rio de Janeiro*, Dissertação de Mestrado, COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.

ZANOBETTI, D., LORGERÉ, H., PREISSMAN, A., CUNGE, J. A., 1970, “Mekong Delta Mathematical Program Construction”, *Journal of the Waterways and Harbours Division*, ASCE, v. 96, p. 181-199.

ZONENSEIN, J., 2007, *Índice de Risco de Cheia como Ferramenta de Gestão de Enchentes*, Dissertação de Mestrado, COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.

ZHENG, X. Y., 2015, “The ancient urban water system construction of China: The lessons from history for future”, *International Journal of Global Environmental Issues*, v. 14, n. 3/4.

ZHOU, Q., 2014, “A Review of Sustainable Urban Drainage Systems Considering the Climate Change and Urbanization Impacts”, *Water*, v.6, p. 976-992. Disponível em: <<http://www.mdpi.com/2073-4441/6/4/976/htm>>, acesso em 15/12/2015.

YANG, J., YU, Q., GONG, P., 2008, “Quantifying air pollution removal by green roofs in Chicago”, *Atmospheric Environment*, v. 42, p. 7266-7273.

YANG, H. S., KANG, J., CHOI, M. S., 2012, “Acoustic effects of green roof systems on a low-profiled structure at street level”, *Building and Environment*, v. 50, p. 44-55.

## REFERÊNCIAS ELETRÔNICAS

- <http://www.greenroofs.com/projects/pview.php?id=1747>, acesso em 13 de novembro de 2015.
- <http://www.dicionarioinformal.com.br/sustentabilidade/>, acesso em 13 de novembro de 2015.
- <http://www.studiocidadejardim.com.br/#!/como-montar-um-telhado-verde/c10wh>, acesso em 13 de novembro de 2015.
- <http://www.moderna.com.br/lumis/portal/file/fileDownload.jsp?fileId=8A8A8A83385170C6013852CDA26C4ECC>, acesso em 12 de dezembro de 2015.
- <https://watersensitivecities.org.au/what-is-a-water-sensitive-city/>, acesso em 9 de janeiro de 2016.
- <https://www.wbdg.org/>, acesso em 25 de fevereiro de 2016.
- <http://www.creditvalleyca.ca/>, acesso em 25 de fevereiro de 2016.
- <http://www.landcareresearch.co.nz/>, acesso em 25 de fevereiro de 2016.
- <https://www.environment.gov.au/>, acesso em 25 de fevereiro de 2016.
- <http://www-wds.worldbank.org/external>, acesso em 25 de fevereiro de 2016.
- <http://water.worldbank.org/iuwm>, acesso em 25 de fevereiro de 2016.
- <https://publications.csiro.au/>, acesso em 25 de fevereiro de 2016.
- <http://geoinfo.mrt.ac.lk/>, acesso em 25 de fevereiro de 2016.
- <http://www.susdrain.org/>, acesso em 25 de fevereiro de 2016.
- <http://www.legislation.gov.uk/>, acesso em 25 de fevereiro de 2016.
- <http://www3.epa.gov/>, acesso em 25 de fevereiro de 2016.
- <http://www.omafra.gov.on.ca/>, acesso em 25 de fevereiro de 2016.
- <https://www.fcm.ca/>, acesso em 25 de fevereiro de 2016.
- <http://www.swrcb.ca.gov/>, acesso em 25 de fevereiro de 2016.
- <https://fortress.wa.gov/>, acesso em 25 de fevereiro de 2016.
- <http://www.unepdhi.org/>, acesso em 25 de fevereiro de 2016.
- <http://www.europarc.org/>, acesso em 25 de fevereiro de 2016.
- <http://watersensitivecities.org.au/>, acesso em 25 de fevereiro de 2016.
- <http://www.guiaviajarmelhor.com/descubra-as-7-maravilhas-do-mundo-antigo/>, acesso em 9 de janeiro de 2016.
- <http://www.greenroofs.com/projects/chichall/chichall11.jpg>, acesso em 20 de novembro de 2015.

<http://www.greenroofs.com/projects/pview.php?id=626>, acesso em 20 de novembro de 2015.

[http://www.greenroofs.com/projects/hsbc\\_bank/hsbc\\_bank8.gif](http://www.greenroofs.com/projects/hsbc_bank/hsbc_bank8.gif), acesso em 20 de novembro de 2015.

[http://www.greenroofs.com/projects/roch\\_israel/roch\\_israel9.gif](http://www.greenroofs.com/projects/roch_israel/roch_israel9.gif), acesso em 20 de novembro de 2015.

<http://www.greenroofs.com/projects/pview.php?id=887>, acesso em 20 de novembro de 2015.

<http://www.greenroofs.com/projects/pview.php?id=846>, acesso em 20 de novembro de 2015.

<http://www.greenroofs.com/projects/pview.php?id=787>, acesso em 20 de novembro de 2015.

[http://www.greenroofs.com/projects/marina\\_barrage/](http://www.greenroofs.com/projects/marina_barrage/), acesso em 20 de novembro de 2015.

<http://www.greenroofs.com/projects/pview.php?id=523>, acesso em 20 de novembro de 2015.

<http://www.greenroofs.com/projects/8house/8house10.gif>, acesso em 20 de novembro de 2015.

<http://www.greenroofs.com/projects/pview.php?id=1304>, acesso em 18 de janeiro de 2016.

<http://www.greenroofs.com/projects/pview.php?id=1364>, acesso em 18 de janeiro de 2016.

<http://www.greenroofs.com/projects/pview.php?id=1584>, acesso em 18 de janeiro de 2016.

<http://www.greenroofs.com/projects/pview.php?id=1385>, acesso em 18 de janeiro de 2016.

<http://www.greenroofs.com/projects/pview.php?id=1715>, acesso em 18 de janeiro de 2016.

<http://www.greenroofs.com/projects/pview.php?id=1729>, acesso em 18 de janeiro de 2016.

<http://oglobo.globo.com/rio/a-nova-estacao-jardim-oceanico-do-metro-do-rio-19614574>, acesso em 18 de janeiro de 2016.

<http://www.studiocidadejardim.com.br/como-montar-um-telhado-verde>, acesso em 18 de janeiro de 2016.

## **APÊNDICE A – HISTÓRICO DAS ATIVIDADES NO PROTÓTIPO DE COBERTURA VERDE**

Com a bancada experimental pronta, houveram algumas tentativas de montagem do protótipo de cobertura verde que não foram bem-sucedidas. A primeira tentativa envolveu um aluno de Doutorado que seria o responsável pela implantação do protótipo; porém; o aluno acabou desistindo da pesquisa e os materiais e a metodologia sugeridos por ele tornaram a execução do protótipo inviável devido ao elevado custo. Em seguida, pensou-se em implantar um telhado verde do tipo “modular”, porém, os módulos comerciais não se encaixavam na área do módulo de modo adequado e, além disso, as empresas que vendiam os módulos não queriam ser responsáveis pelo desenvolvimento e manutenção da vegetação até um determinado estágio. Na terceira tentativa, anterior à apresentada neste trabalho, um grupo de alunos de Iniciação Científica do curso de Engenharia Civil tentou construir o protótipo de telhado verde, implantando um telhado verde do tipo “sistema completo”, com o apoio da Prefeitura da Cidade Universitária, porém, além do substrato não ser adequado para a vegetação que se pretendia implantar, o telhado não resistiu devido a ação de chuvas, de ventos e da intensa incidência de sol. Essas tentativas ocorreram no período de meados de 2013 à meados de 2015.

Em agosto de 2015, foi criado um grupo de pesquisa, envolvendo alunos de graduação e pós-graduação da UFRJ, tendo como objetivo o desfazimento do que restou do último protótipo de telhado verde, que acabou não vingando no módulo da bancada experimental, e a implantação de outro protótipo para o prosseguimento da pesquisa. Foi nesse momento em que o autor do presente trabalho retornou a participar da pesquisa da qual o mesmo fez parte em 2012.

As atividades desempenhadas pelo grupo mencionado no parágrafo anterior estão resumidas e esquematizadas no Quadro A-1. Destaca-se que, além da implantação do telhado verde no módulo 5, também foram executados uma série de reparos na bancada experimental como um todo e de um módulo de pavimento permeável.

O módulo 5, que recebeu o protótipo de cobertura verde, foi impermeabilizado com os produtos Denvertec 100 e Denvertec 540, fornecidos pela empresa Denver Impermeabilizantes (<http://www.denverimper.com.br/>, acesso em 15/03/2016) nos dias 15 e 16 de outubro de 2015 e a conclusão do telhado ocorreu em 6 de novembro de 2015.

Quadro A-1 – Atividades desempenhadas pelo grupo de pesquisa para implantação do protótipo de cobertura verde.

| <b>Data</b> | <b>Atividades realizadas</b>                                                                                                                                                                                                                                                                                             |
|-------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 04/09/2015  | Desfazimento do módulo de telhado verde existente que não vingou, verificação da existência de infiltrações através das paredes do módulo, elaboração do projeto <i>as built</i> do espaço da bancada experimental no qual será implantado o novo telhado verde, e definição das próximas estratégias.                   |
| 16/09/2015  | Visita ao módulo de telhado verde para início da execução de correções e reparos necessários para a realização dos experimentos na bancada experimental.                                                                                                                                                                 |
| 22/09/2015  | Remoção dos tubos de drenagem do módulo do telhado verde, visto que a declividade destes deveriam ser corrigidas.                                                                                                                                                                                                        |
| 29/09/2015  | Apresentação dos problemas identificados na bancada experimental dos protótipos de pavimento permeável e telhado verde, instalados no CESA/UFRJ, aos professores Marcelo Miguez e Theophilo Benedicto, com o objetivo de obter sugestões para reparos e considerações a serem observadas na reconstrução dos protótipos. |
| 09/10/2015  | Visita ao CESA/UFRJ para levantamento dos reparos necessários na bancada. Ida à loja que vende impermeabilizantes para comprar o material necessário para execução dos reparos.                                                                                                                                          |
| 15/10/2015  | Realização dos reparos necessários no módulo de pavimento permeável e de telhado verde na bancada experimental e início da impermeabilização dos módulos.                                                                                                                                                                |
| 16/10/2015  | Término da impermeabilização dos módulos de pavimento permeável e de telhado verde na bancada experimental.                                                                                                                                                                                                              |
| 19/10/2015  | Verificação da impermeabilização dos módulos de pavimento permeável e de telhado verde na bancada experimental.                                                                                                                                                                                                          |
| 23/10/2015  | Verificação dos reparos na impermeabilização e início do teste de estanqueidade.                                                                                                                                                                                                                                         |
| 06/11/2015  | Construção do módulo de telhado verde na bancada experimental.                                                                                                                                                                                                                                                           |
| 10/11/2015  | Acompanhamento do desenvolvimento do telhado verde.                                                                                                                                                                                                                                                                      |
| 13/11/2015  | Acompanhamento do desenvolvimento do telhado verde.                                                                                                                                                                                                                                                                      |
| 15/12/2015  | Realização do primeiro ensaio experimental na bancada.                                                                                                                                                                                                                                                                   |

A UFRJ entrou em recesso de fim de ano no período de 21 de dezembro de 2015 até 3 de janeiro de 2016. Nesse período, o telhado verde acabou ficando muito exposto às intempéries do local, e observou-se, após o período de recesso, que algumas plantas não suportaram a intensa exposição ao sol.

Após visita da professora do Departamento de Botânica do Instituto de Biologia da UFRJ, Fernanda Reinert, em 28/01/2016, ocasião em que foi constado que algumas plantas realmente não haviam resistido, decidiu-se pela substituição dessas e também pelo aumento da densidade de plantas na área do telhado. Em 05/02/2016, foram realizados as

substituições e o plantio de novas bromélias, que correspondem a configuração do telhado verde utilizada nos experimentos desta pesquisa.

Após o processo de reparo da bancada experimental e da implantação do protótipo definitivo de telhado verde no seu respectivo módulo, a campanha de ensaios experimentais da qual a presente pesquisa trata foi realizada no período de 15/02/2016 até 01/04/2016. De modo esquemático, a Figura A-1 apresenta uma linha do tempo em que é possível observar toda a evolução da pesquisa, do processo de planejamento e concepção da bancada experimental até o início da primeira campanha de ensaios experimentais no protótipo de cobertura verde.

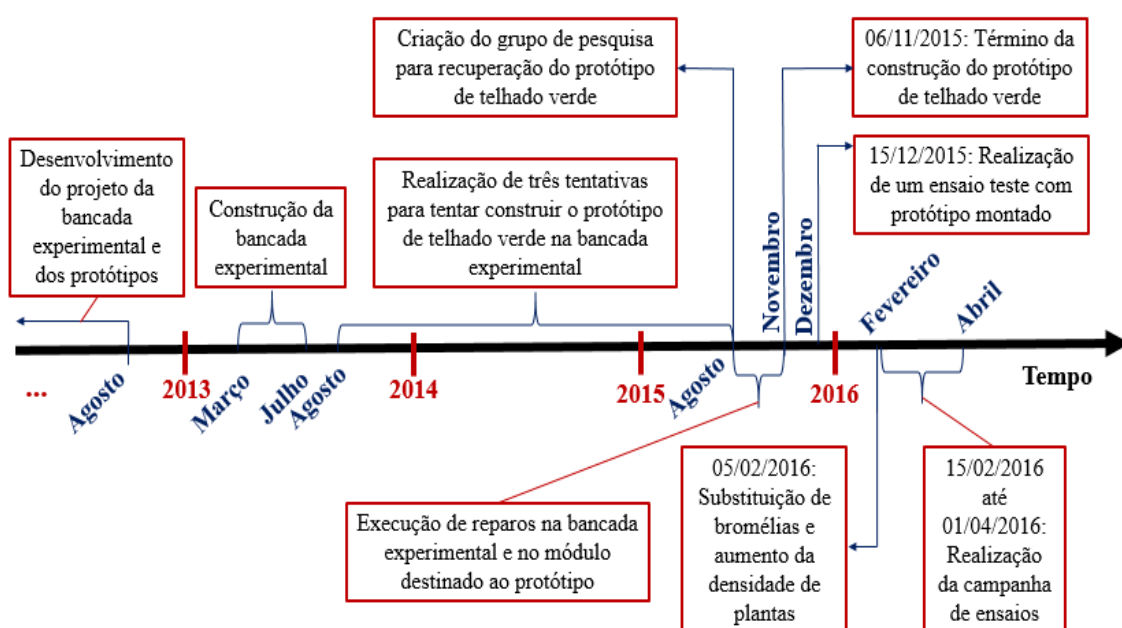


Figura A-1 – Linha do tempo que apresenta desde a concepção do protótipo até o início da realização de ensaios no protótipo de telhado verde.

## APÊNDICE B – FOLHAS DE CAMPO DOS ENSAIOS EXPERIMENTAIS

A folha de campo utilizada nos ensaios experimentais foi se aperfeiçoando, conforme necessidades encontradas durante o período de realização da campanha de ensaios. A última versão desta contempla as seguintes informações:

- Informações Gerais: local e data de realização do experimento, temperatura observada durante o ensaio e número de dias anteriores ao ensaio sem chuva;
- Determinação da precipitação: volumes de água obtidos antes e após o experimento, na calibração do Simulador de Chuvas;
- Determinação da umidade inicial do substrato: pesos do recipiente ( $P_{Tara}$ ), do recipiente com amostra úmida ( $P_{Tara+Úmido}$ ) e do recipiente com amostra seca ( $P_{Tara+Seco}$ );
- Determinação da umidade inicial do substrato: pesos do recipiente ( $P_{Tara}$ ), do recipiente com amostra úmida ( $P_{Tara+Úmido}$ ) e do recipiente com amostra seca ( $P_{Tara+Seco}$ );
- Horários de início da chuva, início do escoamento nas torneiras, fim da chuva, término do escoamento nas torneiras;
- Medições na Caixa Pluviômetra: É anotada a cota inicial que está marcada na régua acoplada ao reservatório maior. A partir do início da chuva, até o término do escoamento de água nas torneiras que drenam o protótipo, são verificadas, a cada minuto, a cota na régua.

A seguir, são apresentadas as folhas de campo com as medições realizadas em cada ensaio experimental.

## Ensaio 1

### Folha de Campo - Ensaio no módulo de telhado verde

|        |                                                         |
|--------|---------------------------------------------------------|
| Local: | Centro Experimental de Saneamento Ambiental - CESA/UFRJ |
| Data:  | 25/02/2016                                              |

|                                   |       |                                  |      |
|-----------------------------------|-------|----------------------------------|------|
| Horário de início das atividades: | 08:00 | Temperatura Média (° C):         | 28.2 |
| Horário de fim das atividades:    | 11:00 | Nº de dias anteriores sem chuva: | 2    |

### 1) Determinação da Precipitação Média do Ensaio

#### 1.1. Precipitação antes da realização do experimento

(Hora - 08:00 )

|                         |      |        |
|-------------------------|------|--------|
| Volume da placa azul 1: | 10.3 | Litros |
| Volume da placa azul 2: | 8.8  | Litros |
| Volume total:           | 19.1 | Litros |

P1 = 106.1 mm/h

$P1 \text{ (mm/h)} = [ \text{Volume total (Litros)} / \text{Área de coleta (=1,8 m}^2 \text{)} ] / \text{Tempo (0,1 h=6min)}$

#### 1.2. Precipitação após a realização do experimento

(Hora - 10:30 )

|                         |      |        |
|-------------------------|------|--------|
| Volume da placa azul 1: | 11.9 | Litros |
| Volume da placa azul 2: | 10.1 | Litros |
| Volume total:           | 22.0 | Litros |

P2 = 122.2 mm/h

$P2 \text{ (mm/h)} = [ \text{Volume total (Litros)} / \text{Área de coleta (=1,8 m}^2 \text{)} ] / \text{Tempo (0,1 h=6min)}$

#### 1.3. Precipitação Média: $P = (P1 + P2) / 2$

P = 114.2 mm/h

## 2) Experimento

### 2.1. Controle dos tempos e horário

|                                                                 | Relógio | Cronômetro |
|-----------------------------------------------------------------|---------|------------|
|                                                                 | (HH:MM) | (HH:MM)    |
| Hora do início da chuva sobre o telhado (Hi):                   | 08:15   | 00:00      |
| Hora em que começa a sair água das torneiras (Ht):              | 08:24   | 00:09      |
| Hora em que o deflúvio do telhado chega na CP (Hc):             | 08:27   | 00:12      |
| Tempo de demora do início do escoamento até chegada na CP (Tr): | 00:12   | 00:12      |
| Hora do fim da chuva sobre o telhado (Hf):                      | 09:45   | 01:30      |
| Tempo de duração da chuva (Td):                                 | 01:30   | -          |

### 2.2. Caixa Pluviômetra

|                                               |      |
|-----------------------------------------------|------|
| Leitura inicial da cota na Caixa Grande (cm): | 22.2 |
|-----------------------------------------------|------|

### 2.3. Umidade do Substrato

Equipamentos: Balança BG 8000, prato de alumínio e estufa.

#### 2.3.1. Amostra de todo substrato

|                               |       |                                |       |                         |       |
|-------------------------------|-------|--------------------------------|-------|-------------------------|-------|
| P <sub>Tara</sub> (g):        | 72.6  | P <sub>Úmido + Tara</sub> (g): | 254.8 | P <sub>Úmido</sub> (g): | 182.2 |
| P <sub>Seco + Tara</sub> (g): | 232.9 | P <sub>Seco</sub> (g):         | 160.3 | Umidade (%):            | 13.7  |

#### 2.3.2. Amostra de areia

|                               |      |                                |      |                         |      |
|-------------------------------|------|--------------------------------|------|-------------------------|------|
| P <sub>Tara</sub> (g):        | 42.6 | P <sub>Úmido + Tara</sub> (g): | 89.9 | P <sub>Úmido</sub> (g): | 47.3 |
| P <sub>Seco + Tara</sub> (g): | 86.5 | P <sub>Seco</sub> (g):         | 43.9 | Umidade (%):            | 7.7  |

### 2.4. Medições

| t  | Hora | Lcg (cm) | t  | Hora | Lcg (cm) | t   | Hora  | Lcg (cm) |
|----|------|----------|----|------|----------|-----|-------|----------|
| 0  | 8:15 | 22.2     | 48 | 9:03 | 33.3     | 96  | 09:51 | 49.2     |
| 1  | 8:16 | 22.2     | 49 | 9:04 | 33.7     | 97  | 09:52 | 49.5     |
| 2  | 8:17 | 22.2     | 50 | 9:05 | 34.1     | 98  | 09:53 | 49.8     |
| 3  | 8:18 | 22.2     | 51 | 9:06 | 34.4     | 99  | 09:54 | 50.0     |
| 4  | 8:19 | 22.2     | 52 | 9:07 | 34.8     | 100 | 09:55 | 50.3     |
| 5  | 8:20 | 22.2     | 53 | 9:08 | 35.1     | 101 | 09:56 | 50.6     |
| 6  | 8:21 | 22.2     | 54 | 9:09 | 35.4     | 102 | 09:57 | 50.8     |
| 7  | 8:22 | 22.2     | 55 | 9:10 | 35.8     | 103 | 09:58 | 51.1     |
| 8  | 8:23 | 22.2     | 56 | 9:11 | 36.1     | 104 | 09:59 | 51.3     |
| 9  | 8:24 | 22.2     | 57 | 9:12 | 36.4     | 105 | 10:00 | 51.6     |
| 10 | 8:25 | 22.2     | 58 | 9:13 | 36.8     | 106 | 10:01 | 51.9     |
| 11 | 8:26 | 22.2     | 59 | 9:14 | 37.1     | 107 | 10:02 | 52.1     |
| 12 | 8:27 | 22.2     | 60 | 9:15 | 37.4     | 108 | 10:03 | 52.3     |
| 13 | 8:28 | 22.3     | 61 | 9:16 | 37.8     | 109 | 10:04 | 52.6     |
| 14 | 8:29 | 22.5     | 62 | 9:17 | 38.1     | 110 | 10:05 | 52.7     |
| 15 | 8:30 | 22.9     | 63 | 9:18 | 38.3     | 111 | 10:06 | 53.1     |
| 16 | 8:31 | 23.1     | 64 | 9:19 | 38.8     | 112 | 10:07 | 53.3     |
| 17 | 8:32 | 23.4     | 65 | 9:20 | 39.1     | 113 | 10:08 | 53.5     |
| 18 | 8:33 | 23.6     | 66 | 9:21 | 39.4     | 114 | 10:09 | 53.7     |
| 19 | 8:34 | 23.9     | 67 | 9:22 | 39.8     | 115 | 10:10 | 53.9     |
| 20 | 8:35 | 24.2     | 68 | 9:23 | 40.0     | 116 | 10:11 | 54.1     |
| 21 | 8:36 | 24.5     | 69 | 9:24 | 40.4     | 117 | 10:12 | 54.2     |
| 22 | 8:37 | 24.8     | 70 | 9:25 | 40.7     | 118 | 10:13 | 54.3     |

|    |      |      |    |      |      |     |       |      |
|----|------|------|----|------|------|-----|-------|------|
| 23 | 8:38 | 25.1 | 71 | 9:26 | 41.0 | 119 | 10:14 | 54.4 |
| 24 | 8:39 | 25.4 | 72 | 9:27 | 41.3 | 120 | 10:15 | 54.5 |
| 25 | 8:40 | 25.8 | 73 | 9:28 | 41.7 | 121 | 10:16 | 54.5 |
| 26 | 8:41 | 26.1 | 74 | 9:29 | 42.0 | 122 | 10:17 | 54.5 |
| 27 | 8:42 | 26.4 | 75 | 9:30 | 42.4 | 123 | 10:18 | 54.5 |
| 28 | 8:43 | 26.7 | 76 | 9:31 | 42.7 | 124 | 10:19 | 54.5 |
| 29 | 8:44 | 27.1 | 77 | 9:32 | 43.0 | 125 |       |      |
| 30 | 8:45 | 27.4 | 78 | 9:33 | 43.4 | 126 |       |      |
| 31 | 8:46 | 27.8 | 79 | 9:34 | 43.7 | 127 |       |      |
| 32 | 8:47 | 28.1 | 80 | 9:35 | 44.0 | 128 |       |      |
| 33 | 8:48 | 28.4 | 81 | 9:36 | 44.3 | 129 |       |      |
| 34 | 8:49 | 28.8 | 82 | 9:37 | 44.6 | 130 |       |      |
| 35 | 8:50 | 29.1 | 83 | 9:38 | 44.9 | 131 |       |      |
| 36 | 8:51 | 29.5 | 84 | 9:39 | 45.3 | 132 |       |      |
| 37 | 8:52 | 29.8 | 85 | 9:40 | 45.6 | 133 |       |      |
| 38 | 8:53 | 30.3 | 86 | 9:41 | 45.9 | 134 |       |      |
| 39 | 8:54 | 30.6 | 87 | 9:42 | 46.3 | 135 |       |      |
| 40 | 8:55 | 30.9 | 88 | 9:43 | 46.6 | 136 |       |      |
| 41 | 8:56 | 31.1 | 89 | 9:44 | 46.9 | 137 |       |      |
| 42 | 8:57 | 31.5 | 90 | 9:45 | 47.3 | 138 |       |      |
| 43 | 8:58 | 31.9 | 91 | 9:46 | 47.6 | 139 |       |      |
| 44 | 8:59 | 32.1 | 92 | 9:47 | 47.9 | 140 |       |      |
| 45 | 9:00 | 32.4 | 93 | 9:48 | 48.2 | 141 |       |      |
| 46 | 9:01 | 32.7 | 94 | 9:49 | 48.5 | 142 |       |      |
| 47 | 9:02 | 33.0 | 95 | 9:50 | 48.9 | 143 |       |      |

## Ensaio 2

### Folha de Campo - Ensaio no módulo de telhado verde

|        |                                                         |
|--------|---------------------------------------------------------|
| Local: | Centro Experimental de Saneamento Ambiental - CESA/UFRJ |
| Data:  | 01/03/2016                                              |

|                                   |       |                                  |      |
|-----------------------------------|-------|----------------------------------|------|
| Horário de início das atividades: | 08:00 | Temperatura Média (°C):          | 24.4 |
| Horário de fim das atividades:    | 11:00 | Nº de dias anteriores sem chuva: | 0    |

### 1) Determinação da Precipitação Média do Ensaio

#### 1.1. Precipitação antes da realização do experimento

(Hora - 08:00 )

|                         |      |        |
|-------------------------|------|--------|
| Volume da placa azul 1: | 7.9  | Litros |
| Volume da placa azul 2: | 8.8  | Litros |
| Volume total:           | 16.7 | Litros |

P1 = 92.8 mm/h

$P1 \text{ (mm/h)} = [ \text{Volume total (Litros)} / \text{Área de coleta (=1,8 m}^2 \text{)} ] / \text{Tempo (0,1 h=6min)}$

#### 1.2. Precipitação após a realização do experimento

(Hora - 10:30 )

|                         |      |        |
|-------------------------|------|--------|
| Volume da placa azul 1: | 8.0  | Litros |
| Volume da placa azul 2: | 8.6  | Litros |
| Volume total:           | 16.6 | Litros |

P2 = 92.2 mm/h

$P2 \text{ (mm/h)} = [ \text{Volume total (Litros)} / \text{Área de coleta (=1,8 m}^2 \text{)} ] / \text{Tempo (0,1 h=6min)}$

#### 1.3. Precipitação Média: $P = (P1 + P2) / 2$

P = 92.5 mm/h

## 2) Experimento

### 2.1. Controle dos tempos e horário

|                                                                 | Relógio | Cronômetro |
|-----------------------------------------------------------------|---------|------------|
|                                                                 | (HH:MM) | (HH:MM)    |
| Hora do início da chuva sobre o telhado (Hi):                   | 08:18   | 00:00      |
| Hora em que começa a sair água das torneiras (Ht):              | 08:24   | 00:06      |
| Hora em que o deflúvio do telhado chega na CP (Hc):             | 08:27   | 00:09      |
| Tempo de demora do início do escoamento até chegada na CP (Tr): | 00:09   | 00:09      |
| Hora do fim da chuva sobre o telhado (Hf):                      | 09:48   | 01:30      |
| Tempo de duração da chuva (Td):                                 | 01:30   | -          |

### 2.2. Caixa Pluviômetra

|                                               |      |
|-----------------------------------------------|------|
| Leitura inicial da cota na Caixa Grande (cm): | 23.1 |
|-----------------------------------------------|------|

### 2.3. Umidade do Substrato

Equipamentos: Balança BG 8000, prato de alumínio e estufa.

#### 2.3.1. Amostra de todo substrato

|                               |       |                                |       |                         |       |
|-------------------------------|-------|--------------------------------|-------|-------------------------|-------|
| P <sub>Tara</sub> (g):        | 63.4  | P <sub>Úmido + Tara</sub> (g): | 220.5 | P <sub>Úmido</sub> (g): | 157.1 |
| P <sub>Seco + Tara</sub> (g): | 201.3 | P <sub>Seco</sub> (g):         | 137.9 | Umidade (%):            | 13.9  |

#### 2.3.2. Amostra de areia

|                               |       |                                |       |                         |      |
|-------------------------------|-------|--------------------------------|-------|-------------------------|------|
| P <sub>Tara</sub> (g):        | 41.8  | P <sub>Úmido + Tara</sub> (g): | 107.0 | P <sub>Úmido</sub> (g): | 65.2 |
| P <sub>Seco + Tara</sub> (g): | 102.3 | P <sub>Seco</sub> (g):         | 60.5  | Umidade (%):            | 7.8  |

### 2.4. Medições

| <b>t</b> | <b>Hora</b> | <b>Lcg (cm)</b> | <b>t</b> | <b>Hora</b> | <b>Lcg (cm)</b> | <b>t</b> | <b>Hora</b> | <b>Lcg (cm)</b> |
|----------|-------------|-----------------|----------|-------------|-----------------|----------|-------------|-----------------|
| 0        | 8:18        | 23.1            | 48       | 9:06        | 36.8            | 96       | 09:54       | 50.5            |
| 1        | 8:19        | 23.1            | 49       | 9:07        | 37.1            | 97       | 09:55       | 50.8            |
| 2        | 8:20        | 23.1            | 50       | 9:08        | 37.4            | 98       | 09:56       | 50.9            |
| 3        | 8:21        | 23.1            | 51       | 9:09        | 37.7            | 99       | 09:57       | 51.2            |
| 4        | 8:22        | 23.1            | 52       | 9:10        | 38.0            | 100      | 09:58       | 51.4            |
| 5        | 8:23        | 23.1            | 53       | 9:11        | 38.3            | 101      | 09:59       | 51.8            |
| 6        | 8:24        | 23.1            | 54       | 9:12        | 38.6            | 102      | 10:00       | 52.3            |
| 7        | 8:25        | 23.1            | 55       | 9:13        | 38.7            | 103      | 10:01       | 52.7            |
| 8        | 8:26        | 23.1            | 56       | 9:14        | 39.0            | 104      | 10:02       | 52.9            |
| 9        | 8:27        | 23.1            | 57       | 9:15        | 39.3            | 105      | 10:03       | 53.2            |
| 10       | 8:28        | 23.6            | 58       | 9:16        | 39.6            | 106      | 10:04       | 53.4            |
| 11       | 8:29        | 24.0            | 59       | 9:17        | 39.8            | 107      | 10:05       | 53.5            |
| 12       | 8:30        | 24.3            | 60       | 9:18        | 40.1            | 108      | 10:06       | 53.7            |
| 13       | 8:31        | 24.6            | 61       | 9:19        | 40.4            | 109      | 10:07       | 53.7            |
| 14       | 8:32        | 25.0            | 62       | 9:20        | 40.6            | 110      | 10:08       | 53.7            |
| 15       | 8:33        | 25.2            | 63       | 9:21        | 41.1            | 111      | 10:09       | 53.9            |
| 16       | 8:34        | 25.5            | 64       | 9:22        | 41.6            | 112      | 10:10       | 53.9            |
| 17       | 8:35        | 25.8            | 65       | 9:23        | 42.0            | 113      | 10:11       | 54.1            |
| 18       | 8:36        | 26.3            | 66       | 9:24        | 42.5            | 114      | 10:12       | 54.1            |
| 19       | 8:37        | 26.6            | 67       | 9:25        | 42.8            | 115      | 10:13       | 54.1            |
| 20       | 8:38        | 27.0            | 68       | 9:26        | 43.1            | 116      | 10:14       | 54.1            |
| 21       | 8:39        | 27.2            | 69       | 9:27        | 43.3            | 117      | 10:15       | 54.1            |
| 22       | 8:40        | 27.7            | 70       | 9:28        | 43.6            | 118      | 10:16       | 54.1            |
| 23       | 8:41        | 28.1            | 71       | 9:29        | 44.0            | 119      |             |                 |

|    |      |      |    |      |      |     |  |  |
|----|------|------|----|------|------|-----|--|--|
| 24 | 8:42 | 28.5 | 72 | 9:30 | 44.3 | 120 |  |  |
| 25 | 8:43 | 28.9 | 73 | 9:31 | 44.7 | 121 |  |  |
| 26 | 8:44 | 29.3 | 74 | 9:32 | 44.9 | 122 |  |  |
| 27 | 8:45 | 29.7 | 75 | 9:33 | 45.2 | 123 |  |  |
| 28 | 8:46 | 30.1 | 76 | 9:34 | 45.4 | 124 |  |  |
| 29 | 8:47 | 30.5 | 77 | 9:35 | 45.8 | 125 |  |  |
| 30 | 8:48 | 30.9 | 78 | 9:36 | 46.0 | 126 |  |  |
| 31 | 8:49 | 31.2 | 79 | 9:37 | 46.3 | 127 |  |  |
| 32 | 8:50 | 31.6 | 80 | 9:38 | 46.5 | 128 |  |  |
| 33 | 8:51 | 31.9 | 81 | 9:39 | 46.8 | 129 |  |  |
| 34 | 8:52 | 32.3 | 82 | 9:40 | 47.1 | 130 |  |  |
| 35 | 8:53 | 32.6 | 83 | 9:41 | 47.4 | 131 |  |  |
| 36 | 8:54 | 33.0 | 84 | 9:42 | 47.9 | 132 |  |  |
| 37 | 8:55 | 33.4 | 85 | 9:43 | 48.1 | 133 |  |  |
| 38 | 8:56 | 33.8 | 86 | 9:44 | 48.3 | 134 |  |  |
| 39 | 8:57 | 34.2 | 87 | 9:45 | 48.6 | 135 |  |  |
| 40 | 8:58 | 34.6 | 88 | 9:46 | 48.8 | 136 |  |  |
| 41 | 8:59 | 34.9 | 89 | 9:47 | 49.0 | 137 |  |  |
| 42 | 9:00 | 35.2 | 90 | 9:48 | 49.2 | 138 |  |  |
| 43 | 9:01 | 35.5 | 91 | 9:49 | 49.4 | 139 |  |  |
| 44 | 9:02 | 35.8 | 92 | 9:50 | 49.7 | 140 |  |  |
| 45 | 9:03 | 36.0 | 93 | 9:51 | 49.8 | 141 |  |  |
| 46 | 9:04 | 36.3 | 94 | 9:52 | 50.1 | 142 |  |  |
| 47 | 9:05 | 36.6 | 95 | 9:53 | 50.3 | 143 |  |  |

### Ensaio 3

#### Folha de Campo - Ensaio no módulo de telhado verde

|        |                                                         |
|--------|---------------------------------------------------------|
| Local: | Centro Experimental de Saneamento Ambiental - CESA/UFRJ |
| Data:  | 03/03/2016                                              |

|                                   |       |                                  |      |
|-----------------------------------|-------|----------------------------------|------|
| Horário de início das atividades: | 08:00 | Temperatura Média (°C):          | 28.4 |
| Horário de fim das atividades:    | 11:00 | Nº de dias anteriores sem chuva: | 2    |

#### 1) Determinação da Precipitação Média do Ensaio

##### 1.1. Precipitação antes da realização do experimento

(Hora - 08:00 )

|                         |      |        |
|-------------------------|------|--------|
| Volume da placa azul 1: | 8.2  | Litros |
| Volume da placa azul 2: | 10.5 | Litros |
| Volume total:           | 18.7 | Litros |

P1 = 103.9 mm/h

$P1 \text{ (mm/h)} = [ \text{Volume total (Litros)} / \text{Área de coleta (=1,8 m}^2 \text{)} ] / \text{Tempo (0,1 h=6min)}$

##### 1.2. Precipitação após a realização do experimento

(Hora - 10:30 )

|                         |      |        |
|-------------------------|------|--------|
| Volume da placa azul 1: | 7.1  | Litros |
| Volume da placa azul 2: | 10.9 | Litros |
| Volume total:           | 18.0 | Litros |

P2 = 100.0 mm/h

$P2 \text{ (mm/h)} = [ \text{Volume total (Litros)} / \text{Área de coleta (=1,8 m}^2 \text{)} ] / \text{Tempo (0,1 h=6min)}$

##### 1.3. Precipitação Média: $P = (P1 + P2) / 2$

P = 101.9 mm/h

## 2) Experimento

### 2.1. Controle dos tempos e horário

|                                                                 | Relógio | Cronômetro |
|-----------------------------------------------------------------|---------|------------|
|                                                                 | (HH:MM) | (HH:MM)    |
| Hora do início da chuva sobre o telhado (Hi):                   | 08:27   | 00:00      |
| Hora em que começa a sair água das torneiras (Ht):              | 08:37   | 00:10      |
| Hora em que o deflúvio do telhado chega na CP (Hc):             | 08:40   | 00:13      |
| Tempo de demora do início do escoamento até chegada na CP (Tr): | 00:13   | 00:13      |
| Hora do fim da chuva sobre o telhado (Hf):                      | 09:57   | 01:30      |
| Tempo de duração da chuva (Td):                                 | 01:30   | -          |

### 2.2. Caixa Pluviômetra

|                                               |      |
|-----------------------------------------------|------|
| Leitura inicial da cota na Caixa Grande (cm): | 22.8 |
|-----------------------------------------------|------|

### 2.3. Umidade do Substrato

Equipamentos: Balança BG 8000, prato de alumínio e estufa.

#### 2.3.1. Amostra de todo substrato

|                               |       |                                |       |                         |       |
|-------------------------------|-------|--------------------------------|-------|-------------------------|-------|
| P <sub>Tara</sub> (g):        | 62.7  | P <sub>Úmido + Tara</sub> (g): | 200.9 | P <sub>Úmido</sub> (g): | 138.2 |
| P <sub>Seco + Tara</sub> (g): | 185.7 | P <sub>Seco</sub> (g):         | 123.0 | Umidade (%):            | 12.4  |

#### 2.3.2. Amostra de areia

|                               |      |                                |      |                         |      |
|-------------------------------|------|--------------------------------|------|-------------------------|------|
| P <sub>Tara</sub> (g):        | 32.9 | P <sub>Úmido + Tara</sub> (g): | 91.1 | P <sub>Úmido</sub> (g): | 58.2 |
| P <sub>Seco + Tara</sub> (g): | 87.5 | P <sub>Seco</sub> (g):         | 54.6 | Umidade (%):            | 6.6  |

### 2.4. Medições

| <b>t</b> | <b>Hora</b> | <b>Lcg (cm)</b> | <b>t</b> | <b>Hora</b> | <b>Lcg (cm)</b> | <b>t</b> | <b>Hora</b> | <b>Lcg (cm)</b> |
|----------|-------------|-----------------|----------|-------------|-----------------|----------|-------------|-----------------|
| 0        | 8:27        | 22.8            | 48       | 9:15        | 31.2            | 96       | 10:03       | 43.9            |
| 1        | 8:28        | 22.8            | 49       | 9:16        | 31.4            | 97       | 10:04       | 44.1            |
| 2        | 8:29        | 22.8            | 50       | 9:17        | 31.7            | 98       | 10:05       | 44.3            |
| 3        | 8:30        | 22.8            | 51       | 9:18        | 32.0            | 99       | 10:06       | 44.5            |
| 4        | 8:31        | 22.8            | 52       | 9:19        | 32.2            | 100      | 10:07       | 44.8            |
| 5        | 8:32        | 22.8            | 53       | 9:20        | 32.4            | 101      | 10:08       | 45.0            |
| 6        | 8:33        | 22.8            | 54       | 9:21        | 32.7            | 102      | 10:09       | 45.2            |
| 7        | 8:34        | 22.8            | 55       | 9:22        | 33.0            | 103      | 10:10       | 45.4            |
| 8        | 8:35        | 22.8            | 56       | 9:23        | 33.2            | 104      | 10:11       | 45.6            |
| 9        | 8:36        | 22.8            | 57       | 9:24        | 33.5            | 105      | 10:12       | 45.8            |
| 10       | 8:37        | 22.8            | 58       | 9:25        | 33.7            | 106      | 10:13       | 45.9            |
| 11       | 8:38        | 22.8            | 59       | 9:26        | 34.0            | 107      | 10:14       | 46.1            |
| 12       | 8:39        | 22.8            | 60       | 9:27        | 34.3            | 108      | 10:15       | 46.3            |
| 13       | 8:40        | 22.8            | 61       | 9:28        | 34.5            | 109      | 10:16       | 46.5            |
| 14       | 8:41        | 23.0            | 62       | 9:29        | 34.8            | 110      | 10:17       | 46.7            |
| 15       | 8:42        | 23.1            | 63       | 9:30        | 35.1            | 111      | 10:18       | 46.9            |
| 16       | 8:43        | 23.3            | 64       | 9:31        | 35.3            | 112      | 10:19       | 47.0            |
| 17       | 8:44        | 23.5            | 65       | 9:32        | 35.6            | 113      | 10:20       | 47.1            |
| 18       | 8:45        | 23.7            | 66       | 9:33        | 35.8            | 114      | 10:21       | 47.2            |
| 19       | 8:46        | 23.9            | 67       | 9:34        | 36.1            | 115      | 10:22       | 47.4            |
| 20       | 8:47        | 24.1            | 68       | 9:35        | 36.3            | 116      | 10:23       | 47.5            |
| 21       | 8:48        | 24.3            | 69       | 9:36        | 36.6            | 117      | 10:24       | 47.6            |
| 22       | 8:49        | 24.5            | 70       | 9:37        | 36.9            | 118      | 10:25       | 47.7            |
| 23       | 8:50        | 24.7            | 71       | 9:38        | 37.2            | 119      | 10:26       | 47.8            |

|    |      |      |    |       |      |     |       |      |
|----|------|------|----|-------|------|-----|-------|------|
| 24 | 8:51 | 24.9 | 72 | 9:39  | 37.4 | 120 | 10:27 | 47.8 |
| 25 | 8:52 | 25.1 | 73 | 9:40  | 37.7 | 121 | 10:28 | 47.8 |
| 26 | 8:53 | 25.4 | 74 | 9:41  | 37.9 | 122 | 10:29 | 47.8 |
| 27 | 8:54 | 25.7 | 75 | 9:42  | 38.2 | 123 |       |      |
| 28 | 8:55 | 25.9 | 76 | 9:43  | 38.4 | 124 |       |      |
| 29 | 8:56 | 26.2 | 77 | 9:44  | 38.7 | 125 |       |      |
| 30 | 8:57 | 26.4 | 78 | 9:45  | 39.0 | 126 |       |      |
| 31 | 8:58 | 26.7 | 79 | 9:46  | 39.2 | 127 |       |      |
| 32 | 8:59 | 27.0 | 80 | 9:47  | 39.5 | 128 |       |      |
| 33 | 9:00 | 27.2 | 81 | 9:48  | 39.7 | 129 |       |      |
| 34 | 9:01 | 27.5 | 82 | 9:49  | 40.0 | 130 |       |      |
| 35 | 9:02 | 27.7 | 83 | 9:50  | 40.3 | 131 |       |      |
| 36 | 9:03 | 28.0 | 84 | 9:51  | 40.6 | 132 |       |      |
| 37 | 9:04 | 28.3 | 85 | 9:52  | 40.8 | 133 |       |      |
| 38 | 9:05 | 28.6 | 86 | 9:53  | 41.0 | 134 |       |      |
| 39 | 9:06 | 28.8 | 87 | 9:54  | 41.3 | 135 |       |      |
| 40 | 9:07 | 29.1 | 88 | 9:55  | 41.8 | 136 |       |      |
| 41 | 9:08 | 29.3 | 89 | 9:56  | 42.1 | 137 |       |      |
| 42 | 9:09 | 29.6 | 90 | 9:57  | 42.4 | 138 |       |      |
| 43 | 9:10 | 29.8 | 91 | 9:58  | 42.6 | 139 |       |      |
| 44 | 9:11 | 30.2 | 92 | 9:59  | 42.9 | 140 |       |      |
| 45 | 9:12 | 30.4 | 93 | 10:00 | 43.1 | 141 |       |      |
| 46 | 9:13 | 30.7 | 94 | 10:01 | 43.4 | 142 |       |      |
| 47 | 9:14 | 30.9 | 95 | 10:02 | 43.7 | 143 |       |      |

## Ensaio 4

### Folha de Campo - Ensaio no módulo de telhado verde

|        |                                                                |
|--------|----------------------------------------------------------------|
| Local: | <b>Centro Experimental de Saneamento Ambiental - CESA/UFRJ</b> |
| Data:  | <b>08/03/2016</b>                                              |

|                                   |       |                                  |      |
|-----------------------------------|-------|----------------------------------|------|
| Horário de início das atividades: | 09:00 | Temperatura Média (°C):          | 31.7 |
| Horário de fim das atividades:    | 12:30 | Nº de dias anteriores sem chuva: | 0    |

### 1) Determinação da Precipitação Média do Ensaio

#### 1.1. Precipitação antes da realização do experimento

(Hora - 09:00 )

|                         |      |        |
|-------------------------|------|--------|
| Volume da placa azul 1: | 8.0  | Litros |
| Volume da placa azul 2: | 10.1 | Litros |
| Volume total:           | 18.1 | Litros |

P1 = 100.6 mm/h

$P1 \text{ (mm/h)} = [ \text{Volume total (Litros)} / \text{Área de coleta (=1,8 m}^2 \text{)} ] / \text{Tempo (0,1 h=6min)}$

#### 1.2. Precipitação após a realização do experimento

(Hora - 12:10 )

|                         |      |        |
|-------------------------|------|--------|
| Volume da placa azul 1: | 8.0  | Litros |
| Volume da placa azul 2: | 9.1  | Litros |
| Volume total:           | 17.1 | Litros |

P2 = 95.0 mm/h

$P2 \text{ (mm/h)} = [ \text{Volume total (Litros)} / \text{Área de coleta (=1,8 m}^2 \text{)} ] / \text{Tempo (0,1 h=6min)}$

#### 1.3. Precipitação Média: $P = (P1 + P2) / 2$

P = 97.8 mm/h

## 2) Experimento

### 2.1. Controle dos tempos e horário

|                                                                 | Relógio | Cronômetro |
|-----------------------------------------------------------------|---------|------------|
|                                                                 | (HH:MM) | (HH:MM)    |
| Hora do início da chuva sobre o telhado (Hi):                   | 09:45   | 00:00      |
| Hora em que começa a sair água das torneiras (Ht):              | 09:52   | 00:07      |
| Hora em que o deflúvio do telhado chega na CP (Hc):             | 09:55   | 00:10      |
| Tempo de demora do início do escoamento até chegada na CP (Tr): | 00:10   | 00:10      |
| Hora do fim da chuva sobre o telhado (Hf):                      | 11:15   | 01:30      |
| Tempo de duração da chuva (Td):                                 | 01:30   | -          |

### 2.2. Caixa Pluviômetra

|                                               |      |
|-----------------------------------------------|------|
| Leitura inicial da cota na Caixa Grande (cm): | 20.1 |
|-----------------------------------------------|------|

### 2.3. Umidade do Substrato

Equipamentos: Balança BG 8000, prato de alumínio e estufa.

#### 2.3.1. Amostra de todo substrato

|                               |       |                                |       |                         |       |
|-------------------------------|-------|--------------------------------|-------|-------------------------|-------|
| P <sub>Tara</sub> (g):        | 72.8  | P <sub>Úmido + Tara</sub> (g): | 217.6 | P <sub>Úmido</sub> (g): | 145.0 |
| P <sub>Seco + Tara</sub> (g): | 199.3 | P <sub>Seco</sub> (g):         | 126.7 | Umidade (%):            | 14.4  |

#### 2.3.2. Amostra de areia

|                               |      |                                |      |                         |      |
|-------------------------------|------|--------------------------------|------|-------------------------|------|
| P <sub>Tara</sub> (g):        | 42.6 | P <sub>Úmido + Tara</sub> (g): | 99.4 | P <sub>Úmido</sub> (g): | 56.8 |
| P <sub>Seco + Tara</sub> (g): | 95.2 | P <sub>Seco</sub> (g):         | 52.6 | Umidade (%):            | 8.0  |

### 2.4. Medições

| <b>t</b> | <b>Hora</b> | <b>Lcg (cm)</b> | <b>t</b> | <b>Hora</b> | <b>Lcg (cm)</b> | <b>t</b> | <b>Hora</b> | <b>Lcg (cm)</b> |
|----------|-------------|-----------------|----------|-------------|-----------------|----------|-------------|-----------------|
| 0        | 9:45        | 20.1            | 48       | 10:33       | 31.8            | 96       | 11:21       | 48.6            |
| 1        | 9:46        | 20.1            | 49       | 10:34       | 32.3            | 97       | 11:22       | 48.9            |
| 2        | 9:47        | 20.1            | 50       | 10:35       | 32.6            | 98       | 11:23       | 49.2            |
| 3        | 9:48        | 20.1            | 51       | 10:36       | 33.0            | 99       | 11:24       | 49.5            |
| 4        | 9:49        | 20.1            | 52       | 10:37       | 33.3            | 100      | 11:25       | 49.8            |
| 5        | 9:50        | 20.1            | 53       | 10:38       | 33.7            | 101      | 11:26       | 50.1            |
| 6        | 9:51        | 20.1            | 54       | 10:39       | 34.0            | 102      | 11:27       | 50.4            |
| 7        | 9:52        | 20.1            | 55       | 10:40       | 34.4            | 103      | 11:28       | 50.6            |
| 8        | 9:53        | 20.1            | 56       | 10:41       | 34.8            | 104      | 11:29       | 50.9            |
| 9        | 9:54        | 20.1            | 57       | 10:42       | 35.1            | 105      | 11:30       | 51.2            |
| 10       | 9:55        | 20.1            | 58       | 10:43       | 35.5            | 106      | 11:31       | 51.5            |
| 11       | 9:56        | 20.2            | 59       | 10:44       | 35.8            | 107      | 11:32       | 51.7            |
| 12       | 9:57        | 20.2            | 60       | 10:45       | 36.2            | 108      | 11:33       | 52.0            |
| 13       | 9:58        | 20.4            | 61       | 10:46       | 36.5            | 109      | 11:34       | 52.2            |
| 14       | 9:59        | 20.7            | 62       | 10:47       | 36.8            | 110      | 11:35       | 52.5            |
| 15       | 10:00       | 20.9            | 63       | 10:48       | 37.2            | 111      | 11:36       | 52.7            |
| 16       | 10:01       | 21.2            | 64       | 10:49       | 37.6            | 112      | 11:37       | 53.0            |
| 17       | 10:02       | 21.5            | 65       | 10:50       | 37.9            | 113      | 11:38       | 53.2            |
| 18       | 10:03       | 21.8            | 66       | 10:51       | 38.2            | 114      | 11:39       | 53.4            |
| 19       | 10:04       | 22.1            | 67       | 10:52       | 38.6            | 115      | 11:40       | 53.6            |
| 20       | 10:05       | 22.4            | 68       | 10:53       | 38.9            | 116      | 11:41       | 53.8            |
| 21       | 10:06       | 22.7            | 69       | 10:54       | 39.3            | 117      | 11:42       | 53.9            |
| 22       | 10:07       | 23.0            | 70       | 10:55       | 39.7            | 118      | 11:43       | 54.0            |
| 23       | 10:08       | 23.3            | 71       | 10:56       | 40.0            | 119      | 11:44       | 54.1            |

|    |       |      |    |       |      |     |       |      |
|----|-------|------|----|-------|------|-----|-------|------|
| 24 | 10:09 | 23.6 | 72 | 10:57 | 40.4 | 120 | 11:45 | 54.1 |
| 25 | 10:10 | 23.9 | 73 | 10:58 | 40.7 | 121 | 11:46 | 54.2 |
| 26 | 10:11 | 24.2 | 74 | 10:59 | 41.1 | 122 | 11:47 | 54.2 |
| 27 | 10:12 | 24.5 | 75 | 11:00 | 41.4 | 123 | 11:48 | 54.2 |
| 28 | 10:13 | 24.9 | 76 | 11:01 | 41.7 | 124 | 11:49 | 54.2 |
| 29 | 10:14 | 25.2 | 77 | 11:02 | 42.1 | 125 | 11:50 | 54.3 |
| 30 | 10:15 | 25.5 | 78 | 11:03 | 42.5 | 126 | 11:51 | 54.3 |
| 31 | 10:16 | 25.8 | 79 | 11:04 | 42.8 | 127 | 11:52 | 54.3 |
| 32 | 10:17 | 26.2 | 80 | 11:05 | 43.1 | 128 | 11:53 | 54.3 |
| 33 | 10:18 | 26.6 | 81 | 11:06 | 43.5 | 129 | 11:54 | 54.3 |
| 34 | 10:19 | 26.9 | 82 | 11:07 | 43.8 | 130 | 11:55 | 54.3 |
| 35 | 10:20 | 27.3 | 83 | 11:08 | 44.2 | 131 |       |      |
| 36 | 10:21 | 27.7 | 84 | 11:09 | 44.6 | 132 |       |      |
| 37 | 10:22 | 28.0 | 85 | 11:10 | 44.9 | 133 |       |      |
| 38 | 10:23 | 28.4 | 86 | 11:11 | 45.2 | 134 |       |      |
| 39 | 10:24 | 28.8 | 87 | 11:12 | 45.6 | 135 |       |      |
| 40 | 10:25 | 29.1 | 88 | 11:13 | 46.0 | 136 |       |      |
| 41 | 10:26 | 29.5 | 89 | 11:14 | 46.3 | 137 |       |      |
| 42 | 10:27 | 29.9 | 90 | 11:15 | 46.6 | 138 |       |      |
| 43 | 10:28 | 30.2 | 91 | 11:16 | 47.0 | 139 |       |      |
| 44 | 10:29 | 30.5 | 92 | 11:17 | 47.3 | 140 |       |      |
| 45 | 10:30 | 30.8 | 93 | 11:18 | 47.6 | 141 |       |      |
| 46 | 10:31 | 31.3 | 94 | 11:19 | 48.0 | 142 |       |      |
| 47 | 10:32 | 31.5 | 95 | 11:20 | 48.3 | 143 |       |      |

## Ensaio 5

### Folha de Campo - Ensaio no módulo de telhado verde

|        |                                                                |
|--------|----------------------------------------------------------------|
| Local: | <b>Centro Experimental de Saneamento Ambiental - CESA/UFRJ</b> |
| Data:  | <b>09/03/2016</b>                                              |

|                                   |       |                                  |      |
|-----------------------------------|-------|----------------------------------|------|
| Horário de início das atividades: | 09:00 | Temperatura Média (°C):          | 31.7 |
| Horário de fim das atividades:    | 12:30 | Nº de dias anteriores sem chuva: | 0    |

### 1) Determinação da Precipitação Média do Ensaio

#### 1.1. Precipitação antes da realização do experimento

(Hora - 09:11 )

|                         |      |        |
|-------------------------|------|--------|
| Volume da placa azul 1: | 8.9  | Litros |
| Volume da placa azul 2: | 8.4  | Litros |
| Volume total:           | 17.3 | Litros |

P1 = 96.1 mm/h

$P1 \text{ (mm/h)} = [ \text{Volume total (Litros)} / \text{Área de coleta (=1,8 m}^2 \text{)} ] / \text{Tempo (0,1 h=6min)}$

#### 1.2. Precipitação após a realização do experimento

(Hora - 12:15 )

|                         |      |        |
|-------------------------|------|--------|
| Volume da placa azul 1: | 8.3  | Litros |
| Volume da placa azul 2: | 8.8  | Litros |
| Volume total:           | 17.1 | Litros |

P2 = 95.0 mm/h

$P2 \text{ (mm/h)} = [ \text{Volume total (Litros)} / \text{Área de coleta (=1,8 m}^2 \text{)} ] / \text{Tempo (0,1 h=6min)}$

#### 1.3. Precipitação Média: $P = (P1 + P2) / 2$

P = 95.6 mm/h

## 2) Experimento

### 2.1. Controle dos tempos e horário

|                                                                 | Relógio | Cronômetro |
|-----------------------------------------------------------------|---------|------------|
|                                                                 | (HH:MM) | (HH:MM)    |
| Hora do início da chuva sobre o telhado (Hi):                   | 09:48   | 00:00      |
| Hora em que começa a sair água das torneiras (Ht):              | 09:53   | 00:05      |
| Hora em que o deflúvio do telhado chega na CP (Hc):             | 09:56   | 00:08      |
| Tempo de demora do início do escoamento até chegada na CP (Tr): | 00:08   | 00:08      |
| Hora do fim da chuva sobre o telhado (Hf):                      | 11:18   | 01:30      |
| Tempo de duração da chuva (Td):                                 | 01:30   | -          |

### 2.2. Caixa Pluviômetra

|                                               |      |
|-----------------------------------------------|------|
| Leitura inicial da cota na Caixa Grande (cm): | 19.9 |
|-----------------------------------------------|------|

### 2.3. Umidade do Substrato

Equipamentos: Balança BG 8000, prato de alumínio e estufa.

#### 2.3.1. Amostra de todo substrato

|                               |       |                                |       |                         |       |
|-------------------------------|-------|--------------------------------|-------|-------------------------|-------|
| P <sub>Tara</sub> (g):        | 63.4  | P <sub>Úmido + Tara</sub> (g): | 251.0 | P <sub>Úmido</sub> (g): | 187.6 |
| P <sub>Seco + Tara</sub> (g): | 226.7 | P <sub>Seco</sub> (g):         | 163.3 | Umidade (%):            | 14.9  |

#### 2.3.2. Amostra de areia

|                               |       |                                |       |                         |      |
|-------------------------------|-------|--------------------------------|-------|-------------------------|------|
| P <sub>Tara</sub> (g):        | 41.8  | P <sub>Úmido + Tara</sub> (g): | 121.4 | P <sub>Úmido</sub> (g): | 79.6 |
| P <sub>Seco + Tara</sub> (g): | 115.2 | P <sub>Seco</sub> (g):         | 73.4  | Umidade (%):            | 8.4  |

### 2.4. Medições

| t  | Hora  | Lcg (cm) | t  | Hora  | Lcg (cm) | t   | Hora  | Lcg (cm) |
|----|-------|----------|----|-------|----------|-----|-------|----------|
| 0  | 9:48  | 19.9     | 48 | 10:36 | 32.9     | 96  | 11:24 | 50.3     |
| 1  | 9:49  | 19.9     | 49 | 10:37 | 33.3     | 97  | 11:25 | 50.7     |
| 2  | 9:50  | 19.9     | 50 | 10:38 | 33.7     | 98  | 11:26 | 51.0     |
| 3  | 9:51  | 19.9     | 51 | 10:39 | 34.1     | 99  | 11:27 | 51.3     |
| 4  | 9:52  | 19.9     | 52 | 10:40 | 34.4     | 100 | 11:28 | 51.4     |
| 5  | 9:53  | 19.9     | 53 | 10:41 | 34.8     | 101 | 11:29 | 51.7     |
| 6  | 9:54  | 19.9     | 54 | 10:42 | 35.2     | 102 | 11:30 | 52.0     |
| 7  | 9:55  | 19.9     | 55 | 10:43 | 35.5     | 103 | 11:31 | 52.5     |
| 8  | 9:56  | 19.9     | 56 | 10:44 | 35.9     | 104 | 11:32 | 52.7     |
| 9  | 9:57  | 20.0     | 57 | 10:45 | 36.2     | 105 | 11:33 | 53.0     |
| 10 | 9:58  | 20.0     | 58 | 10:46 | 36.6     | 106 | 11:34 | 53.4     |
| 11 | 9:59  | 20.3     | 59 | 10:47 | 37.0     | 107 | 11:35 | 53.6     |
| 12 | 10:00 | 20.6     | 60 | 10:48 | 37.3     | 108 | 11:36 | 53.8     |
| 13 | 10:01 | 20.9     | 61 | 10:49 | 37.7     | 109 | 11:37 | 54.0     |
| 14 | 10:02 | 21.1     | 62 | 10:50 | 38.1     | 110 | 11:38 | 54.4     |
| 15 | 10:03 | 21.4     | 63 | 10:51 | 38.5     | 111 | 11:39 | 54.6     |
| 16 | 10:04 | 21.7     | 64 | 10:52 | 38.8     | 112 | 11:40 | 54.9     |
| 17 | 10:05 | 22.0     | 65 | 10:53 | 39.0     | 113 | 11:41 | 55.1     |
| 18 | 10:06 | 22.3     | 66 | 10:54 | 39.4     | 114 | 11:42 | 55.4     |
| 19 | 10:07 | 22.6     | 67 | 10:55 | 39.8     | 115 | 11:43 | 55.5     |
| 20 | 10:08 | 22.9     | 68 | 10:56 | 40.2     | 116 | 11:44 | 55.6     |
| 21 | 10:09 | 23.1     | 69 | 10:57 | 40.5     | 117 | 11:45 | 55.6     |
| 22 | 10:10 | 23.5     | 70 | 10:58 | 40.9     | 118 | 11:46 | 55.6     |
| 23 | 10:11 | 23.9     | 71 | 10:59 | 41.3     | 119 | 11:47 | 55.6     |

|    |       |      |    |       |      |     |       |      |
|----|-------|------|----|-------|------|-----|-------|------|
| 24 | 10:12 | 24.2 | 72 | 11:00 | 41.6 | 120 | 11:48 | 55.7 |
| 25 | 10:13 | 24.5 | 73 | 11:01 | 42.0 | 121 | 11:49 | 55.7 |
| 26 | 10:14 | 24.9 | 74 | 11:02 | 42.3 | 122 | 11:50 | 55.7 |
| 27 | 10:15 | 25.3 | 75 | 11:03 | 42.7 | 123 | 11:51 | 55.8 |
| 28 | 10:16 | 25.5 | 76 | 11:04 | 43.0 | 124 | 11:52 | 55.8 |
| 29 | 10:17 | 26.0 | 77 | 11:05 | 43.4 | 125 | 11:53 | 55.8 |
| 30 | 10:18 | 26.3 | 78 | 11:06 | 43.9 | 126 | 11:54 | 55.8 |
| 31 | 10:19 | 26.7 | 79 | 11:07 | 44.2 | 127 | 11:55 | 55.8 |
| 32 | 10:20 | 27.0 | 80 | 11:08 | 44.6 | 128 |       |      |
| 33 | 10:21 | 27.3 | 81 | 11:09 | 44.9 | 129 |       |      |
| 34 | 10:22 | 27.6 | 82 | 11:10 | 45.3 | 130 |       |      |
| 35 | 10:23 | 28.0 | 83 | 11:11 | 45.6 | 131 |       |      |
| 36 | 10:24 | 28.4 | 84 | 11:12 | 46.0 | 132 |       |      |
| 37 | 10:25 | 28.8 | 85 | 11:13 | 46.3 | 133 |       |      |
| 38 | 10:26 | 29.2 | 86 | 11:14 | 46.7 | 134 |       |      |
| 39 | 10:27 | 29.5 | 87 | 11:15 | 47.1 | 135 |       |      |
| 40 | 10:28 | 30.0 | 88 | 11:16 | 47.5 | 136 |       |      |
| 41 | 10:29 | 30.4 | 89 | 11:17 | 47.8 | 137 |       |      |
| 42 | 10:30 | 30.7 | 90 | 11:18 | 48.1 | 138 |       |      |
| 43 | 10:31 | 31.1 | 91 | 11:19 | 48.4 | 139 |       |      |
| 44 | 10:32 | 31.5 | 92 | 11:20 | 48.9 | 140 |       |      |
| 45 | 10:33 | 31.9 | 93 | 11:21 | 49.3 | 141 |       |      |
| 46 | 10:34 | 32.3 | 94 | 11:22 | 49.7 | 142 |       |      |
| 47 | 10:35 | 32.6 | 95 | 11:23 | 50.0 | 143 |       |      |

## Ensaio 6

### Folha de Campo - Ensaio no módulo de telhado verde

|        |                                                         |
|--------|---------------------------------------------------------|
| Local: | Centro Experimental de Saneamento Ambiental - CESA/UFRJ |
| Data:  | 18/02/2016                                              |

|                                   |       |                                  |      |
|-----------------------------------|-------|----------------------------------|------|
| Horário de início das atividades: | 07:30 | Temperatura Média (°C):          | 26.1 |
| Horário de fim das atividades:    | 10:30 | Nº de dias anteriores sem chuva: | 0    |

### 1) Determinação da Precipitação Média do Ensaio

#### 1.1. Precipitação antes da realização do experimento

(Hora - 07:30 )

|                         |     |        |
|-------------------------|-----|--------|
| Volume da placa azul 1: | 4.5 | Litros |
| Volume da placa azul 2: | 4.5 | Litros |
| Volume total:           | 9.0 | Litros |

P1 = 50.0 mm/h

$P1 \text{ (mm/h)} = [ \text{Volume total (Litros)} / \text{Área de coleta (=1,8 m}^2 \text{)} ] / \text{Tempo (0,1 h=6min)}$

#### 1.2. Precipitação após a realização do experimento

(Hora - 10:25 )

|                         |     |        |
|-------------------------|-----|--------|
| Volume da placa azul 1: | 4.4 | Litros |
| Volume da placa azul 2: | 4.9 | Litros |
| Volume total:           | 9.3 | Litros |

P2 = 51.7 mm/h

$P2 \text{ (mm/h)} = [ \text{Volume total (Litros)} / \text{Área de coleta (=1,8 m}^2 \text{)} ] / \text{Tempo (0,1 h=6min)}$

#### 1.3. Precipitação Média: $P = (P1 + P2) / 2$

P = 50.8 mm/h

## 2) Experimento

### 2.1. Controle dos tempos e horário

|                                                                 | Relógio | Cronômetro |
|-----------------------------------------------------------------|---------|------------|
|                                                                 | (HH:MM) | (HH:MM)    |
| Hora do início da chuva sobre o telhado (Hi):                   | 07:45   | 00:00      |
| Hora em que começa a sair água das torneiras (Ht):              | 07:58   | 00:13      |
| Hora em que o deflúvio do telhado chega na CP (Hc):             | 08:01   | 00:16      |
| Tempo de demora do início do escoamento até chegada na CP (Tr): | 00:16   | 00:16      |
| Hora do fim da chuva sobre o telhado (Hf):                      | 09:15   | 01:30      |
| Tempo de duração da chuva (Td):                                 | 01:30   | -          |

### 2.2. Caixa Pluviômetra

|                                               |      |
|-----------------------------------------------|------|
| Leitura inicial da cota na Caixa Grande (cm): | 22.5 |
|-----------------------------------------------|------|

### 2.3. Umidade do Substrato

Equipamentos: Balança BG 8000, prato de alumínio e estufa.

#### 2.3.1. Amostra de todo substrato

|                               |       |                                |       |                         |       |
|-------------------------------|-------|--------------------------------|-------|-------------------------|-------|
| P <sub>Tara</sub> (g):        | 62.7  | P <sub>Úmido + Tara</sub> (g): | 211.3 | P <sub>Úmido</sub> (g): | 148.6 |
| P <sub>Seco + Tara</sub> (g): | 192.7 | P <sub>Seco</sub> (g):         | 130.0 | Umidade (%):            | 14.3  |

#### 2.3.2. Amostra de areia

|                               |      |                                |       |                         |      |
|-------------------------------|------|--------------------------------|-------|-------------------------|------|
| P <sub>Tara</sub> (g):        | 32.9 | P <sub>Úmido + Tara</sub> (g): | 102.4 | P <sub>Úmido</sub> (g): | 69.5 |
| P <sub>Seco + Tara</sub> (g): | 97.4 | P <sub>Seco</sub> (g):         | 64.5  | Umidade (%):            | 7.8  |

### 2.4. Medições

| t  | Hora | Lcg (cm) | t  | Hora  | Lcg (cm) | t   | Hora | Lcg (cm) |
|----|------|----------|----|-------|----------|-----|------|----------|
| 0  | 7:45 | 22.5     | 48 | 08:33 | 30.3     | 96  | 9:21 | 43.3     |
| 1  | 7:46 | 22.5     | 49 | 08:34 | 30.6     | 97  | 9:22 | 43.5     |
| 2  | 7:47 | 22.5     | 50 | 08:35 | 30.8     | 98  | 9:23 | 43.6     |
| 3  | 7:48 | 22.5     | 51 | 08:36 | 31.1     | 99  | 9:24 | 43.8     |
| 4  | 7:49 | 22.5     | 52 | 08:37 | 31.4     | 100 | 9:25 | 43.9     |
| 5  | 7:50 | 22.5     | 53 | 08:38 | 31.6     | 101 | 9:26 | 44.0     |
| 6  | 7:51 | 22.5     | 54 | 08:39 | 32.0     | 102 | 9:27 | 44.0     |
| 7  | 7:52 | 22.5     | 55 | 08:40 | 32.2     | 103 | 9:28 | 44.1     |
| 8  | 7:53 | 22.5     | 56 | 08:41 | 32.5     | 104 | 9:29 | 44.2     |
| 9  | 7:54 | 22.5     | 57 | 08:42 | 32.8     | 105 | 9:30 | 44.2     |
| 10 | 7:55 | 22.5     | 58 | 08:43 | 33.1     | 106 | 9:31 | 44.2     |
| 11 | 7:56 | 22.5     | 59 | 08:44 | 33.4     | 107 | 9:32 | 44.3     |
| 12 | 7:57 | 22.5     | 60 | 08:45 | 33.6     | 108 | 9:33 | 44.3     |
| 13 | 7:58 | 22.5     | 61 | 08:46 | 33.9     | 109 | 9:34 | 44.3     |
| 14 | 7:59 | 22.5     | 62 | 08:47 | 34.2     | 110 | 9:35 | 44.3     |
| 15 | 8:00 | 22.5     | 63 | 08:48 | 34.4     | 111 | 9:36 | 44.4     |
| 16 | 8:01 | 22.5     | 64 | 08:49 | 34.7     | 112 | 9:37 | 44.4     |
| 17 | 8:02 | 22.6     | 65 | 08:50 | 34.9     | 113 | 9:38 | 44.5     |
| 18 | 8:03 | 22.7     | 66 | 08:51 | 35.2     | 114 | 9:39 | 44.5     |
| 19 | 8:04 | 22.8     | 67 | 08:52 | 35.5     | 115 | 9:40 | 44.5     |
| 20 | 8:05 | 23.0     | 68 | 08:53 | 35.8     | 116 | 9:41 | 44.5     |
| 21 | 8:06 | 23.2     | 69 | 08:54 | 36.0     | 117 | 9:42 | 44.5     |
| 22 | 8:07 | 23.5     | 70 | 08:55 | 36.3     | 118 |      |          |
| 23 | 8:08 | 23.6     | 71 | 08:56 | 36.6     | 119 |      |          |

|    |      |      |    |       |      |     |  |  |
|----|------|------|----|-------|------|-----|--|--|
| 24 | 8:09 | 23.9 | 72 | 08:57 | 36.9 | 120 |  |  |
| 25 | 8:10 | 24.1 | 73 | 08:58 | 37.1 | 121 |  |  |
| 26 | 8:11 | 24.4 | 74 | 08:59 | 37.5 | 122 |  |  |
| 27 | 8:12 | 24.6 | 75 | 09:00 | 37.7 | 123 |  |  |
| 28 | 8:13 | 24.9 | 76 | 09:01 | 38.0 | 124 |  |  |
| 29 | 8:14 | 25.2 | 77 | 09:02 | 38.2 | 125 |  |  |
| 30 | 8:15 | 25.4 | 78 | 09:03 | 38.5 | 126 |  |  |
| 31 | 8:16 | 25.7 | 79 | 09:04 | 38.7 | 127 |  |  |
| 32 | 8:17 | 26.0 | 80 | 09:05 | 39.0 | 128 |  |  |
| 33 | 8:18 | 26.3 | 81 | 09:06 | 39.3 | 129 |  |  |
| 34 | 8:19 | 26.5 | 82 | 09:07 | 39.6 | 130 |  |  |
| 35 | 8:20 | 26.8 | 83 | 09:08 | 39.8 | 131 |  |  |
| 36 | 8:21 | 27.1 | 84 | 09:09 | 40.1 | 132 |  |  |
| 37 | 8:22 | 27.4 | 85 | 09:10 | 40.3 | 133 |  |  |
| 38 | 8:23 | 27.6 | 86 | 09:11 | 40.6 | 134 |  |  |
| 39 | 8:24 | 27.9 | 87 | 09:12 | 40.9 | 135 |  |  |
| 40 | 8:25 | 28.1 | 88 | 09:13 | 41.2 | 136 |  |  |
| 41 | 8:26 | 28.4 | 89 | 09:14 | 41.5 | 137 |  |  |
| 42 | 8:27 | 28.7 | 90 | 09:15 | 41.8 | 138 |  |  |
| 43 | 8:28 | 29.0 | 91 | 09:16 | 42.0 | 139 |  |  |
| 44 | 8:29 | 29.3 | 92 | 09:17 | 42.3 | 140 |  |  |
| 45 | 8:30 | 29.5 | 93 | 09:18 | 42.6 | 141 |  |  |
| 46 | 8:31 | 29.8 | 94 | 09:19 | 42.8 | 142 |  |  |
| 47 | 8:32 | 30.1 | 95 | 09:20 | 43.0 | 143 |  |  |

## Ensaio 7

### Folha de Campo - Ensaio no módulo de telhado verde

|        |                                                         |
|--------|---------------------------------------------------------|
| Local: | Centro Experimental de Saneamento Ambiental - CESA/UFRJ |
| Data:  | 22/02/2016                                              |

|                                   |       |                                  |      |
|-----------------------------------|-------|----------------------------------|------|
| Horário de início das atividades: | 08:00 | Temperatura Média (°C):          | 28.0 |
| Horário de fim das atividades:    | 11:00 | Nº de dias anteriores sem chuva: | 0    |

### 1) Determinação da Precipitação Média do Ensaio

#### 1.1. Precipitação antes da realização do experimento

(Hora - 08:00 )

|                         |     |        |
|-------------------------|-----|--------|
| Volume da placa azul 1: | 4.2 | Litros |
| Volume da placa azul 2: | 4.9 | Litros |
| Volume total:           | 9.1 | Litros |

P1 = 50.6 mm/h

$P1 \text{ (mm/h)} = [ \text{Volume total (Litros)} / \text{Área de coleta (=1,8 m}^2 \text{)} ] / \text{Tempo (0,1 h=6min)}$

#### 1.2. Precipitação após a realização do experimento

(Hora - 10:25 )

|                         |     |        |
|-------------------------|-----|--------|
| Volume da placa azul 1: | 4.4 | Litros |
| Volume da placa azul 2: | 4.6 | Litros |
| Volume total:           | 9.0 | Litros |

P2 = 50.0 mm/h

$P2 \text{ (mm/h)} = [ \text{Volume total (Litros)} / \text{Área de coleta (=1,8 m}^2 \text{)} ] / \text{Tempo (0,1 h=6min)}$

#### 1.3. Precipitação Média: $P = (P1 + P2) / 2$

P = 50.3 mm/h

## 2) Experimento

### 2.1. Controle dos tempos e horário

|                                                                 | Relógio | Cronômetro |
|-----------------------------------------------------------------|---------|------------|
|                                                                 | (HH:MM) | (HH:MM)    |
| Hora do início da chuva sobre o telhado (Hi):                   | 08:15   | 00:00      |
| Hora em que começa a sair água das torneiras (Ht):              | 08:27   | 00:12      |
| Hora em que o deflúvio do telhado chega na CP (Hc):             | 08:30   | 00:15      |
| Tempo de demora do início do escoamento até chegada na CP (Tr): | 00:15   | 00:15      |
| Hora do fim da chuva sobre o telhado (Hf):                      | 09:45   | 01:30      |
| Tempo de duração da chuva (Td):                                 | 01:30   | -          |

### 2.2. Caixa Pluviômetra

|                                               |      |
|-----------------------------------------------|------|
| Leitura inicial da cota na Caixa Grande (cm): | 21.6 |
|-----------------------------------------------|------|

### 2.3. Umidade do Substrato

Equipamentos: Balança BG 8000, prato de alumínio e estufa.

#### 2.3.1. Amostra de todo substrato

|                               |       |                                |       |                         |       |
|-------------------------------|-------|--------------------------------|-------|-------------------------|-------|
| P <sub>Tara</sub> (g):        | 72.6  | P <sub>Úmido + Tara</sub> (g): | 229.8 | P <sub>Úmido</sub> (g): | 157.2 |
| P <sub>Seco + Tara</sub> (g): | 210.4 | P <sub>Seco</sub> (g):         | 137.8 | Umidade (%):            | 14.1  |

#### 2.3.2. Amostra de areia

|                               |      |                                |      |                         |      |
|-------------------------------|------|--------------------------------|------|-------------------------|------|
| P <sub>Tara</sub> (g):        | 42.6 | P <sub>Úmido + Tara</sub> (g): | 98.8 | P <sub>Úmido</sub> (g): | 56.2 |
| P <sub>Seco + Tara</sub> (g): | 94.7 | P <sub>Seco</sub> (g):         | 52.1 | Umidade (%):            | 7.9  |

### 2.4. Medições

| <b>t</b> | <b>Hora</b> | <b>Lcg (cm)</b> | <b>t</b> | <b>Hora</b> | <b>Lcg (cm)</b> | <b>t</b> | <b>Hora</b> | <b>Lcg (cm)</b> |
|----------|-------------|-----------------|----------|-------------|-----------------|----------|-------------|-----------------|
| 0        | 8:15        | 21.6            | 48       | 09:03       | 29.7            | 96       | 9:51        | 42.6            |
| 1        | 8:16        | 21.6            | 49       | 09:04       | 29.9            | 97       | 9:52        | 42.7            |
| 2        | 8:17        | 21.6            | 50       | 09:05       | 30.2            | 98       | 9:53        | 42.9            |
| 3        | 8:18        | 21.6            | 51       | 09:06       | 30.5            | 99       | 9:54        | 43.0            |
| 4        | 8:19        | 21.6            | 52       | 09:07       | 30.7            | 100      | 9:55        | 43.1            |
| 5        | 8:20        | 21.6            | 53       | 09:08       | 31.1            | 101      | 9:56        | 43.1            |
| 6        | 8:21        | 21.6            | 54       | 09:09       | 31.3            | 102      | 9:57        | 43.2            |
| 7        | 8:22        | 21.6            | 55       | 09:10       | 31.6            | 103      | 9:58        | 43.3            |
| 8        | 8:23        | 21.6            | 56       | 09:11       | 31.9            | 104      | 9:59        | 43.3            |
| 9        | 8:24        | 21.6            | 57       | 09:12       | 32.2            | 105      | 10:00       | 43.3            |
| 10       | 8:25        | 21.6            | 58       | 09:13       | 32.5            | 106      | 10:01       | 43.4            |
| 11       | 8:26        | 21.6            | 59       | 09:14       | 32.7            | 107      | 10:02       | 43.4            |
| 12       | 8:27        | 21.6            | 60       | 09:15       | 33.0            | 108      | 10:03       | 43.4            |
| 13       | 8:28        | 21.6            | 61       | 09:16       | 33.3            | 109      | 10:04       | 43.4            |
| 14       | 8:29        | 21.6            | 62       | 09:17       | 33.5            | 110      | 10:05       | 43.5            |
| 15       | 8:30        | 21.6            | 63       | 09:18       | 33.8            | 111      | 10:06       | 43.5            |
| 16       | 8:31        | 21.7            | 64       | 09:19       | 34.0            | 112      | 10:07       | 43.5            |
| 17       | 8:32        | 21.8            | 65       | 09:20       | 34.3            | 113      | 10:08       | 43.5            |
| 18       | 8:33        | 21.9            | 66       | 09:21       | 34.6            | 114      | 10:09       | 43.5            |
| 19       | 8:34        | 22.1            | 67       | 09:22       | 34.9            | 115      | 10:10       | 43.5            |
| 20       | 8:35        | 22.3            | 68       | 09:23       | 35.1            | 116      |             |                 |
| 21       | 8:36        | 22.6            | 69       | 09:24       | 35.4            | 117      |             |                 |
| 22       | 8:37        | 22.7            | 70       | 09:25       | 35.7            | 118      |             |                 |
| 23       | 8:38        | 23.0            | 71       | 09:26       | 36.0            | 119      |             |                 |

|    |      |      |    |       |      |     |  |  |
|----|------|------|----|-------|------|-----|--|--|
| 24 | 8:39 | 23.2 | 72 | 09:27 | 36.2 | 120 |  |  |
| 25 | 8:40 | 23.5 | 73 | 09:28 | 36.6 | 121 |  |  |
| 26 | 8:41 | 23.7 | 74 | 09:29 | 36.8 | 122 |  |  |
| 27 | 8:42 | 24.0 | 75 | 09:30 | 37.1 | 123 |  |  |
| 28 | 8:43 | 24.3 | 76 | 09:31 | 37.3 | 124 |  |  |
| 29 | 8:44 | 24.5 | 77 | 09:32 | 37.6 | 125 |  |  |
| 30 | 8:45 | 24.8 | 78 | 09:33 | 37.8 | 126 |  |  |
| 31 | 8:46 | 25.1 | 79 | 09:34 | 38.1 | 127 |  |  |
| 32 | 8:47 | 25.4 | 80 | 09:35 | 38.4 | 128 |  |  |
| 33 | 8:48 | 25.6 | 81 | 09:36 | 38.7 | 129 |  |  |
| 34 | 8:49 | 25.9 | 82 | 09:37 | 38.9 | 130 |  |  |
| 35 | 8:50 | 26.2 | 83 | 09:38 | 39.2 | 131 |  |  |
| 36 | 8:51 | 26.5 | 84 | 09:39 | 39.4 | 132 |  |  |
| 37 | 8:52 | 26.7 | 85 | 09:40 | 39.7 | 133 |  |  |
| 38 | 8:53 | 27.0 | 86 | 09:41 | 40.0 | 134 |  |  |
| 39 | 8:54 | 27.2 | 87 | 09:42 | 40.3 | 135 |  |  |
| 40 | 8:55 | 27.5 | 88 | 09:43 | 40.6 | 136 |  |  |
| 41 | 8:56 | 27.8 | 89 | 09:44 | 40.9 | 137 |  |  |
| 42 | 8:57 | 28.1 | 90 | 09:45 | 41.1 | 138 |  |  |
| 43 | 8:58 | 28.4 | 91 | 09:46 | 41.4 | 139 |  |  |
| 44 | 8:59 | 28.6 | 92 | 09:47 | 41.7 | 140 |  |  |
| 45 | 9:00 | 28.9 | 93 | 09:48 | 41.9 | 141 |  |  |
| 46 | 9:01 | 29.2 | 94 | 09:49 | 42.1 | 142 |  |  |
| 47 | 9:02 | 29.4 | 95 | 09:50 | 42.4 | 143 |  |  |

## Ensaio 8

### Folha de Campo - Ensaio no módulo de telhado verde

|        |                                                         |
|--------|---------------------------------------------------------|
| Local: | Centro Experimental de Saneamento Ambiental - CESA/UFRJ |
| Data:  | 24/03/2016                                              |

|                                   |       |                                  |      |
|-----------------------------------|-------|----------------------------------|------|
| Horário de início das atividades: | 13:00 | Temperatura Média (°C):          | 28.2 |
| Horário de fim das atividades:    | 16:00 | Nº de dias anteriores sem chuva: | 0    |

### 1) Determinação da Precipitação Média do Ensaio

#### 1.1. Precipitação antes da realização do experimento

(Hora - 13:00 )

|                         |     |        |
|-------------------------|-----|--------|
| Volume da placa azul 1: | 3.8 | Litros |
| Volume da placa azul 2: | 5.3 | Litros |
| Volume total:           | 9.1 | Litros |

P1 = 50.6 mm/h

$P1 \text{ (mm/h)} = [ \text{Volume total (Litros)} / \text{Área de coleta (=1,8 m}^2 \text{)} ] / \text{Tempo (0,1 h=6min)}$

#### 1.2. Precipitação após a realização do experimento

(Hora - 15:30 )

|                         |     |        |
|-------------------------|-----|--------|
| Volume da placa azul 1: | 3.3 | Litros |
| Volume da placa azul 2: | 5.6 | Litros |
| Volume total:           | 8.9 | Litros |

P2 = 49.4 mm/h

$P2 \text{ (mm/h)} = [ \text{Volume total (Litros)} / \text{Área de coleta (=1,8 m}^2 \text{)} ] / \text{Tempo (0,1 h=6min)}$

#### 1.3. Precipitação Média: $P = (P1 + P2) / 2$

P = 50.0 mm/h

## 2) Experimento

### 2.1. Controle dos tempos e horário

|                                                                 | Relógio | Cronômetro |
|-----------------------------------------------------------------|---------|------------|
|                                                                 | (HH:MM) | (HH:MM)    |
| Hora do início da chuva sobre o telhado (Hi):                   | 13:39   | 00:00      |
| Hora em que começa a sair água das torneiras (Ht):              | 13:49   | 00:10      |
| Hora em que o deflúvio do telhado chega na CP (Hc):             | 13:53   | 00:14      |
| Tempo de demora do início do escoamento até chegada na CP (Tr): | 00:14   | 00:14      |
| Hora do fim da chuva sobre o telhado (Hf):                      | 15:09   | 01:30      |
| Tempo de duração da chuva (Td):                                 | 01:30   | -          |

### 2.2. Caixa Pluviômetra

|                                               |      |
|-----------------------------------------------|------|
| Leitura inicial da cota na Caixa Grande (cm): | 21.0 |
|-----------------------------------------------|------|

### 2.3. Umidade do Substrato

Equipamentos: Balança BG 8000, prato de alumínio e estufa.

#### 2.3.1. Amostra de todo substrato

|                               |       |                                |       |                         |       |
|-------------------------------|-------|--------------------------------|-------|-------------------------|-------|
| P <sub>Tara</sub> (g):        | 63.4  | P <sub>Úmido + Tara</sub> (g): | 223.6 | P <sub>Úmido</sub> (g): | 160.2 |
| P <sub>Seco + Tara</sub> (g): | 203.1 | P <sub>Seco</sub> (g):         | 139.7 | Umidade (%):            | 14.7  |

#### 2.3.2. Amostra de areia

|                               |       |                                |       |                         |      |
|-------------------------------|-------|--------------------------------|-------|-------------------------|------|
| P <sub>Tara</sub> (g):        | 41.8  | P <sub>Úmido + Tara</sub> (g): | 115.2 | P <sub>Úmido</sub> (g): | 73.4 |
| P <sub>Seco + Tara</sub> (g): | 109.6 | P <sub>Seco</sub> (g):         | 67.8  | Umidade (%):            | 8.3  |

### 2.4. Medições

| <b>t</b> | <b>Hora</b> | <b>Lcg (cm)</b> | <b>t</b> | <b>Hora</b> | <b>Lcg (cm)</b> | <b>t</b> | <b>Hora</b> | <b>Lcg (cm)</b> |
|----------|-------------|-----------------|----------|-------------|-----------------|----------|-------------|-----------------|
| 0        | 13:39       | 21.0            | 48       | 14:27       | 29.5            | 96       | 15:15       | 42.3            |
| 1        | 13:40       | 21.0            | 49       | 14:28       | 29.7            | 97       | 15:16       | 42.4            |
| 2        | 13:41       | 21.0            | 50       | 14:29       | 30.0            | 98       | 15:17       | 42.6            |
| 3        | 13:42       | 21.0            | 51       | 14:30       | 30.3            | 99       | 15:18       | 42.7            |
| 4        | 13:43       | 21.0            | 52       | 14:31       | 30.6            | 100      | 15:19       | 42.8            |
| 5        | 13:44       | 21.0            | 53       | 14:32       | 30.9            | 101      | 15:20       | 42.9            |
| 6        | 13:45       | 21.0            | 54       | 14:33       | 31.1            | 102      | 15:21       | 43.0            |
| 7        | 13:46       | 21.0            | 55       | 14:34       | 31.4            | 103      | 15:22       | 43.0            |
| 8        | 13:47       | 21.0            | 56       | 14:35       | 31.7            | 104      | 15:23       | 43.1            |
| 9        | 13:48       | 21.0            | 57       | 14:36       | 32.0            | 105      | 15:24       | 43.1            |
| 10       | 13:49       | 21.0            | 58       | 14:37       | 32.2            | 106      | 15:25       | 43.2            |
| 11       | 13:50       | 21.0            | 59       | 14:38       | 32.5            | 107      | 15:26       | 43.2            |
| 12       | 13:51       | 21.0            | 60       | 14:39       | 32.7            | 108      | 15:27       | 43.2            |
| 13       | 13:52       | 21.0            | 61       | 14:40       | 33.0            | 109      | 15:28       | 43.2            |
| 14       | 13:53       | 21.0            | 62       | 14:41       | 33.2            | 110      | 15:29       | 43.3            |
| 15       | 13:54       | 21.2            | 63       | 14:42       | 33.5            | 111      | 15:30       | 43.3            |
| 16       | 13:55       | 21.3            | 64       | 14:43       | 33.8            | 112      | 15:31       | 43.3            |
| 17       | 13:56       | 21.5            | 65       | 14:44       | 34.1            | 113      | 15:32       | 43.3            |
| 18       | 13:57       | 21.7            | 66       | 14:45       | 34.3            | 114      | 15:33       | 43.3            |
| 19       | 13:58       | 21.9            | 67       | 14:46       | 34.6            | 115      | 15:34       | 43.3            |
| 20       | 13:59       | 22.1            | 68       | 14:47       | 34.9            | 116      | 15:35       | 43.3            |
| 21       | 14:00       | 22.3            | 69       | 14:48       | 35.2            | 117      | 15:36       | 43.3            |
| 22       | 14:01       | 22.6            | 70       | 14:49       | 35.4            | 118      |             |                 |
| 23       | 14:02       | 22.9            | 71       | 14:50       | 35.7            | 119      |             |                 |

|    |       |      |    |       |      |     |  |  |
|----|-------|------|----|-------|------|-----|--|--|
| 24 | 14:03 | 23.3 | 72 | 14:51 | 36.0 | 120 |  |  |
| 25 | 14:04 | 23.4 | 73 | 14:52 | 36.2 | 121 |  |  |
| 26 | 14:05 | 23.6 | 74 | 14:53 | 36.5 | 122 |  |  |
| 27 | 14:06 | 23.9 | 75 | 14:54 | 36.8 | 123 |  |  |
| 28 | 14:07 | 24.1 | 76 | 14:55 | 37.1 | 124 |  |  |
| 29 | 14:08 | 24.4 | 77 | 14:56 | 37.3 | 125 |  |  |
| 30 | 14:09 | 24.6 | 78 | 14:57 | 37.6 | 126 |  |  |
| 31 | 14:10 | 25.0 | 79 | 14:58 | 37.9 | 127 |  |  |
| 32 | 14:11 | 25.2 | 80 | 14:59 | 38.2 | 128 |  |  |
| 33 | 14:12 | 25.4 | 81 | 15:00 | 38.4 | 129 |  |  |
| 34 | 14:13 | 25.6 | 82 | 15:01 | 38.7 | 130 |  |  |
| 35 | 14:14 | 25.8 | 83 | 15:02 | 39.0 | 131 |  |  |
| 36 | 14:15 | 26.2 | 84 | 15:03 | 39.2 | 132 |  |  |
| 37 | 14:16 | 26.5 | 85 | 15:04 | 39.5 | 133 |  |  |
| 38 | 14:17 | 26.9 | 86 | 15:05 | 39.7 | 134 |  |  |
| 39 | 14:18 | 27.0 | 87 | 15:06 | 40.0 | 135 |  |  |
| 40 | 14:19 | 27.3 | 88 | 15:07 | 40.3 | 136 |  |  |
| 41 | 14:20 | 27.4 | 89 | 15:08 | 40.5 | 137 |  |  |
| 42 | 14:21 | 27.9 | 90 | 15:09 | 40.8 | 138 |  |  |
| 43 | 14:22 | 28.1 | 91 | 15:10 | 41.1 | 139 |  |  |
| 44 | 14:23 | 28.4 | 92 | 15:11 | 41.3 | 140 |  |  |
| 45 | 14:24 | 28.7 | 93 | 15:12 | 41.5 | 141 |  |  |
| 46 | 14:25 | 28.9 | 94 | 15:13 | 41.8 | 142 |  |  |
| 47 | 14:26 | 29.2 | 95 | 15:14 | 42.0 | 143 |  |  |

## Ensaio 9

### Folha de Campo - Ensaio no módulo de telhado verde

|        |                                                         |
|--------|---------------------------------------------------------|
| Local: | Centro Experimental de Saneamento Ambiental - CESA/UFRJ |
| Data:  | 28/03/2016                                              |

|                                   |       |                                  |      |
|-----------------------------------|-------|----------------------------------|------|
| Horário de início das atividades: | 14:00 | Temperatura Média (°C):          | 33.3 |
| Horário de fim das atividades:    | 16:30 | Nº de dias anteriores sem chuva: | 2    |

### 1) Determinação da Precipitação Média do Ensaio

#### 1.1. Precipitação antes da realização do experimento

(Hora - 14:00 )

|                         |     |        |
|-------------------------|-----|--------|
| Volume da placa azul 1: | 4.2 | Litros |
| Volume da placa azul 2: | 4.6 | Litros |
| Volume total:           | 8.8 | Litros |

P1 = 48.9 mm/h

$P1 \text{ (mm/h)} = [ \text{Volume total (Litros)} / \text{Área de coleta (=1,8 m}^2 \text{)} ] / \text{Tempo (0,1 h=6min)}$

#### 1.2. Precipitação após a realização do experimento

(Hora - 16:15 )

|                         |     |        |
|-------------------------|-----|--------|
| Volume da placa azul 1: | 5.2 | Litros |
| Volume da placa azul 2: | 4.5 | Litros |
| Volume total:           | 9.7 | Litros |

P2 = 53.9 mm/h

$P2 \text{ (mm/h)} = [ \text{Volume total (Litros)} / \text{Área de coleta (=1,8 m}^2 \text{)} ] / \text{Tempo (0,1 h=6min)}$

#### 1.3. Precipitação Média: $P = (P1 + P2) / 2$

P = 51.4 mm/h

## 2) Experimento

### 2.1. Controle dos tempos e horário

|                                                                 | Relógio | Cronômetro |
|-----------------------------------------------------------------|---------|------------|
|                                                                 | (HH:MM) | (HH:MM)    |
| Hora do início da chuva sobre o telhado (Hi):                   | 14:15   | 00:00      |
| Hora em que começa a sair água das torneiras (Ht):              | 14:31   | 00:16      |
| Hora em que o deflúvio do telhado chega na CP (Hc):             | 14:34   | 00:19      |
| Tempo de demora do início do escoamento até chegada na CP (Tr): | 00:19   | 00:19      |
| Hora do fim da chuva sobre o telhado (Hf):                      | 15:45   | 01:30      |
| Tempo de duração da chuva (Td):                                 | 01:30   | -          |

### 2.2. Caixa Pluviômetra

|                                               |    |
|-----------------------------------------------|----|
| Leitura inicial da cota na Caixa Grande (cm): | 22 |
|-----------------------------------------------|----|

### 2.3. Umidade do Substrato

Equipamentos: Balança BG 8000, prato de alumínio e estufa.

#### 2.3.1. Amostra de todo substrato

|                               |       |                                |       |                         |       |
|-------------------------------|-------|--------------------------------|-------|-------------------------|-------|
| P <sub>Tara</sub> (g):        | 62.7  | P <sub>Úmido + Tara</sub> (g): | 239.7 | P <sub>Úmido</sub> (g): | 177.0 |
| P <sub>Seco + Tara</sub> (g): | 219.5 | P <sub>Seco</sub> (g):         | 156.8 | Umidade (%):            | 12.9  |

#### 2.3.2. Amostra de areia

|                               |      |                                |      |                         |      |
|-------------------------------|------|--------------------------------|------|-------------------------|------|
| P <sub>Tara</sub> (g):        | 32.9 | P <sub>Úmido + Tara</sub> (g): | 85.3 | P <sub>Úmido</sub> (g): | 52.4 |
| P <sub>Seco + Tara</sub> (g): | 81.9 | P <sub>Seco</sub> (g):         | 49.0 | Umidade (%):            | 6.9  |

### 2.4. Medições

| t  | Hora  | Lcg (cm) | t  | Hora  | Lcg (cm) | t   | Hora  | Lcg (cm) |
|----|-------|----------|----|-------|----------|-----|-------|----------|
| 0  | 14:15 | 22.0     | 48 | 15:03 | 29.3     | 96  | 15:51 | 41.9     |
| 1  | 14:16 | 22.0     | 49 | 15:04 | 29.6     | 97  | 15:52 | 42.0     |
| 2  | 14:17 | 22.0     | 50 | 15:05 | 29.8     | 98  | 15:53 | 42.1     |
| 3  | 14:18 | 22.0     | 51 | 15:06 | 30.1     | 99  | 15:54 | 42.2     |
| 4  | 14:19 | 22.0     | 52 | 15:07 | 30.4     | 100 | 15:55 | 42.2     |
| 5  | 14:20 | 22.0     | 53 | 15:08 | 30.7     | 101 | 15:56 | 42.3     |
| 6  | 14:21 | 22.0     | 54 | 15:09 | 31.0     | 102 | 15:57 | 42.3     |
| 7  | 14:22 | 22.0     | 55 | 15:10 | 31.3     | 103 | 15:58 | 42.4     |
| 8  | 14:23 | 22.0     | 56 | 15:11 | 31.5     | 104 | 15:59 | 42.4     |
| 9  | 14:24 | 22.0     | 57 | 15:12 | 31.8     | 105 | 16:00 | 42.4     |
| 10 | 14:25 | 22.0     | 58 | 15:13 | 32.1     | 106 | 16:01 | 42.4     |
| 11 | 14:26 | 22.0     | 59 | 15:14 | 32.4     | 107 | 16:02 | 42.5     |
| 12 | 14:27 | 22.0     | 60 | 15:15 | 32.6     | 108 | 16:03 | 42.5     |
| 13 | 14:28 | 22.0     | 61 | 15:16 | 32.9     | 109 | 16:04 | 42.5     |
| 14 | 14:29 | 22.0     | 62 | 15:17 | 33.2     | 110 | 16:05 | 42.5     |
| 15 | 14:30 | 22.0     | 63 | 15:18 | 33.4     | 111 | 16:06 | 42.5     |
| 16 | 14:31 | 22.0     | 64 | 15:19 | 33.6     | 112 | 16:07 | 42.5     |
| 17 | 14:32 | 22.0     | 65 | 15:20 | 33.9     | 113 |       |          |
| 18 | 14:33 | 22.0     | 66 | 15:21 | 34.2     | 114 |       |          |
| 19 | 14:34 | 22.0     | 67 | 15:22 | 34.4     | 115 |       |          |
| 20 | 14:35 | 22.2     | 68 | 15:23 | 34.7     | 116 |       |          |
| 21 | 14:36 | 22.4     | 69 | 15:24 | 35.0     | 117 |       |          |
| 22 | 14:37 | 22.6     | 70 | 15:25 | 35.3     | 118 |       |          |
| 23 | 14:38 | 22.8     | 71 | 15:26 | 35.5     | 119 |       |          |

|    |       |      |    |       |      |     |  |  |
|----|-------|------|----|-------|------|-----|--|--|
| 24 | 14:39 | 23.0 | 72 | 15:27 | 35.8 | 120 |  |  |
| 25 | 14:40 | 23.2 | 73 | 15:28 | 36.1 | 121 |  |  |
| 26 | 14:41 | 23.5 | 74 | 15:29 | 36.4 | 122 |  |  |
| 27 | 14:42 | 23.7 | 75 | 15:30 | 36.6 | 123 |  |  |
| 28 | 14:43 | 24.0 | 76 | 15:31 | 36.9 | 124 |  |  |
| 29 | 14:44 | 24.3 | 77 | 15:32 | 37.1 | 125 |  |  |
| 30 | 14:45 | 24.5 | 78 | 15:33 | 37.4 | 126 |  |  |
| 31 | 14:46 | 24.8 | 79 | 15:34 | 37.6 | 127 |  |  |
| 32 | 14:47 | 25.1 | 80 | 15:35 | 37.9 | 128 |  |  |
| 33 | 14:48 | 25.4 | 81 | 15:36 | 38.2 | 129 |  |  |
| 34 | 14:49 | 25.6 | 82 | 15:37 | 38.4 | 130 |  |  |
| 35 | 14:50 | 25.9 | 83 | 15:38 | 38.7 | 131 |  |  |
| 36 | 14:51 | 26.2 | 84 | 15:39 | 38.9 | 132 |  |  |
| 37 | 14:52 | 26.5 | 85 | 15:40 | 39.1 | 133 |  |  |
| 38 | 14:53 | 26.7 | 86 | 15:41 | 39.4 | 134 |  |  |
| 39 | 14:54 | 27.0 | 87 | 15:42 | 39.7 | 135 |  |  |
| 40 | 14:55 | 27.2 | 88 | 15:43 | 40.0 | 136 |  |  |
| 41 | 14:56 | 27.5 | 89 | 15:44 | 40.2 | 137 |  |  |
| 42 | 14:57 | 27.8 | 90 | 15:45 | 40.5 | 138 |  |  |
| 43 | 14:58 | 28.1 | 91 | 15:46 | 40.7 | 139 |  |  |
| 44 | 14:59 | 28.4 | 92 | 15:47 | 41.0 | 140 |  |  |
| 45 | 15:00 | 28.6 | 93 | 15:48 | 41.3 | 141 |  |  |
| 46 | 15:01 | 28.9 | 94 | 15:49 | 41.5 | 142 |  |  |
| 47 | 15:02 | 29.1 | 95 | 15:50 | 41.7 | 143 |  |  |

## Ensaio 10

### Folha de Campo - Ensaio no módulo de telhado verde

|        |                                                                |
|--------|----------------------------------------------------------------|
| Local: | <b>Centro Experimental de Saneamento Ambiental - CESA/UFRJ</b> |
| Data:  | <b>15/02/2016</b>                                              |

|                                   |       |                                  |   |
|-----------------------------------|-------|----------------------------------|---|
| Horário de início das atividades: | 08:00 | Temperatura Média (°C):          | - |
| Horário de fim das atividades:    | 11:30 | Nº de dias anteriores sem chuva: | 4 |

### 1) Determinação da Precipitação Média do Ensaio

#### 1.1. Precipitação antes da realização do experimento

(Hora - 08:45 )

|                         |     |        |
|-------------------------|-----|--------|
| Volume da placa azul 1: | 4.3 | Litros |
| Volume da placa azul 2: | 4.6 | Litros |
| Volume total:           | 8.9 | Litros |

P1 = 49.4 mm/h

$P1 \text{ (mm/h)} = [ \text{Volume total (Litros)} / \text{Área de coleta (=1,8 m}^2 \text{)} ] / \text{Tempo (0,1 h=6min)}$

#### 1.2. Precipitação após a realização do experimento

(Hora - 11:15 )

|                         |     |        |
|-------------------------|-----|--------|
| Volume da placa azul 1: | 4.5 | Litros |
| Volume da placa azul 2: | 5.0 | Litros |
| Volume total:           | 9.5 | Litros |

P2 = 52.8 mm/h

$P2 \text{ (mm/h)} = [ \text{Volume total (Litros)} / \text{Área de coleta (=1,8 m}^2 \text{)} ] / \text{Tempo (0,1 h=6min)}$

#### 1.3. Precipitação Média: $P = (P1 + P2) / 2$

P = 51.1 mm/h

## 2) Experimento

### 2.1. Controle dos tempos e horário

|                                                                 | Relógio | Cronômetro |
|-----------------------------------------------------------------|---------|------------|
|                                                                 | (HH:MM) | (HH:MM)    |
| Hora do início da chuva sobre o telhado (Hi):                   | 09:15   | 00:00      |
| Hora em que começa a sair água das torneiras (Ht):              | 09:30   | 00:15      |
| Hora em que o deflúvio do telhado chega na CP (Hc):             | 09:33   | 00:18      |
| Tempo de demora do início do escoamento até chegada na CP (Tr): | 00:18   | 00:18      |
| Hora do fim da chuva sobre o telhado (Hf):                      | 10:45   | 01:30      |
| Tempo de duração da chuva (Td):                                 | 01:30   | -          |

### 2.2. Caixa Pluviômetra

|                                               |      |
|-----------------------------------------------|------|
| Leitura inicial da cota na Caixa Grande (cm): | 21.3 |
|-----------------------------------------------|------|

### 2.3. Umidade do Substrato

Equipamentos: Balança BG 8000, prato de alumínio e estufa.

#### 2.3.1. Amostra de todo substrato

|                               |       |                                |       |                         |       |
|-------------------------------|-------|--------------------------------|-------|-------------------------|-------|
| P <sub>Tara</sub> (g):        | 72.6  | P <sub>Úmido + Tara</sub> (g): | 204.7 | P <sub>Úmido</sub> (g): | 132.1 |
| P <sub>Seco + Tara</sub> (g): | 190.4 | P <sub>Seco</sub> (g):         | 117.8 | Umidade (%):            | 12.1  |

#### 2.3.2. Amostra de areia

|                               |      |                                |      |                         |      |
|-------------------------------|------|--------------------------------|------|-------------------------|------|
| P <sub>Tara</sub> (g):        | 42.6 | P <sub>Úmido + Tara</sub> (g): | 95.4 | P <sub>Úmido</sub> (g): | 52.8 |
| P <sub>Seco + Tara</sub> (g): | 92.2 | P <sub>Seco</sub> (g):         | 49.6 | Umidade (%):            | 6.5  |

### 2.4. Medições

| t  | Hora | Lcg (cm) | t  | Hora  | Lcg (cm) | t   | Hora  | Lcg (cm) |
|----|------|----------|----|-------|----------|-----|-------|----------|
| 0  | 9:15 | 21.3     | 48 | 10:03 | 28.5     | 96  | 10:51 | 40.2     |
| 1  | 9:16 | 21.3     | 49 | 10:04 | 28.7     | 97  | 10:52 | 40.3     |
| 2  | 9:17 | 21.3     | 50 | 10:05 | 29.0     | 98  | 10:53 | 40.4     |
| 3  | 9:18 | 21.3     | 51 | 10:06 | 29.2     | 99  | 10:54 | 40.4     |
| 4  | 9:19 | 21.3     | 52 | 10:07 | 29.5     | 100 | 10:55 | 40.5     |
| 5  | 9:20 | 21.3     | 53 | 10:08 | 29.8     | 101 | 10:56 | 40.5     |
| 6  | 9:21 | 21.3     | 54 | 10:09 | 30.1     | 102 | 10:57 | 40.5     |
| 7  | 9:22 | 21.3     | 55 | 10:10 | 30.3     | 103 | 10:58 | 40.6     |
| 8  | 9:23 | 21.3     | 56 | 10:11 | 30.6     | 104 | 10:59 | 40.6     |
| 9  | 9:24 | 21.3     | 57 | 10:12 | 30.8     | 105 | 11:00 | 40.6     |
| 10 | 9:25 | 21.3     | 58 | 10:13 | 31.1     | 106 | 11:01 | 40.6     |
| 11 | 9:26 | 21.3     | 59 | 10:14 | 31.3     | 107 | 11:02 | 40.7     |
| 12 | 9:27 | 21.3     | 60 | 10:15 | 31.6     | 108 | 11:03 | 40.7     |
| 13 | 9:28 | 21.3     | 61 | 10:16 | 31.9     | 109 | 11:04 | 40.7     |
| 14 | 9:29 | 21.3     | 62 | 10:17 | 32.1     | 110 | 11:05 | 40.7     |
| 15 | 9:30 | 21.3     | 63 | 10:18 | 32.3     | 111 | 11:06 | 40.8     |
| 16 | 9:31 | 21.3     | 64 | 10:19 | 32.6     | 112 | 11:07 | 40.8     |
| 17 | 9:32 | 21.3     | 65 | 10:20 | 32.7     | 113 | 11:08 | 40.8     |
| 18 | 9:33 | 21.3     | 66 | 10:21 | 32.9     | 114 | 11:09 | 40.9     |
| 19 | 9:34 | 21.4     | 67 | 10:22 | 33.2     | 115 | 11:10 | 40.9     |
| 20 | 9:35 | 21.6     | 68 | 10:23 | 33.5     | 116 | 11:11 | 40.9     |
| 21 | 9:36 | 22.0     | 69 | 10:24 | 33.8     | 117 | 11:12 | 40.9     |
| 22 | 9:37 | 22.2     | 70 | 10:25 | 34.0     | 118 | 11:13 | 40.9     |
| 23 | 9:38 | 22.4     | 71 | 10:26 | 34.3     | 119 |       |          |

|    |       |      |    |       |      |     |  |  |
|----|-------|------|----|-------|------|-----|--|--|
| 24 | 9:39  | 22.6 | 72 | 10:27 | 34.6 | 120 |  |  |
| 25 | 9:40  | 22.9 | 73 | 10:28 | 34.9 | 121 |  |  |
| 26 | 9:41  | 23.1 | 74 | 10:29 | 35.1 | 122 |  |  |
| 27 | 9:42  | 23.4 | 75 | 10:30 | 35.3 | 123 |  |  |
| 28 | 9:43  | 23.8 | 76 | 10:31 | 35.5 | 124 |  |  |
| 29 | 9:44  | 24.0 | 77 | 10:32 | 35.8 | 125 |  |  |
| 30 | 9:45  | 24.3 | 78 | 10:33 | 36.0 | 126 |  |  |
| 31 | 9:46  | 24.6 | 79 | 10:34 | 36.3 | 127 |  |  |
| 32 | 9:47  | 24.8 | 80 | 10:35 | 36.6 | 128 |  |  |
| 33 | 9:48  | 24.9 | 81 | 10:36 | 36.8 | 129 |  |  |
| 34 | 9:49  | 25.1 | 82 | 10:37 | 37.1 | 130 |  |  |
| 35 | 9:50  | 25.4 | 83 | 10:38 | 37.3 | 131 |  |  |
| 36 | 9:51  | 25.5 | 84 | 10:39 | 37.5 | 132 |  |  |
| 37 | 9:52  | 25.7 | 85 | 10:40 | 37.8 | 133 |  |  |
| 38 | 9:53  | 26.0 | 86 | 10:41 | 38.1 | 134 |  |  |
| 39 | 9:54  | 26.2 | 87 | 10:42 | 38.4 | 135 |  |  |
| 40 | 9:55  | 26.5 | 88 | 10:43 | 38.6 | 136 |  |  |
| 41 | 9:56  | 26.8 | 89 | 10:44 | 38.9 | 137 |  |  |
| 42 | 9:57  | 27.0 | 90 | 10:45 | 39.1 | 138 |  |  |
| 43 | 9:58  | 27.3 | 91 | 10:46 | 39.4 | 139 |  |  |
| 44 | 9:59  | 27.5 | 92 | 10:47 | 39.6 | 140 |  |  |
| 45 | 10:00 | 27.8 | 93 | 10:48 | 39.8 | 141 |  |  |
| 46 | 10:01 | 28.0 | 94 | 10:49 | 40.0 | 142 |  |  |
| 47 | 10:02 | 28.2 | 95 | 10:50 | 40.1 | 143 |  |  |

## ANEXO I – O SIMULADOR DE ÁGUA DE CHUVA

O Simulador de Chuvas utilizado nesta pesquisa, denominado *InfiAsper – Double* (Figura I-1), foi desenvolvido pelo Professor Teodorico Alves Sobrinho da Universidade Federal do Mato Grosso do Sul (UFMS).



Figura I.1 – Simulador de Chuvas *InfiAsper – Double*.

Fonte: LIBERATO (2015).

O Simulador de Chuvas *InfiAsper – Double* foi projetado de modo a garantir que a chuva produzida abranja uma área de influência superior à dos simuladores *InfiAsper2* e *InfiAsper*. A concepção do simulador de chuvas *InfiAsper2* é detalhada em Alves Sobrinho *et al.* (2008), sendo este equipamento uma evolução do simulador *InfiAsper*, cujo projeto é descrito em Alves Sobrinho *et al.* (2002).

Para esta pesquisa, o Simulador de Chuvas original, apresentado na Figura I.1, foi adaptado, com a instalação de rodízios em seus 4 (quatro) pontos de base, de modo a permitir o seu deslocamento ao longo dos trilhos existentes na bancada experimental, podendo atender, desta forma, aos 5 (cinco) módulos construídos ao longo da bancada. As Figuras I.2 e I.3 ilustram esta adaptação realizada no simulador.



Figura I.2 – Rodízios implantados no Simulador de Chuvas (vista 1).

Fonte: Acervo do autor (2016).



Figura I.3 – Rodízios implantados no Simulador de Chuvas (vista 2).

Fonte: Acervo do autor (2016).

Conforme ilustrado na Figura I.4, o Simulador de Chuvas é composto por um corpo em aço galvanizado que, em sua parte superior, encontram-se 2 (dois) interceptadores de água (Figura I.5), onde, dentro de cada um, existe um obturador rotativo ajustável (Figura I.6), através do qual, pela abertura de suas fendas, possível somente após o afrouxamento da borboleta indicada na Figura I.7, é possível ajustar a intensidade de chuva requerida. Na parte superior do simulador (Figura I.5) também estão o painel de controle, para o acionamento dos obturadores e da bomba, e um manômetro que indica a pressão da água que entra nos interceptadores.

O Simulador de Chuvas é alimentado por água da concessionária, que é conduzida até um reservatório (galão) de 200 litros. Este reservatório possui dois furos, próximo do topo, como indicado na Figura I.4, de modo a manter o nível de água dentro do galão constante. A água armazenada no reservatório é recalçada para os interceptadores de água, com o auxílio de uma bomba hidráulica com potência de 1 ½” HP e de tubulações de sucção e recalque. O excesso de água, ou seja, a parcela de água recalçada que não é utilizada para produzir uma dada intensidade de chuva, retorna ao reservatório, por meio de mangueiras, indicadas também na Figura I.4. Trata-se, portanto, conforme mencionado por Liberato (2015), de um sistema de circulação de água, pois parte da água bombeada retorna ao reservatório de alimentação.

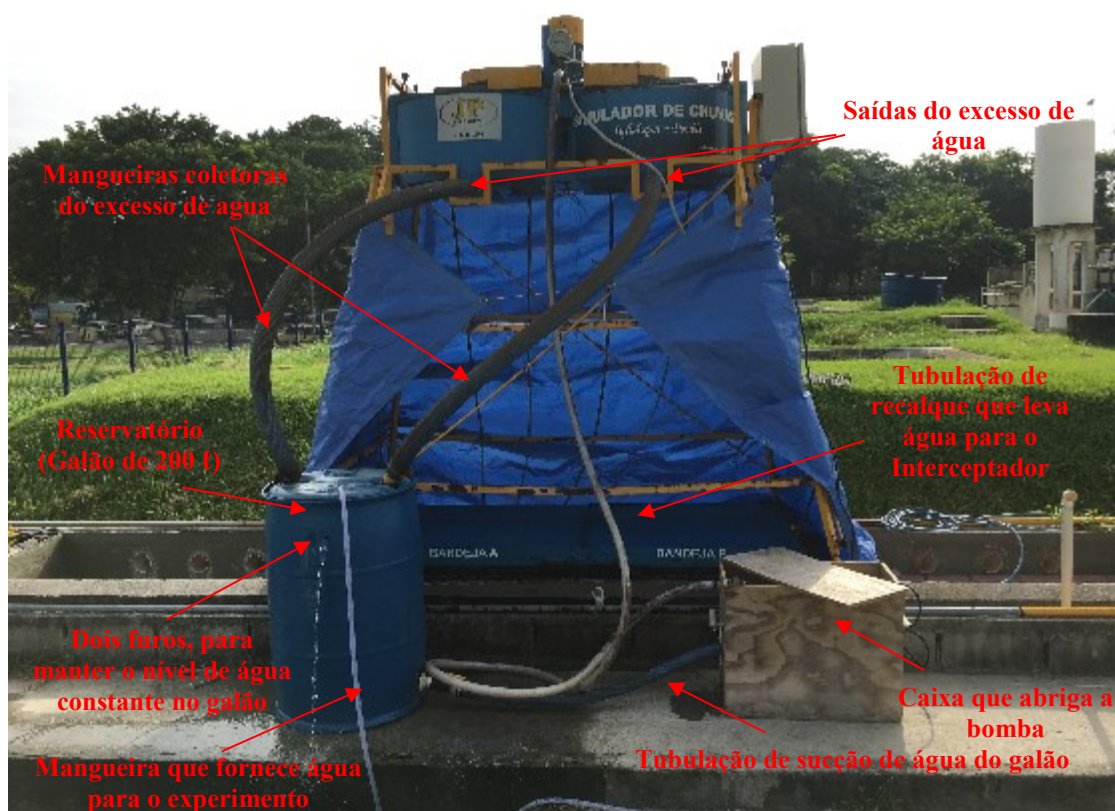


Figura I.4 – Composição do Simulador de Chuvas *InfiAsper – Double*.

Fonte: Acervo do autor (2016).

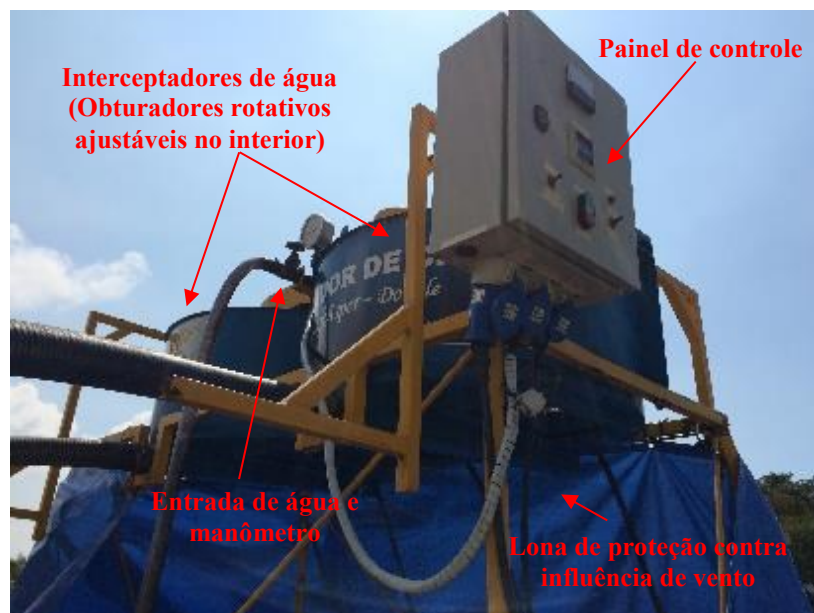


Figura I.5 – Simulador de Chuvas *InfiAsper – Double* (Detalhe da estrutura superior).

Fonte: Acervo do autor (2016).

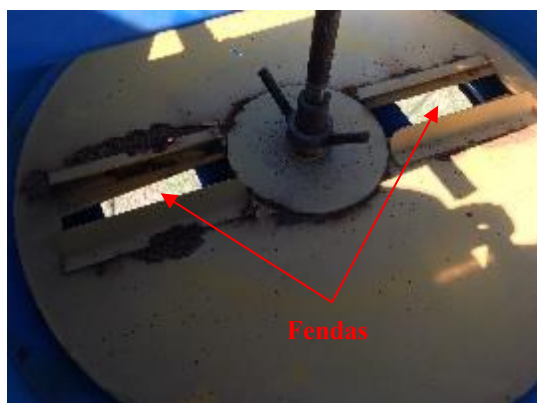


Figura I.6 – Obturador, com vista para suas fendas ajustáveis.

Fonte: Acervo do autor (2016).



Figura I.7 – Borboleta para ajuste da abertura da fenda.

Fonte: Acervo do autor (2016).

Observa-se, conforme apresentado nas Figuras I.4 e I.5, para evitar a influência de vento na chuva induzida pelo simulador, foi utilizada uma lona para cobrir as faces do equipamento em que a direção do vento é predominante.

De acordo com o Manual do Simulador de Chuvas *InfiAsper – Double* (ALVES SOBRINHO, 2012), o simulador pode ser calibrado para produzir chuvas de 30 a 200 mm/h de intensidade. O equipamento é equipado com 4 (quatro) bicos *Veejet 80.150* dispostos paralelamente, sendo 2 (dois) em cada interceptador, que recebem a água recalcada do reservatório (galão). A pressão de operação nos bicos deve ser de 35,6 kPa, equivalente a aproximadamente 5 psi, permitindo a aplicação de chuva cujas gotas apresentam diâmetro médio volumétrico de 2,0 mm. A rotação dos discos obturadores a ser considerada é de 127 rpm, definida por meio de um inversor de frequência localizado no quadro de comando elétrico do equipamento (Figura I.5), sendo que esta rotação é, de acordo com Liberato (2015), acionada por um motor elétrico de 2 HP de potência e sistema de polias, a fim de que ambos os discos tenham a mesma rotação.

## ANEXO II – A CAIXA PLUVIÔMETRA (CP)

A Caixa Pluviômetro (CP) é um equipamento desenvolvido pela Escola Politécnica da UFRJ, tendo sido o pedido de sua patente depositado pela Universidade junto ao Instituto Nacional da Propriedade Industrial (INPI) sob o número BR2020120286942. O idealizador desse equipamento é o Professor Theophilo Benedicto Ottoni Filho, do Departamento de Recursos Hídricos e Meio Ambiente da Escola Politécnica da UFRJ (LIBERATO, 2015).

O equipamento foi concebido para mensurar os principais processos hidrológicos associados à chuva (precipitação total, infiltração e escoamento superficial), bem como avaliar um índice de erosão associado às precipitações medidas. Assim, por meio desse único aparato medidor, pretende-se determinar os mais importantes efeitos ambientais da chuva (LIBERATO, 2015).

A CP (Figura II.1) é um equipamento compacto, construído em ferro galvanizado, com dimensões de 1,00 x 0,90 x 0,70 m, constituído por um corpo e uma tampa (LIBERATO *et al.*, 2015). Seus compartimentos internos estão indicados na Figura II.2.



Figura II.1 – Caixa Pluviômetro pós-etapa de fabricação.

Fonte: LIBERATO (2015).

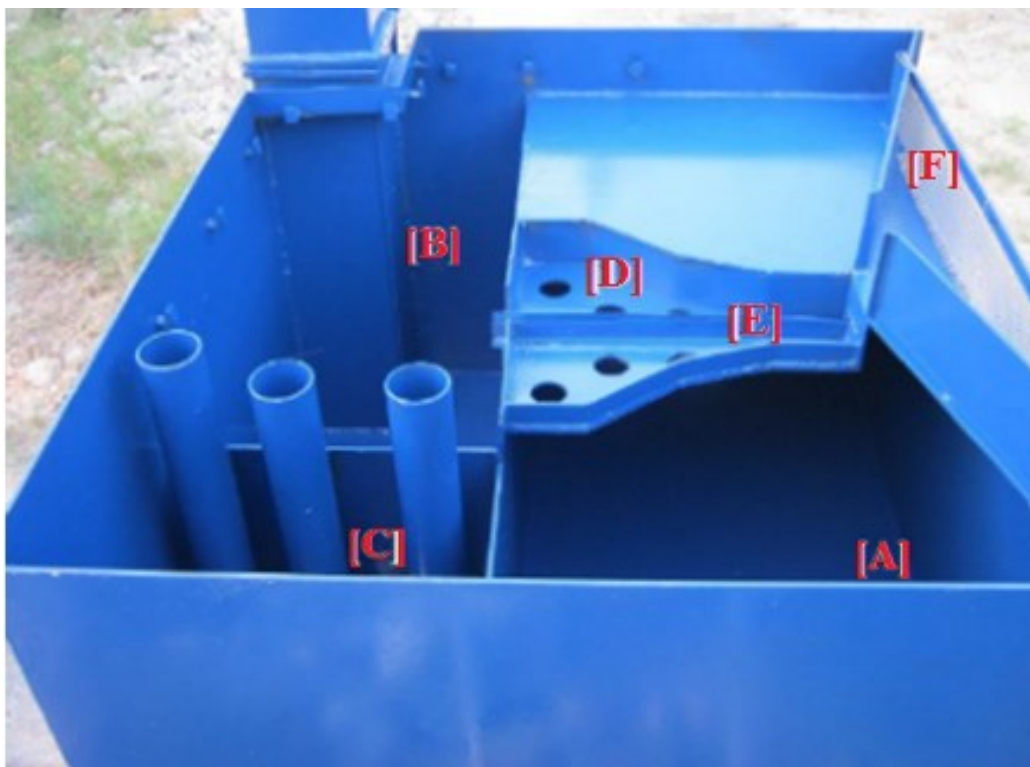


Figura II.2 – Vista interna da Caixa Pluviômetra.

[A] Reservatório maior, cerca de 230 litros; [B] Reservatório menor, cerca de 90 litros; [C] Reservatório de drenagem, onde é feita a drenagem do equipamento pós-eventos com escoamento superficial. Destaque para os três tubos piezométricos para medição do nível; [D] Furos de alimentação do reservatório maior; [E] Canaleta de alimentação do reservatório menor; [F] Tela na embocadura da CP.

Fonte: LIBERATO (2015).

Uma descrição mais detalhada sobre o equipamento, seus compartimentos, e como são realizadas as medições de precipitação, infiltração, escoamento superficial e índice de erosão do solo frente a eventos de chuva, é apresentada na pesquisa de Liberato (2015).

No CESA/UFRJ foram instaladas duas CPs, uma suspensa (Figura II.3), para atender aos ensaios experimentais nos módulos da bancada experimental, e outra enterrada (Figura II.4), para atender a outras pesquisas e destinada a receber a contribuição de uma área em formato trapezoidal, com  $7,8 \text{ m}^2$ , delimitada por uma soleira de 15 cm de altura.



Figura II.3 – CP suspensa.

Fonte: LIBERATO (2015).



Figura II.4 – CP enterrada.

Fonte: LIBERATO (2015).

Considerando que o protótipo de cobertura verde se encontra na bancada experimental, nesta pesquisa foi utilizada a CP suspensa (Figura II.3). Embora, conforme já relatado, este equipamento possa ser utilizado para medir diversos processos hidrológicos, nesta pesquisa, a CP foi utilizada apenas para quantificar as vazões drenadas, através das camadas do módulo de telhado verde, em experimentos com chuvas induzidas pelo Simulador de Chuvas sobre a área do protótipo de cobertura verde.

## **ANEXO III – O MODELO DE CÉLULAS - MODCEL**

### **O Modelo de Células**

O modelo matemático utilizado como ferramenta para esta pesquisa foi o Modelo de Células, ou MODCEL, desenvolvido por Marcelo Gomes Miguez, Professor Associado da UFRJ, cujo conceito teve origem nos trabalhos sobre modelo de células de escoamento desenvolvidos por Zanobetti, Lorgeré, Preissman e Cunge (1970), para o delta do rio Mekong, no Vietnã.

Antes do desenvolvimento do MODCEL, já constava, na dissertação de Mestrado de Miguez (1994), uma aplicação de modelagem matemática, a partir de células de escoamento, para a grande planície alagável do Pantanal Matogrossense. Sete anos após esse trabalho, a tese de Doutorado de Miguez (2001) trouxe o conceito do modelo de células com aplicação em áreas urbanizadas, com o objetivo de representar o fenômeno das cheias urbanas.

Todo o histórico, motivações e desenvolvimento do Modelo de Células – MODCEL, pode ser encontrado nos trabalhos de Miguez (1994) e Miguez (2001).

De acordo com Bahiense (2013), o MODCEL é definido como um modelo de escoamento Quasi-2D, pois apesar de dividir a superfície do ambiente a ser simulado em uma rede células, formando um arranjo bidimensional, tais células são ligadas entre si por equações clássicas unidimensionais.

Trata-se de um modelo que possui atualizações frequentes, conforme surgem as necessidades, possuindo, hoje, diversos tipos de células e ligações para a representação física da situação real.

### **Hipóteses do modelo**

De acordo com a descrição de Miguez (2001) e Veról (2013), as hipóteses do Modelo de Células, para o caso de modelação em áreas urbanas, são:

1. A natureza pode ser representada por compartimentos homogêneos, interligados, chamados células de escoamento. Os rios, seus afluentes, planícies de inundação e bacias de contribuição são subdivididos em células, formando uma rede de escoamento

bidimensional, com possibilidade de escoamento em várias direções nas zonas de inundação, a partir de relações unidimensionais de troca;

2. Na célula, a área da superfície livre líquida depende da elevação do nível d'água no interior desta e o volume de água contido em cada célula está diretamente relacionado com o nível d'água no centro da mesma, ou seja:

$$V_i = V(Z_i) \quad (\text{Equação III.1})$$

$$V_i = A_{si} \times V(Z_i - Z_{0i}) \quad (\text{Equação III.2})$$

Onde:  $Z_{0i}$  é a cota do fundo da célula; e  $A_{si}$  é a área superficial da célula.

3. O modelo proposto articula as células em loop (modelo anelado), com possibilidade de escoamento em várias direções na bacia modelada);

4. Cada célula comunica-se hidraulicamente com células de sua vizinhança próxima;

5. Às vazões trocadas com as células vizinhas somam-se as vazões resultantes da transformação da chuva;

6. O escoamento entre células pode ser calculado através de leis hidráulicas conhecidas, como, por exemplo, a equação dinâmica de Saint-Venant, completa ou simplificada, a equação de escoamento sobre vertedouros, livres ou afogados, a equação de orifício, diversas combinações construídas para representar estruturas hidráulicas, como bocas-de-lobo, galerias, comportas flap, entre outros;

7. A vazão entre duas células adjacentes, em qualquer tempo, é apenas função dos níveis d'água no centro dessas células, ou seja:

$$Q_{i,k} = Q(Z_i, Z_k) \quad (\text{Equação III.3})$$

8. As seções transversais de escoamento são tomadas como seções retangulares equivalentes, simples ou compostas;

9. Aplica-se o princípio da conservação de massa a cada célula;

10. As células são arranjadas em um esquema topológico, constituído por grupos formais, onde uma célula de um dado grupo só pode se comunicar com células deste mesmo grupo, ou dos grupos imediatamente posterior ou anterior, caracterizando as relações de vizinhança e permitindo a solução numérica pelo método da dupla varredura.

## **Representação de bacias no MODCEL: Células e Ligações**

O MODCEL considera que a natureza pode ser representada através da divisão da superfície da bacia em compartimentos homogêneos e interligados, denominadas células de escoamento. As células formam uma rede de escoamento bidimensional, a partir de relações hidráulicas unidimensionais com as células vizinhas. Além desta comunicação hidráulica, cada célula recebe uma contribuição de precipitação e realiza processos hidrológicos internos para transformação de chuva em vazão (GUIMARÃES, 2016). No Modelo de Células, existem 5 (cinco) tipos de células definidos, com determinados usos recomendados, para descrever fisicamente os escoamentos, considerando as seguintes características das células: sua capacidade de armazenamento, suas cotas limitadoras e sua possibilidade de receber, ou não, contribuição de água de chuva. Na Tabela III.1 estão apresentados esses tipos de células e suas respectivas descrições.

De modo a permitir simular, a partir das células, a realidade do escoamento das águas em bacias urbanas, existem, no Modelo de Células, uma série de tipos de ligações entre as células, que estabelecem uma relação hidráulica de comunicação entre as mesmas. Na Tabela III.2 estão listadas essas ligações e uma breve descrição sobre o que indica esta ligação, em termos hidráulicos.

Tabela III.1 – Tipos de Células do MODCEL.

Fonte: Elaborado pelo autor, baseado em UFRJ (2003) e GUIMARÃES (2016).

| <b>Tipos de Células</b>            | <b>Descrição</b>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                        |
|------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| De rio ou de canal                 | Por onde se desenvolve o escoamento principal da drenagem a céu aberto, podendo ser seção simples ou composta, porém, aproximadamente retangulares.                                                                                                                                                                                                                                                                                                                     |
| De galeria                         | Célula subterrânea, e complementa a rede de drenagem principal, representando trechos de rios capeados ou grandes galerias de macrodrenagem.                                                                                                                                                                                                                                                                                                                            |
| De planície urbanizada             | Representa os escoamentos à superfície livre em planícies alagáveis; áreas de armazenamento, ligadas umas às outras por ruas; áreas de encosta, para recepção e transporte da água precipitada sobre as mesmas para dentro do modelo; áreas de vertimento da água de um rio para ruas vizinhas e vice-versa; e áreas de transposição de margens, quando é preciso integrar as ruas marginais a um rio e que se comunicam através de uma ponte ao nível da rua.          |
| De superfície plana não urbanizada | Representa de escoamentos superficiais em áreas aproximadamente planas através de um prisma, simulando áreas naturais de armazenamento, assim como áreas de encostas com pequenas áreas de armazenagem ou áreas que funcionam como soleiras espessas de vertedouro.                                                                                                                                                                                                     |
| De reservatório                    | Simula o armazenamento d'água em um reservatório temporário de armazenamento, dispondo de uma curva cota x área superficial, a partir da qual, conhecendo-se a variação de profundidades, pode-se também conhecer a variação de volume armazenado. A célula tipo-reservatório cumpre o papel de amortecimento de uma vazão afluente. Pode também, de fato, ser utilizada para representação de áreas irregulares do terreno, mesmo que não sejam reservatórios formais. |

Tabela III.2 – Tipos de Ligações do MODCEL.

Fonte: Elaborado pelo autor, baseado em UFRJ (2003) e GUIMARÃES (2016).

| <b>Tipos de Ligações</b>      | <b>Descrição</b>                                                                                                                                                                                                                                                              |
|-------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Planície                      | Indicada para escoamento à superfície livre sem termos de inércia, apropriada para simular a comunicação entre duas células de planície vizinhas cujo escoamento ocorre através de ruas e logradouros.                                                                        |
| Canal                         | Indicada para escoamento à superfície livre, considerando a equação dinâmica de Saint Venant, incluindo seus termos de inércia e é utilizada na representação do escoamento em rios e canais.                                                                                 |
| Galeria 1                     | Apropriada para o escoamento em galerias celulares ou retangulares que representam rios capeados, sendo inicialmente à superfície livre e evoluindo para possível escoamento sob pressão. Tipicamente conectam células de galeria.                                            |
| Galeria 2                     | Apropriada para representação das redes de drenagem tubular enterradas, sendo utilizadas para conectar poços de visita, representados como pequenos reservatórios.                                                                                                            |
| Entrada de galeria            | Utilizada junto com representações do tipo galeria para modelar a contração do escoamento na transição de células de canal e galeria.                                                                                                                                         |
| Saída de galeria              | Utilizada junto com representações do tipo galeria para modelar a expansão do escoamento na transição de células de galeria e canal.                                                                                                                                          |
| Vertedor de soleira espessa   | Considera a equação clássica de vertedouros de soleira espessa, para escoamento livre ou afogado, utilizada para representar o vertimento por transbordamento do rio ou canal para a planície e entre células da planície em locais onde barreiras físicas formam fronteiras. |
| Orifício Clássico             | Ligação que simula o fluxo entre células através de um orifício, nos dois sentidos de escoamento, com a Equação Clássica de orifícios.                                                                                                                                        |
| Confluência de galeria em rio | Funciona como vertedouro, livre ou afogado, ou orifício, para galerias que chegam a um rio em cota superior ao fundo deste, por uma das margens não configurando continuidade da linha d'água.                                                                                |
| Confluência entre galerias    | Semelhante ao tipo anterior, porém, para galerias fechadas.                                                                                                                                                                                                                   |
| Microdrenagem 1               | Funciona como interface das células superficiais com as células de galeria, complementando a representação quando do uso de ligação tipo Galeria 1.                                                                                                                           |
| Microdrenagem 2               | Análoga à ligação anterior, complementando a representação física no uso de ligação tipo galeria 2.                                                                                                                                                                           |
| Vertedor                      | Ligação que simula o fluxo entre células através de um vertedouro, podendo ser frontal ou lateral ao sentido do escoamento, além de clássico, livre ou afogado.                                                                                                               |
| Reservatório                  | Representam efeitos de orifício e vertedor.                                                                                                                                                                                                                                   |
| Comporta FLAP                 | Ligação que simula o fluxo entre células de rio através de uma comporta tipo FLAP. Este tipo de comporta permite a comunicação apenas em um único sentido, de acordo com o nível d'água entre os corpos d'água.                                                               |
| Bombeamento                   | Simula o bombeamento de uma vazão constante, entre duas células a partir de uma cota de partida.                                                                                                                                                                              |

Nas Figuras III.1 e III.2 estão ilustrados, respectivamente, como pode ser feita a divisão de uma área de estudo em células de escoamento, em planta; e a configuração, em corte de como ficariam as células bem como a representação de algumas ligações entre elas.

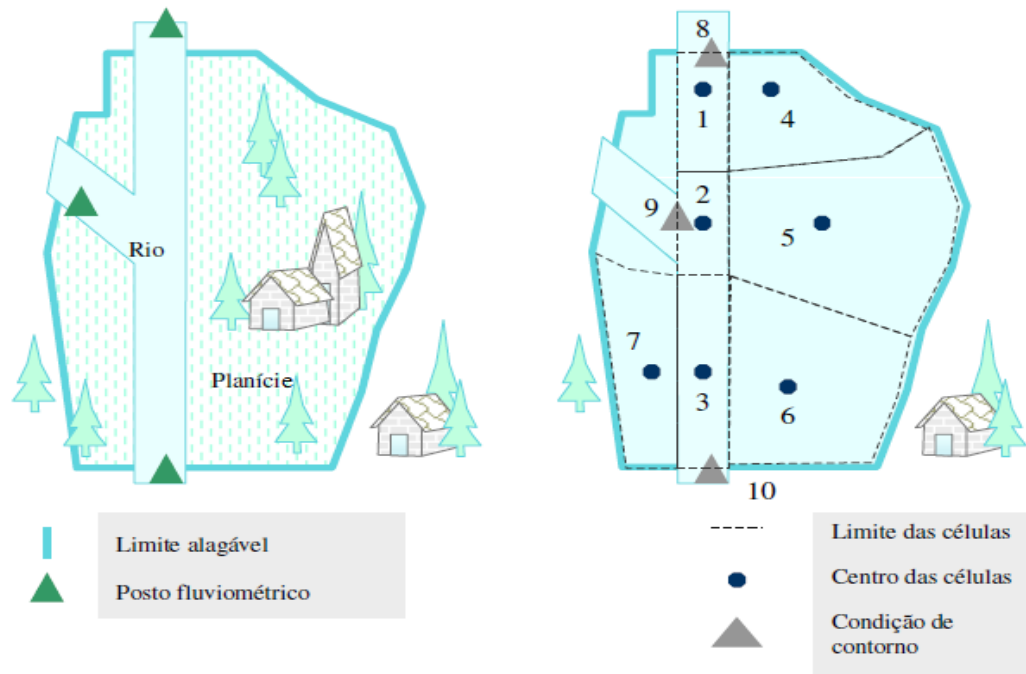


Figura III.1 – Divisão de uma área hipotética em células.

Fonte: MIGUEZ (2001).

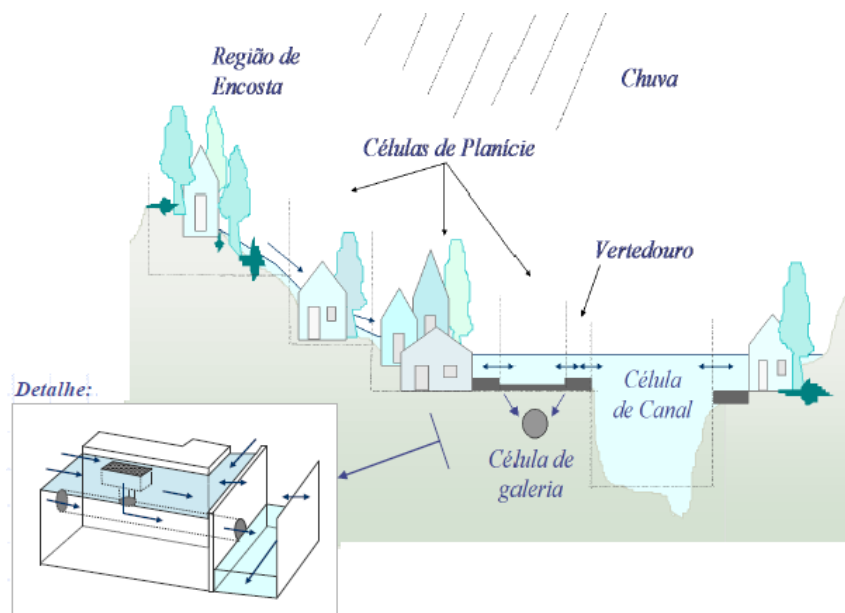


Figura III.2 – Representação esquemática de células e ligações, em corte.

Fonte: MIGUEZ (2001).

## Modelagem hidrológica no MODCEL

A separação do escoamento superficial foi originalmente representada no MODCEL através do coeficiente de *runoff*, definido conforme características de cada célula. Assim, num dado passo de tempo, a lâmina de chuva efetiva, numa célula qualquer, pode ser obtida através do produto do seu coeficiente de *runoff* pela precipitação referente ao mesmo período (VERÓL, 2013). A Figura III.3 esquematiza o processo.

Ainda de acordo com Veról (2013), para uma representação mais detalhada dos fenômenos hidrológicos envolvidos na geração de cheias em áreas urbanas, o MODCEL também apresenta a alternativa de um modelo hidrológico simples, representando a infiltração, a interceptação vegetal e a retenção em depressões, sendo estes dois últimos considerados de modo combinado em uma parcela de abstração. A abstração se manifesta enquanto se enche um reservatório que modela a sua capacidade, enquanto a infiltração pode ocorrer paralelamente enquanto houver uma lâmina d'água sobre as superfícies da célula modelada. Em um passo de tempo qualquer, os cálculos referentes às rotinas hidrológicas são realizados em primeiro lugar, e, em seguida, a propagação dos escoamentos é feita através das rotinas hidrodinâmicas.

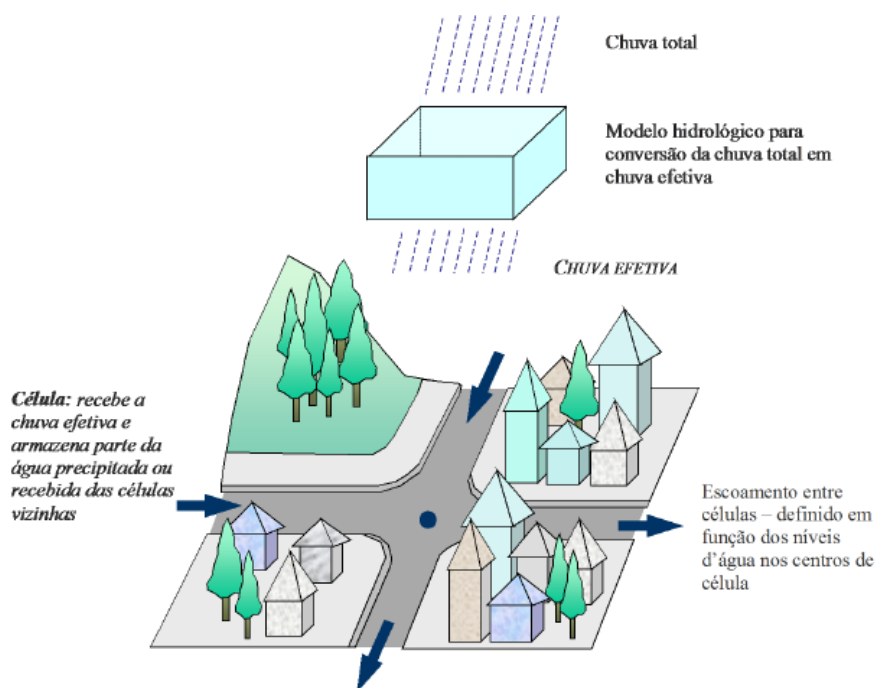


Figura III.3 – Representação esquemática de células e ligações, em corte.

Fonte: MIGUEZ (2001).

## Modelagem hidrodinâmica no MODCEL

A variação do volume em uma célula  $i$ , em um intervalo de tempo  $t$ , é dada pelo balanço de entrada e saída d'água nesta célula, através da precipitação que ocorre sobre sua superfície e das vazões de troca com todas as células  $k$ . O modelo matemático aqui tem a mesma base do modelo desenvolvido para áreas rurais, ou seja, utiliza-se da equação da continuidade, que representa o princípio básico de conservação de massa (MIGUEZ, 2001). A Equação III.1 mostra este o procedimento de cálculo.

$$A_{s_i} \frac{dZ_i}{dt} = P_i + \sum_k Q_{i,k} \quad (\text{Equação III.1})$$

Onde:

$A_{s_i}$  é a área superficial do espelho d'água na célula  $i$ ;

$Z_i$  é a cota do nível d'água no centro da célula  $i$ ;

$t$  é a variável independente relativa ao tempo;

$P_i$  é a vazão relativa à parcela de chuva ocorrida sobre a célula  $i$  e disponível para escoamento;

$Q_{i,k}$  é a vazão entre as células  $i$  e  $k$ , vizinhas entre si.

Conforme já mencionado nas hipóteses do modelo, a vazão entre duas células pode ser sempre escrita como uma função apenas do nível d'água dentro dessas células, ou seja,  $Q_{i,k} = Q(Z_i, Z_k)$ , sendo assim, tal função entre as células são expressas a partir das ligações que são estabelecidas entre elas, e que retratam o comportamento hidráulico do escoamento de uma para outra. Os tipos de ligação existentes já foram apresentados na Tabela III.2.