

**UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ
DEPARTAMENTO ACADÊMICO DE CONSTRUÇÃO CIVIL
CURSO DE ENGENHARIA CIVIL**

**AMANDA FOLMANN DOS SANTOS
KAROLINE MANENTE FERREIRA**

**AVALIAÇÃO DE TÉCNICAS DE DRENAGEM URBANA SUSTENTÁVEL PARA
REDUÇÃO DO PICO DE ESCOAMENTO SUPERFICIAL EM UM LOTEAMENTO
NO MUNICÍPIO DE PATO BRANCO – PR**

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

PATO BRANCO

2017

AMANDA FOLMANN DOS SANTOS
KAROLINE MANENTE FERREIRA

**AVALIAÇÃO DE TÉCNICAS DE DRENAGEM URBANA SUSTENTÁVEL PARA
REDUÇÃO DO PICO DE ESCOAMENTO SUPERFICIAL EM UM LOTEAMENTO
NO MUNICÍPIO DE PATO BRANCO – PR**

Trabalho de Conclusão de Curso
apresentado como requisito parcial para a
obtenção do título de Bacharel em
Engenharia Civil pela Universidade
Tecnológica Federal do Paraná – UTFPR,
Campus Pato Branco.

Orientador: Prof. Dr. Cesar Augusto
Medeiros Destro

PATO BRANCO

2017



TERMO DE APROVAÇÃO

AVALIAÇÃO DE TÉCNICAS DE DRENAGEM URBANA SUSTENTÁVEL PARA REDUÇÃO DO PICO DE ESCOAMENTO SUPERFICIAL EM UM LOTEAMENTO NO MUNICÍPIO DE PATO BRANCO – PR

Amanda Folmann dos Santos

Karoline Manente Ferreira

No dia 20 de novembro de 2017, às 13h00min, na SALA DE TREINAMENTO da Universidade Tecnológica Federal do Paraná, este trabalho de conclusão de curso foi julgado e, após arguição pelos membros da Comissão Examinadora abaixo identificados, foi aprovado como requisito parcial para a obtenção do grau de Bacharel em Engenharia Civil da Universidade Tecnológica do Paraná – UTFPR, conforme Ata de Defesa Pública nº 25-TCC/2017.

Orientador: Prof. Dr. CESAR AUGUSTO MEDEIROS DESTRO (DACOC/UTFPR-PB)

Membro 1 da Banca: Prof. Dr. MURILO CESAR LUCAS (DACOC/UTFPR-PB)

Membro 2 da Banca: Prof. Dr. DANIEL COSTA DOS SANTOS (PPGERHA/UFPR)

RESUMO

SANTOS, Amanda F.; FERREIRA, Karoline M. Avaliação de técnicas de drenagem urbana sustentável para redução do pico de escoamento superficial em um loteamento no município de Pato Branco – PR. 2017. 106 f. Trabalho de Conclusão de Curso – Curso de Engenharia Civil, Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Pato Branco, 2017.

O processo de urbanização tem como consequência o incremento de áreas impermeáveis nas cidades. Isto causa alterações no ciclo hidrológico das regiões urbanizadas, como a redução da taxa de infiltração, a diminuição da recarga freática e o aumento do volume escoado superficialmente. Para solucionar problemas decorrentes do acúmulo de água gerado na superfície, foram implantados nas cidades os sistemas de drenagem urbana convencional, que coletam as águas e transportam-nas até outro ponto. Sendo assim, este método não é capaz de mitigar os efeitos da urbanização no ciclo hidrológico, sendo conveniente o uso de Sistemas de drenagem sustentável (SuDS), que têm isto como um de seus objetivos. Este estudo teve como objetivo geral a avaliação da influência dos SuDS na diminuição do pico do escoamento superficial em um loteamento. Para tanto, foram estabelecidos os seguintes objetivos específicos: o primeiro foi simular no software EPA SWMM o projeto de drenagem convencional a ser implantado e comparar o escoamento superficial com o natural. O segundo foi pré-dimensionar os dispositivos de SuDS escolhidos, bacias de retenção, pavimentos permeáveis e células de biorretenção, para posterior inserção no software. O terceiro objetivo específico foi simular as situações com os dispositivos, primeiramente de cada um juntamente com o sistema convencional, e depois, em combinações. Estas foram: bacia de retenção com pavimento permeável, bacia de retenção com dispositivos de biorretenção e pavimento permeável com dispositivos de biorretenção, todas juntamente com o convencional. O quarto e último objetivo específico foi hierarquizar os grupos de medidas quanto à eficiência no controle do escoamento superficial, por meio de tabelas e gráficos obtidos através das simulações. Obtiveram-se resultados satisfatórios, uma vez que nos três cenários simulados o pico de escoamento reduziu consideravelmente, principalmente na combinação de bacia de retenção com pavimento permeável que atingiu um pico 81,5% menor que o sistema convencional. Ainda, o volume escoado superficialmente diminuiu em 71,9% no caso da combinação de pavimentos permeáveis com células de biorretenção, aproximando-se da situação de pré-urbanização. Os tempos de pico foram atrasados, destacando-se a combinação de bacia de retenção com dispositivos de biorretenção que ocorreu 16 minutos mais tarde. Com isto, comprovou-se a eficiência dos sistemas alternativos de drenagem urbana e do emprego do Software como ferramenta no dimensionamento destas técnicas.

Palavras-chave: Sistemas de Drenagem Sustentável (SuDS). Técnicas compensatórias (TC). Desenvolvimento de baixo impacto (LID). Escoamento superficial. Drenagem urbana.

ABSTRACT

SANTOS, Amanda F.; FERREIRA, Karoline M. Evaluation of sustainable urban drainage techniques to reduce runoff peak flow in an urban basin in Pato Branco/PR city. 2017. 106 f. Trabalho de Conclusão de Curso – Curso de Engenharia Civil, Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Pato Branco, 2017.

The urbanization process has as a consequence the increase of impermeable areas in the cities. This causes changes in the hydrological cycle of the urbanized regions, such as the reduction of infiltration processes, the reduction of the water table supply and the increase of the surface runoff volume. To solve problems arising from the accumulation of water generated on the surface, conventional urban drainage systems were implanted in the cities, which only collect the water and transport it to another point. Thus, this method is not able to mitigate the effects of urbanization in the hydrological cycle, being convenient the use of sustainable drainage systems (SuDS), which have this as one of their goals. The objective of this study was to evaluate the influence of SuDS on the decrease of the surface runoff peak in an urban subdivision. In order to do this, the following specific objectives were established: the first one was to simulate in the EPA SWMM software the conventional drainage project to be implanted, and to compare the runoff with the natural one. The second was to pre-dimension the chosen SuDS devices, detention basins, permeable pavements and bioretention cells, for further insertion into the software. The third specific objective was to simulate the situations with the devices, firstly of each together with the conventional system, and then in combinations. These were: detention basins with permeable pavement, detention basins with bioretention cells, and permeable pavement with bioretention cells, all together with the conventional system. The fourth and last specific objective was to rank the groups of measures for the efficiency of surface runoff control, through tables and graphs obtained through the simulations. Satisfactory results were obtained, since in the three simulated scenarios the peak flow decreased considerably, especially with the combination of detention basin and permeable pavement, that reached a peak 81,5% lower than the conventional system. Furthermore, the volume of surface runoff decreased 71,9% at the combination of permeable pavement and bioretention cells, approaching the pre-urbanization situation. Peak times were delayed, especially the combination of detention basin and bioretention cells that happened 16 minutes later. With this, the efficiency of the alternative systems of urban drainage was verified, as well as the use of the Software as a design tools for these techniques.

Keywords: Sustainable Drainage Systems (SuDS). Compensatory techniques (CTs). Low Impact Development (LID). Runoff. Urban drainage.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Tempo de concentração.....	14
Figura 2 - Hidrograma tipo de uma bacia hidrográfica	16
Figura 3 - Alterações hidrológicas causadas pela urbanização.....	22
Figura 4 - Aumento da população e eventos de enchente em Belo Horizonte - MG.	22
Figura 5 - Sistema de Drenagem Combinado	24
Figura 6 - Sistema de drenagem com separador absoluto.....	25
Figura 7 - Relações entre autores e continentes.....	26
Figura 8 - Exemplo de hidrograma de escoamento.....	29
Figura 9 - Pavimento de concreto permeável.....	33
Figura 10 - Sistema de grama reforçada com grade de concreto	33
Figura 11 - Dispositivo de biorretenção.....	36
Figura 12 - Esquematização de uma trincheira de infiltração.....	38
Figura 13 - Localização da área de estudo	39
Figura 14 – Localização do Loteamento na ZR-4.....	40
Figura 15 - Curvas de nível da área de estudo	41
Figura 16 - Janela de dados das bocas-de-Lobo	42
Figura 17 - Janela de dados dos dissipadores de energia	43
Figura 18 - Janela de dados das caixas de passagem	44
Figura 19 - Janela de dados das áreas de contribuição.....	45
Figura 20 - Janela de dados dos condutos	46
Figura 21 - Projeto de drenagem modelado no EPA SWMM	47
Figura 22 - Ampliação de trecho do projeto	48
Figura 23 – Estrutura de Pavimento permeável	50
Figura 24 - Disposição da bacia de retenção 1	53
Figura 25 - Disposição da bacia de retenção 2	54
Figura 26 – Perfil transversal de armazenamento das bacias de retenção	54
Figura 27 - Dispositivo de biorretenção padrão dimensionado	57
Figura 28 - Diagrama da metodologia e especificação das combinações.....	58
Figura 29 - Hietograma do projeto.....	60
Figura 30 - Vazão no DI1 com sistema convencional e natural	61
Figura 31 - Vazão no DI2 com sistema convencional e natural	62
Figura 32 - Vazão no nó DI1 com as bacias de retenção.....	63

Figura 33 - Vazão no nó DI2 com as bacias de detenção	64
Figura 34 - Vazão no nó DI1 com pavimento permeável	65
Figura 35 - Vazão no nó DI2 com pavimento permeável	66
Figura 36 - Vazão no nó DI1 com biorretenção	67
Figura 37 - Vazão no nó DI2 com biorretenção	68
Figura 38 - Combinação pavimentos permeáveis e bacias de detenção no DI1	69
Figura 39 - Combinação pavimentos permeáveis e bacias de detenção no DI2	70
Figura 40 - Combinação de bacias de detenção e dispositivos de biorretenção no DI1	71
Figura 41 - Combinação de bacias de detenção e dispositivos de biorretenção no DI2	71
Figura 42 - Combinação de pavimentos permeáveis e dispositivos de biorretenção no DI1	72
Figura 43 - Combinação de pavimentos permeáveis e dispositivos de biorretenção no DI2	72

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Períodos de retorno para diferentes ocupações da área	17
Tabela 2 - Coeficientes de escoamento (C)	19
Tabela 3 - Classificação hidrológica do solo a partir de suas características.....	20
Tabela 4 - Número da Curva para escoamento superficial	20
Tabela 5 - Coeficientes de condutividade hidráulica	56
Tabela 6 - Cálculo do hietograma pelo Método dos blocos alternados	60
Tabela 7 - Hierarquização das medidas.....	73
Tabela 8 - Diâmetros dos orifícios das bacias de detenção	87
Tabela 9 - Vazões em função do tempo dos sistemas no dissipador 1.....	90
Tabela 10 - Vazões em função do tempo dos sistemas no dissipador 2.....	93
Tabela 11 - Comprimento dos condutos	96
Tabela 12 - Bocas de lobo	98
Tabela 13 - Áreas de contribuição.....	99
Tabela 14 - Comparação entre simulações em DI1	101
Tabela 15 - Comparação entre simulações em DI2	101
Tabela 16 - Volumes escoados nos sistemas	101
Tabela 17 - Planilha de dimensionamento do sistema convencional	103

LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

BD – Bacia de detenção

BL – Boca de lobo

BMP – *Best Management Practices*

DI – Dissipador de energia

LID – *Low Impact Development*

LIDS - *Low Impact Development Systems*

NRCS – *Natural Resources Conservation Services*

PR – Unidade da Federação – Paraná

SUDERHSA – Superintendência de Desenvolvimento dos Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental

SuDS – *Sustainable Drainage Systems*

SCS-CN – *Soil Conservation Service Curve-Number*

SWMM – *Storm Water Management Model*

TC – Técnicas compensatórias

USDA – *United States Department of Agriculture*

U.S. EPA – *United States Environmental Protection Agency*

WSUD – *Water Sensitive Urban Design*

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	9
1.1 Objetivos	10
1.1.1 Objetivo Geral	10
1.1.2 Objetivos Específicos	10
1.2 Justificativa	11
2 REFERENCIAL TEÓRICO	12
2.1 Aspectos gerais de hidrologia	12
2.1.1 Escoamento Superficial	12
2.1.2 Bacia Hidrográfica	12
2.1.2.1 Área da bacia	13
2.1.2.2 Tipo e uso do solo	13
2.1.2.3 Tempo de concentração	13
2.1.3 Infiltração	14
2.1.4 Precipitação	15
2.1.5 Hidrograma	15
2.1.6 Período de Retorno	16
2.1.7 Equação de Chuvas Intensas	17
2.1.8 Vazão de Enchente	18
2.1.9 Método da Curva Número	19
2.2 Consequência da urbanização no ciclo hidrológico	21
2.3 Sistema convencional de drenagem urbana	23
2.3.1 Sistema combinado	23
2.3.2 Sistema Separador Absoluto	24
2.4 Abordagens sustentáveis da drenagem urbana	25
2.4.1 Best Management Practices (BMPs)	26
2.4.2 Técnicas Compensatórias (TCs)	27
2.4.3 Sistemas de Drenagem Sustentável (SuDS)	27
2.4.3.1 Quantidade da água	28
2.4.3.2 Qualidade da água	29
2.4.3.3 Amenidade	30
2.4.3.4 Biodiversidade	30
2.4.4 Sistemas de Desenvolvimento de Baixo impacto (LIDs)	30
2.4.5 Water Sensitive Urban Design (WSUD)	31
2.5 Medidas estruturais de drenagem urbana sustentável	32
2.5.1 Pavimentos Permeáveis	32
2.5.2 Bacias de Detenção e Retenção	34
2.5.2.1 Bacias de detenção	34
2.5.2.2 Bacias de retenção	35
2.5.3 Dispositivos de Biorretenção	36
2.5.4 Trincheiras de Infiltração	37
3 METODOLOGIA	39
3.1 ÁREA DE ESTUDO	39
3.2 MODELAGEM NO SOFTWARE DO SISTEMA DE DRENAGEM A SER IMPLANTADO	41
3.3 PRÉ-DIMENSIONAMENTO DOS SISTEMAS SUSTENTÁVEIS	48
3.3.1 Método da Curva Envelope	49
3.3.2 Bacias de Detenção	49
3.3.3 Pavimentos Permeáveis	50

3.3.4 Dispositivos de Biorretenção	51
3.4 HIETOGRAMA DE PROJETO PELO MÉTODO DOS BLOCOS ALTERNADOS	52
3.5 SIMULAÇÃO DOS DISPOSITIVOS NO SOFTWARE	53
3.5.1 Bacias de Detenção	53
3.5.2 Pavimentos Permeáveis	55
3.5.3 Dispositivos de Biorretenção	55
3.5.4 Combinações de Dispositivos	58
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO	59
4.1 RESULTADOS DOS PRÉ-DIMENSIONAMENTOS DOS DISPOSITIVOS	59
4.1.1 Bacias de Detenção	59
4.1.2 Pavimentos Permeáveis	59
4.1.3 Biorretenção	59
4.2 HIETOGRAMA DE PROJETO	60
4.3 RESULTADOS DA SIMULAÇÃO DO SISTEMA DE DRENAGEM CONVENCIONAL	61
4.4 RESULTADOS DAS SIMULAÇÕES DOS DISPOSITIVOS	63
4.4.1 Bacias de retenção	63
4.4.2 Pavimento Permeável	65
4.4.3 Biorretenção	67
4.5 RESULTADOS DAS SIMULAÇÕES DOS GRUPOS DE DISPOSITIVOS	69
4.5.1 Pavimentos Permeáveis com Bacias de Detenção	69
4.5.2 Bacias de Detenção com Dispositivos de Biorretenção	70
4.5.3 Pavimentos Permeáveis com Dispositivos de Biorretenção	72
4.6 HIERARQUIZAÇÃO DAS MEDIDAS	73
5 CONSIDERAÇÕES FINAIS	75
5.1 TRABALHOS FUTUROS	76
REFERÊNCIAS	78
APÊNDICE A – OBTENÇÃO DA EQUAÇÃO DE V_{max}	83
APÊNDICE B – PRÉ-DIMENSIONAMENTO DAS BACIAS DE DETENÇÃO	85
APÊNDICE C – PRÉ-DIMENSIONAMENTO DOS PAVIMENTOS PERMEÁVEIS ..	88
APÊNDICE D – VAZÕES EM FUNÇÃO DO TEMPO DOS SISTEMAS	90
APÊNDICE E – DADOS DO PROJETO	96
APÊNDICE F – RESULTADOS DAS SIMULAÇÕES	101
ANEXO A – PLANILHA DE DIMENSIONAMENTO DO SISTEMA CONVENCIONAL	103

1 INTRODUÇÃO

O ciclo hidrológico é a movimentação da água pela atmosfera, superfície e subsolo, por meio dos processos de evapotranspiração, infiltração, precipitação e escoamento superficial. A infiltração possibilita que as águas precipitadas alcancem as camadas mais profundas do solo e, assim, recarreguem os aquíferos (TUCCI, 2009).

Com o desenvolvimento das cidades e a construção de edificações e pavimentação de vias, houve, progressivamente, uma diminuição da permeabilidade do solo nas áreas urbanizadas. Isso teve como consequência o acúmulo de água na superfície, bem como a diminuição do escoamento de água subterrânea para os aquíferos (SHUSTER et al., 2005).

Devido a este excesso de escoamento superficial das águas pluviais, houve a necessidade da implantação da drenagem pluvial urbana, que consiste em um sistema de condutos que coletam e transportam a água precipitada, evitando os efeitos indesejados do seu excesso.

O objetivo do sistema de drenagem pluvial urbana convencional, que é o mais comum no Brasil, é afastar a água do seu local inicial e transportá-la para os rios, o que causa um aumento da vazão dos mesmos e, portanto, transfere o problema para regiões à jusante (POLETO, 2011). Ademais, em grande parte das cidades, há áreas em que este se encontra saturado, o que pode ter como consequência o extravasamento da capacidade de drenagem do coletor, causando alagamentos e perdas humanas. Tais acontecimentos exigem medidas corretivas pontuais que demandam grande investimento de verbas públicas, frequentemente (PORTO, 2003).

Com o intuito de utilizar de forma sustentável a água da chuva e amenizar a sobrecarga no sistema de drenagem convencional, apresenta-se, como uma solução, os SuDS (*Sustainable Drainage Systems*) ou Sistemas de Drenagem Sustentáveis. As alternativas propostas por este sistema reduzem o escoamento superficial por meio de diferentes abordagens, procurando aproximar o ciclo hidrológico da situação de pré-urbanização e diminuir o risco de enchentes. Na implantação de um projeto com SuDS, é possível a utilização de uma de suas técnicas ou uma combinação de várias.

Além dos SuDS, abordagens similares são feitas por outros sistemas em

diferentes países, como o LID (*Low Impact Development*), WSUD (*Water Sensitive Urban Design*), entre outros, que visam a diminuição do impacto do sistema de drenagem no ciclo hidrológico e a sustentabilidade. Tais práticas recorrem a técnicas estruturais e paisagísticas, tanto acima quanto abaixo do solo.

Os benefícios obtidos com a aplicação desses métodos oferecem uma compensação pelos efeitos da urbanização, sendo eles não só ambientais, como também econômicos. É possível, então, uma solução de drenagem duradoura, complementando o sistema convencional, que, sozinho, se torna insuficiente à medida que se intensifica o desenvolvimento das cidades.

Tendo em vista os benefícios possíveis com a adoção desta prática, objetivou-se a simulação de cenários considerando a aplicação de cenários com SuDS em um loteamento urbano do município de Pato Branco-PR, como uma alternativa para mitigação dos efeitos da urbanização na região.

1.1 OBJETIVOS

1.1.1 Objetivo Geral

O objetivo geral deste trabalho é avaliar simulações de grupos de medidas de drenagem urbana sustentável para redução do pico de escoamento superficial decorrente da urbanização em um loteamento no município de Pato Branco – PR.

1.1.2 Objetivos Específicos

São propostos como objetivos específicos trabalho:

- Simular o projeto de drenagem convencional a ser implantado no local e comparar o escoamento superficial com o de pré-urbanização;
- Pré-dimensionar medidas de drenagem urbana sustentável para controle do acréscimo de escoamento superficial;
- Simular o comportamento da área com os dispositivos de drenagem urbana sustentável e suas determinadas combinações;
- Hierarquizar os grupos de medidas quanto à efetividade no controle do escoamento superficial.

1.2 JUSTIFICATIVA

A urbanização e, conseqüentemente, o aumento da impermeabilização do solo, com o passar dos anos, gera mudanças notáveis no escoamento superficial da água da chuva das bacias hidrográficas (SHUSTER et al., 2005). Estas alterações impactam diretamente na frequência de alagamentos das vias e inundações nas margens dos rios, devido ao aumento de volume e velocidade do escoamento superficial.

Tendo em vista tais complicações a respeito da drenagem pluvial urbana, constata-se a necessidade de soluções para o bom funcionamento do sistema. Essas soluções podem ser obtidas através dos SuDS, que propõem a reaproximação ao ciclo hidrológico natural, através da preocupação com o destino das águas coletadas, ao contrário da cultura convencional, que proporciona apenas a expulsão imediata das mesmas.

A melhoria é obtida por meio de procedimentos como: o aumento da capacidade de infiltração do solo, retenção, detenção e uso sustentável da água, tendo como consequência a diminuição e controle da vazão dos cursos d'água (SOUZA, 2005).

Foram propostas medidas de drenagem sustentável (SuDS) para um loteamento não urbanizado, localizado no Município de Pato Branco-PR. A escolha do local se deu por já existirem o projeto de drenagem do loteamento, bem como os dados altimétricos do mesmo. As medidas foram propostas combinando diferentes alternativas para estas simulações.

Este trabalho foi viabilizado por meio da obtenção de dados de uso e ocupação do solo e topografia da região em estudo, do projeto de drenagem a ser implantado, cedido pelo escritório responsável pelo mesmo, e pelo acesso gratuito ao software utilizado nas simulações, EPA SWMM, que tornou mais eficientes os processos desenvolvidos.

A relevância deste estudo se dá à medida que aprofunda a pesquisa na área de drenagem urbana sustentável, que é pouco utilizada no Brasil, tanto pelo desconhecimento das técnicas alternativas, como pela falta de iniciativa em se adotarem novos procedimentos, atendo-se ao convencional.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 ASPECTOS GERAIS DE HIDROLOGIA

2.1.1 Escoamento Superficial

Entende-se por escoamento superficial a componente do ciclo hidrológico que trata do deslocamento de águas na superfície terrestre (GARCEZ; ALVAREZ, 1988). O mesmo é formado por parte da água precipitada sobre a área da bacia, ou seja, a parcela efetiva de precipitação, uma vez que parte dela é perdida por processos naturais. Esses processos são decorrentes da infiltração no solo até que o mesmo atinja sua capacidade máxima de drenagem (saturação), evaporação e perda por alagamento na superfície (GRIBBIN, 2016).

Na fase inicial da precipitação, o escoamento superficial forma uma película laminar que recobre as pequenas depressões do terreno. Com a continuação do processo, a lâmina superficial vai-se tornando mais espessa, passando a escoar um volume que representa a diferença entre a precipitação total e os volumes retidos, infiltrados, evaporados e acumulados nas depressões. Essas águas, que não têm ainda um caminho preferencial de escoamento, mas tão-somente um sentido de escoamento dado pela linha de maior declive do terreno, são conhecidas como águas livres (GARCEZ; ALVAREZ, 1988, p. 212).

Estas águas livres, portanto, impulsionadas pela gravidade, confluem para os pontos de menores cotas do terreno. Ao erodir o solo, a água que escoar molda uma microrrede de drenagem que, por sua vez, quando em grande número, constitui as torrentes (GARCEZ; ALVAREZ, 1988; SILVEIRA, 2009).

2.1.2 Bacia Hidrográfica

Segundo Silveira (2009), a bacia hidrográfica é a área geográfica em que toda água precipitada converge para o mesmo ponto, o exutório, podendo, ainda, ser dividida em sub-bacias.

Uma bacia hidrográfica é determinada em relação a um curso d'água e é delimitada em função dos divisores de água, que a separam das contíguas. Estes são os pontos do relevo de altitude mais elevada, nos quais o escoamento da água

precipitada é dividido (GARCEZ; ALVAREZ, 1988).

Diversos fatores influenciam na forma como ocorre o escoamento superficial nas bacias hidrográficas. A seguir, são definidos os mais relevantes para esse trabalho.

2.1.2.1 Área da bacia

A área da bacia é a superfície em projeção horizontal delimitada pela linha divisória traçada nos pontos de maior altitude. Isso é feito a partir de uma planta topográfica, ou ainda, por mapas através do SIG (Sistemas de Informação Geográfica) (SILVEIRA, 2009).

Este parâmetro é de fundamental importância para a caracterização de uma bacia, visto que é necessário para o cálculo do volume precipitado na mesma. Este, por sua vez, é obtido através da multiplicação da área da bacia pela lâmina de água precipitada (SILVEIRA, 2009).

2.1.2.2 Tipo e uso do solo

O tipo e uso do solo influenciam diretamente na taxa de infiltração do mesmo. Solos com grande quantidade de vegetação normalmente produzem pouco escoamento superficial, por possuírem maior capacidade de infiltração. Além disso, a umidade do solo é outro fator determinante na capacidade de infiltração do mesmo, ou seja, um solo bastante úmido é menos permeável que um solo seco (TUCCI; CLARKE, 1997).

2.1.2.3 Tempo de concentração

Esta grandeza pode ser definida como o tempo necessário para a água precipitada percorrer a distância do ponto hidráulicamente mais distante até o exutório da bacia, sendo este ponto aquele mais distante em tempo de percurso e não em distância propriamente dita, conforme ilustrado na Figura 1 (WOODWARD; HOEFT, 2010).

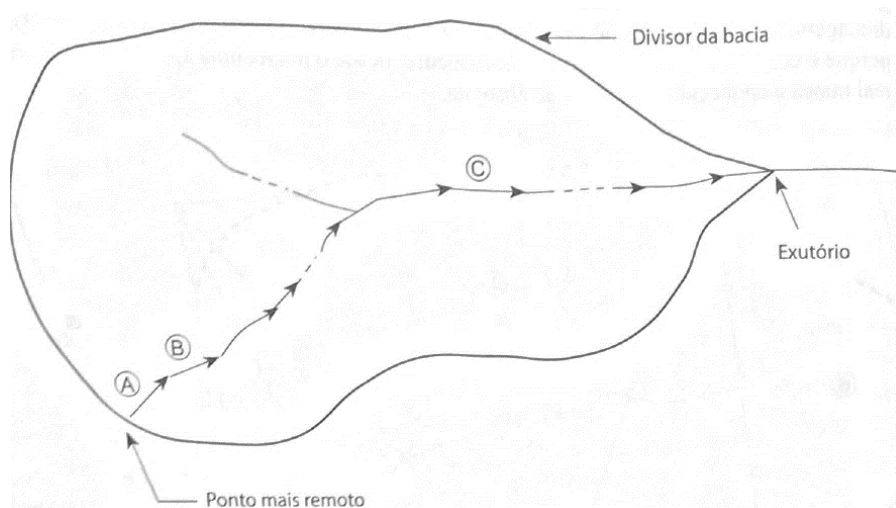


Figura 1 – Tempo de concentração
Fonte: Gribbin, 2016.

O tempo de concentração está relacionado com as características físicas da bacia, ou seja, o mesmo varia para cada bacia de acordo com a sua forma, tamanho, declividade e cobertura do solo. Dessa forma, pode-se estimar a vazão de pico de uma bacia hidrográfica a partir do seu tempo de concentração, tendo em vista que quanto maior for esse tempo, menor será o valor de pico no fluxo do escoamento (GRIBBIN, 2016).

A urbanização impacta diretamente no tempo de concentração de uma bacia através do aumento da impermeabilização do solo e da redução da interceptação vegetal, diminuindo o tempo de escoamento da água precipitada até o exutório (MATA-LIMA et al., 2007).

2.1.3 Infiltração

A penetração da água nas camadas mais superficiais do solo é denominada infiltração. Sendo o solo um meio poroso, o caminho percorrido pela água é determinado pelos vazios presentes no mesmo através da ação da gravidade. A intensidade da vegetação determina a capacidade de infiltração do solo, uma vez que interfere no escoamento superficial da água precipitada (PINTO et al., 1995).

A infiltração, então, ocorre até que a camada superficial do solo não se encontre na condição saturada. A água precipitada que infiltra no solo é parcialmente aproveitada pelos vegetais e o restante percola para os lençóis freáticos, contribuindo para o escoamento de base dos rios (SILVEIRA, 2009).

2.1.4 Precipitação

Denomina-se precipitação toda a água proveniente da condensação do vapor d'água atmosférico que atinge a superfície da terra. Esta água pode se encontrar no estado líquido ou sólido (chuva, neve, granizo, geada, orvalho). A formação da precipitação se dá em condições de resfriamento do ar quente e úmido até o seu ponto de saturação, sendo necessário ainda que as gotas de água tenham volume e peso suficiente para vencerem as forças que as mantêm suspensas (BERTONI; TUCCI, 2009; GARCEZ; ALVAREZ, 1988).

A precipitação está ligada ao escoamento superficial, sendo, dessa forma, de grande importância a determinação de sua intensidade para controle de inundações e erosão do solo. Portanto, os principais parâmetros a serem quantificados sobre este fenômeno são o seu total (volume precipitado), a sua duração e a sua distribuição no tempo e espaço (BERTONI; TUCCI, 2009).

Tucci e Bertoni (2009) definem o primeiro parâmetro, também denominado de altura pluviométrica (P), como o valor dado pela altura da lâmina de água precipitada sobre uma área horizontal, desconsiderando-se a ocorrência de infiltração, escoamento ou evaporação. Este parâmetro é expresso em milímetros.

A duração de uma precipitação é entendida como o intervalo de tempo compreendido entre o início e o fim da mesma. A razão entre a altura da lâmina de água e o tempo é definida como a intensidade de precipitação, geralmente medida em mm/h ou mm/min. Por fim, outro parâmetro necessário na caracterização de uma chuva é a sua frequência, dada pelo número de vezes em que uma precipitação de mesmas características (duração e altura pluviométrica) ocorre num intervalo de tempo (GARCEZ; ALVAREZ, 1988).

2.1.5 Hidrograma

Para uma determinada precipitação e conseqüente vazão, o hidrograma é a representação gráfica do comportamento de uma bacia hidrográfica frente à precipitação (TUCCI, 2009a).

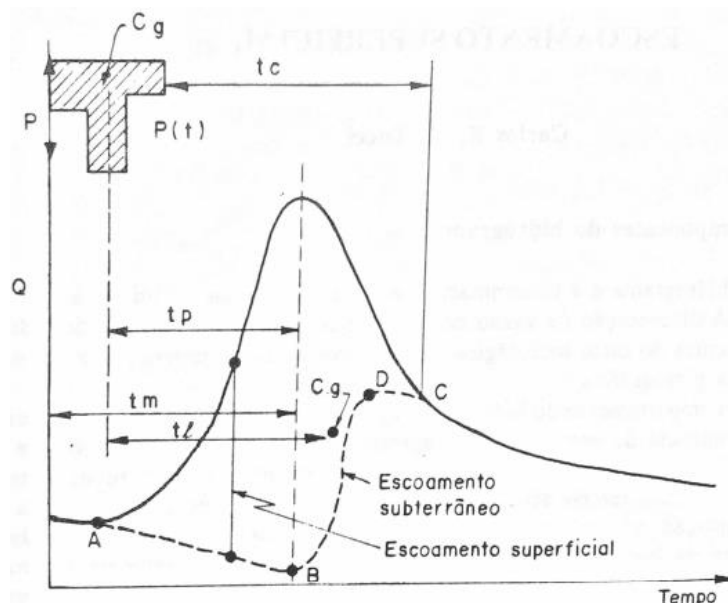


Figura 2 - Hidrograma tipo de uma bacia hidrográfica
Fonte: Tucci, 2009.

A região inicial do gráfico (Figura 2), até o ponto A, representa o retardo existente no escoamento superficial da água precipitada decorrente dos processos de infiltração e interceptação vegetal. O ponto C representa o início do escoamento subterrâneo e fim do escoamento superficial. O primeiro é consequência da infiltração da água precipitada da camada superior do solo para camadas mais profundas (percolação) (TUCCI, 2009a).

A forma de um hidrograma pode diferir para determinadas situações. Cita-se, por exemplo, que “uma bacia com boa drenagem e grande declividade apresenta um hidrograma íngreme e com pouco escoamento de base” (TUCCI, 2009, p.393).

2.1.6 Período de Retorno

Também denominado de tempo de recorrência (T ou T_r), esta grandeza, medida em anos, estabelece o intervalo de tempo em que pode ocorrer ou ser superado um dado evento, ou seja, tempo para que uma precipitação de mesma intensidade (i) e duração (t) se repita (GARCEZ; ALVAREZ, 1988).

Ao se adotar um período de retorno para determinada obra, manifesta-se o grau de preocupação que se tem com a possibilidade de falha da mesma, ou seja, possibilidade de igualar ou superar um evento que exige o maior desempenho possível da construção. Portanto, a escolha correta do tempo de retorno da uma obra

reflete o risco ao qual a população está sujeita. Por outro lado, aspectos econômicos entram em conflito com o risco que se propõe a aceitar, visto que maiores períodos de retorno implicam obras de maiores portes. Neste sentido, obras grandes interferem no meio urbano, em situações de realocação de populações, interferências no tráfego, desapropriações de imóveis, entre outras (PORTO et al., 2009).

São estabelecidos períodos de retorno aceitáveis a serem adotados como critério de projeto, conforme a Tabela 1.

Tabela 1 - Períodos de retorno para diferentes ocupações da área

Tipo de obra	Tipo de ocupação da área	T (anos)
Microdrenagem	Residencial	2
	Comercial	5
	Áreas com edifícios de serviços ao público	5
	Aeroportos	2-5
	Áreas comerciais e artérias de tráfego	5-10
Macro-drenagem	Áreas comerciais e residenciais	50-100
	Áreas de importância específica	500

Fonte: DAEE/CETESB, 1980, apud Tucci, 2009a.

2.1.7 Equação de Chuvas Intensas

Quando uma chuva ultrapassa um valor mínimo de intensidade precipitação num intervalo de tempo, pode-se classifica-la como chuva intensa. Para o dimensionamento de sistemas de drenagem pluvial, o intervalo de tempo de análise é de curta duração, sendo necessário, para essa classificação, que a precipitação tenha grande intensidade em pouco tempo. Diagramas como o hietograma, dado pela intensidade pluviométrica média em um intervalo de tempo, e a curva das alturas pluviométricas acumuladas, determinam as precipitações intensas de uma região (GARCEZ; ALVAREZ, 1988).

A adoção deste parâmetro como critério de execução de um projeto é fundamental, da mesma forma que o período de retorno da região, pois reflete na segurança esperada da obra. Garcez e Alvarez (1988, p. 87) remetem essa importância ao fato de se procurar “obter proteção contra uma precipitação que tenha certa probabilidade de ocorrer e não uma proteção total contra qualquer precipitação”.

Para estimar a intensidade máxima de precipitação em um local, utiliza-se a

equação de chuvas intensas definida para o mesmo, dispondo-se dos valores de duração e período de retorno a serem estudados (COLOMBELLI; MENDES, 2013).

Como as relações de intensidade-duração-frequência são obtidas através da análise de uma longa série de observações pluviográficas locais (GARCEZ; ALVAREZ, 1988), cada município apresenta uma relação IDF característica, que possibilita a análise de chuvas intensas da região. Para o município de Pato Branco - PR, Fendrich (1991) estabelece a equação

$$i_{max} = \frac{879,43 \cdot T_R^{0,152}}{(t + 9)^{0,732}} \quad (1)$$

Sendo:

i_{max} - precipitação máxima (mm/h)

T_R - período de retorno (anos)

t - duração da chuva (minutos)

2.1.8 Vazão de Enchente

O estudo da máxima vazão provável, da mesma forma que o período de retorno e equação de chuvas intensas, é de grande importância para o dimensionamento de estruturas hidráulicas (GARCEZ; ALVAREZ, 1988).

Para estimar a máxima vazão provável, é necessário fazer uma análise das precipitações máximas. Em bacias pequenas (com área máxima de 2 km²), o Método Racional pode ser empregado para esta estimativa através da equação (2):

$$Q_{max} = 0,278 C.I.A \quad (2)$$

Sendo:

Q_{max} – vazão máxima (m³/s);

C – coeficiente de perdas (ad);

I – intensidade da precipitação (mm/h);

A – área da bacia (km²).

Tucci (2009b) define algumas considerações que devem ser levadas em conta.

Sendo assim, para este método, adota-se uma duração de chuva intensa igual ao tempo de concentração e um coeficiente de perdas único para a bacia, de acordo com suas características.

O coeficiente escoamento superficial C, é dado por tabelas, de acordo com a classificação do meio ou do tipo de cobertura do solo (TUCCI, 2009b). Para as simulações desenvolvida neste trabalho, foi considerada a tabela de coeficientes do Manual de Drenagem Urbana da Região Metropolitana de Curitiba – PR (Tabela 2).

Tabela 2 - Coeficientes de escoamento (C)

Tipo de superfície	Valor recomendado	Faixa de variação
Concreto, asfalto e telhado	0,95	0,90 – 0,95
Paralelepípedo	0,70	0,58 – 0,81
Blockets	0,78	0,70 – 0,89
Concreto e asfalto poroso	0,03	0,02 – 0,05
Solo compactado	0,66	0,59 – 0,79
Matas, parques e campos de esporte	0,10	0,05 – 0,20
Gramma solo arenoso	0,10	0,08 – 0,18
Gramma solo argiloso	0,20	0,15 – 0,30

Fonte: SUDERHSA, 2002.

2.1.9 Método da Curva Número

Para a estimativa do volume de escoamento superficial, no software utilizado para as simulações neste trabalho, foi selecionado o Método da Curva Número, que faz uso de dados de precipitação e de características hidrológicas do solo que compõe a bacia.

Este método é conhecido também como método do SCS-CN (*Soil Conservation Service Curve-Number*) e foi desenvolvido pelo Serviço de Conservação de Recursos Naturais (*Natural Resources Conservation Service - NRCS*) do Departamento de Agricultura dos Estados Unidos (*United States Department of Agriculture – USDA*). O mesmo utiliza informações de solos mapeados por este departamento (DINGMAN, 2014).

Segundo McCuen (1998), nos Estados Unidos, os solos foram classificados em grupos hidrológicos a partir das suas capacidades de escoamento. Pode-se enquadrar, então, o solo em um dos 4 grupos (A, B, C ou D) de acordo com a Tabela

3, a partir dos quais é possível aproximar o valor do CN com o uso de tabelas.

Tabela 3 - Classificação hidrológica do solo a partir de suas características

Grupo	Características do solo
Grupo A	Areia profunda; Loess profundo; Siltes agregados
Grupo B	Loess raso; Lama arenosa
Grupo C	Argila; Lama arenosa rasa; Solos com baixo nível de material orgânico; Solos com alto nível de argila geralmente
Grupo D	Solos que incham significativamente quando molhados; Argilas altamente plásticas; Certos solos salinos

Fonte: McCuen, 1998.

O valor de CN, por sua vez, é determinado a partir do grupo hidrológico em que o solo foi classificado, da cobertura do mesmo e das suas condições de umidade que antecedem um evento de precipitação, conforme a Tabela 4 (MCCUEN, 1998).

Tabela 4 - Número da Curva para escoamento superficial

Descrição do Uso do Solo	Condição hidrológica	Número da curva para Grupos Hidrológicos do Solo			
		A	B	C	D
Residencial: tamanho aproximado do lote					
	1/4 de acre	61	75	83	87
	1/3 de acre	57	72	81	86
	1/2 de acre	54	70	80	85
	1 acre	51	68	79	84
	2 acres	46	65	77	82
Arbusto					
	Escasso	48	67	77	83
	Razoável	35	56	70	77
	Bom	30	48	65	73

Fonte: adaptado de McCuen, 1998.

Desta forma, considerando volumes de precipitação e de perdas iniciais, segundo o método do SCS-CN, pode-se utilizar a equação (3) para a determinação da precipitação efetiva:

$$P^* = \frac{(P - S_i)^2}{P - S_i + S_{max}}$$

(3)

P^* = Precipitação efetiva (mm)

P = Precipitação total (mm)

S_i = Abstração inicial, ou seja, as perdas iniciais por interceptação e retenção superficial (mm)

S_{max} = Potencial máximo de retenção da bacia hidrográfica (mm)

Sendo S_i empiricamente dado por $S_i = 0,2S_{max}$ para condições normais de umidade do solo da bacia antes do evento de precipitação. Daí:

$$P^* = \frac{(P - 0,2 S_{max})^2}{(P + 0,8 S_{max})} \quad (4)$$

Uma vez que o potencial máximo de retenção dado por:

$$S_{max} = \frac{25400}{CN} - 254 \quad (5)$$

Substituindo o resultado obtido de S_{max} na equação (5), é possível determinar, então, o valor de precipitação efetiva.

2.2 CONSEQUÊNCIA DA URBANIZAÇÃO NO CICLO HIDROLÓGICO

Com a progressão da urbanização e, com ela, a inserção e expansão de superfícies impermeabilizadas, o escoamento superficial aumenta, tanto em volume quanto em velocidade, levando à diminuição do tempo de concentração. Isto tem como consequência picos de vazão maiores e mais rápidos que na situação natural, e a deficiência do reabastecimento de lençóis freáticos (CHENG; COFFMAN; CLAR, 2001; SOUZA, 2005).

O aumento do volume de escoamento superficial após desenvolvimento, e consequente impermeabilização do solo, pôde ser observado no estudo de Dietz e Clausen, em 2007, em uma região com drenagem tradicional implantada (DIETZ; CLAUSEN, 2007).

Essas consequências causam alterações no hidrograma da área em questão (Figura 3). O hidrograma de uma área urbanizada possui maior vazão de pico e menor tempo de pico se comparado ao de uma área não urbanizada (SOUZA, 2005).

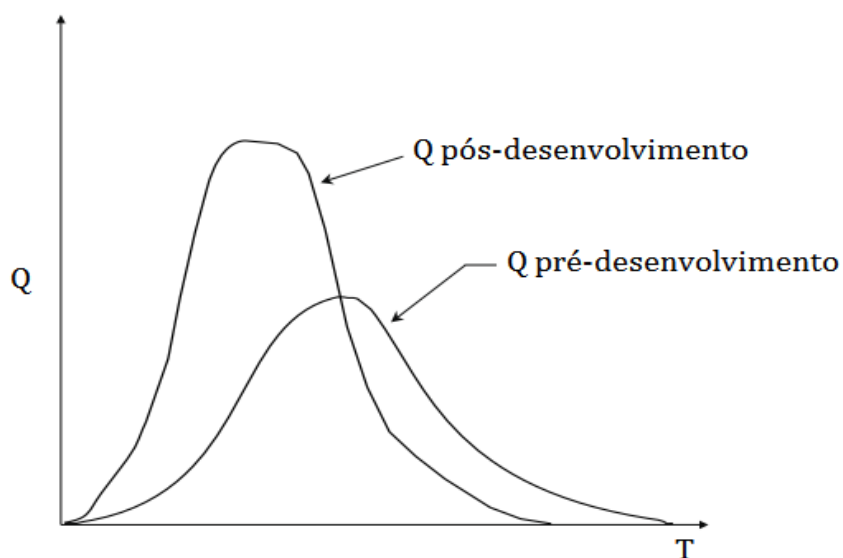


Figura 3 - Alterações hidrológicas causadas pela urbanização
Fonte: Adaptado de Cheng; Coffman; Clar, 2001.

Esses impactos causados pelas cidades não se limitam às áreas delas próprias, influenciando toda a região próxima do rio à jusante (NIEMCZYNOWICZ, 1999). Ainda, com o aumento da urbanização e as consequentes mudanças no regime de escoamento já citadas, ocorrem inundações mais frequentes (Figura 4) (TUCCI, 2010).

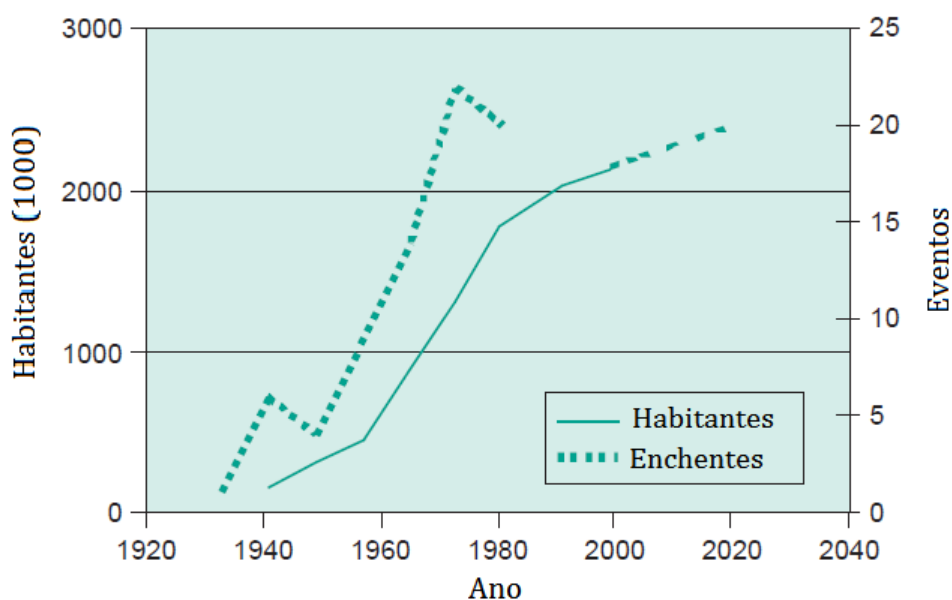


Figura 4 - Aumento da população e eventos de enchente em Belo Horizonte - MG
Fonte: Adaptado de Tucci, 2010.

2.3 SISTEMA CONVENCIONAL DE DRENAGEM URBANA

A drenagem das águas urbanas é parte integrante dos sistemas de saneamento básico, que preveem a preservação da salubridade nas cidades, sendo constituída como um dos direitos humanos essenciais para garantia da qualidade de vida pela Assembleia Geral da Organização das Nações Unidas (*U.N. General Assembly*), através da Resolução 64/292 de julho de 2010 (Organização das Nações Unidas [ONU], 2010).

O sistema convencional de drenagem urbana, também denominado de sanitário-higienista, tem como objetivo, segundo Poleto (2011), “expulsar as águas das cidades, indiferente de serem águas pluviais ou com detritos”.

Sendo assim, este tipo de sistema é prejudicial às regiões à jusante, visto que apenas transfere o problema de um local para outro, sem realmente solucioná-lo (POLETO, 2011; TUCCI, 2010). Desta forma, ocorrem alagamentos, com significativas perdas não apenas econômicas, como também humanas (TUCCI, 2010).

Tucci (2003) classifica os sistemas de drenagem em: combinado ou separado, os quais serão apresentados na sequência.

2.3.1 Sistema combinado

Também denominado de sistema de esgotamento unitário (Figura 5), é aquele em que as águas coletadas são residuais (de origem doméstica e industrial) e pluviais. Neste tipo de sistema, a mistura das águas residuais e pluviais, por serem transportadas pela mesma rede de canalizações, tem a desvantagem de prejudicar o tratamento das pluviais (TSUTIYA; ALEM SOBRINHO, 2000).

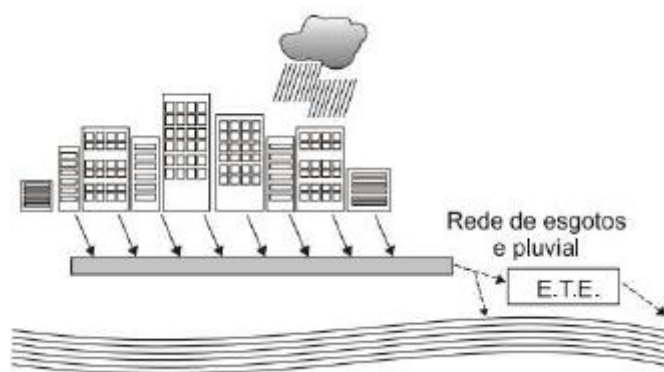


Figura 5 - Sistema de Drenagem Combinado
Fonte: Von Sperling, 2005.

Outra desvantagem deste sistema é a demanda de um maior investimento devido ao aumento das dimensões dos condutos, a fim de possibilitar o transporte de toda a água coletada (TSUTIYA; ALEM SOBRINHO, 2000).

2.3.2 Sistema Separador Absoluto

Neste tipo de sistema, a captação e o transporte de águas residuais e pluviais são feitos separadamente. Constitui-se, dessa forma, de um sistema de esgoto sanitário independente e um sistema de drenagem pluvial. O primeiro conduz as águas provenientes do uso doméstico e industrial, e o segundo transporta as águas pluviais coletadas (TSUTIYA; ALEM SOBRINHO, 2000).

É o principal método utilizado para o manejo das águas drenadas no Brasil por apresentar a vantagem de redução da extensão das canalizações de grandes diâmetros, já que não é necessária a construção de galerias em todas as ruas. Como consequência, exige menores gastos ao se empregar uma tubulação mais barata. Além disso, tem-se maior flexibilidade na execução por etapas das redes de tubulação, sendo possível priorizar a rede sanitária (TSUTIYA; ALEM SOBRINHO, 2000).

O sistema separador absoluto (Figura 6), no entanto, apresenta a complicação de carregar para os rios, através da tubulação de águas pluviais, sem tratamento, eventuais poluições provenientes do escoamento superficial. Outrossim, podem ocorrer ligações clandestinas de esgoto às tubulações de águas superficiais (TUCCI, 2010; WOODS-BALLARD et al., 2015).

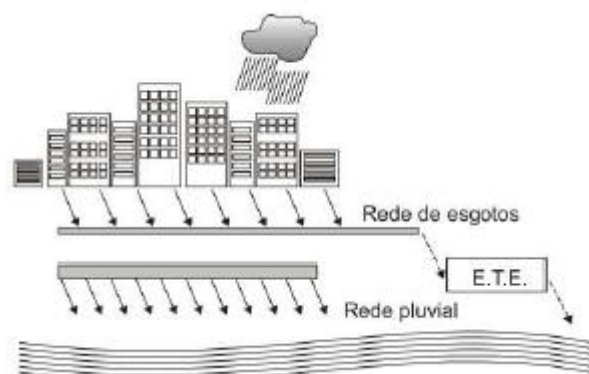


Figura 6 - Sistema de drenagem com separador absoluto

Fonte: Von Sperling, 2005.

O sistema separador absoluto é estabelecido para uso pela legislação brasileira, apesar de nem sempre executado corretamente. Há casos em que prefeituras, por motivos financeiros, aceitam a utilização da rede pluvial para o transporte de esgoto, o que não é uma solução eficiente, visto que o mesmo não é tratado (TUCCI, 2003a).

Este tipo de sistema é o utilizado no presente estudo, sendo que o mesmo diz respeito ao sistema de drenagem apenas de águas pluviais.

2.4 ABORDAGENS SUSTENTÁVEIS DA DRENAGEM URBANA

O desenvolvimento sustentável, para Brundtland (1987), é aquele que satisfaz as necessidades atuais sem comprometer a habilidade das gerações futuras de atingir as suas necessidades. Para a drenagem urbana ocorrer de maneira sustentável, deve-se ter como objetivos: manter a saúde pública, evitar a poluição do meio ambiente, minimizar a utilização de recursos naturais, ser durável em longo prazo e adaptável para necessidades futuras (BUTLER; PARKINSON, 1997).

A drenagem urbana sustentável, então, apresenta-se como solução às limitações do sistema de drenagem urbana convencional, à medida que é uma opção que causa menos impacto no ciclo hidrológico natural, atendendo mais eficientemente a demanda da drenagem das cidades e visando a durabilidade das instalações para as gerações futuras.

Com isto em mente, novas abordagens de drenagem urbana têm surgido nas últimas décadas, buscando soluções mais próximas à sustentabilidade, variando em nome, abrangência das propostas e país de origem.

Alguns dos novos termos utilizados para abordar a drenagem urbana de modo mais holístico são: LID (*Low Impact Development*), SuDS, WSUD (*Water Sensitive Urban Design*), BMPs (*Best Management Practices*) e TCs (Técnicas Compensatórias) (FLETCHER et al., 2015).

No estudo realizado por Rosa (2016), foi mapeado e avaliado o domínio de publicações científicas a respeito de 22 termos relacionados à drenagem urbana sustentável, e puderam ser constatadas diferenças de quantidade de autores em diferentes continentes. Tais diferenças podem ser verificadas na Figura 7.

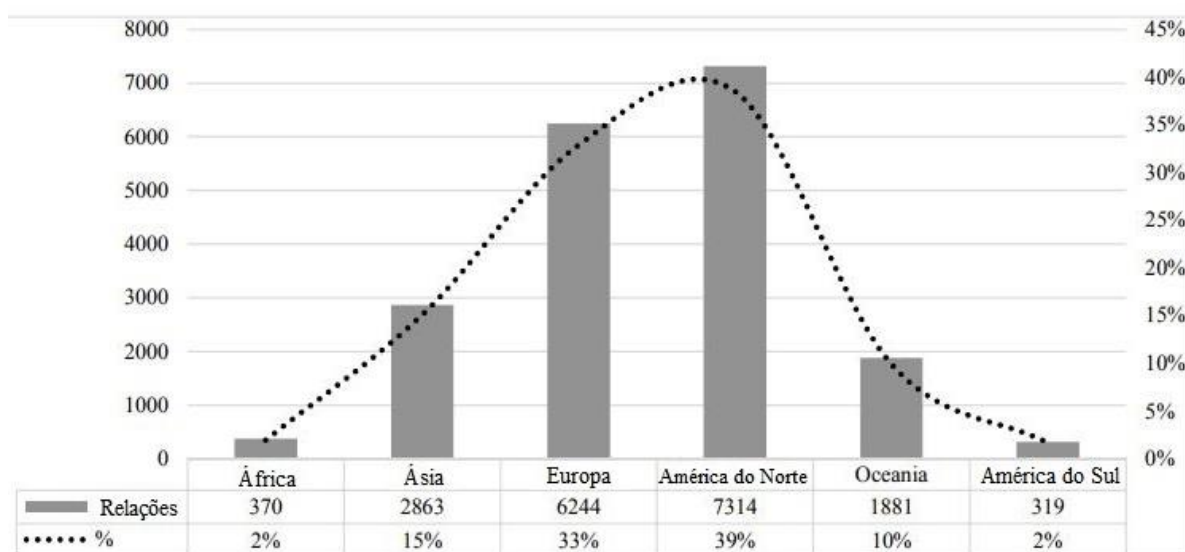


Figura 7 - Relações entre autores e continentes

Fonte: Rosa, 2016.

A pesquisa também mostrou que os países líderes em quantidade de autores são os Estados Unidos, com 32%, seguidos da Austrália, com 9%, Grã-Bretanha, com 8%, China, com 7%, e Canadá, com 6%. Os autores da América do Sul, juntos, somam 4%. A partir destes dados, nota-se a predominância da América do Norte e Europa nos estudos a respeito do tema, bem como a sua escassez na América do Sul, reforçando a importância do aprofundamento deste assunto no Brasil.

2.4.1 Best Management Practices (BMPs)

As BMPs são ferramentas ou práticas que consistem principalmente em dispositivos de retenção, recarga, práticas domésticas, entre outros, para reduzir ou tratar a poluição das águas (FLETCHER et al., 2015). O surgimento destas práticas se deu a partir da década de 70, nos países desenvolvidos que perceberam que o

sistema de drenagem convencional se mostrava insustentável economicamente (SOUZA, 2005).

Os microrreservatórios e detenções, que fazem parte desta sistemática, foram muito difundidos no Reino Unido e Austrália. Apesar de o uso dos BMPs ainda ser estimulado em certos países, como o Brasil, principalmente em Porto Alegre e São Paulo, em países como Canadá, Estados Unidos e Austrália, novas soluções foram adotadas, procurando aproximar ao máximo o funcionamento do ciclo hidrológico da situação pré-urbanização (SOUZA, 2005).

2.4.2 Técnicas Compensatórias (TCs)

As técnicas compensatórias surgiram na França, nos anos 80, denominadas, então, de *techniques alternatives* (TAs), em francês. Tal abordagem resultou da intenção das autoridades de resolver os problemas da drenagem da época, diminuir a poluição e aumentar a qualidade de vida (FLETCHER et al., 2015).

Os objetivos das técnicas compensatórias, quando do seu surgimento, tinham maior foco na qualidade de vida humana do que ambiental, sendo os principais deles a diminuição da vazão de pico e do volume escoado superficialmente, procurando mantê-lo próximo ao de situações naturais. Para tanto, essas técnicas lançaram mão da gestão do escoamento, com dispositivos de retenção, retenção, atenuação, e infiltração (FLETCHER et al., 2015).

2.4.3 Sistemas de Drenagem Sustentável (SuDS)

Os SuDS, também denominados de SUDS (Sustainable Urban Drainage Systems), tiveram como país de origem a Escandinávia, onde foi lançado um projeto, em 1988, para promover a sustentabilidade do distrito de Augustenborg. Neste local, foram construídos pavimentos porosos, gramados e telhados verdes, que funcionavam como canais para escoamento da água da chuva (POLETO, 2011).

Mais tarde, com destaque nos anos 90, países como os Estados Unidos, Canadá, Austrália, países da Europa, entre outros, aderiram aos SuDS, sendo o Reino Unido, atualmente, referência mundial nessa abordagem. Já nos países em desenvolvimento, incluindo nestes o Brasil, o controle quantitativo da drenagem urbana ainda necessita de melhoras significativas, e o qualitativo está muito inferior

ao ideal (POLETO, 2011).

As técnicas mais populares em SuDS atualmente são: pavimentos permeáveis, trincheiras de infiltração, valas de infiltração, bacias de retenção e detenção, microrreservatórios, telhados verdes, dispositivos de bioretenção e detenção distribuída. Estes sistemas podem ser utilizados individualmente ou combinados, de acordo com os objetivos de projeto e condições locais (POLETO, 2011; ZHOU, 2014).

Os SuDS têm como principal objetivo que o escoamento superficial seja controlado e utilizado de forma que gere o máximo de benefícios possível, estando estes divididos em quatro categorias principais: quantidade de água escoada, qualidade da água, amenidade e biodiversidade (WOODS-BALLARD et al., 2015).

2.4.3.1 Quantidade da água

Para garantir que a eventual água escoada superficialmente não prejudique a população, bens materiais, ou o meio-ambiente, os projetos devem controlar a velocidade e volume do escoamento superficial. Com isto, é possível diminuir a frequência de enchentes, e ainda, o risco de erosão dos leitos dos rios. Também é uma consequência a proteção do ciclo hidrológico das mudanças causadas pela urbanização, uma vez que são implantadas técnicas que priorizam a infiltração, processo responsável pelo reabastecimento de lençóis freáticos, pela manutenção do fluxo de base para os rios e pela umidificação dos solos (WOODS-BALLARD et al., 2015).

Buscando aproximar as condições do ciclo para o mais próximo da situação pré-desenvolvimento possível, as técnicas de atenuação adotadas pelos SuDS conseguem controlar o volume de escoamento superficial (Figura 8). A atenuação estende o hidrograma pós-desenvolvimento, diminuindo a vazão de pico, e, por outro lado, aumentando o tempo pelo qual a vazão de pico permanece. Também, há aumento de volume escoado em relação à situação pré-desenvolvimento, o que pode aumentar o risco de inundações nos corpos receptores da vazão. Este fator requer cautela quando das instalações descarregarem em tubulações de sistemas de drenagem (WOODS-BALLARD et al., 2015).

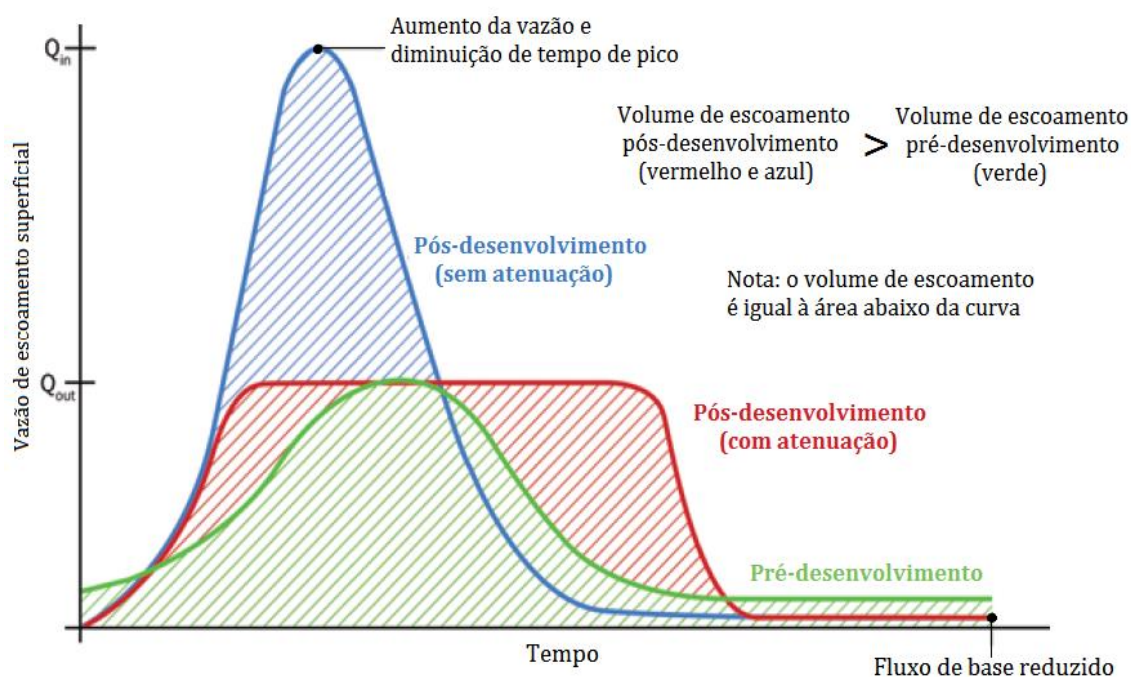


Figura 8 - Exemplo de hidrograma de escoamento
Fonte: adaptado de Woods-Ballard, 2015.

A atenuação do escoamento superficial pode se dar pela execução de sistemas de armazenamento, ou seja, dispositivos que acumulam a água, liberando-a com o tempo e, assim, controlam o fluxo (WOODS-BALLARD et al., 2015).

2.4.3.2 Qualidade da água

A concentração de poluentes no escoamento superficial é maior no início da precipitação, sendo este escoamento inicial também chamado de descarga inicial ou *first flush*, em inglês (GUPTA; SAUL, 1996). Nos primeiros 25mm de chuva, normalmente, encontram-se 95% da carga poluidora (TUCCI, 2003b). Desta forma, é necessário que essa poluição seja administrada, visto que não são necessários eventos de chuva relativamente intensos para que ela aconteça (WOODS-BALLARD et al., 2015).

Essa água com alta concentração de poluição, portanto, chega aos rios contaminada (TUCCI, 2003b). Os SuDS oferecem soluções que infiltram, transportam e armazenam as águas escoadas, diminuindo a poluição do meio receptor, ao mesmo tempo que reduzem o risco de enchentes (WOODS-BALLARD et al., 2015).

2.4.3.3 Amenidade

A amenidade almejada pelos SuDS consiste em criar ambientes relaxantes e agradáveis para as comunidades. Os SuDS podem favorecer a amenidade de uma região por meio da criação de zonas de recreação, estacionamentos e outras áreas multifuncionais, sejam elas áreas verdes ou atrações com água aumentando o bem-estar dos habitantes (WOODS-BALLARD et al., 2015).

Este aspecto dos SuDS não será aprofundado neste trabalho, visto que este tem foco nas consequências hidrológicas relativas ao funcionamento dos sistemas de drenagem, preterindo reflexões sobre o conforto humano.

2.4.3.4 Biodiversidade

Os projetos de SuDS devem procurar proporcionar habitats para diversas espécies, que resultem em ecossistemas resilientes e autossustentáveis. Este objetivo pode ser alcançado com a diminuição de substâncias tóxicas lançadas nos corpos e cursos d'água, e a plantação de espécies que favoreçam o crescimento da biodiversidade.

Meios de obter-se a biodiversidade pelos SuDS, assim como a amenidade, não serão aprofundados neste trabalho, pelo motivo de o enfoque principal ser o aspecto hidrológico de funcionamento do sistema.

2.4.4 Sistemas de Desenvolvimento de Baixo impacto (LIDs)

O principal objetivo do LID é a preservação ciclo hidrológico natural. Isso significa modificar o mínimo possível os locais das instalações, reduzindo, assim, o impacto no solo, vegetação e sistemas aquáticos. Ainda, em contraste com o sistema convencional que apenas expulsa a vazão escoada de pico, o sistema baseado no LID proporciona um escoamento superficial menor em volume, visto que diminui as áreas impermeáveis da cidade (DIETZ, 2007).

Este conceito é mais comumente utilizado nos Estados Unidos e na Nova Zelândia. Nos Estados Unidos, o sistema se caracteriza predominantemente por dispositivos de tratamento de águas pluviais de menor escala, como sistemas de biorretenção, telhados verdes e trincheiras de infiltração, localizadas diretamente ou

próximas às fontes de escoamento. Já na Nova Zelândia, o enfoque do LID é mais dado ao controle da poluição do que à diminuição do escoamento superficial (FLETCHER et al., 2015).

Esta abordagem foi provada eficiente na redução do escoamento superficial no trabalho publicado por Dietz e Clausen (2007). Nele, foram comparadas uma região com técnicas de drenagem urbana tradicionais e outra com a aplicação de técnicas LID, na cidade de Waterford nos Estados Unidos, ao longo de seus desenvolvimentos e conseqüente aumento de impermeabilização do solo. Foi observado um aumento do escoamento superficial e da saída de nitrogênio e fósforo após o desenvolvimento da região de técnicas tradicionais, quando comparado com a sua situação inicial. Já na área onde foram usadas técnicas de LID, estes parâmetros, após o desenvolvimento, permaneceram os mesmos que os inicialmente medidos (DIETZ; CLAUSEN, 2007).

2.4.5 Water Sensitive Urban Design (WSUD)

Os sistemas de WSUD surgiram na década de 90, na Austrália (FLETCHER et al., 2015; WONG, 2007). Essa abordagem tem como princípio a integração do planejamento urbano com a proteção e conservação do ciclo hidrológico urbano, de modo que a administração hídrica das cidades seja sensível aos processos hidrológicos e ecológicos naturais. Objetiva-se, então, a conservação da água potável, a minimização da poluição proveniente das águas residuais e a diminuição do volume de escoamento superficial decorrente da urbanização (WONG, 2007).

Os sistemas baseados no WSUD incluem a preferência por instalações de manejo de águas que abranjam regiões, ao invés de locais particulares, possibilitando, assim, um sistema de administração de águas mais interconectado. Uma outra dimensão compreendida pelos WSUDs é a integração das instalações sustentáveis à arquitetura local, possibilitando ganhos paisagísticos. Tem-se, ainda, o emprego de práticas não-estruturais, como políticas que favoreçam a implementação das medidas sustentáveis e iniciativas relacionadas ao estudo destas soluções (WONG, 2007).

Visando a conquista da sustentabilidade de uma região urbana, seguindo os princípios do WSUD, o aproveitamento da água da chuva é uma opção eficiente, visto que favorece a preservação da água potável e, também, a qualidade das águas pluviais. Na Austrália, mais significativamente na região Oeste de Sydney, foram

instalados sistemas de coleta de águas pluviais e reuso de águas servidas, que, em 2007, abasteciam 15.000 residências (WONG, 2007).

2.5 MEDIDAS ESTRUTURAIS DE DRENAGEM URBANA SUSTENTÁVEL

Alguns tipos de dispositivos de drenagem urbana sustentável serão apresentados, bem como suas características e funcionamentos.

2.5.1 Pavimentos Permeáveis

A técnica de pavimentos permeáveis propõe o uso de revestimentos compostos de materiais que permitam a passagem e infiltração da água da chuva para o solo ou para algum reservatório. Exige-se, ainda, que sejam rígidos o suficiente para permitir o tráfego de baixa intensidade de pedestres e veículos (WOODS-BALLARD et al., 2015).

Objetiva-se, com a adoção desta técnica, o aumento da permeabilidade de uma bacia hidrográfica que teve sua superfície revestida, e conseqüentemente, impermeabilizada, com a urbanização (SOUZA, 2005). Com isto, é possível aproximar o escoamento da água das suas características originais, ou seja, há redução do volume deste escoamento e também é promovida a despoluição da água (WOODS-BALLARD et al., 2015).

Outra vantagem apresentada é que, através de estudos e análises em campo na Alemanha, comprovou-se que este tipo de pavimento evita a contaminação do solo com metais pesados, uma vez que os mesmos ficam retidos nos poros do material (AUSTRALIA, 2002).

Um cuidado específico deve ser tomado com o uso deste revestimento em superfícies de alto tráfego de pessoas e automóveis, uma vez que se possibilita assim o comprometimento do seu desempenho com o entupimento dos poros do pavimento (TUCCI, 2003b).

São exemplos desta técnica os asfaltos porosos, pavers (pavimento modular permeável), concretos permeáveis (Figura 9) e sistemas de grama reforçada, constituída de grades de concreto preenchidas com grama (Figura 10) (WOODS-BALLARD et al., 2015).



Figura 9 - Pavimento de concreto permeável
Fonte: Woods-Ballard et al, 2015.



Figura 10 - Sistema de grama reforçada com grade de concreto
Fonte: Woods-Ballard et al, 2015.

Os pavimentos permeáveis apresentam certas desvantagens, como a probabilidade de colmatção, má execução, ou obstrução, que diminuem a efetividade da infiltração, além do risco de contaminação do aquífero (ACIOLI, 2005).

Durante o período compreendido entre os anos de 2006 e 2008, em uma área urbana na cidade de Auckland, Nova Zelândia, foi monitorada a implantação e desempenho de um local de teste de pavimento permeável. O mesmo, construído em fevereiro de 2006, compreendia uma área aproximadamente 200 m², próximo a uma área asfaltada para que fosse possível comparar os resultados obtidos das duas áreas

(FASSMAN; BLACKBOURN, 2010).

Com 35 metros de comprimento, 6 metros de largura e em torno de 48 cm de profundidade, a faixa pavimentada com o sistema sustentável na estrada de Birkdale foi projetada para suportar o tráfego de automóveis. Este local foi selecionado por se acreditar que a quantidade de poluentes seria mais significativa para o estudo do que quando comparado à implantação em estacionamentos. No pavimento foi utilizado o paver de concreto impermeável com juntas largas preenchidas com areia grossa. A água infiltrada era ainda captada por drenos (FASSMAN; BLACKBOURN, 2010).

Segundo Fassman e Blackbourn (2010), foram obtidas as curvas de frequência de fluxo dos ensaios, que relacionam o pico de fluxo com as porcentagens de eventos igualados ou superados. As mesmas indicam que a vazão de descarga se aproxima muito das condições de pré-desenvolvimento para 75% dos casos medidos no pavimento permeável, enquanto 92% dos eventos excedem os picos de pré-desenvolvimento na área convencionalmente asfaltada. Ainda, nos 44 eventos de chuva medidos com a precipitação excedendo 7 mm, a vazão medida na solução sustentável era de 0,15 a 1,17 L/s. Este valor é perceptivelmente menor quando comparado com o intervalo de 0,82 a 2,05 L/s da área revestida com asfalto.

Por fim, as pesquisadoras concluem que, apesar de a região apresentar um declive de aproximadamente 6% e um solo suporte com baixa permeabilidade, o desempenho do sistema implantado foi satisfatório. Cita-se ainda que, em longos eventos de precipitação, as diferenças de concentração de alguns dos poluentes aferidos entre os dois sistemas era maior que 70%.

2.5.2 Bacias de Detenção e Retenção

As bacias de detenção e retenção são dispositivos de atenuação que podem ser empregados na drenagem pluvial urbana com o objetivo principal de promover o armazenamento da água e a diminuição da vazão de pico (CHENG; COFFMAN; CLAR, 2001; FRENI; MANNINA; VIVIANI, 2010; TUCCI, 2010).

2.5.2.1 Bacias de detenção

Com o emprego de bacias de detenção, a água escoada superficialmente é integral ou parcialmente armazenada, e então gradualmente liberada no sistema de

drenagem (FRENI; MANNINA; VIVIANI, 2010), permanecendo secas em períodos de baixo fluxo (TUCCI, 2010).

Com o uso destes reservatórios, é possível diminuir o diâmetro das tubulações à jusante, devido à diminuição da vazão de pico. Além disso, eles podem servir para reter sedimentos para que sejam removidos do sistema, e ainda, serem usados para recreação (TUCCI, 2003b; WOODS-BALLARD et al., 2015).

A proliferação de mosquitos vetores de doenças é um fator que deve ser levado em consideração na implantação de bacias de detenção. Assim, é necessário que seja conhecido o tempo de ciclo reprodutivo das espécies, e assegurado que o tempo de detenção, que é o tempo médio de permanência da água no reservatório, seja menor que o primeiro. No entanto, em regiões úmidas, as bacias de detenção podem permanecer molhadas durante a maior parte do tempo, o que favorece a reprodução de mosquitos (TUCCI, 2010).

Outra limitação, Segundo Tucci (2010), é que em países em climas úmidos tropicais, há falta de controle das instalações de águas residuais, possibilitando a entrada deste fluxo para os reservatórios.

Existem experiências com bacias de detenção em cidades brasileiras, mas ainda há falta de conhecimento técnico entre os profissionais. Também, essas práticas acabam não obtendo confiança por parte da população devido a problemas relativos à qualidade da água, má execução e projeto, falta de espaços apropriados e à política implantada atualmente (GOLDENFUM et al., 2007).

2.5.2.2 Bacias de retenção

Nas bacias de retenção, a água proveniente do escoamento superficial é armazenada e é liberada para o exterior por infiltração, evaporação, ou usos como irrigação, sem ser conduzida para o sistema de drenagem (FRENI; MANNINA; VIVIANI, 2010). Deste modo, os reservatórios de retenção permanecem sempre cheios. São mais utilizados do que os de detenção no Canadá, Estados Unidos e Austrália (TUCCI, 2003b).

Assim como para as bacias de detenção, existem as limitações a respeito da proliferação de vetores de doenças, como malária, dengue e febre amarela, restrições de espaço, e a frequente falta de isolamento do sistema de águas servidas (TUCCI, 2010).

Em Porto Alegre, no Parque Marinha do Brasil, foi construído um reservatório de retenção, que foi projetado para receber somente águas pluviais. No entanto, após sua construção, foram encontradas contribuições de esgoto, principalmente devidas a conexões clandestinas (GOLDENFUM et al., 2007).

2.5.3 Dispositivos de Biorretenção

Os dispositivos de biorretenção são depressões rasas com vegetação, que reduzem a velocidade e volume do escoamento superficial, além de tratar a poluição da água infiltrada e proporcionar a recarga do lençol freático (DIETZ, 2007). Estes controlam a qualidade e a quantidade da água, utilizando as propriedades químicas, físicas e biológicas das plantas, micro-organismos e solos (PRINCE GEORGE'S COUNTY, 2007). Podem ser executados com diversas dimensões, formas, materiais e tipos de vegetação.

No dispositivo, a água escoada é acumulada temporariamente na superfície e então, infiltrada pela vegetação e solo subjacente, opcionalmente, sendo posteriormente coletada por uma tubulação na parte inferior (WOODS-BALLARD et al., 2015). Quando a capacidade de infiltração do solo é excedida, a água escoada acumula-se na superfície vegetada. Na Figura 11 está representado um perfil de biorretenção típico, de infiltração total, sem drenos.



Figura 11 - Dispositivo de biorretenção
Fonte: Prince George's County, 2007.

O uso de biorretenções pode trazer benefícios não diretamente relacionados ao ciclo hidrológico. A inserção da diversidade paisagística que proporcionam ao ambiente tem como consequências (PRINCE GEORGE'S COUNTY, 2007):

- O encorajamento da gestão ambiental e o orgulho da comunidade;
- Benefícios ambientais, como habitat para a vida silvestre, inserção de plantas nativas, melhorando a qualidade do ar, mitigando climas urbanos.
- O aumento do valor de imóveis, em até 20%, pelo uso de paisagismo esteticamente agradável.

Apesar das vantagens desta técnica no sentido de melhora da qualidade da água, este aspecto não será avaliado no presente trabalho, e sim, a sua influência na redução do escoamento superficial.

2.5.4 Trincheiras de Infiltração

As trincheiras de infiltração (Figura 12) são valas rasas que têm como objetivo a redução da poluição da água e da velocidade de escoamento, além de parte do volume, através da infiltração. Para isto, são preenchidas com pedras ou cascalhos (WOODS-BALLARD et al., 2015).

O fluxo de água proveniente das superfícies impermeáveis são recebidos por uma faixa de superfície vegetada posicionada ao lado das valas, responsável por realizar um pré-tratamento da água, e então escoam em direção às trincheiras. Este pré-tratamento é necessário para evitar a colmatação dos materiais que compõem o sistema.

As águas então recebidas do escoamento superficial são coletadas e transportadas ao longo das valas para que sejam conduzidas para o sistema de drenagem (WOODS-BALLARD et al., 2015).

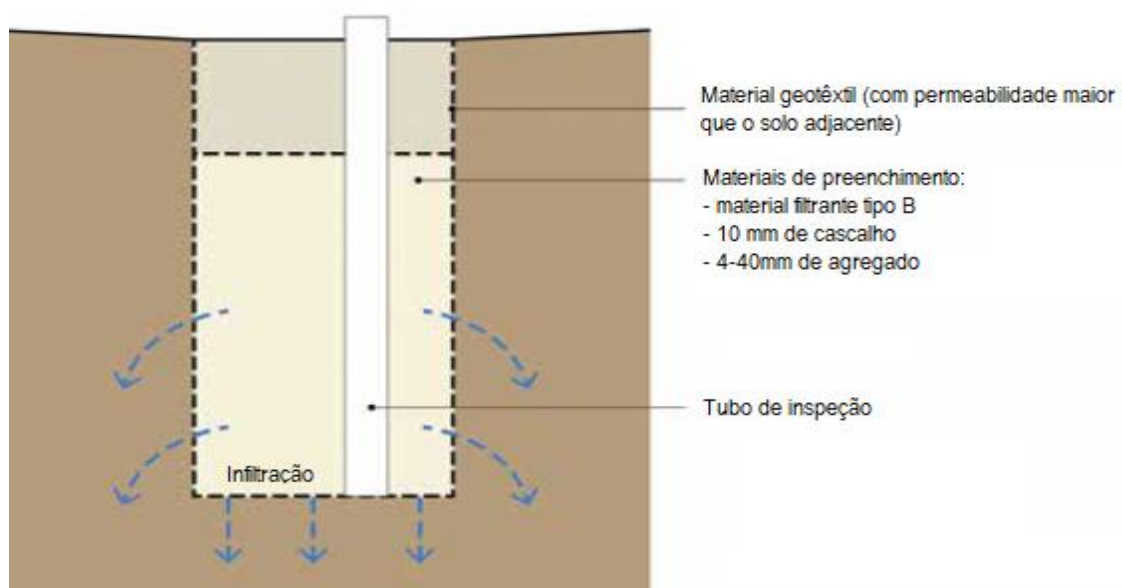


Figura 12 - Esquematização de uma trincheira de infiltração

Fonte: Woods-Ballard et al, 2015.

No presente trabalho, esta técnica não será utilizada, em vista de haver certa dificuldade na implantação do mesmo em áreas residenciais, pois o tráfego de pessoas e veículos sobre o dispositivo é dificultado.

3 METODOLOGIA

3.1 ÁREA DE ESTUDO

O local estudado localiza-se no município de Pato Branco-PR, no Bairro Alvorada, Loteamento Araucária (Figura 13). Os arquivos relativos ao projeto do mesmo foram disponibilizados pelo escritório responsável. Na data desta aquisição, em 01/08/2017, o Loteamento se encontrava na fase inicial de execução do sistema de drenagem, estando este projeto pronto. A área de estudo é de 121.203m².

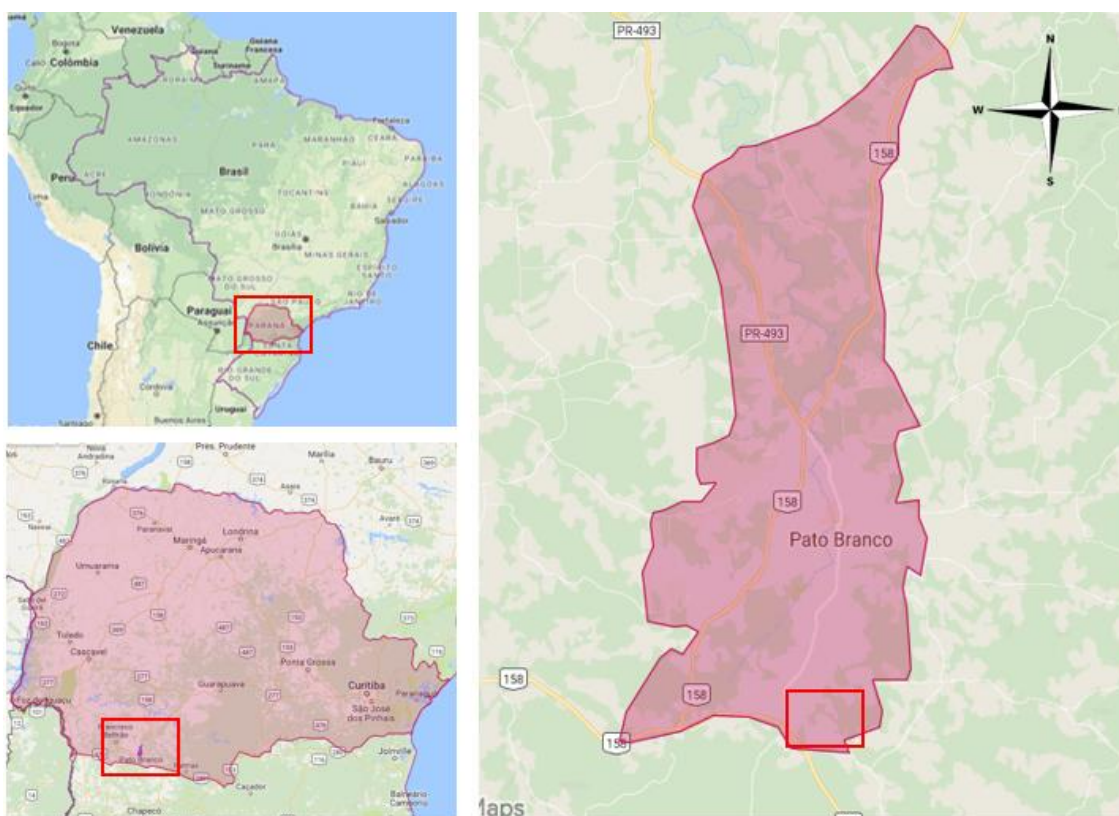


Figura 13 - Localização da área de estudo
Fonte: Adaptado de Google Maps, 2017.

O Loteamento está contido na Zona Residencial 4, como verificado no mapa de zoneamento da cidade de Pato Branco, disponibilizado no site da Prefeitura (Figura 14). De acordo com a Lei complementar nº 46 de 26 de maio de 2011, que regulamenta o Uso, Ocupação e Parcelamento do Solo no Município de Pato Branco, a taxa de permeabilidade mínima para esta Zona é de 30%.

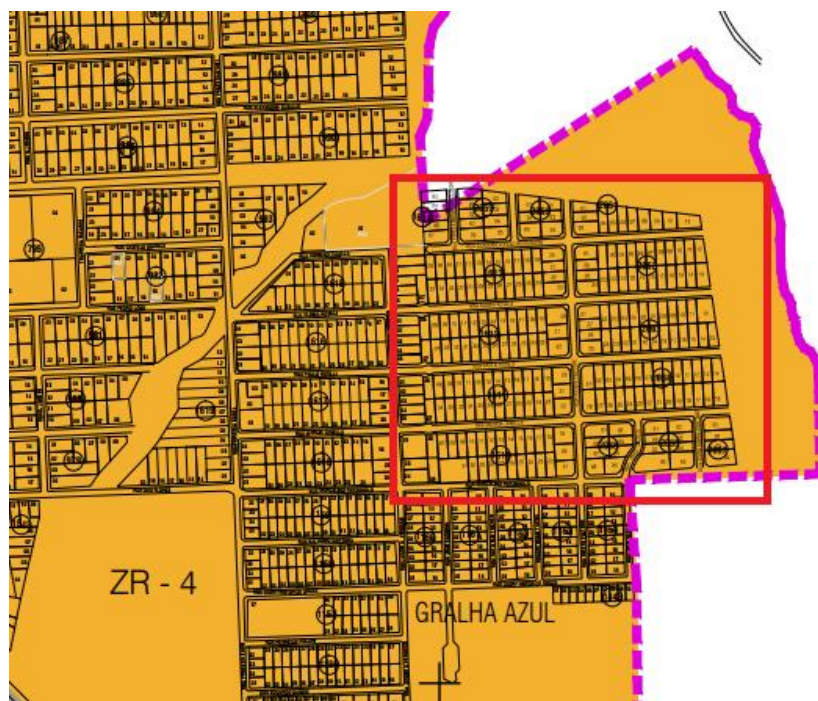


Figura 14 – Localização do Loteamento na ZR-4
Fonte: adaptado de Pato Branco, 2017

A representação das curvas de nível da área do estudo, consta na Figura 15, sendo que as linhas cinzas são de um em um metro e as vermelhas são de cinco em cinco metros. O arquivo contendo estas informações foi concedido pelo escritório responsável pelo projeto de drenagem, e utilizado como base pelos profissionais do mesmo para o dimensionamento do sistema convencional, que resultou na Tabela 17.

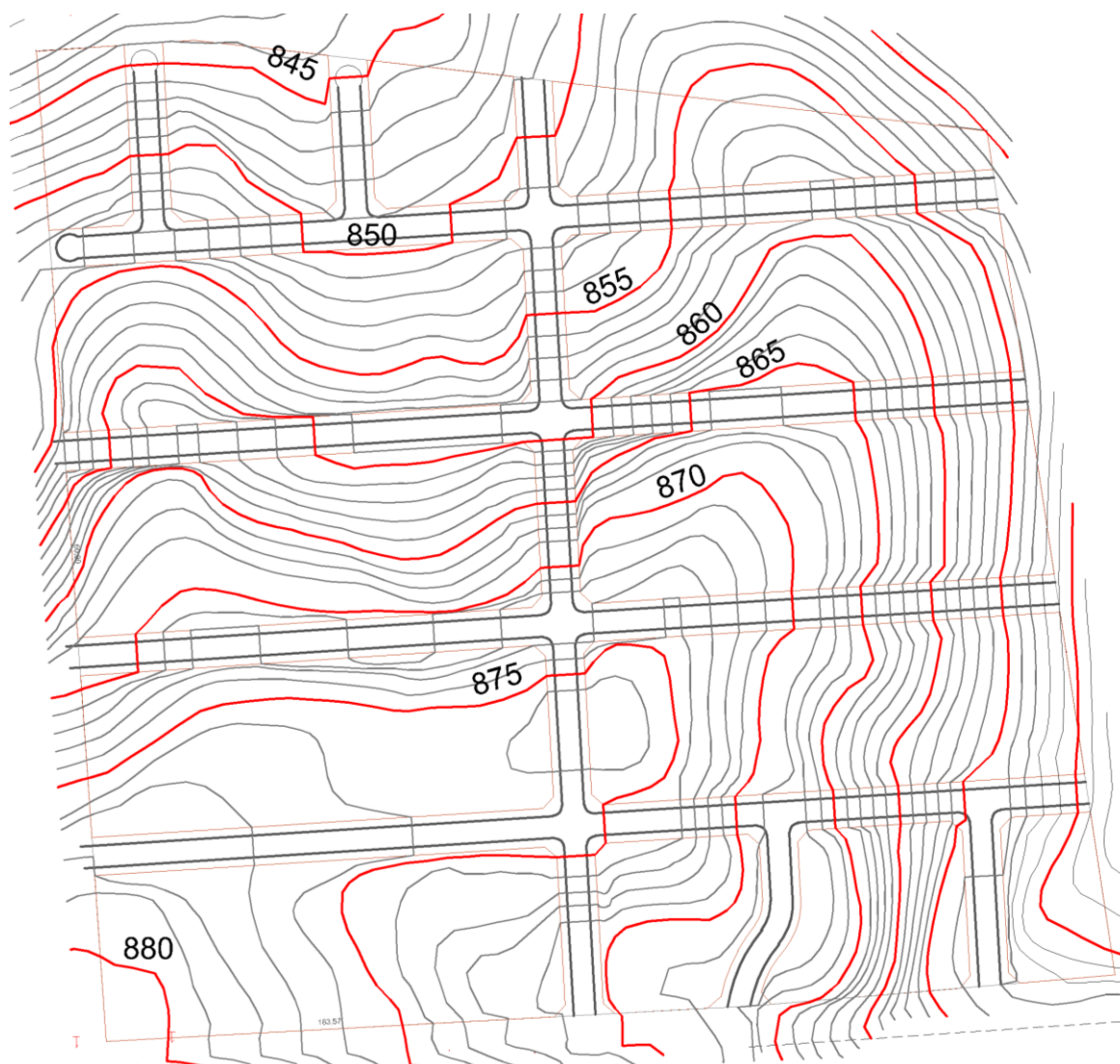


Figura 15 - Curvas de nível da área de estudo
Fonte: Autoria própria.

3.2 MODELAGEM NO SOFTWARE DO SISTEMA DE DRENAGEM A SER IMPLANTADO

O projeto de drenagem convencional foi obtido no escritório de engenharia responsável pelo mesmo. Foram disponibilizadas a planta baixa do loteamento, as curvas de nível e a planilha de dimensionamento. Este foi realizado, segundo profissional responsável, seguindo as diretrizes do manual de drenagem de rodovias do DNIT (Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes) e as recomendações da Secretaria de Engenharia e Obras do Município de Pato Branco. A planilha de dimensionamento resultante, elaborada por este profissional, consta no Anexo A.

O local está dividido em duas sub-bacias, contendo, portanto, dois exutórios do sistema de drenagem, estando previstos um dissipador de energia em cada um. As galerias de águas pluviais adotadas foram tubos de concreto.

Este projeto foi inserido no software EPA SWMM, primeiramente posicionando a imagem da planta do loteamento como fundo, para então, serem locados os elementos de nó, que abrangem as bocas-de-lobo (Figura 16), dissipadores de energia (Figura 17) e caixas de passagem (Figura 18). Para estes elementos, foram informados os valores de elevação (*Invert El.*) e de profundidade da base (*Max depth*).

Junction BL51 ✖	
Property	Value
Name	BL51
X-Coordinate	3052.394
Y-Coordinate	6062.264
Description	
Tag	
Inflows	NO
Treatment	NO
Invert El.	18.7
Max. Depth	1.5
Initial Depth	0
Surcharge Depth	0
Ponded Area	400
User-assigned name of junction	

Figura 16 - Janela de dados das bocas-de-Lobo
Fonte: Autoria própria

Outfall D11 x	
Property	Value
Name	D11
X-Coordinate	10631.486
Y-Coordinate	5014.534
Description	
Tag	
Inflows	NO
Treatment	NO
Invert El.	1.5
Tide Gate	NO
Route To	
Type	FREE
Fixed Outfall	
Fixed Stage	0
Tidal Outfall	
Curve Name	*
Time Series Outfall	
Series Name	*
User-assigned name of outfall	

Figura 17 - Janela de dados dos dissipadores de energia
Fonte: Autoria própria

Divider CX1	
Property	Value
Name	CX1
X-Coordinate	9981.281
Y-Coordinate	4843.167
Description	
Tag	
Inflows	NO
Treatment	NO
Invert El.	3.4
Max. Depth	1.0
Initial Depth	0
Surcharge Depth	0
Ponded Area	400
Diverted Link	C85
Type	CUTOFF
Cutoff Divider	
Cutoff Flow	0
Tabular Divider	
Curve Name	*
Weir Divider	
Min. Flow	0
Max. Depth	0
Coefficient	0
User-assigned name of divider	

Figura 18 - Janela de dados das caixas de passagem
Fonte: Autoria própria

Em seguida, foram inseridas as áreas de contribuição (*Subcatchments*), de acordo com a Figura 19, que foram ligadas a uma boca-de-lobo específica (*Outlet*), e informados o valor das suas áreas (*Area*), medidas no AutoCAD. Também foram inseridos os valores de largura (*Width*), que de acordo com o manual do EPA SWMM, é igual à área da sub-bacia dividida pela máxima distância entre a boca-de-lobo e o ponto mais distante da sub-bacia. Ainda, para estes elementos, foi selecionado a Curva Número como método de infiltração (*Infiltration*), e seu valor configurado, além da porcentagem impermeabilizada.

Subcatchment S15	
Property	Value
Name	S15
X-Coordinate	1234.572
Y-Coordinate	7345.821
Description	
Tag	
Rain Gage	Gage1
Outlet	BL63
Area	0.25021
Width	42
% Slope	0.5
% Imperv	70
N-Imperv	0.01
N-Perv	0.1
Dstore-Imperv	0.05
Dstore-Perv	0.05
%Zero-Imperv	25
Subarea Routing	OUTLET
Percent Routed	100
Infiltration	CURVE_NUMBER
Groundwater	NO
Snow Pack	
LID Controls	0
Land Uses	0
Initial Buildup	NONE
Curb Length	0

Figura 19 - Janela de dados das áreas de contribuição
Fonte: Autoria própria

Finalmente, para completar traçado da tubulação, os nós foram ligados pelos condutos. Para a configuração destes últimos, foram informados o diâmetro das galerias (*Max Depth*), o comprimento dos trechos (*Length*), o seu formato (*Shape*), que foi considerado circular para todos, e a rugosidade de Manning (*Roughness*) (Figura 20). Esta última foi adotada como 0,013 para tubos de concreto, assim como no projeto original. Todos estes dados foram obtidos a partir do projeto original

(Apêndice E).

Conduit C3	
Property	Value
Outlet Node	BL80
Description	
Tag	
Shape	CIRCULAR
Max. Depth	0.4
Length	56.5
Roughness	0.013
Inlet Offset	*
Outlet Offset	*
Initial Flow	0
Maximum Flow	0
Entry Loss Coeff.	0
Exit Loss Coeff.	0
Avg. Loss Coeff.	0
Seepage Loss Rate	0
Flap Gate	NO
Culvert Code	
User-assigned name of Conduit	

Figura 20 - Janela de dados dos condutos
Fonte: Autoria própria

O layout geral do sistema inserido no EPA SWMM pode ser observado na Figura 21, e, ainda, as delimitações das sub-bacias no mesmo. Os círculos verdes indicam a localização dos dissipadores de energia, que são os exutórios de cada sub-bacia, com a denominação de cada um.

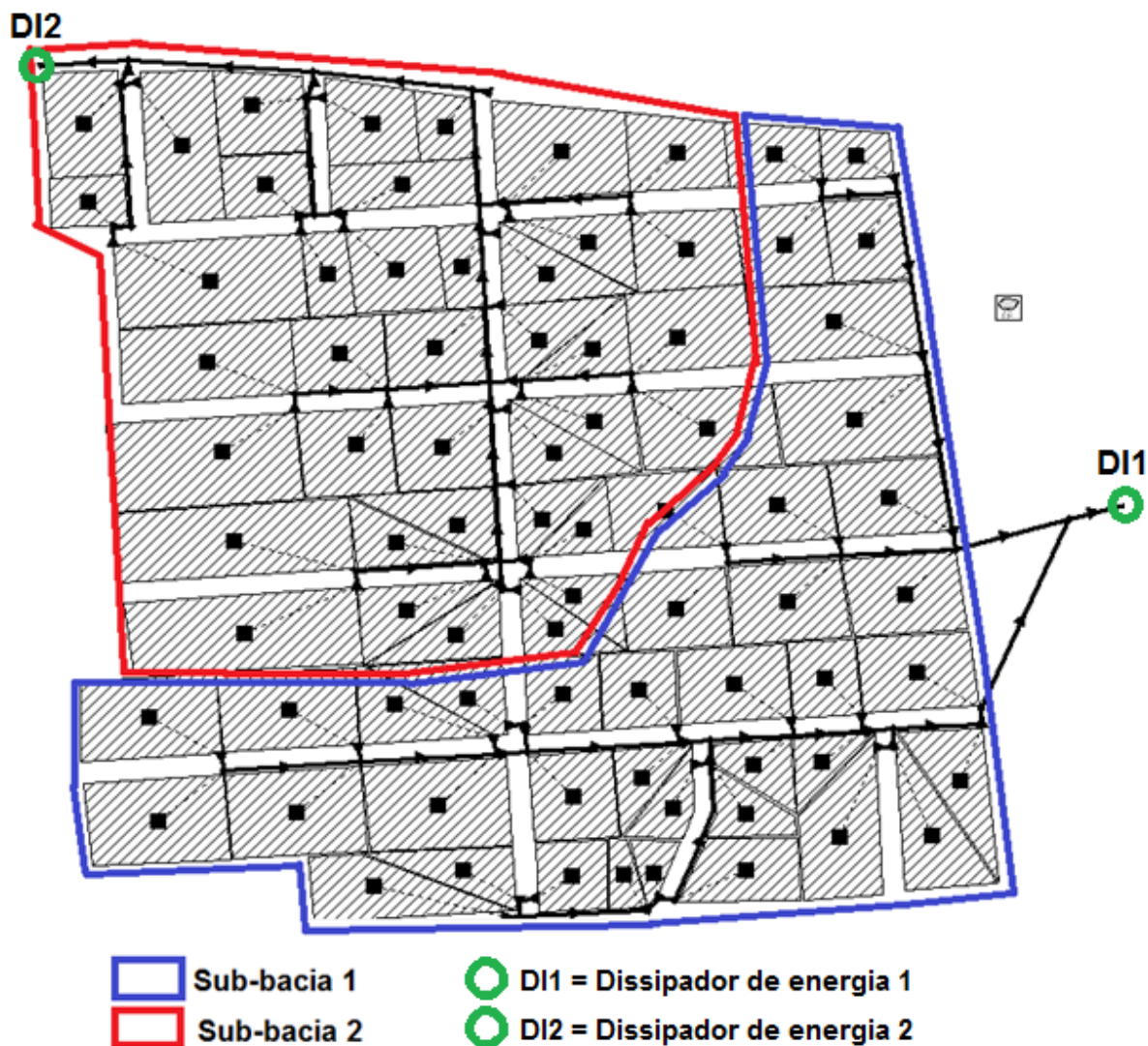


Figura 21 - Projeto de drenagem modelado no EPA SWMM
Fonte: Autoria própria

Na Figura 22 está representada uma ampliação de um trecho do projeto modelado no EPA SWMM, para melhor ilustração dos elementos inseridos. Os objetos hachurados com quadrado no centro são as áreas de contribuição, que se ligam a uma boca-de-lobo específica. Este último tipo de elemento está representado pelos círculos preenchidos, que, por sua vez, estão ligados pelos condutos, cujos sentidos de fluxo estão indicados pelas flechas.

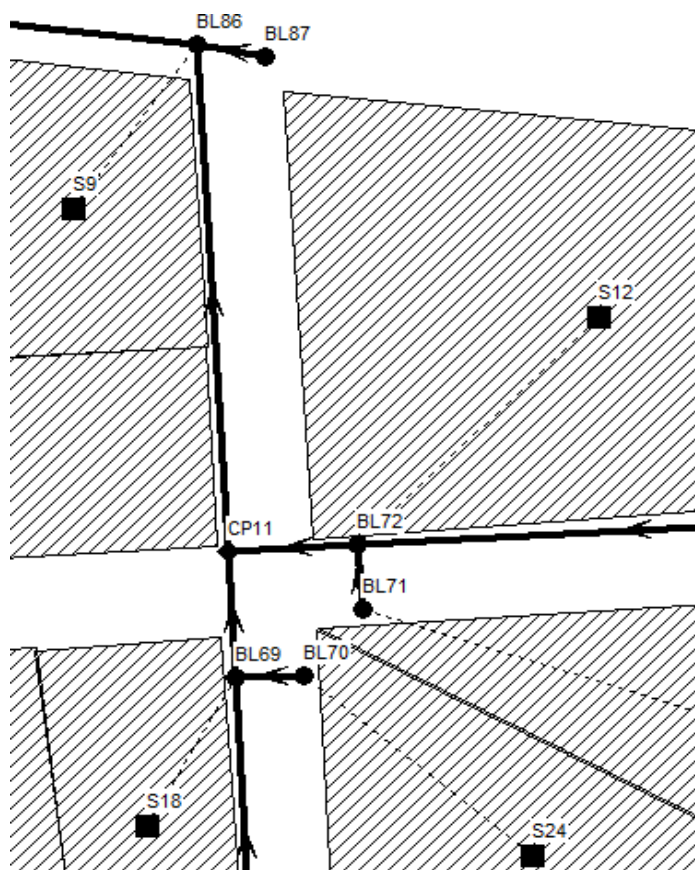


Figura 22 - Ampliação de trecho do projeto
Fonte: Autoria própria.

O modelo de infiltração adotado foi o da curva número, sendo que o solo enquadra-se no Grupo D de classificação hidrológica, conforme abordado anteriormente neste trabalho. Ainda, de posse das tabelas de CN disponibilizadas por McCuen (1998), o valor para a situação urbanizada inserido nas áreas de contribuição foi de 86, considerando uma área de contribuição de 1/3 de acre, segundo a Tabela 4, e a porcentagem impermeável adotada foi de 70%, a máxima permitida pela Lei de uso e parcelamento do solo (PATO BRANCO, 2011). Para a simulação da hipótese de pré-urbanização, foi mantido todo o sistema, apenas alterado o valor de CN para 77 e a porcentagem de impermeabilização para 10%, de acordo com os valores propostos em tabelas pela literatura de referência.

3.3 PRÉ-DIMENSIONAMENTO DOS SISTEMAS SUSTENTÁVEIS

Dentre as técnicas sustentáveis apresentadas pelos SuDS, as que serão propostas neste trabalho visam ao amortecimento da vazão de água escoada

superficialmente. Os grupos de medidas indicados a seguir são compostos por sistemas de pavimentos permeáveis, bacias de retenção e dispositivos de biorretenção. Este último, além de viabilizar o controle do escoamento, possibilita tratamento da água, que não será avaliado neste trabalho.

O pré-dimensionamento dos dispositivos, neste trabalho, tem a importância de servir como base ou estimativa inicial para inserção destes valores obtidos no software EPA SWMM, para que os dispositivos estivessem dimensionados de maneira coerente.

3.3.1 Método da Curva Envelope

Para o processo de dimensionamento dos SuDS, pode ser utilizado o Método da Curva Envelope. Este se aplica a qualquer dispositivo com algum volume de armazenamento, sendo comumente utilizado para o dimensionamento de bacias de retenção. Neste, o volume de dimensionamento é obtido através da máxima diferença entre as curvas de massa dos volumes afluentes dos volumes efluentes do dispositivo (SILVEIRA, 2003; SILVEIRA; GOLDENFUM, 2007). Os cálculos referentes ao desenvolvimento do método encontram-se no Apêndice A.

3.3.2 Bacias de Retenção

O pré-dimensionamento de uma bacia de retenção pode ser feito a partir da equação (13) do Apêndice A, pelo processo que consta no Apêndice B.

Existem três tipos de pré-dimensionamento de bacias de retenção (SILVEIRA; GOLDENFUM, 2007; SUDERHSA, 2002):

- a) Com leito impermeável (esgotamento por tubulação)
- b) Com leito permeável e esgotamento por infiltração (bacia de infiltração)
- c) Com leito permeável e esgotamento simultâneo por infiltração no solo e por tubulação (bacia de retenção/infiltração).

Considerou-se, para o dimensionamento e simulações, o leito como impermeável, a favor da segurança, no caso de a infiltração durante o funcionamento das bacias ser menor que o estimado.

Como a região possui dois exutórios, foram projetadas duas bacias de retenção, próximas aos mesmos. As suas respectivas áreas de contribuição foram

medidas no software AutoCAD.

A profundidade das bacias de retenção foi definida como 1,5m para ambas, por ser uma medida usual e porque profundidades maiores comprometem a segurança, considerando a possibilidade de acesso de pessoas às mesmas.

O orifício adotado para estas bacias foi locado no fundo das mesmas, a fim de possibilitar a descarga de água de maneira controlada, não ultrapassando o valor de vazão da situação de pré-urbanização. O mesmo foi dimensionado conforme o processo descrito no Apêndice B.

3.3.3 Pavimentos Permeáveis

O pré-dimensionamento de um pavimento permeável visa determinar a espessura da camada porosa, geralmente composta por brita, presente em todos os tipos deste sistema. São quatro tipos de pavimentos porosos, que diferem entre si pelo tipo de revestimento superficial (poroso ou impermeável) e pela permeabilidade do solo suporte (permeável ou impermeável) (SUDERHSA, 2002).

O tipo adotado para a simulação neste trabalho é o pavimento permeável com revestimento superficial poroso e com solo suporte permeável (Figura 23), pois é o mais comum. Como optou-se por utilizar este sistema em todas as calçadas do loteamento estudado, o material mais adequado é o paver, ou seja, bloco de concreto convencional para pavimentação.

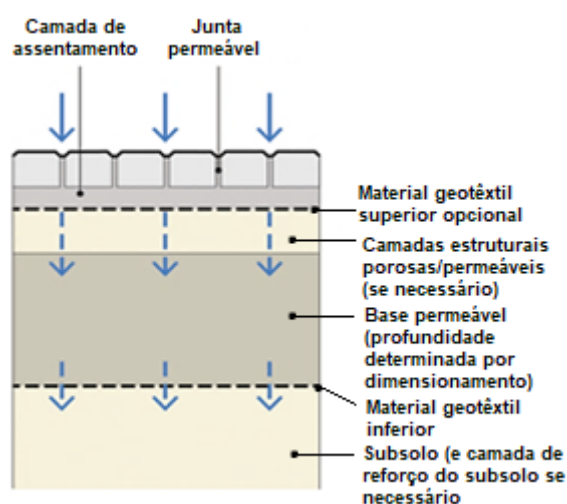


Figura 23 – Estrutura de Pavimento permeável
Fonte: adaptado de Woods-Ballard et al., 2015.

Em decorrência do tempo disponível para o estudo, o solo suporte, entretanto, não foi devidamente ensaiado em relação ao nível do lençol freático ou capacidade de permeabilidade através de ensaios.

Desta forma, utilizou-se o valor encontrado na literatura dos ensaios de permeabilidade realizados na região. De acordo com a proximidade da amostra e das características do solo, o valor da condutividade hidráulica (K) encontrado do solo tipo 1 da área de estudo, de acordo com a referência utilizada, é da ordem de $2,95 \times 10^{-5}$ cm/s (TABALIPA, 2008).

As equações de pré-dimensionamento, no entanto, consideram a utilização do coeficiente de permeabilidade do solo saturado (K_{sat}). Contudo, a forma de obtenção do mesmo através do valor do K utilizando modelos matemáticos não foi encontrada na literatura. Considerou-se, então, o valor inicial de K para K_{sat} , uma vez que um pré-dimensionamento tão detalhado não era exigido para situações de simulação, podendo-se ter, assim, resultados satisfatórios.

Os cálculos referentes ao desenvolvimento do método encontram-se no Apêndice C de acordo com as recomendações do Manual de Drenagem de Drenagem Urbana da Região Metropolitana de Curitiba – PR.

3.3.4 Dispositivos de Biorretenção

Foi determinado que cada lote teria um dispositivo individual de biorretenção localizado na frente do mesmo, no jardim da casa.

Para o pré-dimensionamento dos dispositivos de biorretenção, foram utilizadas as recomendações do Manual de SuDS da CIRIA (2015). Para o cálculo da área superficial das células, foi utilizada a equação (6):

$$A_f = \frac{V_t L}{k (h + L) t_p} \quad (6)$$

Onde:

A_f = área superficial do meio filtrante (m^2)

V_t = volume de água a ser tratada (m^3)

L = profundidade do meio filtrante (m)

k = condutividade hidráulica do meio filtrante (m/s)

h = altura média da água acima do meio filtrante (m)

t_p = tempo requerido para o volume de água percolar pelo meio filtrante(s)

Para a obtenção de V_t , foi utilizada a ferramenta “Estatísticas” do software EPA SWMM, na qual foi selecionada uma área de contribuição de mesma medida que a área de lote média (360m²), e selecionado que fosse informado o volume total escoado superficialmente naquela área para o evento de chuva inserido. O valor encontrado então foi de 1,1 m³.

A profundidade do meio filtrante (L) foi estimada em 1m, por ser um valor comum. Já o coeficiente de permeabilidade do meio filtrante (k), foi estimado como o mesmo do solo adjacente, de $2,95 \times 10^{-4}$ cm/s. De acordo com recomendação de Woods-Ballard, et al. (2015), o valor de h deve estar entre 15 cm e 30 cm, sendo adotado 30 cm para menor resultado de área superficial do dispositivo. O parâmetro t foi estimado seguindo ainda as recomendações de Woods-Ballard et al., segundo o qual, o este tempo deve estar entre 24 e 48 horas, sendo adotado 48 horas para menor dimensão do dispositivo.

3.4 HIETOGRAMA DE PROJETO PELO MÉTODO DOS BLOCOS ALTERNADOS

O hietograma de projeto aplicado ao estudo foi obtido pelo Método dos Blocos Alternados. De acordo com Menezes Filho e Costa (2007), e Bemfica, et al (2000), este método consiste em três etapas:

- 1) Separar o tempo de duração total da chuva em intervalos de tempo iguais e, para cada um, calcular as intensidades dadas pelas equações i-d-f;
- 2) Computar os incrementos de chuva que correspondem a cada intervalo de duração;
- 3) Reordenar o hietograma de modo a deixar o pico centralizado, e os demais, em ordem decrescente, dispostos alternadamente um à direita e outro à esquerda do centro.

3.5 SIMULAÇÃO DOS DISPOSITIVOS NO SOFTWARE

3.5.1 Bacias de Detenção

Para a inserção das bacias de detenção no Software EPA SWMM, foi necessário o arranjo de um nó logo após as mesmas, para que fosse locado um orifício entre o nó e a bacia. Na prática, tal nó não existiria, mas este foi um recurso necessário para a simulação no software.

A situação de como foi disposta a bacia de detenção 1 pode ser observada na Figura 24, onde BD1 é a bacia de detenção 1, J1 é o nó de ligação, O1 é o orifício 1, localizado entre BD1 e J1, e DI1 é o dissipador 1. As denominações dos elementos da bacia 2 se deram de forma análoga (Figura 25).

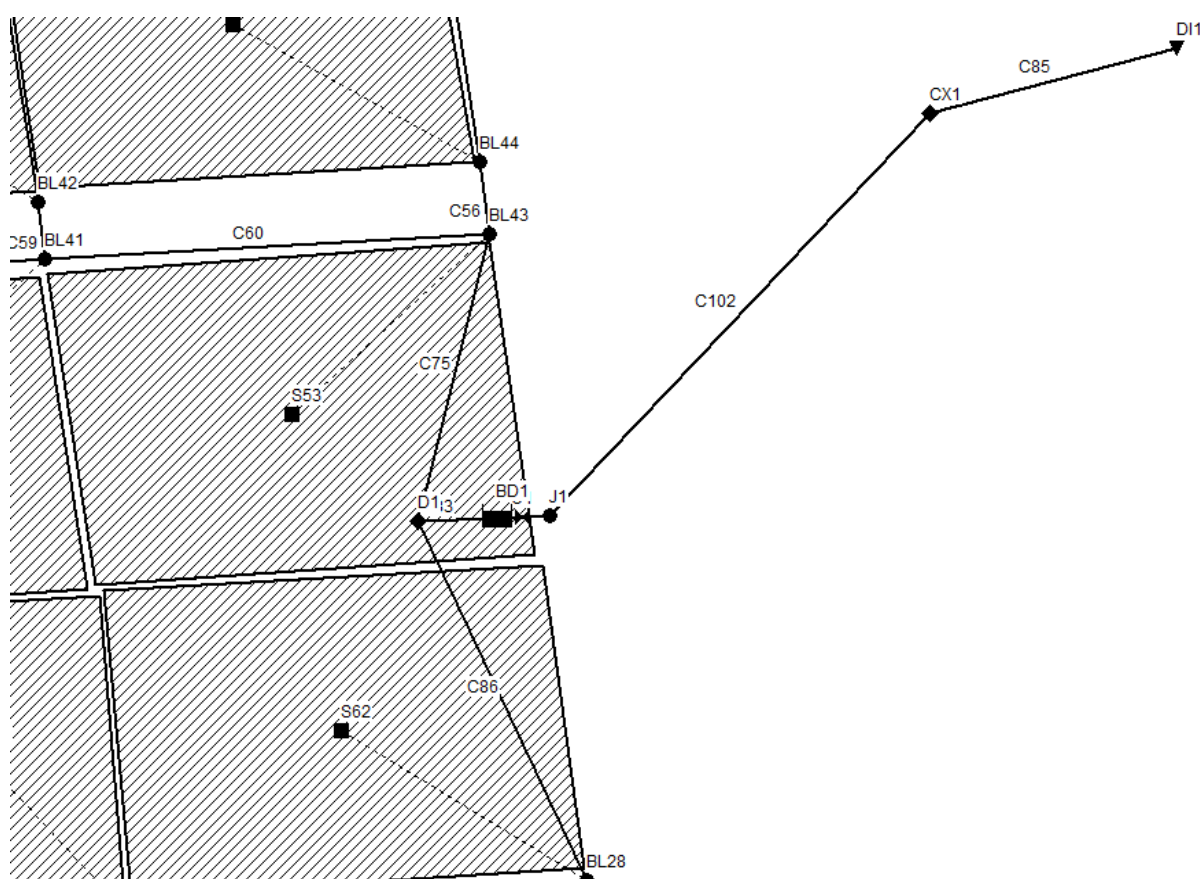


Figura 24 - Disposição da bacia de detenção 1

Fonte: Autoria própria

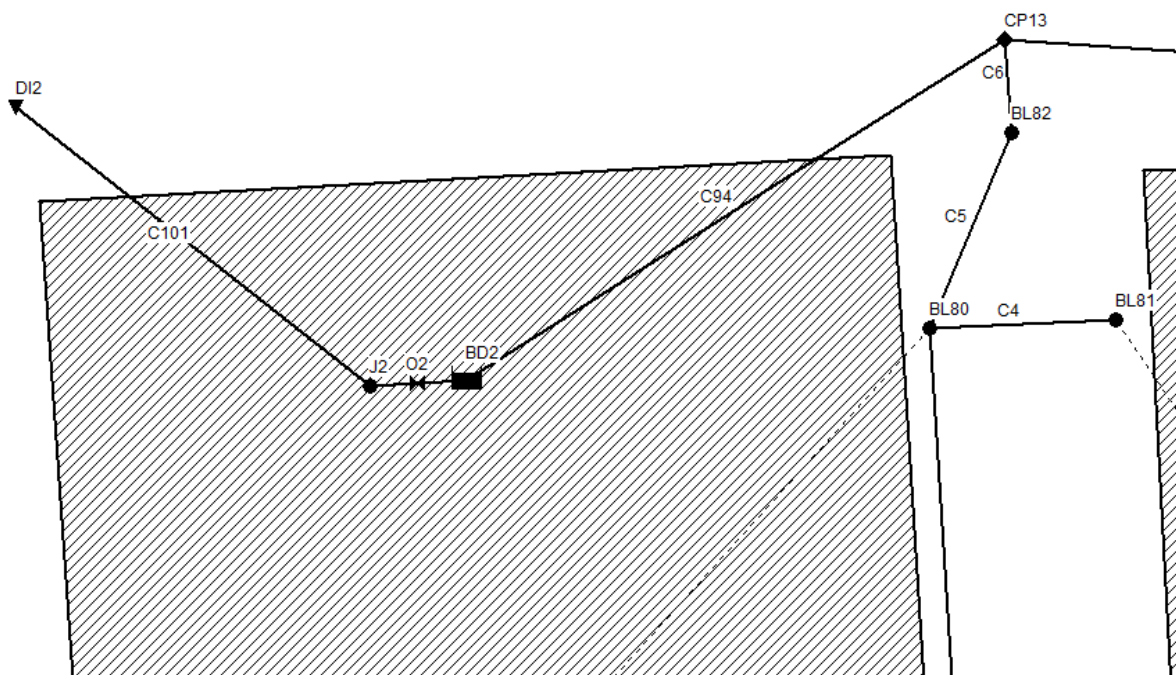


Figura 25 - Disposição da bacia de detenção 2
Fonte: Autoria própria

A curva de armazenamento das bacias, que corresponde às medidas do seu perfil transversal foi considerada com o mesmo formato para as duas, supondo paredes praticamente verticais. Foi optado, por motivo de simplificação, o modelo tabular, que relaciona a profundidade à área, com 1,5 m de profundidade (Figura 26).

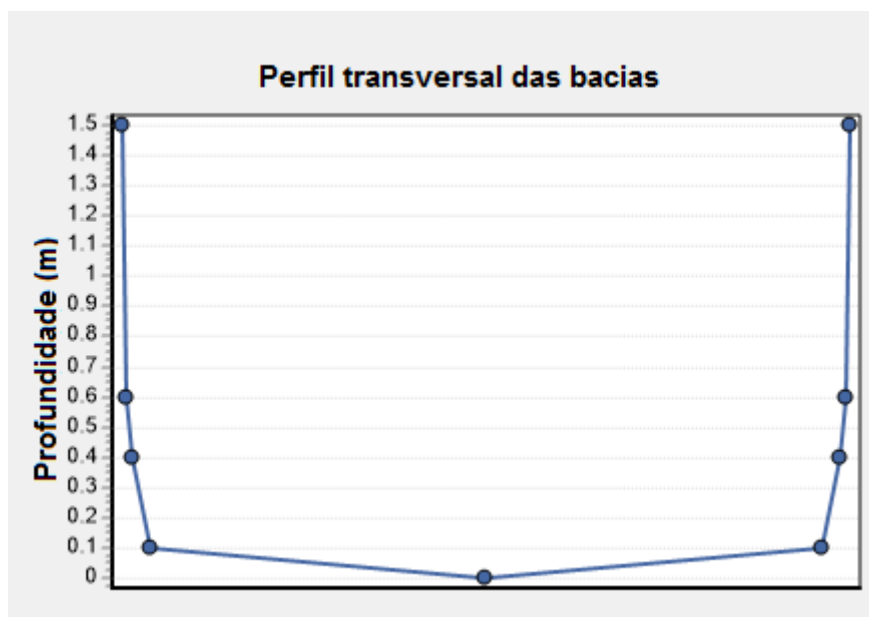


Figura 26 – Perfil transversal de armazenamento das bacias de detenção
Fonte: Autoria própria

Os orifícios de saída das bacias foram locados no fundo das bacias,

determinados como circulares, e sem comportas para evitar fluxo reverso, pois a vazão está no sentido do caimento do terreno em ambas as bacias. Todos estes parâmetros foram selecionados nas configurações dos orifícios criados após as bacias.

3.5.2 Pavimentos Permeáveis

Para a inserção do pavimento permeável no software EPA SWMM, foi criado primeiramente um sistema de LID, no qual seriam informados os parâmetros necessários para a simulação, tendo sido alguns já definidos no pré-dimensionamento de acordo com o Manual de Drenagem da Região Metropolitana de Curitiba - PR. Contudo, após a simulação, observou-se que os valores inicialmente projetados resultavam em um sistema superdimensionados, podendo ser reduzidos.

Com base no esquema estrutural apresentado no programa, foi considerado, por fim, pavimento de blocos de concreto com 50 mm de espessura e 90% de área superficial total impermeável. Esta porcentagem foi adotada pois se levou em conta que o bloco de concreto em si é impermeável, mas as juntas preenchidas com areia desempenham o papel de infiltração da água. A profundidade da camada de brita passou a medir 40 cm e a camada de areia utilizada para o assentamento dos blocos de concreto foi estabelecida em 5 cm. Os sistemas foram então inseridos em cada sub-bacia, no software, de acordo com a relação de área de calçada e de área de contribuição para cada caso. A largura de superfície por unidade se aplica a telhados, pavimentos e trincheiras que utilizam fluxo de transbordamento para transportar o escoamento superficial para fora da unidade. Esta foi adotada como 0, pelo motivo de ter sido considerado que toda a água precipitada seria infiltrada, sem haver escoamento sobre o pavimento permeável.

3.5.3 Dispositivos de Biorretenção

Ao inserir os dados relativos aos dispositivos no software EPA SWMM, mais parâmetros tiveram que ser definidos. O primeiro foi a elevação no perímetro da célula, que foi estipulada em 30cm. A fração de volume de vegetação, que, de acordo com o manual do próprio Software EPA SWMM, pode ser ignorada, exceto em casos de vegetação muito densa, quando pode chegar a 0,1 ou 0,2, foi considerada como 0.

Seguindo recomendação do manual do Software EPA SWMM, a largura de superfície por unidade para biorretenções deve ser adotada como 0. A porcentagem inicialmente saturada foi considerada como 0% por não se saber esta condição do solo para um evento isolado como é o caso. Foi adotada a porcentagem de área impermeável tratada como 90%, pois supôs-se que toda a água escoada superficialmente das áreas impermeáveis seria conduzida para os dispositivos, porém, podendo ocorrer pequenas perdas. Ainda, considerou-se que todo o fluxo coletado pelos drenos seria conduzido ao sistema de drenagem, o que, no software, implica que os drenos estariam ligados à boca-de-lobo que coleta a água da respectiva área de contribuição.

O coeficiente de Manning informado ao software para a rugosidade da superfície do sistema foi de 0,025, para superfícies de vegetação com grama curta (CHOW, 1959). A espessura da camada de solo foi adotada como 1000 mm, e a da camada de armazenamento, de 300 mm. A dimensão recomendada para a brita que compõe esta última é de 5 a 20 mm (WOODS-BALLARD et al., 2007). Com base na Tabela 5 do Manual de drenagem de rodovias do DNIT (2006), foi adotada então brita 0, cuja condutividade hidráulica é de 5 cm/s ou 180000 mm/h.

Tabela 5 - Coeficientes de condutividade hidráulica

Tipo de material	Granulometria (cm)	K (cm/s)
Brita 5	7,5 a 10,0	100
Brita 4	5,0 a 7,5	80
Brita 3	2,5 a 5,0	45
Brita 2	2,0 a 2,5	25
Brita 1	1,0 a 2,0	15
Brita 0	0,5 a 1,0	5
Areia Grossa	0,2 a 0,5	1×10^{-1}
Areia Fina	0,005 a 0,04	1×10^{-3}
Silte	0,0005 a 0,005	1×10^{-5}
Argila	Menor que 0,0005	1×10^{-8}

Fonte: DNIT, 2006

Foi determinado que os dispositivos possuiriam drenos por motivo de segurança e bom funcionamento no caso de haver transbordamento da área alagada. Foram estabelecidos um dreno de 1,20 m de comprimento, com orifícios de 5 mm de diâmetro espaçados a cada 30 cm. Na seção de seleção dos parâmetros dos drenos, o coeficiente de fluxo foi calculado de acordo com o manual do próprio software EPA

SWMM. De acordo com este, o coeficiente citado seria 60.000 vezes a razão entre a área total de orifícios para área do dispositivo ($1,5 \text{ m}^2$). Esta proporção foi de $7,84 \times 10^{-5}$, a qual, multiplicada por 60.000, resultou num coeficiente de fluxo de 3,1. Seguindo a mesma referência, o expoente de fluxo foi adotado como 0,5, valor indicado para tubos com orifícios. A altura do dreno foi estipulada em 0,5m. Para os demais parâmetros foram adotadas as sugestões do próprio software, por serem valores consistentes com a realidade.

Na Figura 27 consta o dispositivo de biorretenção padrão do estudo com as dimensões calculadas, com as cotas em centímetros.

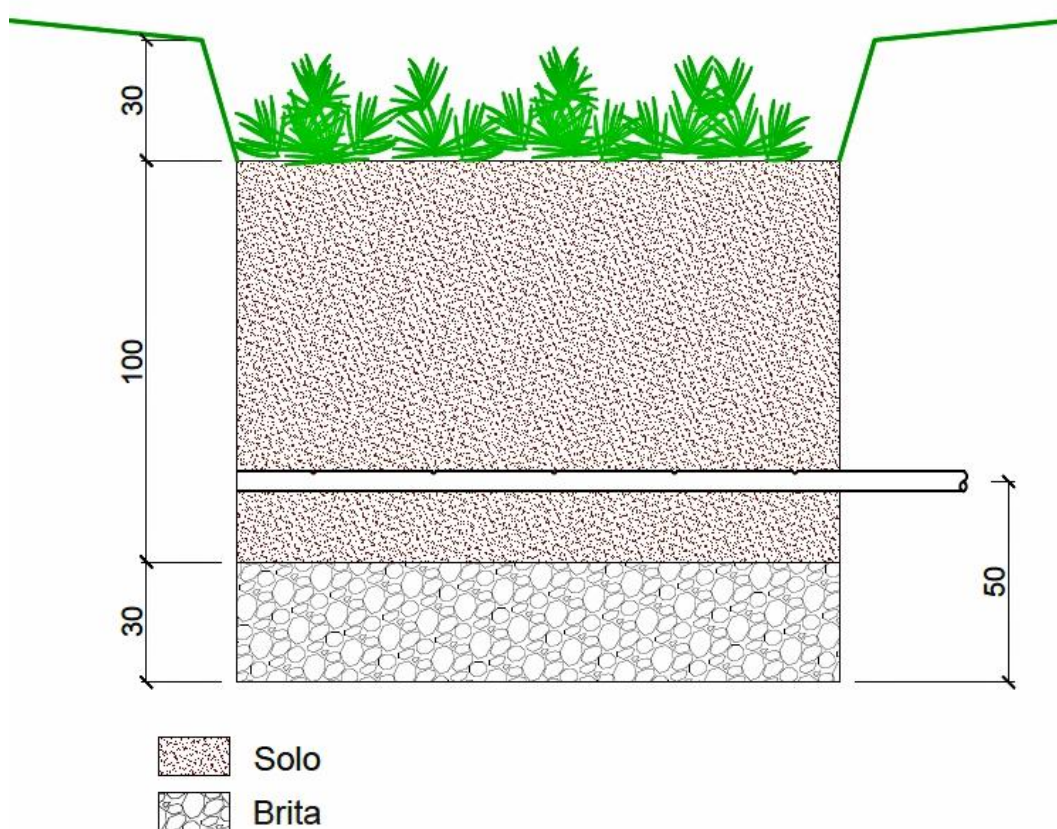


Figura 27 - Dispositivo de biorretenção padrão dimensionado

Fonte: Autoria própria.

Pelo fato de não acontecer de fato a construção dos dispositivos dimensionados no presente trabalho no futuro, alguns parâmetros foram estimados sem grandes restrições, porém, se fosse haver a real instalação dos mesmos, seria necessária maior cautela e verificação dos valores adotados.

3.5.4 Combinações de Dispositivos

De posse das simulações das medidas de drenagem urbana sustentável isoladas, foi estabelecido que seriam simulados três grupos de medidas combinadas. Para que esta proposta fosse mais realista economicamente, foi decidido que apenas dois tipos de dispositivos por grupo seriam escolhidos. As combinações foram: pavimentos permeáveis com bacias de retenção, pavimentos permeáveis com dispositivos de biorretenção, e bacias de retenção com dispositivos de biorretenção.

Para a visualização dos resultados desejados, através do software, foi necessário inserir cada dispositivo combinado com o sistema convencional, e então gerar a simulação, conforme ilustrado no diagrama da Figura 28. Foram coletados os dados de vazão em função do tempo nos dois dissipadores, que são os exutórios das duas microbacias contidas no loteamento, para cada combinação de sistemas desejada. Então esses valores em forma de planilha foram copiados para o software Excel, onde foram agrupados em gráficos.

Também, através da ferramenta “Estatísticas” do software, foi obtido o volume total de água que passou pelas tubulações de saída do sistema durante todo o evento da chuva, o que é aproximadamente equivalente ao volume de escoamento superficial.

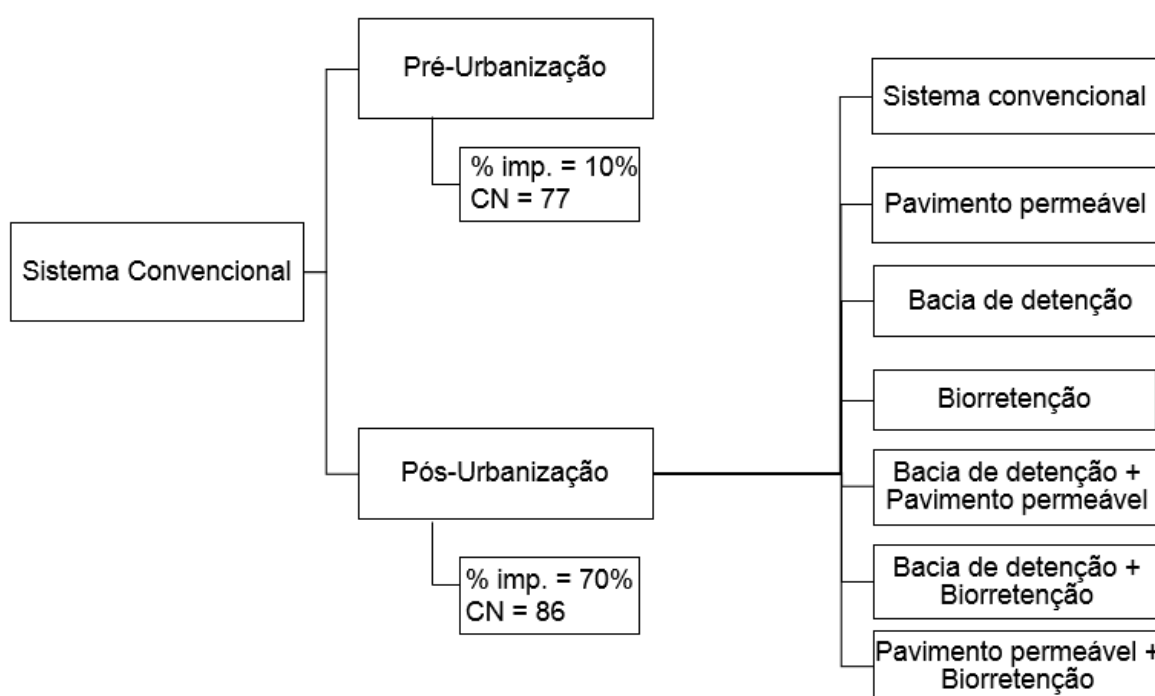


Figura 28 - Diagrama da metodologia e especificação das combinações
Fonte: Autoria própria

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 RESULTADOS DOS PRÉ-DIMENSIONAMENTOS DOS DISPOSITIVOS

4.1.1 Bacias de Detenção

A área de contribuição medida no software AutoCAD para cada bacia de detenção foi de 5,47 ha para a bacia 1 e 5,96 ha para a bacia 2. Pelo desenvolvimento dos cálculos contidos no Apêndice B, a área em planta da bacia de detenção 1 obtida foi de 686,3 m² e da bacia 2, foi de 747,7 m².

Os diâmetros dos orifícios de saída encontrados, calculados no mesmo Apêndice, foram considerados os mesmos para as duas bacias, de 24 cm.

4.1.2 Pavimentos Permeáveis

Para a área de pavimento permeável medida no software AutoCAD, foi considerada a instalação do mesmo em todas as calçadas do loteamento. O valor obtido para esta área foi de 1,16 ha, enquanto a área de contribuição para este sistema é equivalente a 8,15 ha. Através do desenvolvimento dos cálculos que constam no Apêndice C, a profundidade obtida para a camada preenchida com brita é de 1,0m.

4.1.3 Biorretenção

Como resultado da Equação (6), a área superficial do dispositivo de biorretenção calculada foi de 1,66 m². Por arredondamento, foi considerada então, 1,50m² por lote de 360m², que corresponde a 0,42% do total do mesmo. Para lotes com áreas diferentes desta medida, a área do dispositivo foi obtida de acordo com esta proporção, e então, as células de biorretenção foram inseridas no programa em cada área de contribuição.

4.2 HIETOGRAMA DE PROJETO

Para a obtenção da precipitação de projeto a ser inserida no software, foi criado um hietograma de projeto a partir da equação de chuvas intensas de Pato Branco (equação (1)), utilizando o método dos blocos alternados. Adotou-se o tempo de duração da chuva (t) de 40 minutos, em intervalos de 5 minutos.

Seguindo esta metodologia, foi obtida a Tabela 6, e então os valores, em função do tempo, foram adicionados ao projeto no software, como uma série temporal. O hietograma resultante pode ser observado na Figura 29.

Tabela 6 - Cálculo do hietograma pelo Método dos blocos alternados

1	2	3	4	5	6
Tempo (min)	Intensidade da chuva (mm/h)	(Col.1x Col.2)/60 (mm)	Dif. Coluna 3 (mm)	Ordem decrecente col.4 (mm)	Precipitação no intervalo (mm)
5	185,03	15,42	15,42	15,42	2,97
10	147,96	24,66	9,24	9,24	4,08
15	124,71	31,18	6,52	6,52	6,52
20	108,57	36,19	5,01	5,01	15,42
25	96,64	40,27	4,08	4,08	9,24
30	87,41	43,70	3,44	3,44	5,01
35	80,02	46,68	2,97	2,97	3,44
40	73,96	49,30	2,63	2,63	2,63

Fonte: Autoria própria

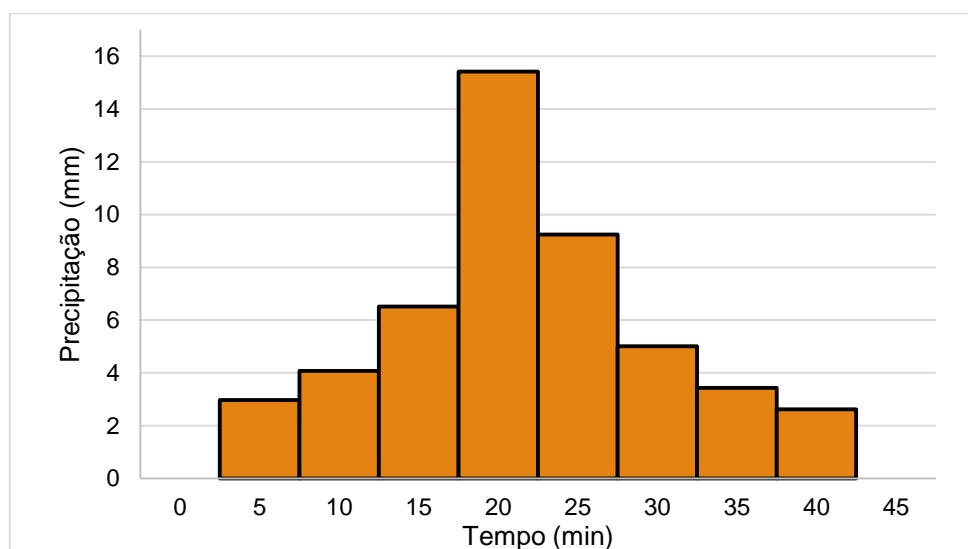


Figura 29 - Hietograma do projeto

Fonte: Autoria própria

4.3 RESULTADOS DA SIMULAÇÃO DO SISTEMA DE DRENAGEM CONVENCIONAL

Após traçada toda a tubulação de drenagem urbana convencional do loteamento e inseridos todos os seus dados, foi gerada a simulação do seu comportamento frente ao evento de chuva adotado.

As tabelas com as vazões em função do tempo desta simulação, bem como das dos itens seguintes, estão dispostas no Apêndice D, na Tabela 9 e Tabela 10.

O gráfico da Figura 30 mostra a comparação desta situação com a que seria a natural, através da vazão em função do tempo no dissipador 1. A Figura 31 ilustra a mesma relação para o dissipador 2.

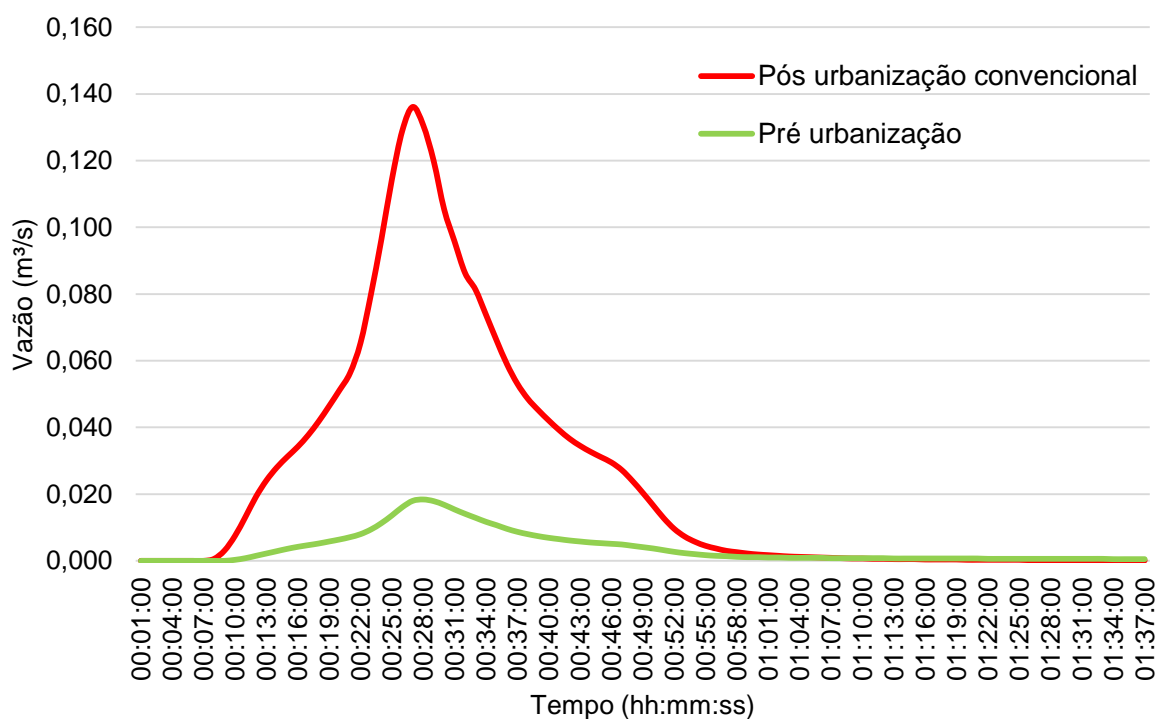


Figura 30 - Vazão no DI1 com sistema convencional e natural
Fonte: Autoria própria

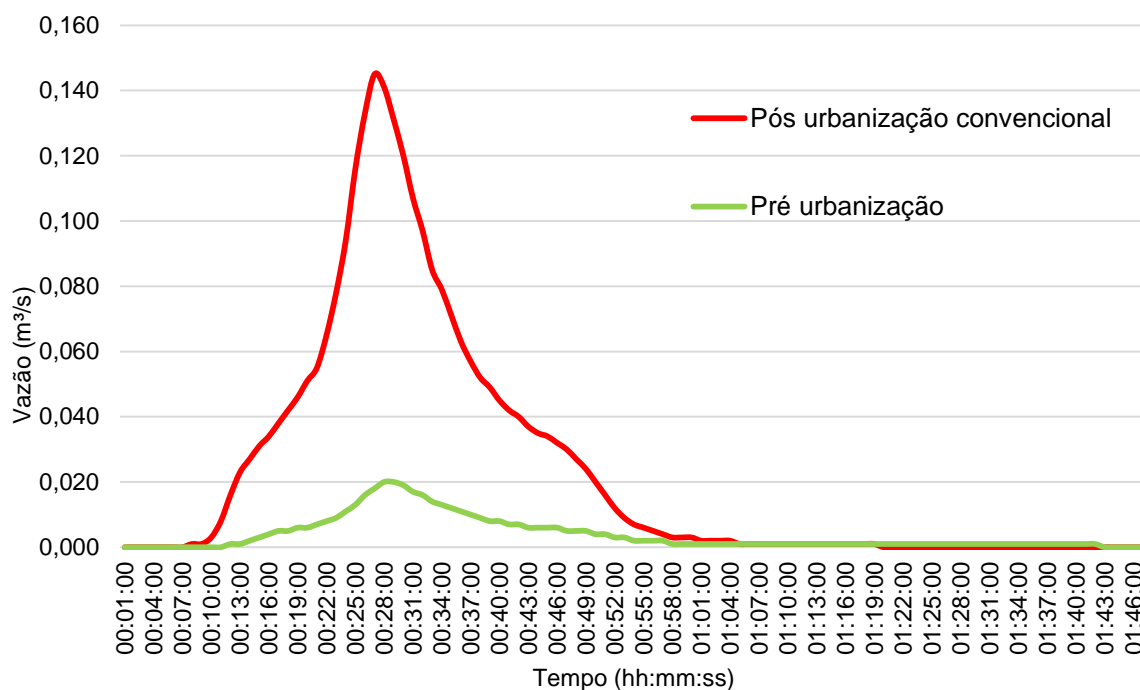


Figura 31 - Vazão no DI2 com sistema convencional e natural
Fonte: Autoria própria

No dissipador 1, o pico de escoamento da situação natural foi de 18 L/s, enquanto que na situação pós-urbanização, foi de 136 L/s. Já no dissipador 2, estes valores foram, respectivamente, de 20 L/s e 145 L/s. Estes aumentos foram de 655,6% no dissipador 1 e 625% no dissipador 2. Pode-se concluir, por consequência, e observando o gráfico, que o volume escoado, que corresponde à área abaixo da curva, foi visivelmente maior na situação de urbanização.

Quanto ao momento dos picos, no dissipador 1 foi aos 28 minutos na situação natural, e aos 27 na urbanizada, enquanto que no dissipador, esses valores foram, respectivamente, de 29 e 27 minutos. A diferença não é considerável visto que o software não leva em consideração o fato de haver vegetação ou não nas áreas de contribuição para atenuar a velocidade do escoamento superficial.

O volume total escoado nos dois trechos finais das tubulações foi de 47,11 m³ na situação natural, e 294,63 m³ na urbanizada, o que representa um aumento de 525,4%.

Os dados gerados, portanto, comprovaram a diferença que seria causada pela impermeabilização do solo devida à urbanização no escoamento superficial.

4.4 RESULTADOS DAS SIMULAÇÕES DOS DISPOSITIVOS

4.4.1 Bacias de retenção

Como resultado da simulação do sistema convencional combinado com as duas bacias de retenção, obtiveram-se os gráficos das vazões em função do tempo nos dissipadores, comparando esta situação com a de somente o sistema convencional.

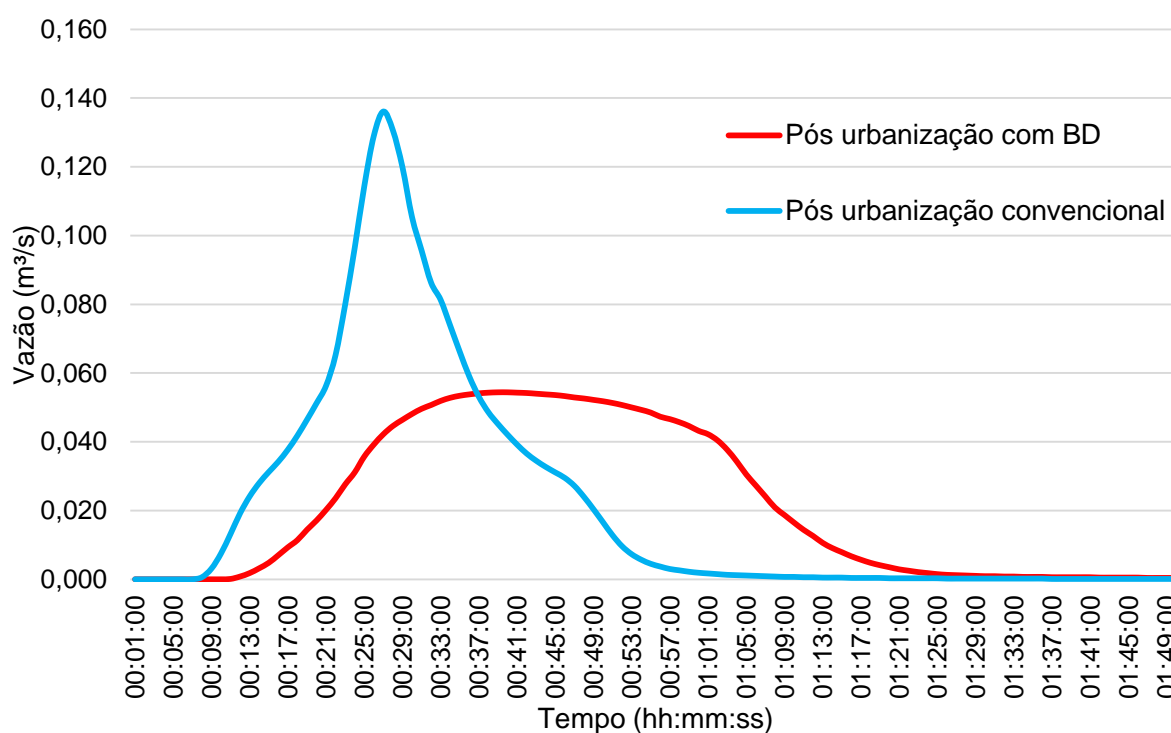


Figura 32 - Vazão no nó DI1 com as bacias de retenção
Fonte: Autoria própria.

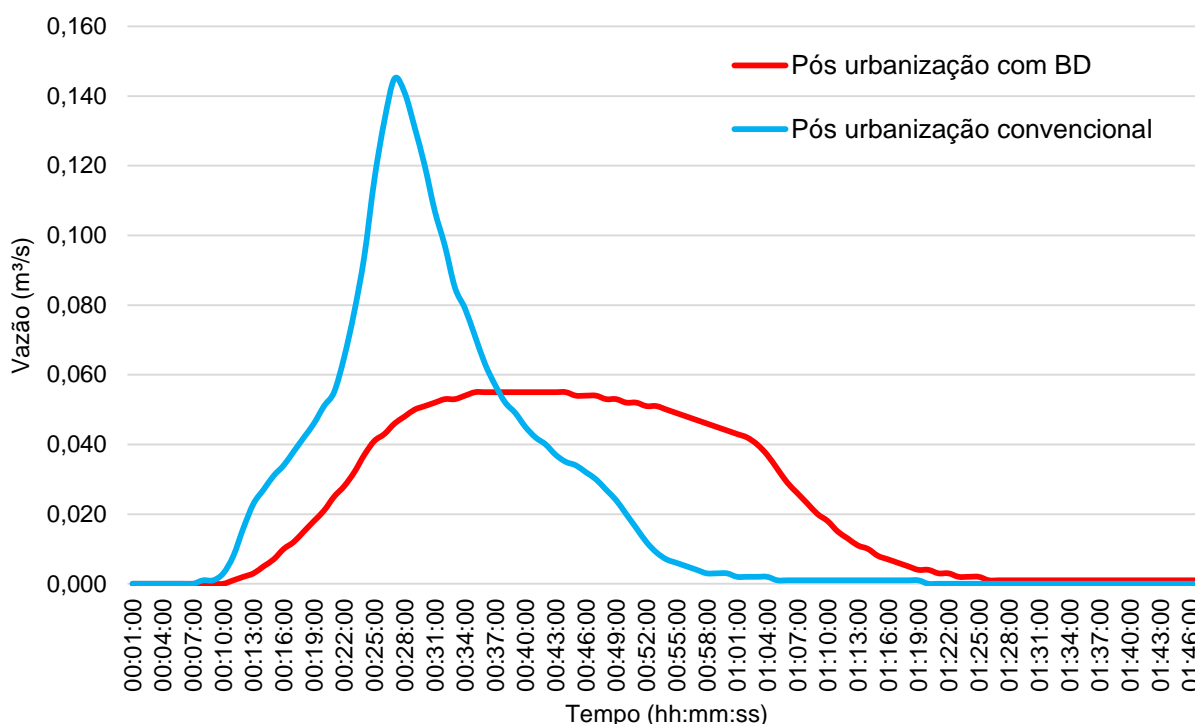


Figura 33 - Vazão no nó DI2 com as bacias de detenção
Fonte: Autoria própria.

Em ambos os gráficos, tanto da Figura 32 quanto da Figura 33, pode ser observada a diminuição do pico de vazão provocada pela inserção das bacias no sistema. Esta redução foi de 60,3% no dissipador 1, e de 62,1% no dissipador 2.

As curvas dos gráficos do sistema com bacias de detenção (Figura 32 e Figura 33) se comportaram aproximadamente como o esperado, com a formação de um patamar aproximadamente constante nas curvas das vazões com as bacias, sendo este abaixo da vazão de pico do convencional, por consequência da regularização da vazão provocada pelas mesmas.

Como esperado, o escoamento demorou mais para cessar nesta situação, devido à detenção, propriamente dita, da água escoada na bacia. É visível nos gráficos o atraso do escoamento, que, no dissipador 1, para o sistema convencional, chegou a 0 em 1 hora e 16 minutos do início da simulação, e, para o sistema com bacia, em 1 hora e 47 minutos. No dissipador 2, esses mesmos tempos foram, respectivamente, de 1 hora e 20 minutos, e 1 hora e 53 minutos.

A vazão máxima com bacia no dissipador 1 foi de 54 L/s, e no dissipador 2, de 55 L/s. No entanto, o resultado encontrado no Apêndice B para a vazão nos orifícios de saída das bacias foi de 148 L/s para o dissipador 1, e 161 L/s para o dissipador 2. Esta diferença pode ser devida ao fato de que estes últimos valores foram calculados

supondo as bacias cheias, ou seja, com 1,5m de profundidade, e na realidade esta profundidade nunca é alcançada. Esta observação da simulação indica que as bacias estão superdimensionadas pelo método proposto.

4.4.2 Pavimento Permeável

Os resultados obtidos a partir da simulação do sistema convencional combinado com os sistemas de pavimentos permeáveis utilizados nas calçadas do loteamento podem ser observados na Figura 34, para o dissipador 1, e na Figura 35, para o dissipador 2.

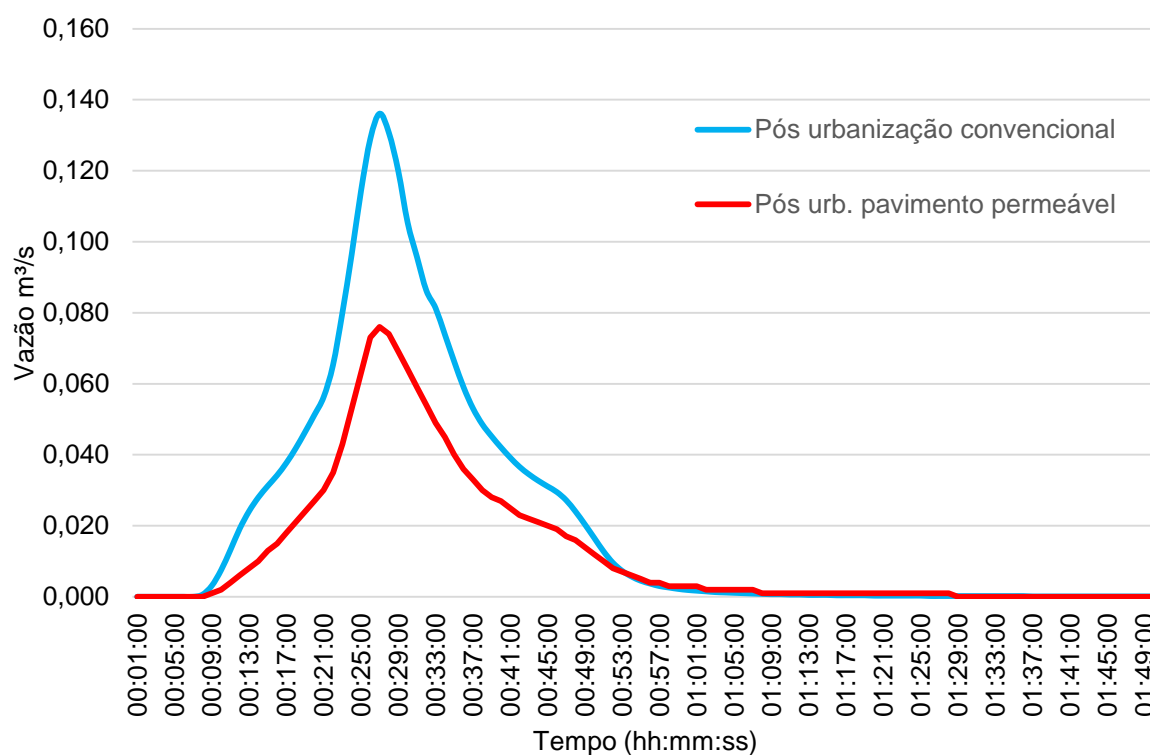


Figura 34 - Vazão no nó DI1 com pavimento permeável

Fonte: Autoria própria

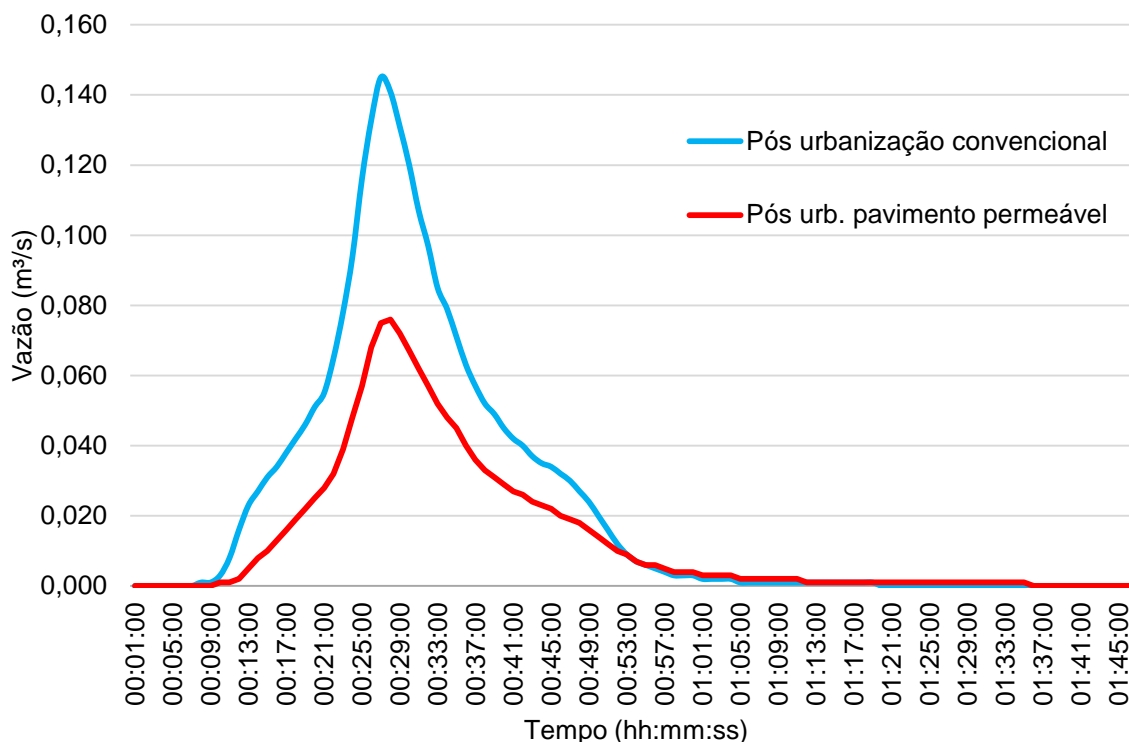


Figura 35 - Vazão no nó DI2 com pavimento permeável

Fonte: Autoria própria

A vazão máxima no dissipador 1 foi de 136 L/s aos 27 minutos na situação com sistema de drenagem convencional, e de 76 L/s também aos 27 minutos com a instalação do sistema sustentável, configurando redução de 44% do pico. Já a vazão do dissipador 2 na situação convencional foi de 145 L/s aos 28 minutos e 76 L/s aos 28 minutos com a implantação, caracterizando uma redução em 47,6%.

Percebe-se, ainda, uma grande redução no volume total escoado superficialmente e isso se deve ao fato de que boa parte do volume precipitado será infiltrado pelo sistema (Tabela 16 – Apêndice F).

Comparando os resultados obtidos com estudos similares encontrados na literatura, conclui-se que os mesmos são relativamente satisfatórios. O estudo, realizado na Carolina do Norte, Estados Unidos, ensaiou quatro tipos diferentes de pavimentos permeáveis instalados em um estacionamento de automóveis, cada tipo compreendendo uma área de pouco mais de 100 m². Os resultados foram comparados com os resultados do tipo pavers de concreto interligados de 8 cm de espessura, com 8,5% de área permeável e camada de brita com 10 cm de espessura. Ainda, neste sistema foram utilizados drenos (COLLINS; HUNT; HATHAWAY, 2008).

Para este sistema adotado na Carolina do Norte, a média de redução na vazão de pico atingiu aproximadamente 60%. Esta diferença pode ser associada às

diferenças de dimensões adotadas, uma vez que neste trabalho foi simulada uma situação de um pavimento com uma área superficial significativamente maior (11600 m²). Ainda, não foram considerados drenos, o que reduz a capacidade de captação da água.

No entanto, a redução no pico de escoamento é considerável, tendo sido alcançado o objetivo principal da pesquisa.

4.4.3 Biorretenção

Após a simulação do sistema com os dispositivos, foram obtidos os gráficos da vazão por tempo no dissipador 2 (Figura 37) e no dissipador 1 (Figura 36), comparando a situação pós-urbanização com sistema de drenagem convencional e a convencional com as células de biorretenção.

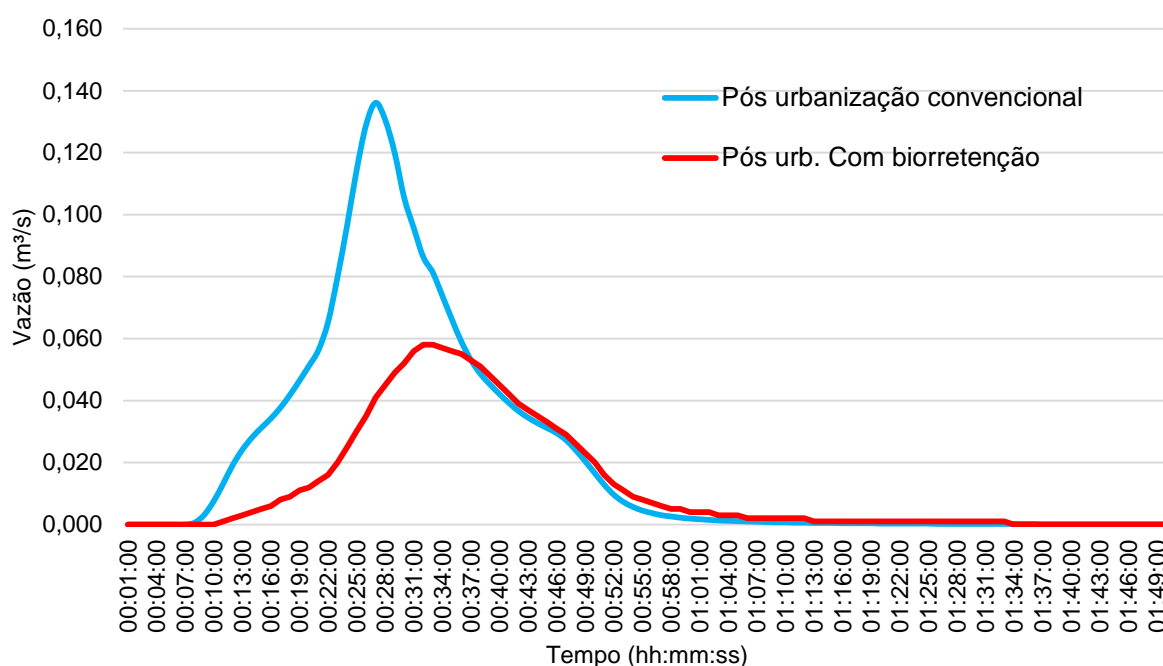


Figura 36 - Vazão no nó DI1 com biorretenção
Fonte: Autoria própria

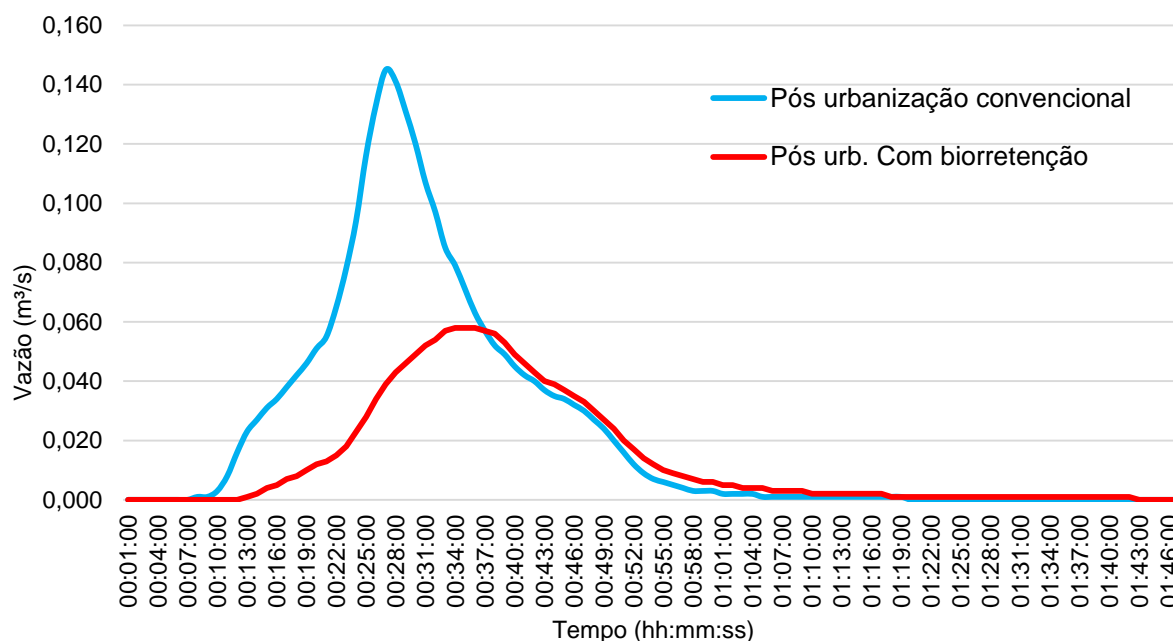


Figura 37 - Vazão no nó DI2 com biorretenção
Fonte: Autoria própria

No dissipador 1, com biorretenção, o pico foi de 58 L/s, aos 33 minutos do início da chuva, sendo que na convencional, o pico foi de 136 L/s, aos 27 minutos, o que configura uma diminuição do valor em 57,3%. Observa-se diminuição do pico de vazão e pode-se perceber pelo formato do gráfico atraso do escoamento superficial na situação com os dispositivos implantados.

No dissipador 2, o pico com biorretenção foi de 58 L/s aos 35 minutos, e na situação convencional, de 145 L/s aos 27 minutos, configurando redução de 60,0% deste valor com o uso de biorretenções. As mesmas observações feitas sobre a simulação no dissipador 1 se aplicam a este.

As curvas dos gráficos resultantes da biorretenção (Figura 36 e Figura 37) mostram que, diferentemente dos pavimentos permeáveis, ocorre retenção do escoamento superficial. Isto pode ser percebido pelo atraso do escoamento, cuja vazão de pico acontece cinco minutos mais tarde que o convencional no dissipador 1, e oito minutos mais tarde no dissipador 2.

O uso dos dispositivos para diminuição do pico de escoamento se mostrou eficiente, visto que houve redução em torno de 60% em relação ao sistema convencional. Apesar de, neste aspecto, o sistema com biorretenção ser mais eficaz que o com pavimentos permeáveis (em torno de 45%), analisando o volume total escoado (Tabela 16 – Apêndice F), os dois são aproximadamente iguais. Isto é compreensível, visto que ambos são dispositivos de infiltração, mas o de biorretenção

também atua detendo a água.

4.5 RESULTADOS DAS SIMULAÇÕES DOS GRUPOS DE DISPOSITIVOS

Foram gerados gráficos comparando, nos dissipadores 1 e 2, a vazão para a situação natural de pré-urbanização, a com sistema de drenagem convencional, e com cada combinação. Todas as situações foram simuladas com as mesmas dimensões e parâmetros de quando foram inseridas isoladamente, o que tem por consequência que as curvas de pré-urbanização e sistema convencional são as mesmas para todos os gráficos do item 4.5.

As simulações dos grupos de medidas, bem como as da situação pré-urbanização e pós-urbanização com sistema convencional, tiveram seus momentos e vazões de pico elencadas na Tabela 14 e Tabela 15 do Apêndice F, respectivamente, para os dissipadores 1 e 2. No mesmo Apêndice, na Tabela 16, estão os volumes totais escoados para as duas sub-bacias.

4.5.1 Pavimentos Permeáveis com Bacias de Detenção

Inserindo a combinação dos pavimentos permeáveis com as bacias de retenção no sistema de drenagem convencional, como explanado no item 4.4, obtiveram-se os gráficos da Figura 38 e Figura 39.

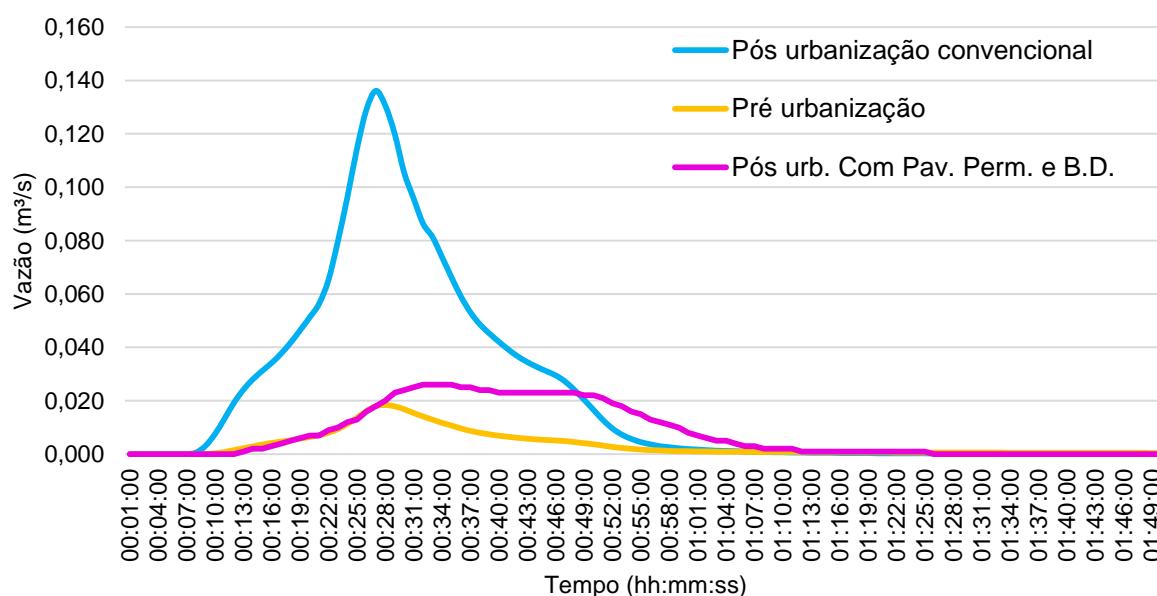


Figura 38 - Combinação pavimentos permeáveis e bacias de retenção no DI1

Fonte: Autoria própria.

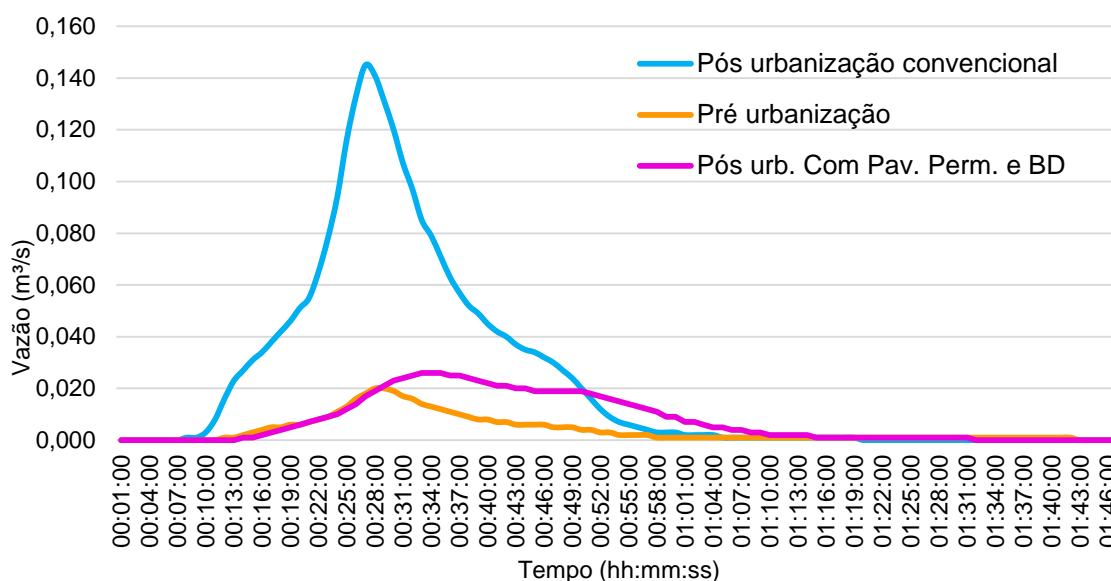


Figura 39 - Combinação pavimentos permeáveis e bacias de retenção no DI2

Fonte: Autoria própria.

No dissipador 1, o pico de vazão da combinação foi de 26 L/s aos 34 minutos, que configurou um aumento de 44,4% em relação ao natural, de 18 L/s, aos 28 minutos. Já o sistema convencional foi 655,6% maior que o do natural.

No dissipador 2, o aumento do pico em relação ao da pré-urbanização foi de 30% para a combinação de medidas, e de 625% para o sistema de drenagem convencional.

4.5.2 Bacias de Detenção com Dispositivos de Biorretenção

Os gráficos resultantes da simulação da combinação das bacias de retenção com os dispositivos de biorretenção constam na Figura 40 e Figura 41.

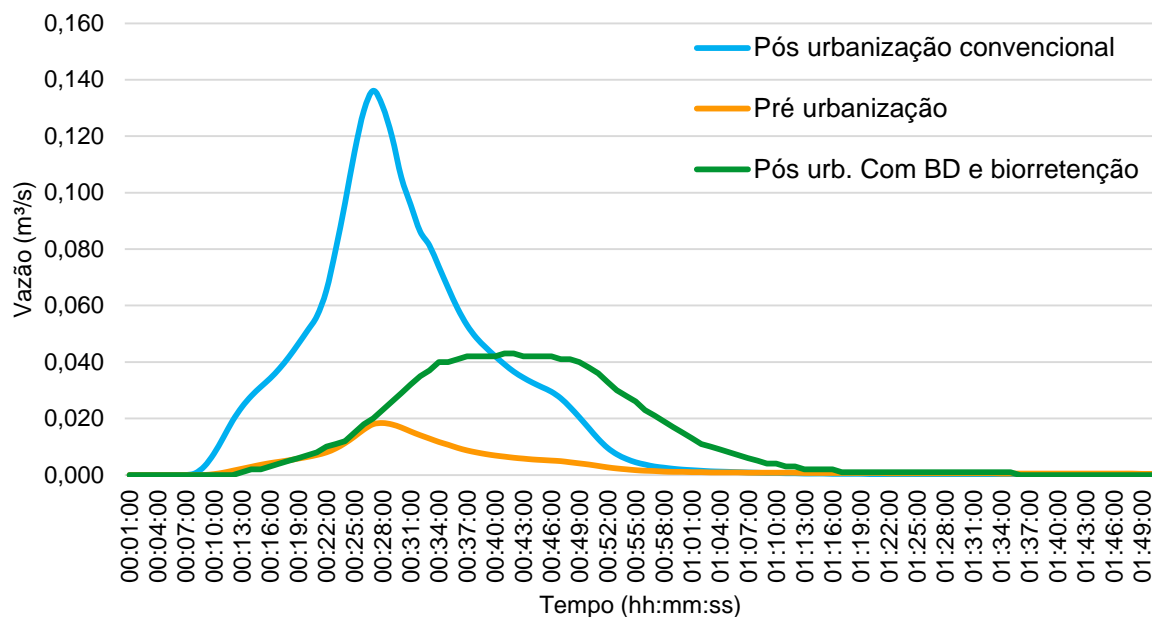


Figura 40 - Combinação de bacias de detenção e dispositivos de biorretenção no DI1
Fonte: Autoria própria.

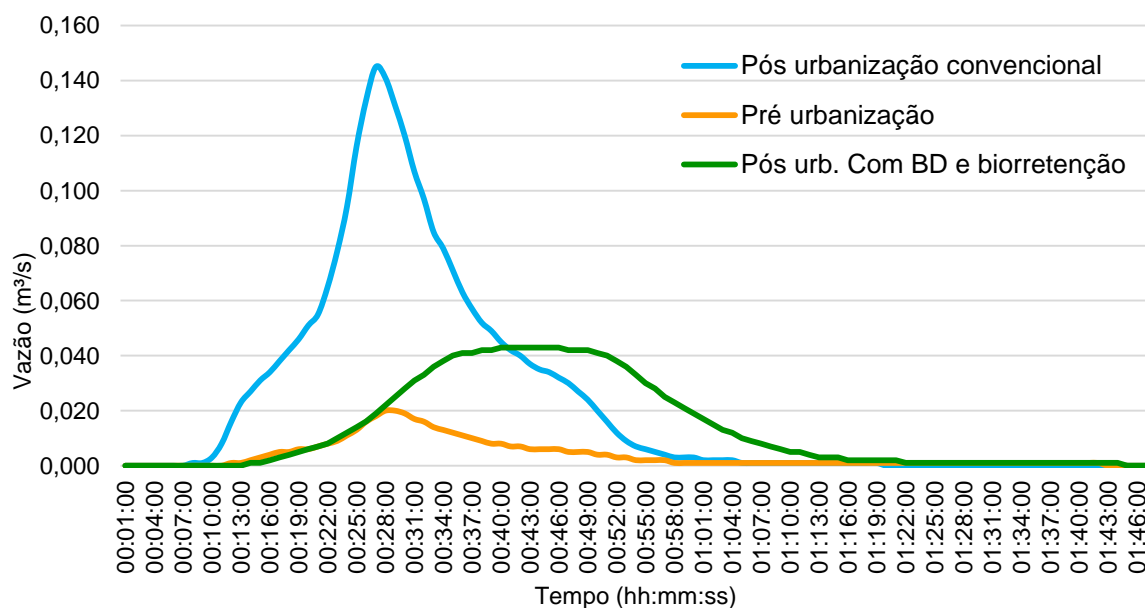


Figura 41 - Combinação de bacias de detenção e dispositivos de biorretenção no DI2
Fonte: Autoria própria.

O resultado do pico de vazão para a combinação no dissipador 1 foi de 43 L/s, aos 42 minutos, e no dissipador 2, também 43 L/s, aos 44 minutos. Isso resultou em um aumento em relação ao natural de 138,9% para o primeiro, e 115,0% para o segundo.

4.5.3 Pavimentos Permeáveis com Dispositivos de Biorretenção

A simulação da combinação dos pavimentos permeáveis com os dispositivos de biorretenção resultou nos gráficos que constam na Figura 42 e Figura 43.

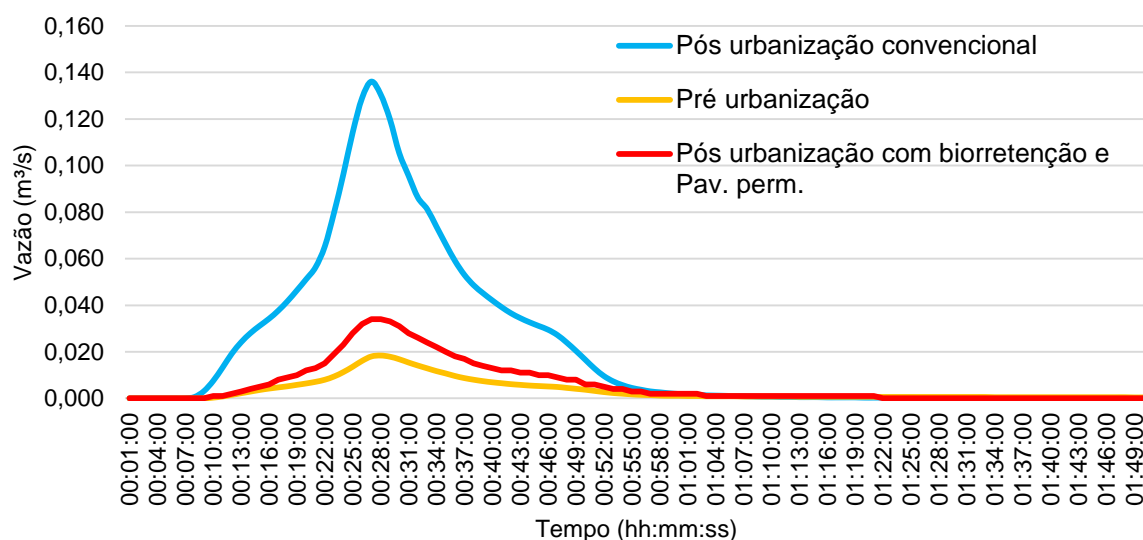


Figura 42 - Combinação de pavimentos permeáveis e dispositivos de biorretenção no DI1
Fonte: Autoria própria.

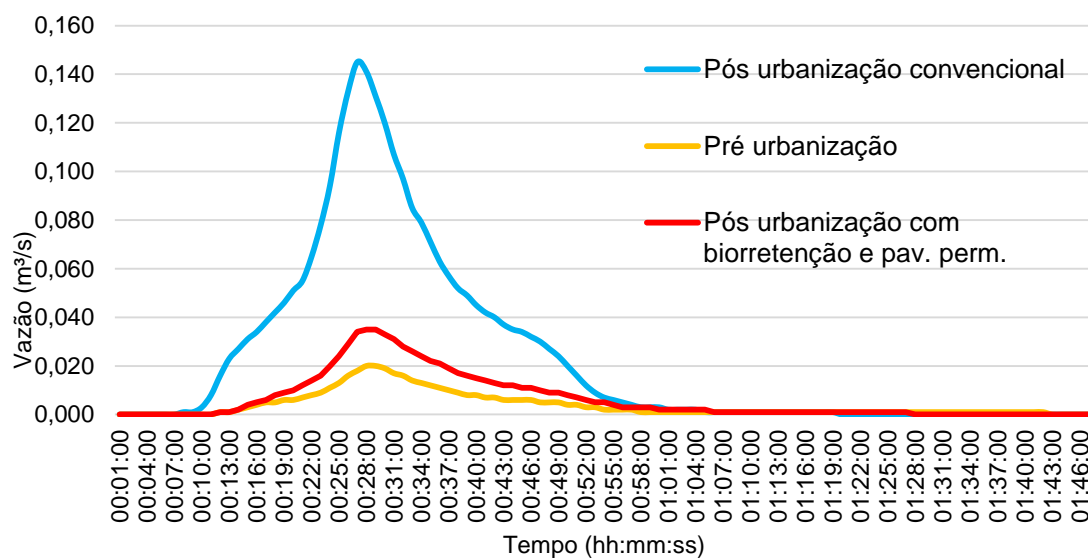


Figura 43 - Combinação de pavimentos permeáveis e dispositivos de biorretenção no DI2
Fonte: Autoria própria.

O pico de vazão encontrado para a combinação no dissipador 1 foi de 34 L/s; e no dissipador 2, de 35 L/s, que resultam em um aumento em relação ao de pré-urbanização de, respectivamente, 88,9% e 75,0%.

4.6 HIERARQUIZAÇÃO DAS MEDIDAS

Observa-se, em todas as simulações, grande semelhança entre os resultados nos dois dissipadores, o que é compreensível, visto que a maioria dos parâmetros inseridos no software são os mesmos para os dois. A principal diferença se dá pelo traçado da tubulação de drenagem convencional, que possui declividades diferentes a cada trecho, o que influencia na vazão que escoam nas mesmas.

Os valores gerados pelo software de volumes escoados no final das tubulações constam na Tabela 16.

A partir da Tabela 16, da Tabela 9 e da Tabela 10, foi possível hierarquizar as medidas, cujo resultado é a Tabela 7. Nesta, estão classificadas em 1, 2, 3, 4, 5 ou 6 de acordo com quão eficaz a medida foi em relação às outras para cada critério, sendo 1 mais eficaz e 6 menos eficaz. Ressalta-se que essa classificação não leva em conta a proporção em que uma foi mais eficiente que a outra, apenas a ordem de acordo com a eficiência.

Tabela 7 - Hierarquização das medidas

	Diminuição do valor de pico	Diminuição do volume total escoado	Atraso do pico
Biorretenção	5	4	4
Bacia de detenção	4	6	2
Pavimento permeável	6	5	6
Biorretenção e Bacia de detenção	3	3	1
Pavimento permeável e bacia de detenção	1	2	3
Biorretenção e pavimento permeável	2	1	5

Fonte: Autoria própria

Observando a Tabela 7, o grupo de medidas mais eficiente para o atraso do pico de escoamento é o de biorretenção com bacias de detenção, porém, é o menos eficaz entre as três combinações na diminuição do valor da vazão de pico. Nesse último aspecto, o melhor grupo é o de pavimentos permeáveis com bacias de detenção. Isso pode ser devido à combinação de um dispositivo de infiltração total

(pavimento permeável) com um de apenas detenção (bacia de detenção), o que alia os dois benefícios mais igualmente do que a combinação de qualquer um dos dois com a biorretenção, que é um dispositivo ao mesmo tempo de infiltração e detenção.

No entanto, ao se observarem os resultados contidos na Tabela 16, percebe-se que o grupo que gera menor volume total de escoamento superficial é o de biorretenção e pavimentos permeáveis. Este é um resultado coerente e esperado, visto que ambos os dispositivos são de infiltração, o que diminui o volume escoado, ao contrário da bacia de detenção. Esta divergência demonstra que o sistema com menor pico de escoamento nem sempre é o com menor volume total escoado, apesar de estas características estarem relacionadas.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Os Sistemas de Drenagem Urbana Sustentável fazem parte de uma abordagem que propõe a aproximação do ciclo hidrológico de uma bacia hidrográfica à sua situação de pré-desenvolvimento. Um dos benefícios proporcionados com o uso destas medidas é a redução do volume do escoamento superficial gerado após um evento de chuva, que foi o foco de estudo deste trabalho.

Foram simulados, no software EPA SWMM, a situação pré e pós-urbanização com o sistema convencional projetado e, ainda, três diferentes tipos de dispositivos de SuDS e as combinações dos mesmos, com objetivo de avaliar a diminuição da vazão máxima escoada no sistema.

A simulação gerada para a situação urbanizada e apenas com o sistema de drenagem convencional provou aumento significativo do volume de escoamento superficial comparado com o natural, de 525,4%. A vazão de pico também foi de aumento notável, chegando a superar em mais de 6 vezes a da situação de pré-urbanização. Isso contribui para a conclusão de que há necessidade da implantação de medidas que mitiguem este impacto.

Para que fossem inseridos posteriormente no software, foram pré-dimensionados os dispositivos sustentáveis por diferentes métodos, sendo que para pavimentos permeáveis e bacias de retenção, observou-se certo superdimensionamento. Após uma primeira análise da simulação dos pavimentos permeáveis, pôde-se reduzir algumas dimensões dos mesmos. Isto foi feito até que se obtivesse uma situação que garantiria um bom desempenho do sistema mesmo utilizando dispositivos menores.

Com base na análise dos resultados obtidos das simulações com os pavimentos permeáveis, células de biorretenção e bacias de retenção separadamente, observou-se que a implantação destes sistemas validou o resultado esperado, que era a diminuição do escoamento superficial e atraso do pico no caso das bacias e da biorretenção.

Também, na etapa das combinações de técnicas, foram obtidos resultados diferentes entre si para cada uma, no sentido de redução do pico de escoamento e do volume total escoado, e do atraso no tempo do pico.

Os valores obtidos foram significativos, podendo-se alcançar uma redução no

pico de escoamento, por exemplo, de até 82% em relação à situação de sistema convencional de drenagem. Neste caso, onde se simulou a combinação de pavimentos permeáveis com bacia de detenção, cita-se ainda o atraso em 6 minutos do momento de pico do escoamento. Contudo, a garantia do menor volume escoado foi possibilitada pela combinação de dispositivos de biorretenção com pavimentos permeáveis, por se tratarem de duas técnicas que viabilizam a infiltração da água captada.

Portanto, conclui-se que a adoção dos softwares de simulação concomitantemente com os métodos de dimensionamento é uma ferramenta que pode evitar custos desnecessários com superdimensionamentos de medidas de drenagem sustentável, além de possibilitar a avaliação da real necessidade das dimensões da tubulação convencional, que com tubos de diâmetros menores, seria menos onerosa.

Como limitações deste estudo, pode ser citado o tempo, que impossibilitou a realização de ensaios no local em estudo. Tais ensaios poderiam ter fornecido a profundidade do lençol freático e o coeficiente de permeabilidade do solo com precisão, nos pontos necessários do local, tornando os resultados mais acurados.

Ainda, ressalta-se que houve certa dificuldade na obtenção de referências na literatura para o dimensionamento dos dispositivos. Também, esta deficiência em referências apropriadas foi devida ao fato de a drenagem sustentável não ser uma prática comum no Brasil, e, portanto, haver poucas referências brasileiras no assunto.

No entanto, apesar das limitações, o objetivo geral, que foi a avaliação da redução do escoamento superficial em uma região com a simulação da implantação de SuDS, foi atingido e, com isso, reforçada a eficiência deste conjunto de práticas quanto a benefícios ao ciclo hidrológico urbano.

5.1 TRABALHOS FUTUROS

Sugere-se, para trabalhos futuros:

- Implantação de um ou mais dispositivos pré-dimensionados neste estudo na região estudada e acompanhamento da sua influência no escoamento superficial;
- Realização de ensaios de condutividade hidráulica do solo e/ou de

determinação da profundidade do lençol freático no local do estudo e posterior desenvolvimento semelhante a este trabalho, realizando a comparação dos resultados;

- Simulação ou implantação de outros dispositivos de drenagem urbana sustentável no local do estudo e comparação com os resultados deste trabalho.

REFERÊNCIAS

ACIOLI, L. A. **Estudo experimental de pavimentos permeáveis para o controle do escoamento superficial na fonte**. 2005. 145 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Instituto de Pesquisas Hidráulicas, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2005.

AUSTRALIA. Introduction to urban stormwater management in australia. **Urban Stormwater initiative of the Living Cities Program 2002**, 2002.

BERTONI, J. C.; TUCCI, C. E. M. Precipitação. In: TUCCI, C. E. M. (Ed.). **Hidrologia: Ciencia e aplicação**. 4. ed. Porto Alegre: UFRGS, 2009. p. 177–241.

BRUNDTLAND, G. H. **Our Common Future: Report of the World Commission on Environment and Development**. [s.l.] 1987. Relatório.

BUTLER, D.; PARKINSON, J. Towards Sustainable Urban Drainage. **Water Science and Technology**, v. 35, n. 9, p. 53–63, 1997.

CHENG, M. S.; COFFMAN, L. S.; CLAR, M. L. **Low-impact development hydrologic analysisUrban Drainage Modeling**. [s.l.: s.n.]. Disponível em: <<http://www.scopus.com/inward/record.url?eid=2-s2.0-0035769927&partnerID=40&md5=626b5e593d092cc28beeff4bc31b4348>>.

CHOW, V. TE. **Open Channel Hydraulics**. New York: McGraw-Hill Book Company, 1959.

COLLINS, K. A.; HUNT, W. F.; HATHAWAY, J. M. Hydrologic Comparison of Four Types of Permeable Pavement and Standard Asphalt in Eastern North Carolina. **Journal of Hydrologic Engineering**, v. 13, n. 12, 2008.

COLOMBELLI, K.; MENDES, R. Determinação dos parâmetros da equação de chuvas intensas para o município de Videira, SC. **Unoesc & Ciência - ACET**, v. 4, n.2, p. 169–180, 2013.

DIETZ, M. E. Low impact development practices: A review of current research and recommendations for future directions. **Water, Air, and Soil Pollution**, v. 186, n. 1, p. 351–363, 2007.

DIETZ, M. E.; CLAUSEN, J. C. Stormwater runoff and export changes with development in a traditional and low impact subdivision. **Journal of Environmental Management**, v. 87, n. 4, p. 560–566, 2007.

DINGMAN, S. L. **Physycal Hydrology.pdf**. 3ª ed. Long Grove, IL: Waveland Press, Inc., 2014.

FASSMAN, E. A.; BLACKBOURN, S. Permeable Pavement Performance over 3 Years of Monitoring. **ASCE**, v. 367, n. 2006, p. 15, 2010.

FLETCHER, T. D. et al. SUDS, LID, BMPs, WSUD and more – The evolution and application of terminology surrounding urban drainage. **Urban Water Journal**, v. 12, n. 7, p. 525–542, 2015.

FRENI, G.; MANNINA, G.; VIVIANI, G. Urban Storm-Water Quality Management: Centralized versus Source Control. **Journal of Water Resources Planning and Management**, v. 136, n. 2, p. 268–278, 2010.

GARCEZ, L. N.; ALVAREZ, G. A. **Hidrologia**. 2. ed. São Paulo: Edgard Blücher Ltda, 1988.

GOLDENFUM, J. A. et al. Challenges for the Sustainable Urban Stormwater Management in Developing Countries: From basic education to technical and institutional issues. **NOVATECH**, p. 1–8, 2007.

GRIBBIN, J. E. **Introdução a Hidráulica, Hidrologia e Gestão de Águas Pluviais**. 4. ed. São Paulo: Cengage Learning, 2016.

GUPTA, K.; SAUL, A. J. Specific relationships for the first flush load in combined sewer flows. **Elsevier Science**, v. 30, n. 5, p. 1244–1252, 1996.

MATA-LIMA, H. et al. Comportamento hidrológico de bacias hidrográficas: integração de métodos e aplicação a um estudo de caso. **Rem: Revista Escola de Minas**, v. 60, n. 3, p. 525–536, 2007.

MCCUEN, R. H. **Hydrologic Analysis and Design**. 2ª ed. Ann Arbor, Michigan: Prentice Hall, 1998.

NIEMCZYNOWICZ, J. Urban hydrology and water management - present and future challenges. **Urban Water**, v. 1, p. 1–14, 1999.

PATO BRANCO. Mapa de zoneamento. Disponível em: <http://www.patobranco.pr.gov.br/wp-content/uploads/2017/05/Mapa-de-Zoneamento_04.2017.pdf>. Acesso em: 15 ago. 2017.

PATO BRANCO. Lei complementar nº 46, de 26 de maio de 2011. Regulamenta o Uso, Ocupação e Parcelamento do Solo no Município de Pato Branco, em adequação à Lei Complementar nº 28, de 27 de junho de 2008. Disponível em: <<https://leismunicipais.com.br/a/pr/p/pato-branco/lei-complementar/2011/4/46/lei-complementar-n-46-2011-regulamenta-o-uso-ocupacao-e-parcelamento-do-solo-no-municipio-de-pato-branco-em-adequacao-a-lei-complementar-n-28-de-27-de-junho-de-2008>>. Acesso em: 20 ago. 2017.

PINTO, N. L. S. et al. **Hidrologia Básica**. [s.l: s.n.].

POLETO, C. SUDS (Sustainable Urban Drainage Systems): Uma Contextualização Histórica. **Revista Thema**, v. 8, n. 1, 2011.

PORTO, R. et al. Drenagem urbana. In: TUCCI, C. E. M. (Ed.). . **Hidrologia: Ciência e aplicação**. 4. ed. Porto Alegre: UFRGS, 2009. p. 805–847.

PORTO, R. DE M. Metodologia de cálculo para o Planejamento de Bacias de Detenção. **RBRH - Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 8, n. 3, p. 135–149, set. 2003.

PORTO, R. DE M. **Hidráulica Básica**. 4ª ed. São Carlos: Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, 2006.

PRINCE GEORGE'S COUNTY. **Bioretention Manual - Design Manual for Use of Bioretention in Stormwater Management**. Prince George's County: Department of Environmental Resources, 2007.

ROSA, Altair. **Bioretention for diffuse pollution control in SUDS using experimental-adaptive approaches of ecohydrology**. 2016. 109 f. Tese (Doutorado em Engenharia Hidráulica e Sanitarista) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2016.

SHUSTER, W. D. et al. Impacts of impervious surface on watershed hydrology: A review. **Urban Water Journal**, v. 2, n. 4, p. 263–275, 2005.

SILVEIRA, A. L. L. Pré-dimensionamento hidrológico de pavimentos permeáveis e trincheiras de infiltração. **Simpósio ABRH 2003 Curitiba/PR**, 2003.

SILVEIRA, A. L. L. Ciclo hidrológico e bacia hidrográfica. In: TUCCI, C. E. M. (Ed.). . **Hidrologia: Ciência e aplicação**. 4. ed. Porto Alegre: UFRGS, 2009. p. 35–51.

SILVEIRA, A. L. L.; GOLDENFUM, J. A. Metodologia Generalizada para Pré-Dimensionamento de Dispositivos de Controle Pluvial na Fonte. **RBRH - Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 12, n. 2, p. 157–168, 2007.

SOUZA, C. F. **Mecanismos técnico-institucionais para a sustentabilidade da drenagem urbana**. [s.l.] Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2005.

SUDERHSA. **Manual de Drenagem Urbana: Região Metropolitana de Curitiba/PR**. Curitiba: SUDERHSA - Superintendência de Desenvolvimento de Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental, 2002.

TABALIPA, N. L. **Estudo da estabilidade de vertentes da Bacia do Rio Ligeiro, Pato Branco, Paraná**. [s.l.] Universidade Federal do Paraná, 2008.

TSUTIYA, M. T.; ALEM SOBRINHO, P. **Coleta e transporte de esgoto sanitário**. 2ª ed. São Paulo: Department de Engenharia Hidráulica e Sanitária da Escola Politécnica da Universidade da São Paulo, 2000.

TUCCI, C. E. M. Águas urbanas. In: TUCCI, C. E. M.; BERTONI, J. C. (Eds.). . **Inundações urbanas na América do Sul**. 1ª ed. Porto Alegre: Associação Brasileira de Recursos Hídricos, 2003a. p. 156.

TUCCI, C. E. M. Inundações e drenagem urbana. In: TUCCI, C. E. M.; BERTONI, J. C. (Eds.). . **Inundações urbanas na América do Sul**. 1ª ed. Porto Alegre: Associação Brasileira de Recursos Hídricos, 2003b. p. 156.

TUCCI, C. E. M. Escoamento superficial. In: TUCCI, C. E. M. (Ed.). . **Hidrologia: Ciência e aplicação**. 4. ed. Porto Alegre: UFRGS, 2009a. p. 391–441.

TUCCI, C. E. M. Vazão máxima e hidrograma de projeto. In: TUCCI, C. E. M. (Ed.). . **Hidrologia: ciência e aplicação**. 4. ed. Porto Alegre: UFRGS, 2009b. p. 527–572.

TUCCI, C. E. M. Integrated urban water management in the humid tropics. In: PARKINSON, J. N.; GOLDENFUM, J. A.; TUCCI, C. E. M. (Eds.). . **Integrated Urban Water Management: Humid Tropics**. Paris: UNESCO; Taylor and Francis The Netherlands, 2010. p. 24–46.

TUCCI, C. E. M.; CLARKE, R. Impactos das mudanças da cobertura vegetal no

escoamento: revisão. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 2, n. 1, p. 135–152, 1997.

WONG, T. H. F. Water Sensitive Urban Design - the Journey Thus Far Actions Towards Sustainable Outcomes. n. April 2006, 2007.

WOODS-BALLARD, B. et al. **The SuDS manual**. 1. ed. Londres: CIRIA, 2007. v. 44

WOODS-BALLARD, B. et al. **The SUDS manual**. Londres: CIRIA, 2015.

WOODWARD, D. E.; HOEFT, C. C. Part 630 - Hydrology. In: **National Engineering Handbook**. [s.l.] United States Department of Agriculture, Natural Resources Conservation Service, 2010.

ZHOU, Q. A Review of Sustainable Urban Drainage Systems Considering the Climate Change and Urbanization Impacts. **Water**, v. 6, n. 4, p. 976–992, 2014.

APÊNDICE A – OBTENÇÃO DA EQUAÇÃO DE V_{MAX}

Inicialmente, são definidas as variáveis de massa (função do tempo):

H_E = lâmina d'água de entrada acumulada rebatida sobre a área em planta;

H_S = lâmina d'água de saída acumulada, também rebatida sobre a área em planta.

A expressão de H_E é dada pela equação (7):

$$H_E = \beta \frac{a T^b}{t + c} \cdot \frac{t}{60} \quad (7)$$

Sendo que H_E é dado em mm, β é produto do coeficiente de escoamento pela razão entre a área contribuinte e a área do dispositivo, T é o período de retorno, em anos, a , b , e c são parâmetros da equação, e t é a duração da chuva, em minutos.

É necessário, então, conhecer os parâmetros a , b e c da expressão de Talbot para a IDF (equação (8)).

$$i = \frac{a T^b}{t + c} \quad (8)$$

Sendo i a intensidade da chuva, em mm/h, e os outros parâmetros já definidos semelhantemente à equação (7).

Como é conhecida apenas a equação potencial para a IDF para região de estudo, definida na equação (1), é necessário que seja feita a conversão desta para do tipo Talbot. Os parâmetros da equação potencial são definidos pela equação (9):

$$i = \frac{k T^m}{(t + d)^n} \quad (9)$$

Portanto, para a equação da região de Pato Branco (equação (1)): $k=879,43$, $m=0,152$, $d=9$ e $n=0,732$.

De acordo com Silveira e Goldenfum (2007), podem ser encontradas as expressões de conversão a partir de simulações numéricas:

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

$$b = m$$

$$c = 1,32n^{-2,28}d^{0,89}$$

Substituindo os valores de k, m, d e n, obtem-se, para Pato Branco:

$$a = 1303,6$$

$$b = 0,152$$

$$c = 19,0$$

É necessário ainda, uma majoração do coeficiente a, que será multiplicado por 2,2. Assim, a versão Talbot da IDF de Pato Branco é:

$$i = \frac{2868 T^{0,152}}{t + 19} \quad (10)$$

A função H_s , é obtida pela equação (11), que multiplica a vazão de saída constante pelo tempo:

$$H_s = \gamma \cdot H \cdot q_s \cdot \frac{t}{60} \quad (11)$$

Onde:

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

γ = razão entre a área de percolação e volume do dispositivo (mm^{-1})

H = profundidade média do volume de acumulação do dispositivo (mm)

t = duração da chuva (min)

Obtem-se o volume máximo através da maximização da diferença entre H_E e H_s , no tempo, que resulta, após desenvolvimento, na equação (12):

$$\beta \frac{c a T^b}{(t + c)^2} - \gamma H q_s = 0 \quad (12)$$

Então, pode-se explicitar o tempo, e aplicando-se à diferença entre H_E e H_s , é possível obter-se a expressão do volume máximo:

$$V_{max} = \left(\sqrt{\frac{a}{60}} \sqrt{\beta} T^{b/2} - \sqrt{\frac{c}{60}} \sqrt{\gamma} \sqrt{H} \sqrt{q_s} \right)^2 \quad (13)$$

Sendo que, para bacias de retenção e pavimentos permeáveis, foi considerada a área de percolação coincidente com a área do dispositivo em planta. Portanto, $\sqrt{\gamma} \sqrt{H} = 1$.

APÊNDICE B – PRÉ-DIMENSIONAMENTO DAS BACIAS DE DETENÇÃO

Igualando β a C , na equação (13), obtém-se V_{max} , que é o volume a se reservar em equivalente de lâmina sobre toda a bacia contribuinte, pela equação (14).

$$V_{max} = \left(\sqrt{\frac{a}{60}} \sqrt{C} T^{b/2} - \sqrt{\frac{c}{60}} \sqrt{q_s} \right)^2 \quad (14)$$

Substituindo os valores de a e b , da expressão de IDF para Pato Branco, a equação (14) se torna:

$$V_{max} = (6,91\sqrt{C} T^{0,076} - 0,563\sqrt{q_s})^2 \quad (15)$$

Onde:

V_{max} = volume de acumulação (mm);

C = coeficiente de escoamento;

T = período de retorno (anos);

q_s = vazão de saída (mm/h).

A vazão do tubo de saída foi considerada como $q_s = 27 \text{ l/(s.ha)}$ (SUDERHSA, 2002) (9,7mm/h). O valor de C , relativo ao coeficiente de escoamento, foi considerado como 0,70. O período de retorno adotado (T) foi de 2 anos, e, substituindo os valores na equação (14), obteve-se:

$$V_{max} = (6,91\sqrt{0,7} 2^{0,076} - 0,563\sqrt{9,7})^2$$

$$V_{max} = 18,83 \text{ mm}$$

Ou:

$$V_{max} = 183,3 \text{ m}^3/\text{ha}$$

Área de contribuição da bacia 1: 5,47 ha

Área de contribuição da bacia 2: 5,96 ha

Multiplicando as áreas por V_{max} , obtém-se os volumes para cada bacia de detenção:

Volume da bacia 1: $5,47 \times 183,3 = 1029,5 \text{ m}^3$

Volume da bacia 2: $5,96 \times 183,3 = 1121,6 \text{ m}^3$

Dividindo o volume da bacia pela profundidade (1,5m), encontra-se a área de cada uma:

Área da bacia 1: $1029,5 / 1,5 = 686,3 \text{ m}^2$

Área da bacia 2: $1121,6 / 1,5 = 747,7 \text{ m}^2$

O orifício de descarga da água destas bacias foram dimensionados segundo a equação da *lei dos orifícios* (PORTO, 2006):

$$Q = C_d A \sqrt{2gH_v} \quad (16)$$

Onde:

C_d = coeficiente de descarga

A = área da seção transversal do orifício (m^2)

g = aceleração da gravidade (m/s^2)

H_v = carga atuante, ou seja, distância vertical desde a superfície livre do líquido até a linha do centro do orifício (m).

Porto (2006), entretanto, recomenda a correção do coeficiente C_d para C_d' , devido a ocorrência de contração incompleta no orifício quando o mesmo se encontrar a distâncias inferiores a três vezes o diâmetro deste orifício. Desta forma, obtém-se o coeficiente de descarga corrigido através da equação:

$$C_d' = C_d (1 + 0,13.K) \quad (17)$$

Fazendo-se:

$$C_d' = 0,62 (1 + 0,13.0,25)$$

$$C_d' = 0,64$$

Por fim, os diâmetros para cada orifício das bacias de detenção constam na Tabela 8:

Tabela 8 - Diâmetros dos orifícios das bacias de detenção

	Vazão (m³/s)	Área (m²)	Diâmetro (m)
BD1	0,148	0,043	0,23
BD2	0,161	0,046	0,24

Fonte: Autoria própria

APÊNDICE C – PRÉ-DIMENSIONAMENTO DOS PAVIMENTOS PERMEÁVEIS

Utilizando a equação (10) e substituindo os valores de a e b da expressão IDF de Pato Branco, para encontrar o volume de acumulação sobre a área em planta do dispositivo, tem-se:

$$V_{max} = (6,91\sqrt{\beta} T^{0,076} - 0,563 \sqrt{q_s})^2 \quad (18)$$

Para a qual:

$$\beta = \frac{A_{pav} + C \cdot A}{A_{pav}} \quad (19)$$

Onde:

β = coeficiente adimensional

A_{pav} = área de pavimento permeável do loteamento (m²)

A = área de contribuição ao pavimento (m²)

C = coeficiente de escoamento da área de contribuição

Ainda, a área de contribuição ao pavimento (A) é dada pela soma das áreas de ruas e edificações, sendo a última equivalente à 70% da área dos lotes, conforme previsto no Plano Diretor da cidade de Pato Branco – PR.

Desta forma, com a medição do loteamento através do software AutoCAD, tem-se:

$$A = 8,15 \text{ ha}$$

$$A_{pav} = 1,16 \text{ ha}$$

Considerando a Tabela 2 de coeficiente de escoamento superficial, foram adotados para estas superfícies os valores de 0,85 para a parcela edificada e 0,95 para as ruas. O coeficiente de escoamento ponderado da área de contribuição é dado por:

$$C = \frac{0,85x A_{edificada} + 0,95x A_{ruas}}{A_{edificada} + A_{ruas}} \quad (20)$$

$$C = 0,77$$

Desta forma, obteve-se:

$$\beta = 7,10$$

Como já mencionado na metodologia, tem-se $K_{sat} = 2,95 \times 10^{-5}$ cm/s que, convertido, é equivalente a 1,06 mm/h.

Para a obtenção da vazão de saída, adotou-se um coeficiente redutor para colmatação de $\alpha = 0,1$. Portanto, como:

$$q_s = K_{sat} \times \alpha \quad (21)$$

Tem-se que $q_s = 0,106$ mm/h.

Substituindo-se os valores encontrados na equação (18), para um período de retorno de 2 anos, estima-se um volume de 369,87 mm.

A profundidade da camada porosa é dada por:

$$H_p = \frac{V_{max}}{\eta} \quad (22)$$

Onde:

H_p = profundidade da camada porosa (mm)

V_{max} = volume de acumulação (mm)

η = porosidade do material da camada porosa (%)

Adotou-se a brita como o material a ser disposto na camada porosa, cuja porosidade é igual a 0,35.

Desta forma, a profundidade recomendada para execução do sistema de pavimentos permeáveis é de 1,0 m.

APÊNDICE D – VAZÕES EM FUNÇÃO DO TEMPO DOS SISTEMAS

Tabela 9 - Vazões em função do tempo dos sistemas no dissipador 1

(continua)

Tempo (hh:mm:ss)	Vazão de entrada (m³/s)							
	Pré-urbanização			Pós-urbanização				
	Natural	Convencional	Com BD	Com Biorretenção	Com Pavimento Permeável	Com BD e Biorretenção	Com BD e Pav. Perm.	Com Pav. Perm. e Biorretenção
00:01:00	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
00:02:00	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
00:03:00	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
00:04:00	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
00:05:00	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
00:06:00	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
00:07:00	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
00:08:00	0,000	0,001	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
00:09:00	0,000	0,003	0,000	0,000	0,001	0,000	0,000	0,000
00:10:00	0,000	0,008	0,000	0,000	0,002	0,000	0,000	0,001
00:11:00	0,001	0,013	0,000	0,001	0,004	0,000	0,000	0,001
00:12:00	0,002	0,019	0,001	0,002	0,006	0,000	0,000	0,002
00:13:00	0,002	0,024	0,002	0,003	0,008	0,001	0,001	0,003
00:14:00	0,003	0,028	0,003	0,004	0,010	0,002	0,002	0,004
00:15:00	0,004	0,031	0,005	0,005	0,013	0,002	0,002	0,005
00:16:00	0,004	0,034	0,007	0,006	0,015	0,003	0,003	0,006
00:17:00	0,005	0,038	0,009	0,008	0,018	0,004	0,004	0,008
00:18:00	0,005	0,042	0,011	0,009	0,021	0,005	0,005	0,009
00:19:00	0,006	0,046	0,014	0,011	0,024	0,006	0,006	0,010
00:20:00	0,006	0,051	0,017	0,012	0,027	0,007	0,007	0,012
00:21:00	0,007	0,056	0,020	0,014	0,030	0,008	0,007	0,013
00:22:00	0,008	0,065	0,024	0,016	0,035	0,010	0,009	0,015
00:23:00	0,009	0,080	0,028	0,020	0,043	0,011	0,010	0,019
00:24:00	0,011	0,096	0,031	0,025	0,053	0,012	0,012	0,023
00:25:00	0,014	0,114	0,036	0,030	0,063	0,015	0,013	0,028
00:26:00	0,016	0,129	0,039	0,035	0,073	0,018	0,016	0,032
00:27:00	0,018	0,136	0,042	0,041	0,076	0,020	0,018	0,034
00:28:00	0,018	0,131	0,045	0,045	0,074	0,023	0,020	0,034
00:29:00	0,018	0,120	0,046	0,049	0,069	0,026	0,023	0,033
00:30:00	0,017	0,105	0,048	0,052	0,064	0,029	0,024	0,031
00:31:00	0,015	0,096	0,050	0,056	0,059	0,032	0,025	0,028
00:32:00	0,014	0,086	0,051	0,058	0,054	0,035	0,026	0,026
00:33:00	0,013	0,081	0,052	0,058	0,049	0,037	0,026	0,024
00:34:00	0,012	0,074	0,053	0,057	0,045	0,040	0,026	0,022
00:35:00	0,011	0,066	0,053	0,056	0,040	0,040	0,026	0,020

Tabela 8 - Vazões em função do tempo dos sistemas no dissipador 1

(continua)

Tempo (hh:mm:ss)	Vazão de entrada (m³/s)							
	Pré-urbanização			Pós-urbanização				
	Natural	Convencional	Com BD	Com Biorretenção	Com Pavimento Permeável	Com BD e Biorretenção	Com BD e Pav. Perm.	Com Pav. Perm. e Biorretenção
00:36:00	0,010	0,059	0,054	0,055	0,036	0,041	0,025	0,018
00:37:00	0,009	0,053	0,054	0,053	0,033	0,042	0,025	0,017
00:38:00	0,008	0,049	0,054	0,051	0,030	0,042	0,024	0,015
00:39:00	0,007	0,045	0,054	0,048	0,028	0,042	0,024	0,014
00:40:00	0,007	0,042	0,054	0,045	0,027	0,042	0,023	0,013
00:41:00	0,007	0,039	0,054	0,042	0,025	0,043	0,023	0,012
00:42:00	0,006	0,037	0,054	0,039	0,023	0,043	0,023	0,012
00:43:00	0,006	0,035	0,054	0,037	0,022	0,042	0,023	0,011
00:44:00	0,006	0,033	0,054	0,035	0,021	0,042	0,023	0,011
00:45:00	0,005	0,031	0,054	0,033	0,020	0,042	0,023	0,010
00:46:00	0,005	0,030	0,053	0,031	0,019	0,042	0,023	0,010
00:47:00	0,005	0,027	0,053	0,029	0,017	0,041	0,023	0,009
00:48:00	0,005	0,024	0,053	0,026	0,016	0,041	0,023	0,008
00:49:00	0,004	0,020	0,052	0,023	0,014	0,040	0,022	0,008
00:50:00	0,004	0,017	0,052	0,020	0,012	0,038	0,022	0,006
00:51:00	0,003	0,013	0,051	0,016	0,010	0,036	0,021	0,006
00:52:00	0,003	0,010	0,051	0,013	0,008	0,033	0,019	0,005
00:53:00	0,002	0,007	0,050	0,011	0,007	0,030	0,018	0,004
00:54:00	0,002	0,006	0,049	0,009	0,006	0,028	0,016	0,004
00:55:00	0,002	0,005	0,049	0,008	0,005	0,026	0,015	0,003
00:56:00	0,002	0,004	0,047	0,007	0,004	0,023	0,013	0,003
00:57:00	0,001	0,003	0,047	0,006	0,004	0,021	0,012	0,002
00:58:00	0,001	0,003	0,046	0,005	0,003	0,019	0,011	0,002
00:59:00	0,001	0,002	0,045	0,005	0,003	0,017	0,010	0,002
01:00:00	0,001	0,002	0,043	0,004	0,003	0,015	0,008	0,002
01:01:00	0,001	0,002	0,042	0,004	0,003	0,013	0,007	0,002
01:02:00	0,001	0,002	0,040	0,004	0,002	0,011	0,006	0,002
01:03:00	0,001	0,001	0,038	0,003	0,002	0,010	0,005	0,001
01:04:00	0,001	0,001	0,034	0,003	0,002	0,009	0,005	0,001
01:05:00	0,001	0,001	0,031	0,003	0,002	0,008	0,004	0,001
01:06:00	0,001	0,001	0,027	0,002	0,002	0,007	0,003	0,001
01:07:00	0,001	0,001	0,024	0,002	0,002	0,006	0,003	0,001
01:08:00	0,001	0,001	0,021	0,002	0,001	0,005	0,002	0,001
01:09:00	0,001	0,001	0,019	0,002	0,001	0,004	0,002	0,001
01:10:00	0,001	0,001	0,017	0,002	0,001	0,004	0,002	0,001
01:11:00	0,001	0,001	0,014	0,002	0,001	0,003	0,002	0,001
01:12:00	0,001	0,001	0,013	0,002	0,001	0,003	0,001	0,001
01:13:00	0,001	0,001	0,011	0,001	0,001	0,002	0,001	0,001

Tabela 8 - Vazões em função do tempo dos sistemas no dissipador 1

(conclusão)

Tempo (hh:mm:ss)	Vazão de entrada (m ³ /s)							
	Pré-urbanização			Pós-urbanização				
	Natural	Convencional	Com BD	Com Biorretenção	Com Pavimento Permeável	Com BD e Biorretenção	Com BD e Pav. Perm.	Com Pav. Perm. e Biorretenção
01:14:00	0,001	0,001	0,009	0,001	0,001	0,002	0,001	0,001
01:15:00	0,001	0,001	0,008	0,001	0,001	0,002	0,001	0,001
01:16:00	0,001	0,000	0,007	0,001	0,001	0,002	0,001	0,001
01:17:00	0,001	0,000	0,006	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001
01:18:00	0,001	0,000	0,005	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001
01:19:00	0,001	0,000	0,004	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001
01:20:00	0,001	0,000	0,004	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001
01:21:00	0,001	0,000	0,003	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001
01:22:00	0,001	0,000	0,003	0,001	0,001	0,001	0,001	0,000
01:23:00	0,001	0,000	0,002	0,001	0,001	0,001	0,001	0,000
01:24:00	0,001	0,000	0,002	0,001	0,001	0,001	0,001	0,000
01:25:00	0,001	0,000	0,002	0,001	0,001	0,001	0,001	0,000
01:26:00	0,001	0,000	0,001	0,001	0,001	0,001	0,000	0,000
01:27:00	0,001	0,000	0,001	0,001	0,001	0,001	0,000	0,000
01:28:00	0,001	0,000	0,001	0,001	0,001	0,001	0,000	0,000
01:29:00	0,001	0,000	0,001	0,001	0,000	0,001	0,000	0,000
01:30:00	0,001	0,000	0,001	0,001	0,000	0,001	0,000	0,000
01:31:00	0,001	0,000	0,001	0,001	0,000	0,001	0,000	0,000
01:32:00	0,001	0,000	0,001	0,001	0,000	0,001	0,000	0,000
01:33:00	0,001	0,000	0,001	0,001	0,000	0,001	0,000	0,000
01:34:00	0,001	0,000	0,001	0,000	0,000	0,001	0,000	0,000
01:35:00	0,001	0,000	0,001	0,000	0,000	0,001	0,000	0,000
01:36:00	0,001	0,000	0,001	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
01:37:00	0,001	0,000	0,001	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
01:38:00	0,001	0,000	0,001	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
01:39:00	0,001	0,000	0,001	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
01:40:00	0,001	0,000	0,001	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
01:41:00	0,001	0,000	0,001	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
01:42:00	0,001	0,000	0,001	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
01:43:00	0,001	0,000	0,001	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
01:44:00	0,001	0,000	0,001	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
01:45:00	0,001	0,000	0,001	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
01:46:00	0,001	0,000	0,001	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
01:47:00	0,001	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
Pico:	0,018	0,136	0,054	0,058	0,076	0,043	0,026	0,034
Tempo:	28 min	27 min	40 min	33 min	27 min	42 min	34 min	29 min

Fonte: Autoria própria.

Tabela 10 - Vazões em função do tempo dos sistemas no dissipador 2

(continua)

Tempo (hh:mm:ss)	Vazão de entrada (m³/s)							
	Pré-urbanização		Pós-urbanização					
	Natural	Convencional	Com BD	Com biorretenção	Com pavimento permeável	Com BD e biorretenção	Com BD e pav. perm.	Com pav. Perm. e biorretenção
00:01:00	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
00:02:00	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
00:03:00	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
00:04:00	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
00:05:00	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
00:06:00	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
00:07:00	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
00:08:00	0,000	0,001	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
00:09:00	0,000	0,001	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
00:10:00	0,000	0,003	0,000	0,000	0,001	0,000	0,000	0,000
00:11:00	0,000	0,008	0,001	0,000	0,001	0,000	0,000	0,000
00:12:00	0,001	0,016	0,002	0,000	0,002	0,000	0,000	0,001
00:13:00	0,001	0,023	0,003	0,001	0,005	0,000	0,000	0,001
00:14:00	0,002	0,027	0,005	0,002	0,008	0,001	0,001	0,002
00:15:00	0,003	0,031	0,007	0,004	0,010	0,001	0,001	0,004
00:16:00	0,004	0,034	0,010	0,005	0,013	0,002	0,002	0,005
00:17:00	0,005	0,038	0,012	0,007	0,016	0,003	0,003	0,006
00:18:00	0,005	0,042	0,015	0,008	0,019	0,004	0,004	0,008
00:19:00	0,006	0,046	0,018	0,010	0,022	0,005	0,005	0,009
00:20:00	0,006	0,051	0,021	0,012	0,025	0,006	0,006	0,010
00:21:00	0,007	0,055	0,025	0,013	0,028	0,007	0,007	0,012
00:22:00	0,008	0,065	0,028	0,015	0,032	0,008	0,008	0,014
00:23:00	0,009	0,078	0,032	0,018	0,039	0,010	0,009	0,016
00:24:00	0,011	0,094	0,037	0,023	0,048	0,012	0,010	0,020
00:25:00	0,013	0,116	0,041	0,028	0,057	0,014	0,012	0,024
00:26:00	0,016	0,133	0,043	0,034	0,068	0,016	0,014	0,029
00:27:00	0,018	0,145	0,046	0,039	0,075	0,019	0,017	0,034
00:28:00	0,020	0,141	0,048	0,043	0,076	0,022	0,019	0,035
00:29:00	0,020	0,131	0,050	0,046	0,072	0,025	0,021	0,035
00:30:00	0,019	0,120	0,051	0,049	0,067	0,028	0,023	0,033
00:31:00	0,017	0,107	0,052	0,052	0,062	0,031	0,024	0,031
00:32:00	0,016	0,097	0,053	0,054	0,057	0,033	0,025	0,028
00:33:00	0,014	0,085	0,053	0,057	0,052	0,036	0,026	0,026
00:34:00	0,013	0,079	0,054	0,058	0,048	0,038	0,026	0,024
00:35:00	0,012	0,071	0,055	0,058	0,045	0,040	0,026	0,022
00:36:00	0,011	0,063	0,055	0,058	0,040	0,041	0,025	0,021
00:37:00	0,010	0,057	0,055	0,057	0,036	0,041	0,025	0,019
00:38:00	0,009	0,052	0,055	0,056	0,033	0,042	0,024	0,017

Tabela 9 – Vazões em função do tempo dos sistemas no dissipador 2

(continua)

Tempo (hh:mm:ss)	Vazão de entrada (m³/s)							
	Pré-urbanização		Pós-urbanização					
	Natural	Convencional	Com BD	Com biorretenção	Com pavimento permeável	Com BD e biorretenção	Com BD e pav. perm.	Com pav. Perm. e biorretenção
00:39:00	0,008	0,049	0,055	0,053	0,031	0,042	0,023	0,016
00:40:00	0,008	0,045	0,055	0,049	0,029	0,043	0,022	0,015
00:41:00	0,007	0,042	0,055	0,046	0,027	0,043	0,021	0,014
00:42:00	0,007	0,040	0,055	0,043	0,026	0,043	0,021	0,013
00:43:00	0,006	0,037	0,055	0,040	0,024	0,043	0,020	0,012
00:44:00	0,006	0,035	0,055	0,039	0,023	0,043	0,020	0,012
00:45:00	0,006	0,034	0,054	0,037	0,022	0,043	0,019	0,011
00:46:00	0,006	0,032	0,054	0,035	0,020	0,043	0,019	0,011
00:47:00	0,005	0,030	0,054	0,033	0,019	0,042	0,019	0,010
00:48:00	0,005	0,027	0,053	0,030	0,018	0,042	0,019	0,009
00:49:00	0,005	0,024	0,053	0,027	0,016	0,042	0,019	0,009
00:50:00	0,004	0,020	0,052	0,024	0,014	0,041	0,019	0,008
00:51:00	0,004	0,016	0,052	0,020	0,012	0,040	0,018	0,007
00:52:00	0,003	0,012	0,051	0,017	0,010	0,038	0,017	0,006
00:53:00	0,003	0,009	0,051	0,014	0,009	0,036	0,016	0,005
00:54:00	0,002	0,007	0,050	0,012	0,007	0,033	0,015	0,005
00:55:00	0,002	0,006	0,049	0,010	0,006	0,030	0,014	0,004
00:56:00	0,002	0,005	0,048	0,009	0,006	0,028	0,013	0,003
00:57:00	0,002	0,004	0,047	0,008	0,005	0,025	0,012	0,003
00:58:00	0,001	0,003	0,046	0,007	0,004	0,023	0,011	0,003
00:59:00	0,001	0,003	0,045	0,006	0,004	0,021	0,009	0,003
01:00:00	0,001	0,003	0,044	0,006	0,004	0,019	0,009	0,002
01:01:00	0,001	0,002	0,043	0,005	0,003	0,017	0,007	0,002
01:02:00	0,001	0,002	0,042	0,005	0,003	0,015	0,007	0,002
01:03:00	0,001	0,002	0,040	0,004	0,003	0,013	0,006	0,002
01:04:00	0,001	0,002	0,037	0,004	0,003	0,012	0,005	0,002
01:05:00	0,001	0,001	0,033	0,004	0,002	0,010	0,005	0,002
01:06:00	0,001	0,001	0,029	0,003	0,002	0,009	0,004	0,001
01:07:00	0,001	0,001	0,026	0,003	0,002	0,008	0,004	0,001
01:08:00	0,001	0,001	0,023	0,003	0,002	0,007	0,003	0,001
01:09:00	0,001	0,001	0,020	0,003	0,002	0,006	0,003	0,001
01:10:00	0,001	0,001	0,018	0,002	0,002	0,005	0,002	0,001
01:11:00	0,001	0,001	0,015	0,002	0,002	0,005	0,002	0,001
01:12:00	0,001	0,001	0,013	0,002	0,001	0,004	0,002	0,001
01:13:00	0,001	0,001	0,011	0,002	0,001	0,003	0,002	0,001
01:14:00	0,001	0,001	0,010	0,002	0,001	0,003	0,002	0,001
01:15:00	0,001	0,001	0,008	0,002	0,001	0,003	0,001	0,001
01:16:00	0,001	0,001	0,007	0,002	0,001	0,002	0,001	0,001
01:17:00	0,001	0,001	0,006	0,002	0,001	0,002	0,001	0,001

Tabela 9 - Vazões em função do tempo dos sistemas no dissipador 2

(conclusão)

Tempo (hh:mm:ss)	Vazão de entrada (m³/s)							
	Pré-urbanização		Pós-urbanização					
	Natural	Convencional	Com BD	Com biorretenção	Com pavimento permeável	Com BD e biorretenção	Com BD e pav. perm.	Com pav. Perm. e biorretenção
01:18:00	0,001	0,001	0,005	0,001	0,001	0,002	0,001	0,001
01:19:00	0,001	0,001	0,004	0,001	0,001	0,002	0,001	0,001
01:20:00	0,001	0,000	0,004	0,001	0,001	0,002	0,001	0,001
01:21:00	0,001	0,000	0,003	0,001	0,001	0,002	0,001	0,001
01:22:00	0,001	0,000	0,003	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001
01:23:00	0,001	0,000	0,002	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001
01:24:00	0,001	0,000	0,002	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001
01:25:00	0,001	0,000	0,002	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001
01:26:00	0,001	0,000	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001
01:27:00	0,001	0,000	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001
01:28:00	0,001	0,000	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,000
01:29:00	0,001	0,000	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,000
01:30:00	0,001	0,000	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,000
01:31:00	0,001	0,000	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,000
01:32:00	0,001	0,000	0,001	0,001	0,001	0,001	0,000	0,000
01:33:00	0,001	0,000	0,001	0,001	0,001	0,001	0,000	0,000
01:34:00	0,001	0,000	0,001	0,001	0,001	0,001	0,000	0,000
01:35:00	0,001	0,000	0,001	0,001	0,001	0,001	0,000	0,000
01:36:00	0,001	0,000	0,001	0,001	0,000	0,001	0,000	0,000
01:37:00	0,001	0,000	0,001	0,001	0,000	0,001	0,000	0,000
01:38:00	0,001	0,000	0,001	0,001	0,000	0,001	0,000	0,000
01:39:00	0,001	0,000	0,001	0,001	0,000	0,001	0,000	0,000
01:40:00	0,001	0,000	0,001	0,001	0,000	0,001	0,000	0,000
01:41:00	0,001	0,000	0,001	0,001	0,000	0,001	0,000	0,000
01:42:00	0,001	0,000	0,001	0,001	0,000	0,001	0,000	0,000
01:43:00	0,000	0,000	0,001	0,000	0,000	0,001	0,000	0,000
01:44:00	0,000	0,000	0,001	0,000	0,000	0,001	0,000	0,000
01:45:00	0,000	0,000	0,001	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
01:46:00	0,000	0,000	0,001	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
01:47:00	0,000	0,000	0,001	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
Pico	0,020	0,145	0,055	0,058	0,076	0,043	0,026	0,035
Tempo	29 min	27 min	40 min	35 min	28 min	40 min	33 min	29 min

Fonte: Autoria própria.

APÊNDICE E – DADOS DO PROJETO**Tabela 11 - Comprimento dos condutos**
(continua)

	Comprimento (m)
C1	7,00
C2	7,00
C3	56,50
C4	6,00
C5	8,00
C6	1,50
C7	35,00
C8	5,50
C9	5,50
C10	10,50
C11	4,00
C12	46,50
C13	5,50
C14	7,50
C15	2,00
C16	73,00
C17	6,00
C18	63,00
C19	6,00
C20	47,50
C21	6,00
C22	10,00
C23	46,50
C24	6,00
C25	10,50
C26	6,00
C27	29,00
C28	6,00
C29	43,50
C30	6,00
C31	11,00
C32	30,00
C33	6,00
C34	10,50
C35	6,00
C36	39,50
C37	6,00
C38	36,00
C39	6,00
C40	11,00
C41	30,00
C42	6,00
C43	29,50
C44	6,00

Tabela 10 – Comprimento dos condutos

(conclusão)

	Comprimento (m)
C45	10,00
C46	6,00
C47	4,50
C48	5,66
C49	50,70
C50	5,66
C51	28,38
C52	5,66
C53	66,31
C54	5,84
C55	66,64
C56	5,68
C57	5,66
C58	44,14
C59	5,66
C60	44,32
C62	5,66
C63	53,44
C64	5,66
C65	53,44
C66	5,66
C67	11,03
C68	5,70
C69	10,51
C70	59,98
C71	5,70
C72	10,70
C73	5,66
C74	7,98
C75	32,14
C76	5,70
C77	26,32
C78	5,70
C79	11,15
C80	5,66
C81	5,71
C82	34,46
C83	5,80
C84	46,04
C85	37,40
C86	84,84
C87	3,42
C88	5,70
C89	1,85
C90	49,26
C91	6,81
C92	5,43
C93	58,53
C94	55,55

Fonte: Autoria própria.

Tabela 12 - Bocas de lobo (BL)

BL	Cota (m)
9	32,40
11	30,70
13	29,84
17	23,81
2	26,74
5	23,70
20	23,10
21	16,77
23	11,70
27	5,70
75	10,70
77	9,30
60	8,60
43	6,50
39	24,40
41	13,90
43	7,00
CP01	-1,60
DI1	-5,00
32	26,20
34	25,00
45	20,40
53	16,40
CP02	13,20
50	14,20
52	13,60
58	20,40
56	15,90
61	10,40
69	7,40
CP03	6,60
74	11,40
72	7,40
86	4,90
CP15	0,90
66	4,40
83	1,30
CP14	0,10
64	7,90
80	0,90
CP13	-0,10
DI2	-2,10

Fonte: Autoria própria

Tabela 13 - Áreas de contribuição
(continua)

Bacia	Área (m²)	Área (ha)
S1	1636,8	0,16368
S2	709,9	0,07099
S3	-	-
S4	1963,98	0,196398
S5	1332,68	0,133268
S6	874,48	0,087448
S7	1233,43	0,123343
S8	-	-
S9	735,02	0,073502
S10	1032,61	0,103261
S11	1375,08	0,137508
S12	2086,43	0,208643
S13	985,53	0,098553
S14	579,73	0,057973
S15	2502,14	0,250214
S16	587,94	0,058794
S17	1160,35	0,116035
S18	587,09	0,058709
S19	2236,66	0,223666
S20	1242,24	0,124224
S21	1307,72	0,130772
S22	1580,84	0,158084
S23	974,56	0,097456
S24	929,44	0,092944
S25	1256,31	0,125631
S26	764,99	0,076499
S27	806,7	0,08067
S28	1262,14	0,126214
S29	1099,6	0,10996
S30	1995,26	0,199526
S31	2625,75	0,262575
S32	1173,13	0,117313
S33	1341,49	0,134149
S34	2001,81	0,200181
S35	2304,63	0,230463
S36	880,52	0,088052
S37	887,02	0,088702
S38	3575,53	0,357553
S39	880,31	0,088031
S40	962,98	0,096298
S41	1323,9	0,13239
S42	1421,47	0,142147

Tabela 12 – Áreas de contribuição
(conclusão)

Bacia	Área (m²)	Área (ha)
S43	1429,58	0,142958
S44	577,35	0,057735
S45	585,04	0,058504
S46	3352,98	0,335298
S47	923,16	0,092316
S48	937,78	0,093778
S49	1856,12	0,185612
S50	1787,09	0,178709
S51	952,09	0,095209
S52	1010,27	0,101027
S53	1699,5	0,16995
S54	1536,69	0,153669
S55	1508,87	0,150887
S56	642,85	0,064285
S57	630,78	0,063078
S58	1060,51	0,106051
S59	930,36	0,093036
S60	1450,79	0,145079
S61	880,24	0,088024
S62	1448,68	0,144868
S63	1893,71	0,189371
S64	1779,15	0,177915
S65	2042,55	0,204255
S66	1238,91	0,123891
S67	542,11	0,054211
S68	572,76	0,057276
S69	786,38	0,078638
S70	538,68	0,053868
S71	367,65	0,036765
S72	-	-
S73	1074,51	0,107451
S74	1799,29	0,179929
S75	-	-
S76	-	-
S77	443,59	0,044359
S78	603,09	0,060309
S79	1430,1	0,14301
S80	993,91	0,099391
S81	1070,92	0,107092
S82	1326,83	0,132683
S83	1130,93	0,113093

Fonte: Autoria própria

APÊNDICE F – RESULTADOS DAS SIMULAÇÕES

Tabela 14 - Comparação entre simulações em DI1

Situação do sistema	Momento do pico	Momento do pico em relação ao natural (min)	Pico de vazão (L/s)	Aumento do pico em relação ao natural (%)
Natural	28 min	-	18	-
Convencional	27 min	-1	136	655,6
Pav. Perm. e biorretenção	28 min	0	34	88,9
Biorretenção e Bacias de detenção	42 min	14	43	138,9
Pav. Perm. e bacias de detenção	34 min	6	26	44,4

Fonte: Autoria própria.

Tabela 15 - Comparação entre simulações em DI2

Situação do sistema	Momento do pico	Momento do pico em relação ao natural (min)	Pico de vazão (L/s)	Aumento do pico em relação ao natural (%)
Natural	29 min	-	20	-
Convencional	27 min	-2	145	625
Pav. Perm. e biorretenção	29 min	0	35	75
Biorretenção e Bacias de detenção	44 min	15	43	115
Pav. Perm. e bacias de detenção	33 min	4	26	30

Fonte: Autoria própria.

Tabela 16 - Volumes escoados nos sistemas

(continua)

	DI1	DI2	Total
Natural (m ³)	22,88	24,23	47,11
Convencional (m ³)	143,27	151,36	294,63
Bacia de detenção e biorretenção (m ³)	79,58	86,75	166,33

Tabela 15 – Volumes escoados no sistema

	(conclusão)		
	DI1	DI2	Total
Bacia de detenção e pav. Perm. (m³)	51,63	48,86	100,49
Biorretenção e pav. Perm. (m³)	40,75	42,12	82,87
Biorretenção (m³)	82,68	86,94	169,62
Bacia de detenção (m³)	141,76	149,61	291,37
Pavimento permeável (m³)	84,63	86,77	171,4

Fonte: Autoria própria

ANEXO A – PLANILHA DE DIMENSIONAMENTO DO SISTEMA CONVENCIONAL

Tabela 17 - Planilha de dimensionamento do sistema convencional

Trecho	Extensão	Cota a montante (m)			Cota a Jusante (m)			Declividade (m/m)	Área (ha)	Intensidade (mm/min)	Vazão (m³/s)	Vazão (0,1 m³/min)	φ Calculado (m)	φ adotado (m)	Velocidade (m/s)
		TERRENO	TUBO	BL	TERRENO	TUBO	BL								
BL09 - BL11	54,00	33,50	32,40	1,10	31,80	30,70	1,10	0,0315	0,22	2,47	0,06	0,38	0,40	0,40	2,94
BL11 - BL13	54,00	31,80	30,70	1,10	31,60	29,70	1,90	0,0185	0,44	2,47	0,13	0,76	0,58	0,60	2,96
BL13 - BL17	71,00	31,60	29,70	1,90	26,00	23,80	2,20	0,0831	0,66	2,47	0,19	1,14	0,51	0,60	6,26
BL02 - BL05	42,50	27,84	26,74	1,10	25,20	24,30	0,90	0,0574	0,21	2,47	0,06	0,36	0,36	0,40	3,97
BL05 - BL 20	60,00	25,20	24,30	0,90	26,00	23,60	2,40	0,0117	0,41	2,47	0,12	0,71	0,62	0,40	1,79
BL17 - BL21	44,00	26,00	23,80	2,20	18,00	15,80	2,20	0,1818	1,36	2,47	0,39	2,35	0,58	0,60	9,26
BL21 - BL23	27,00	18,00	15,80	2,20	12,80	11,70	1,10	0,1926	1,54	2,47	0,44	2,66	0,60	0,80	11,55
BL23 - BL27	46,00	14,00	11,70	1,10	6,80	5,70	1,10	0,1565	1,65	2,47	0,47	2,85	0,64	0,80	10,41
BL75-BL77	28,50	11,50	10,70	0,80	10,00	9,30	0,70	0,0491	0,10	2,47	0,03	0,17	0,28	0,40	3,67
BL77 - BL60	66,50	10,00	9,30	0,70	10,80	8,60	2,20	0,0105	0,20	2,47	0,06	0,35	0,48	0,40	1,70
BL60-BL43	74,00	10,00	8,60	2,20	9,00	7,00	2,00	0,0216	0,60	2,47	0,17	1,04	0,63	0,60	3,19
BL39 - BL 41	44,00	25,50	24,40	1,10	15,00	13,90	1,10	0,2386	0,36	2,47	0,10	0,62	0,33	0,40	8,10
BL 41 - BL43	44,50	15,00	13,90	1,10	9,00	7,00	2,00	0,1551	0,72	2,47	0,21	1,24	0,47	0,60	8,55
BL43 - CX1	62,00	9,00	7,00	1,10	-0,50	-1,60	1,10	0,1387	1,70	2,47	0,49	2,93	0,66	0,80	9,80
BL27 -CX1	113,00	6,80	5,70	1,10	-0,50	-1,60	1,10	0,0646	1,83	2,47	0,53	3,16	0,78	0,80	6,69
CX1 – DI1	35,00	-0,50	-1,60	1,10	-4,00	-5,00	1,00	0,0971	3,53	2,47	1,02	6,09	0,93	1,00	9,52
BL32 - BL34	51,00	27,00	26,20	0,80	28,00	25,00	3,00	0,0235	0,39	2,47	0,11	0,67	0,53	0,60	3,33
BL34 - BL45	30,00	28,00	25,00	3,00	21,50	20,40	1,10	0,1533	0,75	2,47	0,22	1,29	0,48	0,60	8,51
BL45 - BL53	29,50	21,50	20,40	1,10	17,50	16,40	1,10	0,1356	1,11	2,47	0,32	1,92	0,56	0,60	8,00
BL53 - CP02	10,50	17,50	16,40	1,10	16,00	13,20	2,80	0,3048	1,24	2,47	0,36	2,14	0,51	0,60	11,99
BL50 - BL52	36,00	15,00	14,20	0,80	15,30	13,60	1,70	0,0167	0,27	2,47	0,08	0,47	0,49	0,60	2,80
BL52 - CP02	40,00	15,30	13,60	1,70	16,00	13,20	2,80	0,0100	0,50	2,47	0,14	0,86	0,68	0,60	2,17
BL58 - BL56	55,50	21,50	20,40	1,10	17,00	15,90	1,10	0,0811	0,23	2,47	0,07	0,40	0,34	0,40	4,72
BL56 - CP02	11,00	17,00	15,90	1,10	16,00	13,20	2,80	0,2455	0,51	2,47	0,15	0,88	0,38	0,60	10,76
CP02 - BL61	30,00	16,00	13,20	2,80	11,50	10,40	1,10	0,0933	2,38	2,47	0,68	4,11	0,81	0,80	8,04
BL61 - BL69	29,00	11,50	10,40	1,10	8,50	7,40	1,10	0,1034	2,51	2,47	0,72	4,33	0,81	1,00	9,82
BL 69 - CP11	11,00	8,50	7,40	1,10	7,70	6,60	1,10	0,0727	2,72	2,47	0,78	4,70	0,89	1,00	8,24
BL74 - BL72	47,50	12,50	11,40	1,10	8,50	7,40	1,10	0,0842	0,27	2,47	0,08	0,47	0,36	0,40	4,81
BL72 -CP11	11,00	8,50	7,40	1,10	7,70	6,60	1,10	0,0727	0,37	2,47	0,11	0,64	0,42	0,60	5,86
CP11 - BL86	44,50	7,70	6,60	1,10	6,00	4,90	1,10	0,0382	3,09	2,47	0,89	5,33	1,05	1,20	6,74
BL86 -CP15	63,00	6,00	4,90	1,10	2,00	0,90	1,10	0,0635	3,19	2,47	0,92	5,51	0,97	1,00	7,69
BL66 -BL83	46,50	5,50	4,40	1,10	2,40	1,30	1,10	0,0667	0,45	2,47	0,13	0,78	0,46	0,60	5,61
BL83 - CP15	8,00	2,40	1,30	1,10	2,00	0,90	1,10	0,0500	0,45	2,47	0,13	0,78	0,49	0,60	4,86
CP15 - CP14	54,50	2,00	0,90	1,10	1,20	0,10	1,10	0,0147	3,64	2,47	1,05	6,28	1,34	1,40	4,63
BL64 -BL80	56,50	9,00	7,90	1,10	2,00	0,90	1,10	0,1239	0,66	2,47	0,19	1,14	0,47	0,60	7,65
BL80 - CP13	10,00	2,00	0,90	1,10	1,00	-0,10	1,10	0,1000	0,66	2,47	0,19	1,14	0,49	0,60	6,87
CP13 – DI2	35,00	1,00	-0,10	1,10	-1,00	-2,10	1,10	0,0571	4,30	2,47	1,24	7,42	1,10	1,20	8,24

Fonte: Autoria própria