



UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ  
NÚCLEO DE DESENVOLVIMENTO AMAZÔNICO EM ENGENHARIA  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM INFRAESTRUTURA E  
DESENVOLVIMENTO ENERGÉTICO

JOÃO VICTOR BATISTA PALHETA

**MODELAGEM DA CAPACIDADE DE INFILTRAÇÃO DE DIFERENTES CENÁRIOS DE  
PAVIMENTOS PERMEÁVEIS NA BACIA DO UNA - BELÉM - PA**

Belém - Pa

2023

JOÃO VICTOR BATISTA PALHETA

**MODELAGEM DA CAPACIDADE DE INFILTRAÇÃO DE DIFERENTES  
CENÁRIOS DE PAVIMENTOS PERMEÁVEIS NA BACIA DO UNA - BELÉM - PA**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Infraestrutura e Desenvolvimento Energético do Núcleo de Desenvolvimento Amazônico em Engenharia, da Universidade Federal do Pará, como requisito para a obtenção do título de Mestre em Infraestrutura e Desenvolvimento Energético. Área de concentração: Infraestrutura.

Orientadora: Prof<sup>a</sup>. Dr<sup>a</sup>. Luciana de Nazaré Pinheiro Cordeiro.

Belém - Pa

2023

**Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP) de acordo com ISBD  
Sistema de Bibliotecas da Universidade Federal do Pará  
Gerada automaticamente pelo módulo Ficat, mediante os dados fornecidos pelo(a)  
autor(a)**

---

- P153m Palheta, João Victor Batista.  
Modelagem da capacidade de infiltração de diferentes cenários de pavimentos permeáveis na Bacia do Una – Belém - Pa / João Victor Batista Palheta. — 2023.  
XV, 84 f. : il. color.
- Orientador(a): Prof<sup>a</sup>. Dra. Luciana de Nazaré Pinheiro Cordeiro  
Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal do Pará, Núcleo de Desenvolvimento Amazônico em Engenharia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Infraestrutura e Desenvolvimento Energético, Tucuruí, 2023.
1. Pavimento Permeável. 2. Desenvolvimento de baixo impacto. 3. Modelagem hidrológica. 4. Sistema de drenagem sustentável. I. Título.

CDD 620.11

---

JOÃO VICTOR BATISTA PALHETA

**MODELAGEM DA CAPACIDADE DE INFILTRAÇÃO DE DIFERENTES  
CENÁRIOS DE PAVIMENTOS PERMEÁVEIS NA BACIA DO UNA - BELÉM - PA**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Infraestrutura e Desenvolvimento Energético do Núcleo de Desenvolvimento Amazônico em Engenharia, da Universidade Federal do Pará, como requisito para a obtenção do título de Mestre em Infraestrutura e Desenvolvimento Energético. Área de concentração: Infraestrutura.

Orientadora: Prof<sup>a</sup>. Dr<sup>a</sup>. Luciana de Nazaré Pinheiro Cordeiro.

Aprovado em 06 de abril de 2023.

BANCA EXAMINADORA:

---

Doutora / Luciana de Nazaré Pinheiro Cordeiro / UFPA - Orientadora

*Junior I*

---

Doutor / Junior Hiroyuki Ishihara / UFPA

*Carina M. Stolz*

---

Doutora / Carina Mariane Stolz / UFRJ

---

Doutor / Francisco Carlos Lira Pessoa / UFPA

Dedico essa dissertação de  
mestrado à Deus, que me guia e ilumina  
meus pensamentos e à minha querida  
família, que tanto admiro, dedico o  
resultado do esforço realizado ao longo  
desse percurso.

## **AGRADECIMENTOS**

Se você está lendo esta página é porque eu consegui. E não foi fácil chegar até aqui. Do processo seletivo, passando pela aprovação até a conclusão do mestrado, foi um longo caminho percorrido. Nada foi fácil, nem tampouco tranquilo.

Quero agradecer a todos aqueles que sempre confiaram em mim, desde sempre. Nesses anos de muito estudo, esforço, empenho, gostaria de agradecer a algumas pessoas que me acompanharam e foram fundamentais para a realização de mais um sonho.

Primeiramente agradeço à Deus e a Nossa senhora por estarem sempre comigo e me proporcionarem mais este desafio que em sua glória estou concluindo, entrego mais esta vitória em tuas mãos. Obrigado por me darem a fé e a força necessária para lutar e enfrentar cada obstáculo sem nunca desistir.

Aos meus pais, por me terem dado educação, valores e por me terem ensinado a andar. A meu pai Alcir Palheta, que nunca deixou de me amar, nem de confiar em mim. Pai, meu amor eterno. À minha mãe, amor incondicional. Mãe, você que me gerou e me alfabetizou, ensinando-me a ler, viu como aprendi direitinho? A vocês que, muitas vezes, renunciaram aos seus sonhos para que eu pudesse realizar o meu, partilho a alegria deste momento.

A Carolina Rabelo e ao meu filho João Davi, pela compreensão, ao serem privados em muitos momentos da minha companhia e atenção, e pelo profundo apoio, me estimulando nos momentos mais difíceis. Obrigado por desejarem sempre o melhor para mim, pelo esforço que fizeram para que eu pudesse superar cada obstáculo em meu caminho e chegar até aqui. A vocês, minha família, sou eternamente grato por tudo que sou, por tudo que consegui conquistar e pela felicidade que tenho.

Um obrigado especial a Thainá Oliveira que esteve ao meu lado durante o esse árduo percurso acadêmico, compartilhando importantes conhecimentos comigo e me ensinando muitas coisas e pronta para me ajudar quando necessário.

Minha gratidão especial a Prof<sup>a</sup>. Luciana Cordeiro, minha orientadora, obrigada pela sua dedicação, paciência e, principalmente, obrigado por sempre ter acreditado e depositado sua confiança em mim ao longo de todos esses anos de

trabalho. Sem sua orientação, apoio e confiança em todo esse caminho percorrido até aqui, nada disso seria possível.

“Não podemos resolver nossos  
problemas com o mesmo pensamento  
que tínhamos quando os criamos”. (Albert  
Einstein)

## RESUMO

O concreto permeável é uma importante alternativa para construções sustentáveis, sendo utilizado para preservar a qualidade da água e restaurar a propriedades de infiltração do solo. Para analisar este comportamento foi realizado um estudo que objetiva analisar a capacidade de infiltração de diferentes cenários de pavimentos permeáveis na sub-bacia da Três de Maio localizada em Belém do Pará com o uso do software SWMM. Para tanto foram estipuladas características como o efeito da espessura do revestimento na taxa de infiltração, a espessura da base na taxa de infiltração, o efeito da área de pavimento permeável na taxa de infiltração e o potencial de captação de água nos cenários propostos. Os cenários foram divididos em nove arranjos de sistemas drenantes, distribuídos em três espessuras para a camada de revestimento (100 mm, 200 mm e 300 mm) e 3 três para o reservatório do pavimento de concreto permeável (300 mm, 400 mm e 500 mm). Com a inserção de pavimento permeável percebeu-se que todos os cenários modelados obtiveram benefícios significantes, no entanto, a aplicação da variação da espessura de concreto permeável não obteve influência significativa na taxa de infiltração mantendo seus resultados constantes. O uso do pavimento permeável possui um grande potencial de captação de água em todos os cenários, se mostrando promissores para serem aplicados em áreas com um baixo grau de permeabilidade, principalmente nas sub-bacias que compõe a bacia do Una em Belém do Pará, que sofrem com enchentes e inundações provenientes da impermeabilização urbana e pela defasada rede de drenagem existente.

**Palavras-chave:** Pavimento permeável. Desenvolvimento de baixo impacto. Modelagem hidrológica. Sistema de drenagem sustentável.

## ABSTRACT

Permeable concrete is an important alternative for sustainable construction, being used to preserve water quality and restore soil infiltration properties. To analyze this behavior, a study was conducted to analyze the infiltration capacity of different permeable sidewalk scenarios in the Três de Maio sub-basin located in Belém do Pará using SWMM software. To this end, characteristics were stipulated such as the effect of sidewalk thickness on infiltration rate, base thickness on infiltration rate, the effect of permeable sidewalk area on infiltration rate, and water catchment potential in the proposed scenarios. The scenarios were divided into nine drainage system arrangements, distributed into three thicknesses for the base course (100 mm, 200 mm and 300 mm) and 3 three for the permeable concrete sidewalk reservoir (300 mm, 400 mm and 500 mm). With the insertion of permeable sidewalk it was noticed that all the modeled scenarios obtained significant benefits, however, the application of permeable concrete thickness variation did not obtain significant influence on the infiltration rate keeping its results constant. The use of permeable sidewalk has a great potential for water catchment in all scenarios, showing promise to be applied in areas with a low degree of permeability, especially in the sub-basins that make up the Una basin in Belém do Pará, which suffer from flooding and inundation due to urban sealing and the outdated drainage network.

**Keywords:** Permeable sidewalk. Low impact development. Hydrological modeling. Sustainable drainage system.

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 2.1 – Relação entre cobertura impermeável e escoamento de superfície.....	19
Figura 2.2 – Elementos de microdrenagem (a) e macrodrenagem (b).....	20
Figura 2.3 – Sistemas de drenagem sustentáveis.....	21
Figura 2.4– Principais categorias de benefícios.....	26
Figura 2.5 – Estrutura do poço de infiltração.....	37
Figura 2.6 – Bacia do Igarapé do Una.....	39
Figura 2.7 – Inundações na Bacia do Una – Bairro da Pedreira .....	40
Figura 2.8 – Inundações na Bacia do Una – Bairro da Pedreira .....	40
Figura 2.8 – Modelo conceitual do SWMM.....	49
Figura 2.9 – Elementos técnicos LID do SWMM.....	52
Figura 3.10 – Localização da sub-bacia da Três de Maio.....	55
Figura 3.11 – Imagens da (a) Declividade e (b) Hipsometria.....	55
Figura 3.12 – Uso do solo.....	56
Figura 3.13 – Estruturado cenário referência obtida pelo software SWMM.....	61
Figura 3.14 – Fluxograma de análise estrutural e hidrológica.....	62
Figura 3.15 – (a) Caminho crítico e (b) Divisão das áreas de contribuição.....	67
Figura 4.16 – Armazenamento LID Inicial .....	69
Figura 4.17 – Drenagem LID por altura de reservatório .....	70
Figura 4.18 – Armazenamento inicial x Drenagem LID x Armazenamento final.....	70
Figura 4.19 – Escoamento superficial .....	71
Figura 4.20 – Perda por infiltração .....	72
Figura 4.21 – Armazenamento final .....	73
Figura 4.22 – Carregamento recebido pelo exutório com LID.....	74
Figura 4.23 – Mapa de sobrecarga do sistema de drenagem - cenário referência (1) e cenários LID (2).....	75

## LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1– Resistência mecânica e espessura mínima do revestimento permeável .....	35
Tabela 2.2 – Equações de pré-dimensionamento do pavimento permeável.....	38
Tabela 2.3 – Coeficiente de escoamento superficial (C) adotado segundo as características de uso e ocupação do solo .....	42
Tabela 2.4 – Coeficiente de escoamento superficial (C) médio da Bacia do Una .....	42
Tabela 3.5 – Morfologia da sub-bacia .....	56
Tabela 3.6 – Uso do solo e taxa de permeabilidade. ....	58
Tabela 3.7 – Parâmetros iniciais utilizados no software.....	59
Tabela 3.8 – Dados de entrada .....	60
Tabela 3.9 – Curva Número <i>do Soil Conservation Service</i> – SCS <sup>1</sup> .....	65
Tabela 4.10 – Erros das simulações .....	68
Tabela 4.11 – Carregamento recebido pelo exutório. ....	73
Tabela 4.12 – Resumo dos resultados dos cenários.....	76
Quadro 2.1 – Fases de desenvolvimento das águas urbanas.....	16
Quadro 2.2 – Exemplos de infraestrutura LID e algumas especificações sobre elas. ....	24
Quadro 2.3 – Síntese conceitual do WSUD. ....	29
Quadro 2.4 – Terminologias ligadas à Infraestrutura Verde.....	32
Quadro 2.5 – Classificação dos Modelos Hidrológicos. ....	44
Quadro 2.6 – Tipos de modelos, características e usos na modelagem hidrológica.	47
Quadro 2.7– Tipos de Módulos Disponíveis no SWMM. ....	49
Quadro 3.8 – Dados dos cenários com a tecnologia LID para modelagem no SWMM. ....	57
Quadro 3.11 – Fatores concorrentes para o dimensionamento do reservatório.....	63

## LISTA DE SIGLAS

QGis – *Geographic Information System*

ATs – *Alternatives Techniques.*

BMP – *Best Management Practices.*

CTs – *Compensatory Techniques.*

EPA – *Environmental Protection Agency.*

EUA – Estados Unidos da América.

GI – *Green Infrastructure.*

IDF – Intensidade-Duração-Frequência.

IUWM – *Integrated Urban Water Management.*

LID – *Low Impact Development.*

LIUDD – *Low Impact Urban Design and Development*

PCP – Pavimentos de Concreto Permeável.

PMSB – Planos Municipais de Saneamento Básico.

SCMs – *Storm Water Control Measures.*

SuDS – *Sustainable Drainage Systems.*

SUDS – *Sustainable Urban Drainage Systems.*

SWMM – *Storm Water Management Model.*

UTM – Universal Transversa de Marcator.

WSUD – *Water Sensitive Urban Design.*

CODEM – Companhia de Desenvolvimento e Administração da Área Metropolitana de Belém.

PROMABEN - Programa de Saneamento da Bacia da Estrada Nova.

SESAN – Secretaria Municipal de Saneamento.

SCS – *Soil Conservation Service.*

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas.

IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística.

ACI – *American Concrete Institute*

## LISTA DE SÍMBOLOS

- H – Profundidade média do volume de acumulação do dispositivo
- $\eta$  – Porosidade do material de enchimento do dispositivo
- k, a, b e c – Parâmetros da equação IDF de Talbot
- $\beta$  – Produto do coeficiente de escoamento pela razão entre a área contribuinte e a área do dispositivo
- T – Período de retorno
- $q_s$  – Vazão de saída constante do dispositivo
- $V_{m\acute{a}x}$  – Volume de dimensionamento
- $H_E$  – Lâmina de entrada
- $H_S$  – Lâmina de saída
- i – Intensidade da chuva
- t – Duração da chuva
- $\gamma$  – Razão entre a área de percolação e volume do dispositivo
- D – Dimensões do dispositivo
- A – Área contribuinte do dispositivo
- C – Coeficiente de escoamento da área de contribuição
- $t_c$  – Tempo de concentração
- L – Comprimento do talvegue
- $\Delta H$  – Desnível máximo do talvegue
- $i_f$  – Taxa de infiltração final constante
- $i_i$  – Taxa de infiltração no início do experimento
- C – Constante de decaimento

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b>	<b>9</b>
1.1	Justificativa	11
1.2	Objetivos	13
1.2.1	Objetivo geral	13
1.2.2	Objetivos específicos	13
1.3	Estrutura do trabalho	14
<b>2</b>	<b>REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b>	<b>15</b>
2.1	Efeitos da Urbanização e Sistemas de Drenagem Urbana	15
2.2	Sistemas de Drenagem Sustentáveis	20
2.2.1	Melhores Práticas de Gestão – BMP's	21
2.2.2	Desenvolvimento de Baixo Impacto – LID	23
2.2.3	Sistema de Drenagem Urbana Sustentável – SUDS	26
2.2.4	Desenvolvimento Urbano Sensível à Água – WSUD	28
2.2.5	Infraestrutura Verde - GI	30
2.3	Pavimento em Concreto Permeável	33
2.4	Bacia do Una	38
2.5	Precipitação na Cidade de Belém	42
2.6	Modelagem Hidráulica	43
2.7	<i>Software Storm Water Management Model - SWMM</i>	47
<b>3</b>	<b>MÉTODO</b>	<b>54</b>
3.1	Caracterização da área de estudo	54
3.2	Caracterização dos cenários de estudo	56
3.3	Construção do modelo hidrológico-hidráulico no SWMM	61
3.3.1	Concepção e Definição do Sistema	62
3.3.2	Precipitação de projeto	64
3.3.3	Modelo para determinação da infiltração	65
3.3.4	Construção do modelo conceitual e modelagem das sub-bacias	66
<b>4</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÕES</b>	<b>68</b>
4.1	Efeitos da aplicação do sistema LID nos cenários	68
4.2	Mapa de eficiência dos cenários	73
<b>5</b>	<b>CONSIDERAÇÕES FINAIS</b>	<b>78</b>
5.1	Sugestões de pesquisas futuras	79

<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....</b>	<b>80</b>
--	-----------

# 1 INTRODUÇÃO

O crescimento e expansão dos grandes centros urbanos acarretam consequências bastante expressivas para o sistema de drenagem, muitos desses em estado precário, em decorrência das ocupações irregulares e da crescente impermeabilização, prejudicando o ciclo hidrológico, uma vez que diminui drasticamente a capacidade de infiltração do solo, causando a intensificação do escoamento superficial, e, conseqüentemente, aumentando as vazões durante as chuvas (CRUZ et al., 2019).

Os sistemas de drenagem fazem parte de uma infraestrutura da cidade e são uma chave importante na vida urbana. Se o sistema de drenagem falhar, as cidades ficam sujeitas a inundações, a possíveis degradações ambientais, a problemas de saneamento e de saúde e a perturbações dos serviços da cidade (BELUSSI; MÁXIMO; RODRIGUES, 2016).

Os sistemas tradicionais de drenagem acabam transferindo o problema para jusante, sem o controle na fonte, e implicam em continuadas intervenções localizadas após os eventos de inundação. No entanto, a demanda por um desenvolvimento urbano sustentável modificou a concepção dos sistemas tradicionais de drenagem nos últimos anos, a chamada *Low Impact Development - LID*, denominado no Brasil como Desenvolvimento Urbano de Baixo Impacto, busca soluções que proporcionam a retenção artificial das águas pluviais, a fim de compensar as perdas na retenção natural, é uma abordagem para manejo sustentável das águas pluviais que busca atenuar os efeitos negativos da urbanização sobre as bacias hidrográficas. Os principais objetivos das práticas LID são minimizar o volume e vazão de pico do escoamento superficial, aumentar a evapotranspiração, infiltração e recarga dos aquíferos subterrâneos e reduzir as cargas poluentes nas águas superficiais e subterrâneas (FRANÇA, 2020; GÜLBAZ; KAZEZYILMAZ-ALHAN, 2018).

Segundo Gutierrez e Ramos (2017), desde a década de 80, surgiram algumas técnicas de drenagem sustentável, as quais receberam diversas denominações ao redor do mundo: *BMP (Best Management Practices)*, *LID (Low Impact Development)*, *SUDS (Sustainable Urban Drainage Systems)*, *WSUD (Water Sensitive Urban Design)* e *GI (Green Infrastructure)*.

Seus conceitos buscam o mesmo objetivo, o de promover o gerenciamento eficiente do fluxo de águas urbanas nas cidades, com o intuito de evitar os transtornos causados por esta. Contudo, apesar de possuírem o mesmo objetivo, essas ações podem variar da simples preocupação com o manejo e tratamento das águas urbanas, até a instituição de ambientes integrados com paisagens multifuncionais, alinhando com concepções voltadas à preservação das águas, da biodiversidade e do bem estar da sociedade (GARRIDO NETO et al., 2019).

Os pavimentos de concreto permeável (PCP) têm sido cada vez mais usados como uma ferramenta de desenvolvimento de baixo impacto (LID), que ajuda a gerenciar os impactos da construção de infraestrutura e operações no ambiente natural (BRUINSMA et al., 2017; RODRÍGUEZ-ROJAS et al., 2018). O concreto permeável é um tipo único de pavimento de concreto composto principalmente de material cimentante e agregados graúdos graduados racionalmente, que fornecem à mistura uma estrutura interna macroporosa interconectada que permite a infiltração de águas pluviais através do pavimento nas camadas de base / sub-base (ACI 552R-10, 2010; XIE; AKIN; SHI, 2019; YAHIA; KABAGIRE, 2014). Os PCPs podem beneficiar significativamente o meio ambiente em ambientes urbanos. Eles podem levar à redução da quantidade de escoamento de águas pluviais e melhorar a qualidade da água em relação ao total de sólidos suspensos. Além disso, o problema do ruído do tráfego e o efeito da ilha de calor podem ser mitigados ao mesmo tempo (HOLMES; HART; KEVERN, 2017a, 2017b; KIM et al., 2017).

A modelagem hidrológica é mais um conceito utilizado para representar e compreender o comportamento hidrológico em uma bacia hidrográfica, grande parte dos modelos desenvolvidos se tornam operacionais em função das relações matemáticas (MACIEL, 2017). O *Storm Water Management Model da EPA (SWMM)* é um modelo dinâmico do tipo chuva-vazão de simulação de quantidade e qualidade de escoamento pluvial, utilizado para a simulação de um único evento de chuva ou a simulação contínua de longo prazo em zonas urbanas (ROSSMAN, 2015). O programa considera vários processos hidrológicos que produzem o escoamento de água das áreas urbanas, dentre eles estão: as precipitações variáveis no tempo (SANTINI JUNIOR, 2018), a análise de riscos para inundações, a infiltração da

precipitação, a detenção e a retenção de chuva/drenagem através de dispositivos de baixo impacto (LID).

Visando os princípios citados anteriormente, a presente dissertação visa integrar novas tecnologias da construção civil como o pavimento de concreto permeável para apoiar o manejo de águas urbanas, através do método de construção de cenários simulados e avaliados por meio de modelagem matemática, buscando minimizar a sobrecarga presente nos sistemas de drenagem tradicionais.

## **1.1 Justificativa**

Um dos principais impactos causados nas regiões ocupadas é o desequilíbrio do balanço hídrico, no qual ocorre uma diminuição significativa da capacidade de infiltração do solo devido a urbanização. A alteração no hidrograma do escoamento superficial é desenvolvida por acréscimo nos picos de vazões e no aumento do volume em um curto espaço de tempo, como resultado, têm-se as enxurradas e cheias urbanas (CARVALHO, 2008).

A forma tradicional para solucionar problemas na drenagem urbana são as construções de galerias pluviais para coleta e transporte do excesso de escoamento superficial para pontos a jusante das áreas atingidas. Ainda assim, o uso dessa metodologia para concepção de sistemas de drenagem, muitas vezes, não suporta a dimensão das vazões de escoamento nos pontos de descarga, se agravando, ainda, pela impermeabilização de grandes áreas urbanas em razão da ocupação desordenada, subdimensionamento de pontos de redes de drenagem e mal funcionamento em função de entupimentos provocados pelo lixo não coletado ou descartado em local inadequado (REIS ABREU; DE OLIVEIRA ILHA, 2014).

No Brasil, a Lei 11.445 (2007), estabeleceu como documento balizador para gestão do saneamento básico, os Planos Municipais de Saneamento Básico (PMSB), ferramenta de planejamento e gestão composto por diretrizes, estudos, programas, projetos, prioridades, metas, atos normativos e procedimentos; o documento contempla os quatro eixos do saneamento básico: o abastecimento de água potável, o esgotamento sanitário, o manejo de resíduos sólidos e a drenagem urbana.

Baptista, Nascimento e Barraud (2011) e Tucci (2012) alertaram para a necessidade de se adotar estratégias de gestão com abordagem integrada das águas pluviais urbanas, de modo a promover a interrelação entre todos os sistemas

que compõem o saneamento, para que estes dialoguem com a legislação e a gestão pública simultaneamente ao desenvolvimento do projeto de ordenamento urbano. Esta interrelação contribuirá, inclusive, para evitar o comprometimento da qualidade das águas por poluição urbana. A preservação da qualidade da água é fundamental em todo o mundo, em especial no Brasil, que possui enorme responsabilidade neste sentido pelo fato de ser um dos países com maior disponibilidade de água no planeta. Então, torna-se indispensável o controle ambiental para favorecer o ciclo hidrológico por intermédio do aumento da infiltração e reduzir os processos erosivos causados pelo aumento do escoamento superficial (PEITER; POLETO, 2012).

A sustentabilidade ambiental, tema recorrente na atualidade, motiva discussões em diversas áreas. Na construção civil um dos recursos que possui um peso significativo pela busca da sustentabilidade é o aproveitamento das águas pluviais, porém, visões críticas sobre os benefícios da captação de água pluvial em residências para o meio urbano ainda são mal desenvolvidas, e contam com poucas ações e incentivo dos órgãos públicos (COSENTINO; BORGES, 2016).

É fundamental que as águas pluviais das áreas urbanas sejam adequadamente drenadas, todavia é necessário que a estrutura do sistema de drenagem seja reconsiderada para que possam alcançar novos resultados. Os projetos de drenagem das cidades necessitam ter sistemas de escoamentos de águas pluviais eficientes e sustentáveis, capazes de acompanhar a evolução da cidade, para atender as necessidades da população e assegurar uma qualidade de vida adequada (MENDES, 2019).

A abordagem LID preconiza o desenvolvimento urbano de forma sustentável através da tentativa de retomar o ciclo hidrológico que existia antes da urbanização. Assim, áreas impermeáveis tornam-se verdes através da adoção de práticas como, por exemplo, a biorretenção, as valas e trincheiras de infiltração, os poços de infiltração, os pavimentos permeáveis e os telhados verdes. Essas práticas permitem a ocorrência dos processos de infiltração, retenção vegetal e evapotranspiração que reduzem o escoamento superficial. Lucas et al. (2015) descrevem que as valas, as trincheiras e os poços de infiltração constituem-se em alternativas que visam propiciar a infiltração em áreas reduzidas e sob condições controladas.

O autor cita ainda que a escolha da aplicação da técnica compensatória de drenagem a ser implantada, necessita da análise de alguns critérios específicos.

Esses critérios envolvem uma série de combinações de informações, como: hidrologia local, características da área contribuinte (impermeabilização e coeficiente de escoamento) e qualidade da água de entrada na estrutura.

O principal objetivo das técnicas compensatórias é a contenção das águas da chuva, no entanto, é fundamental que esses dispositivos se integrem aos ambientes dispostos, abordando de maneira multidisciplinar as boas práticas de manejo de águas pluviais, unindo a participação de diversos profissionais juntamente com o envolvimento da população local para aceitação e uso adequado das estruturas alternativas de drenagem, onde segundo os profissionais, este tem sido o maior desafio da implantação dessa tecnologia (OLIVEIRA, 2018).

Portanto, cada sistema não pode ser visto isoladamente, mas dentro de um mesmo conjunto de sistemas que, de alguma forma, interagem no funcionamento e podem propiciar um melhor uso da água. A prática, além de setorizada em termos de uso, tem a visão essencialmente local. O desafio é o de criar tecnologias que permitam viabilizar o conjunto de planejamento, projeto e operação de sistemas hídricos que compatibilizem de forma sustentável e adequada diferentes usos no conjunto da bacia ou região hidrográfica.

## **1.2 Objetivos**

### **1.2.1 Objetivo geral**

Analisar a capacidade de infiltração de diferentes cenários de pavimentos permeáveis em um trecho da Bacia do Una pelo Modelo de Gerenciamento de Águas Pluviais da EPA.

### **1.2.2 Objetivos específicos**

- Analisar comparativamente os diferentes cenários de inserção de pavimento permeável;
- Avaliar o efeito da espessura do revestimento na taxa de infiltração;
- Avaliar o efeito da espessura da base na taxa de infiltração;
- Avaliar o efeito da área de pavimento permeável na taxa de infiltração;
- Avaliar o potencial de captação de água de cada cenário.

### **1.3 Estrutura do trabalho**

O presente documento, que desenvolve um estudo sobre a modelagem de espessuras de revestimento de concreto permeável e seu reservatório por intermédio do software SWMM para redução do escoamento superficial e alagamentos, está disposto em cinco capítulos. O primeiro capítulo trata de assuntos gerais pertinentes à temática abordada, mostrando os objetivos geral e específicos, os quais serão analisados com mais abrangência no decorrer do trabalho.

O segundo capítulo expõe a revisão bibliográfica acerca dos efeitos da urbanização e seus sistemas de drenagem, e caracteriza os principais objetos de estudo do trabalho, partindo dos sistemas de drenagem urbana sustentáveis, conceituando as principais técnicas utilizadas no mundo, dando enfoque maior ao pavimento de concreto permeável. O capítulo também abrange um apanhado geral sobre o software SWMM.

O terceiro capítulo apresenta a metodologia e o programa experimental aplicado, a caracterização da sub-bacia estudada e modelada, a construção do modelo hidrológico-hidráulico aplicado à área de estudo e descrição dos cenários elaborados.

O quarto capítulo apresenta a discussão dos resultados para modelagem dos cenários propostos.

O quinto capítulo apresenta as considerações finais baseadas nos resultados apresentados.

E por fim as referências bibliográficas que serviram de fundamentação teórica para o estudo.

## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 2.1 Efeitos da Urbanização e Sistemas de Drenagem Urbana

As cidades começaram a se estabelecer por volta de 12.000 anos antes de Cristo, principalmente nas áreas mais produtivas chamada de crescente fértil, localizada entre os vales dos rios Tigres e Eufrates, nas antigas Mesopotâmia e Suméria (AQUAFLUXUS, 2011).

Por volta de 4000 a.C, a base do desenvolvimento estava na agricultura irrigada e a drenagem urbana funcionava como suporte para as atividades agrícolas (TUCCI, 2012), foi então que surgiu a necessidade do controle das inundações em períodos de cheia. A partir desse momento, grandes obras de engenharia foram desenvolvidas para conter as enchentes; e, com o passar do tempo, essas técnicas de drenagem foram se aprimorando e sendo executadas em outros tipos de serviços, como na construção de condutos subterrâneos e no melhoramento de terrenos naturalmente inundados.

Desse período até o início do século XX, o esgoto era disposto em fossas ou diretamente nas ruas sem coleta ou tratamento, em que o principal desafio era evitar a proliferação em massa de doenças, principalmente devido às condições sanitárias dos efluentes gerados pela própria população que contaminava suas principais fontes de abastecimento, causando uma alta taxa de mortalidade da população residente nas cidades (AQUAFLUXUS, 2011; TUCCI, 2012).

Então, a partir do ano de 1970, iniciou-se a denominada fase higienista (CHRISTOFIDIS; ASSUMPÇÃO; KLIGERMAN, 2019; GARRIDO NETO et al., 2019; TUCCI, 2012), também muito conhecida como fase *Tout à l'égout*, que traduzido do francês significa “tudo ao esgoto” (AQUAFLUXUS, 2011), marcada pela ideia de transportar o esgoto junto às águas pluviais através de condutos, afastando rapidamente e lançando o mais longe possível as águas contaminadas. Esse sistema resultou na redução das doenças e mortalidade, mas, por outro lado, gerou um colapso do ambiente urbano, causado pelo lançamento de efluentes sem tratamento nos corpos d'água e consequente contaminação dos mananciais, já que sempre haverá uma cidade a montante e a jusante para contaminar a água (GARRIDO NETO et al., 2019; SANTOS, 2012). Tucci (2012) complementa que nesse mesmo período verificou-se que era insustentável continuar com obras que

amplificassem o escoamento devido à urbanização, implicando uma revisão dos procedimentos para se utilizar sistemas de amortecimento em detrimento do sistema de canalizações, marco este denominado de fase corretiva das águas urbanas.

Nessa fase foi percebida uma melhora significativa na qualidade da água de rios, lagoas e lagos, que antes recebiam diretamente o esgoto in natura. No entanto, apesar de as cidades oferecerem um excelente sistema de esgoto sanitário, ainda foram detectados problemas na qualidade da água dos corpos hídricos na proximidade das áreas urbanas; segundo Aquafluxus (2011), foi quando notaram que a própria água da chuva, através do escoamento superficial, carregava diversos tipos de poluentes. A essa água suja dá-se o nome de poluição difusa.

Algumas cidades já passam a tratar também a água da chuva antes de lançar no corpo hídrico. As medidas estruturais em conjunto com medidas não estruturais ampliaram as possibilidades de indução a haver maior detenção, infiltração e percolação das águas, de modo a compensar as consequências negativas da drenagem tradicional, passando a ser conhecida como fase de desenvolvimento sustentável (CHRISTOFIDIS; ASSUMPÇÃO; KLIGERMAN, 2019).

Tucci e Meller (2007) dividem a história das águas urbanas em quatro fases distintas: pré-higienista, higienista, corretiva e desenvolvimento sustentável, conforme consta no Quadro 2.1.

**Quadro 2.1 – Fases de desenvolvimento das águas urbanas.**

<b>Fase</b>	<b>Características</b>	<b>Consequências</b>
<b>Pré-higienista: até início do século XX</b>	Esgoto em fossas ou na drenagem, sem coleta ou tratamento e água da fonte mais próxima, poço ou rio.	Doenças e epidemias, grande mortalidade e inundações.
<b>Higienista: antes da década de 1970</b>	Transporte de esgoto distante das pessoas e canalização do escoamento.	Redução das doenças, mas rios contaminados, impactos nas fontes de água e inundações.
<b>Corretiva: entre as décadas de 1970 e 1990</b>	Tratamento de esgoto doméstico e industrial, amortecimento do escoamento.	Recuperação dos rios, restando a poluição difusa, obras hidráulicas e impacto ambiental.

### Quadro 2.1– Fases de desenvolvimento das águas urbanas.

(conclusão)

Fase	Características	Consequências
<b>Desenvolvimento sustentável: depois da década de 1990</b>	Tratamento terciário e do escoamento pluvial, novos desenvolvimentos que preservam o sistema natural.	Conservação ambiental, redução das inundações e melhoria da qualidade de vida.

**Fonte: Tucci e Meller (2007)**

O crescimento dos ambientes urbanos e das cidades exige um tratamento sustentável, com desafios estruturais, dentre os quais, os problemas relacionados com a gestão de águas pluviais (CARMO; MARCHI, 2013).

O contexto da gestão da drenagem urbana, conhecida como manejo de águas pluviais urbanas, considerou como critério o ciclo das águas e os principais avanços técnicos associados à evolução da dinâmica da percepção hídrica.

Tucci (1999) afirma que juntamente com o avanço da urbanização ocorrem os seguintes impactos:

- Aumento das vazões máximas, devido à canalização do escoamento e impermeabilização das superfícies;
- Aumento da produção de sedimentos e resíduos sólidos (lixo);
- Deterioração da qualidade da água, pela lavagem do solo e ligações clandestinas de esgoto e;
- Uma desorganização em como a infraestrutura é implantada.

A drenagem urbana é uma das redes de composição da infraestrutura das cidades, em que representa diversos tipos de sistemas de saneamento ambiental, como sistema de esgotamento sanitário, de drenagem de águas pluviais, abastecimento de água e coleta de lixo (CARNEIRO, MIGUEZ, 2011).

Grande parte dos ambientes urbanos é atingida por inundações, sendo as superfícies impermeáveis, as principais causas. Durante as chuvas intensas e de curta duração, há um processo de escoamento superficial acelerado, acarretando o aumento da vazão e redução do tempo de pico, que sobrecarrega a capacidade de drenagem dos canais.

De acordo com Braga (2019), o sistema de drenagem corresponde à coleta, manejo e despejo de águas pluviais em dois componentes, a microdrenagem

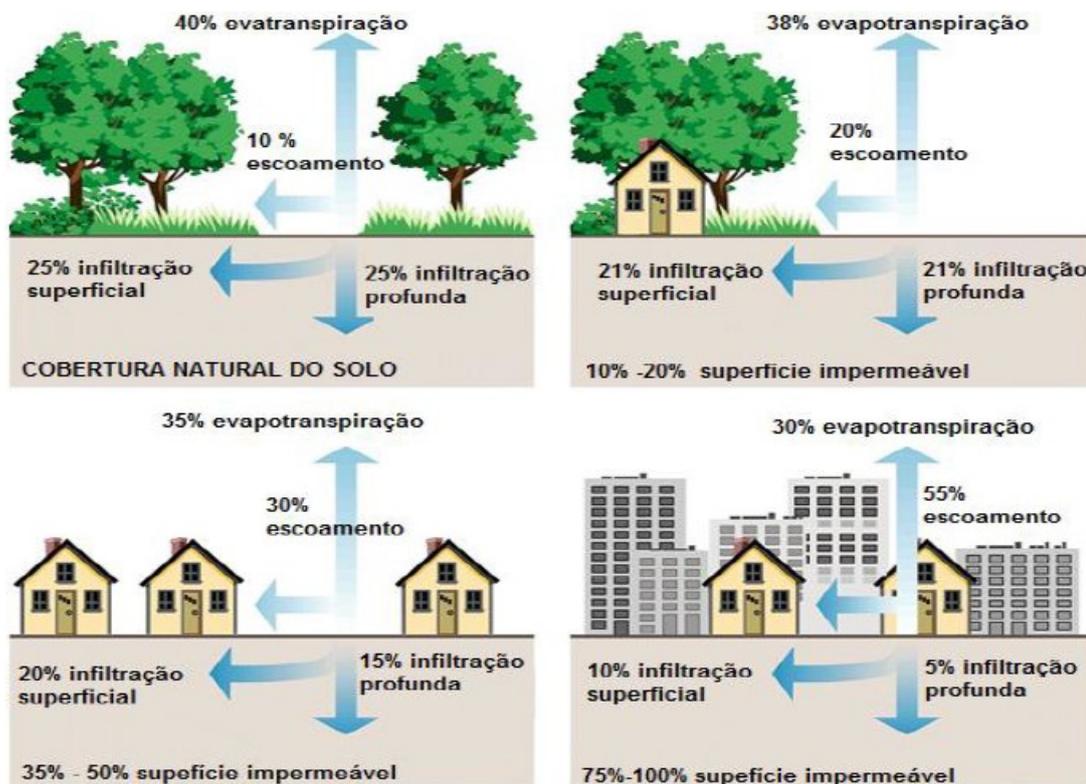
composta por bocas de lobo, sarjetas, galerias, poços de visita e tubos de ligação; e a macrodrenagem, representada por sub-bacias que cortam a rede urbana e têm sua curvatura e dimensões alteradas para se adequar à morfologia da cidade.

Conforme Augusto et al. (2017), o solo é prejudicado com a impermeabilização, pois altera seu escoamento hidrológico natural, sendo que uma grande porcentagem de precipitação passa a escoar superficialmente, necessitando de um sistema de drenagem de águas pluviais eficiente, para assim prevenir as catástrofes causadas por inundações, alagamentos, deslizamentos de terra, dentre outras intempéries.

Todos os anos o Brasil é atingido por enchentes. Dados do IBGE (2019) indicam que dos 5.570 municípios brasileiros, 59,4% não contam com instrumentos de planejamento e gerenciamento de riscos, sendo que 25% possuem Plano Diretor, contemplando enchentes, e 23% só possuem Lei de Uso e Ocupação do Solo prevendo tais situações. O relatório demonstra que na grande maioria dos municípios, as áreas urbanas são mais atingidas, devido à construção de moradias, rodovias, dentre outras obras que interferem na drenagem das águas.

As enchentes urbanas acontecem, principalmente, por conta da incapacidade de se reter as águas das chuvas em locais apropriados, seja para o reabastecimento dos lençóis freáticos ou para uso posterior; isso acontece com a impermeabilização da superfície, tais como: asfalto, telhados, concreto, conforme Figura 2.1. Cardoso et al. (2014), observando pelo lado ambiental, afirmam que a impermeabilização do solo contribui para elevação da temperatura e sobrecarga do sistema de drenagem, reduzindo a qualidade de vida humana e ambiental nas áreas urbanas.

A Lei Federal de Saneamento Básico 11.445 (2007), que estabelece as diretrizes nacionais para o saneamento básico no Brasil, define “sistema de drenagem e manejo das águas pluviais urbanas” como medidas tomadas através do conjunto de atividades, infraestruturas e instalações operacionais, de transporte, detenção ou retenção para o amortecimento de vazões de cheias, tratamento e disposição final das águas pluviais urbanas.



**Figura 2.1 – Relação entre cobertura impermeável e escoamento de superfície.**  
**Fonte: Fisrwg (2001)**

Com o avanço da urbanização, diversos fenômenos naturais dentre eles as cheias têm se intensificado, muitos deles devido ao mal funcionamento de dispositivos de drenagem urbana, seja na microdrenagem, na macrodrenagem ou em ambos (PONTE et al., 2014).

Obras de macrodrenagem têm por princípio a ampliação das seções dos canais naturais, construção de canais artificiais ou galerias de grandes dimensões para direcionamento das águas, dissipação de energia, proteção contra erosões e assoreamentos (MONTES; LEITE, 1985)

A autora complementa que o sistema de microdrenagem possui o papel de captar as águas pluviais e transferir o escoamento o mais rápido possível para jusante, por meio de galerias, até o deságue em córregos, rios ou canais. A rede de microdrenagem tem como componentes principais as galerias, guias, sarjetas, boca-de-lobo e poço de visita.

A Figura 2.2 representa os elementos que compõem os sistemas de micro e macrodrenagem.



(a)



(b)

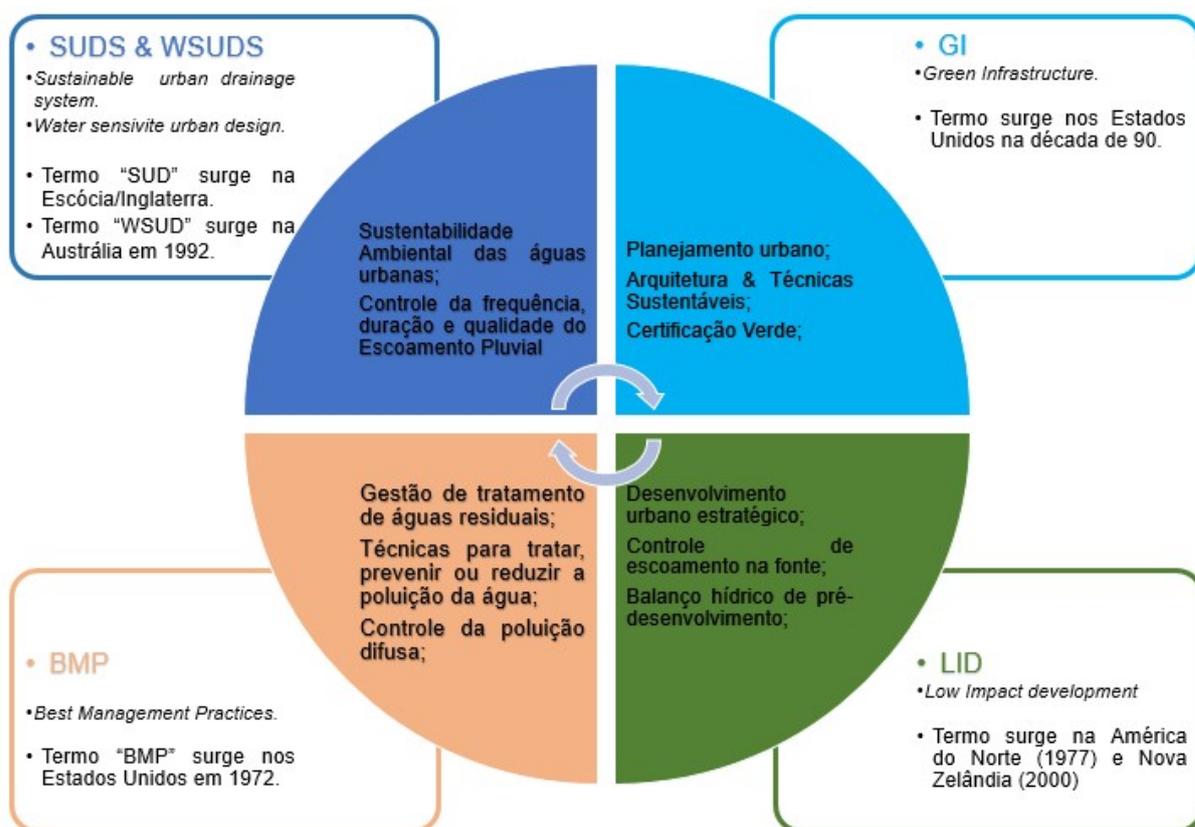
**Figura 2.2 – Elementos de microdrenagem (a) e macrodrenagem (b).**  
**Fonte: (a) Maia construtora (2020) (b) Vinagre et al. (2017)**

## 2.2 Sistemas de Drenagem Sustentáveis

Diante de toda essa urbanização não planejada, a ocorrência de eventos hidrológicos de alta intensidade mostrou a fragilidade dos sistemas de drenagem tradicionais, que sempre buscaram, entre outras coisas, implementar técnicas que acelerassem os escoamentos, como as obras de canalização dos rios. Essas técnicas acabam transferindo o problema para jusante, sem o controle na fonte, e implicam em continuadas intervenções localizadas após eventos de inundação. No entanto, uma abordagem mais atual, a chamada Drenagem Urbana Sustentável, busca soluções que proporcionam a retenção artificial das águas pluviais, a fim de compensar as perdas na retenção natural. Essas soluções diferem do conceito tradicional de canalização, mas podem estar a elas associadas, para adequação ou otimização do sistema de drenagem (CANHOLI, 2014).

Fletcher et al. (2015) encontraram, na literatura, os principais termos de técnicas utilizadas no mundo de controle na fonte: *low impact development* (LID) /

*low impact urban design and development (LIUDD); water sensitive urban design (WSUD); integrated urban water management (IUWM); sustainable urban drainage systems(SUDS) / sustainable drainage systems (SuDS); best management practices(BMPs); storm water control measures (SCMs); alternative techniques (ATs) or compensatory techniques (CTs); source control; e green infrastructure (GI)* (Figura2.3). Visando obter um maior aprofundamento e subsídios para a construção de eventuais cenários, realizou-se uma pré-seleção de técnicas, cujo critério foi a possibilidade de a técnica ser aplicada diretamente nas cidades por órgãos públicos ou privados, não dependendo da adesão de residentes, o que reduz os riscos para sua efetiva implantação.



**Figura 2.3 – Sistemas de drenagem sustentáveis.**  
**Fonte: Gutierrez e Ramos (2017)**

### 2.2.1 Melhores Práticas de Gestão – BMP's

O conceito das Melhores Práticas de Gestão (BMP) surgiu nos Estados Unidos e sua origem está relacionada com o controle da poluição industrial e com o

domínio das águas residuais para ser aplicada a drenagem urbana sustentável (MIGUEZ; VERÓL; CARNEIRO, 2012).

É um conjunto planejado de ações implementadas na bacia, com o objetivo de atenuar os impactos da urbanização, buscando reduzir a quantidade de água lançada no corpo receptor através da infiltração, e também melhorias na qualidade dessas águas. Exemplos típicos de BMP's incluem dispositivos de retenção ou retenção, dispositivos de infiltração e *wetlands* (AQUAFLUXUS, 2011; MIGUEZ; VERÓL; CARNEIRO, 2012).

Desta forma, as BMP's de águas pluviais devem funcionar de forma distribuída pela bacia hidrográfica, integrando o controle da quantidade e qualidade da água com o objetivo de mitigar os efeitos gerados pelas alterações do uso do solo, com custos otimizados (GARRIDO NETO et al., 2019; LIU et al., 2015; LIU; BRALTS; ENGEL, 2015; MWANGI et al., 2015). BMP's urbanas, como sistemas de biorretenção, pavimentos porosos, pátios permeáveis, barris / cisternas de chuva, telhados verdes, lagoas molhadas e lagoas secas, são práticas comuns implementadas em áreas urbanas para tratar a quantidade e qualidade do escoamento de águas pluviais (LIU et al., 2017).

Para fins de gestão da quantidade de água e melhoria da qualidade da água, um número crescente de BMP's tem sido estudado em projetos de pesquisa e implementado em projetos de gestão de bacias hidrográficas globalmente (STANG et al., 2016; WRIGHT et al., 2016; ZHUANG et al., 2016).

Apesar de ser ampla a implementação do BMP, permanecem dúvidas sobre a eficiência e qual combinação de práticas melhor atenderá as metas. Numerosos estudos empíricos de práticas individuais foram conduzidos para quantificar as eficiências e auxiliar na seleção e implementação de práticas, por exemplo, (AHIABLAME; ENGEL; CHAUBEY, 2013; LIU et al., 2016a, 2016b, 2016c). As BMP's representam sistemas ambientais complexos e dinâmicos, podendo causar impactos secundários no meio ambiente, que nem sempre são considerados no projeto inicial (ACUNHA; RUBIN; SILVEIRA, 2019).

### 2.2.2 Desenvolvimento de Baixo Impacto – LID

O Desenvolvimento de Baixo Impacto (LID) é uma estratégia de gerenciamento de águas pluviais e de uso da terra que busca restaurar os processos hidrológicos de infiltração, armazenamento, evaporação e transpiração da pré-urbanização, priorizando a conservação e o uso dos recursos naturais do local e integrando-se a um projeto (AQUAFLUXUS, 2011; FERREIRA, 2017).

Neste contexto, conforme Aquaflexus (2011), o uso de paisagens multifuncionais aparece como elemento útil na malha urbana, de modo a permitir a recuperação das características de infiltração e retenção da bacia natural, procurando imitar as funções hidrológicas da bacia natural, envolvendo volume, vazão, recarga e tempos de concentração.

Segundo Martin-Mikle et al. (2015), as técnicas de LID funcionam reduzindo o escoamento de áreas de fonte impermeáveis localizadas (por exemplo, telhados verdes e pavimento permeável) (AHIABLAME; ENGEL; CHAUBEY, 2013), desacelerando e filtrando o escoamento superficial de água, sedimentos e poluentes antes de chegarem à rede de córregos principal (por exemplo, através de grama, vales, jardins de chuva e lagoas de retenção / retenção) (LIU et al., 2015), diminuindo e filtrando o escoamento ou adjacente à rede de córregos principais.

De acordo com o site da EPA (2020) há muitas práticas que têm sido utilizadas para aderir a esses princípios, como instalações de biorretenção, jardins de chuva, telhados vegetados, barris de chuva e pavimentos permeáveis, como mostra o Quadro 2.2 Com a implementação de princípios e práticas LID, a água pode ser gerida de forma a reduzir o impacto das áreas construídas e promover o movimento natural da água dentro de um ecossistema ou bacia hidrográfica. Aplicado em larga escala, o LID pode manter ou restaurar as funções hidrológicas e ecológicas de uma bacia hidrológica.

**Quadro 2.2 – Exemplos de infraestrutura LID e algumas especificações sobre elas.**

<b>Infraestrutura</b>	<b>Característica principal</b>	<b>Função</b>	<b>Efeito</b>	<b>Considerações</b>
<b>Trincheiras de infiltração</b>	Reservatório linear escavado no solo preenchido com material poroso	Infiltração no solo e/ou retenção, de forma concentrada e linear, da água da chuva caída em superfície limítrofe	Retardo e/ou redução do escoamento pluvial gerado em área adjacente	Não recomendada para locais com lençol freático próximo à superfície, devido ao risco de contaminação
<b>Jardins de chuva</b>	É um tipo de sistema de bioretenção	Englobam os processos de retenção e/ou infiltração	Redução do volume de escoamento superficial	Não recomendada para locais com lençol freático próximo à superfície, devido ao risco de contaminação
<b>Pavimentos permeáveis</b>	Pavimento com camada base porosa como reservatório.	Armazenamento e/ou infiltração temporária da chuva no local do próprio pavimento. Áreas externas ao pavimento podem também contribuir.	Retardo e/ou redução do escoamento pluvial gerado pelo pavimento e por eventuais áreas externas	Não pode ser usado em locais com tráfego intenso e/ou cargas pesadas
<b>Microrreservatório</b>	Reservatório de pequenas dimensões tipo “caixa d’água” residencial	Armazenamento temporário do esgotamento pluvial de áreas impermeabilizadas próximas	Retardo e/ou redução do escoamento pluvial de áreas impermeabilizadas	Recomendado somente se houver declividade para escoamento por gravidade até rede convencional
<b>Áreas vegetadas (Swales)</b>	Depressões lineares cobertas com grama e/ou vegetação	Permitir maior tempo para água infiltrar no solo natural abaixo dela	Retardo e/ou redução do escoamento pluvial	Não eficiente se a afluência vem com muitos sedimentos

**Fonte: Zanandrea (2016).**

Conforme EPA (2012), as práticas LID fornecem muitos benefícios ambientais e econômicos, tais como:

- **Melhor qualidade da água** - o escoamento de águas pluviais pode coletar poluentes como óleos, bactérias, sedimentos, metais, hidrocarbonetos e alguns nutrientes de superfícies impermeáveis e

descarregá-los nas águas superficiais. O uso de práticas LID reduzirá as águas pluviais carregadas de poluentes que chegam às águas locais. Uma melhor qualidade da água aumenta os valores das propriedades e reduz os custos de limpeza do governo.

- **Número reduzido de eventos de inundação dispendiosos** - em comunidades que dependem de valas e drenos para desviar o escoamento para cursos de água locais, podem ocorrer inundações quando grandes volumes de águas pluviais entram nas águas superficiais muito rapidamente. A incorporação holística de práticas de LID reduz o volume e a velocidade do escoamento de águas pluviais e diminui inundações e danos materiais caros.
- **Habitat Aquático Restaurado** - a água da chuva em movimento rápido causa erosão nas margens dos rios e nos canais dos rios, destruindo o habitat de peixes e outras formas de vida aquática. O uso de práticas LID reduz a quantidade de águas pluviais que atingem um sistema de águas superficiais e ajuda a manter as funções do canal natural e o habitat.
- **Recarga de água subterrânea aprimorada** - o escoamento que é rapidamente desviado através de valas e drenos para as águas superficiais não pode penetrar no solo. As práticas do LID retêm mais chuva no local, permitindo que penetre e seja filtrado pelo solo à medida que desce para o lençol freático.
- **Beleza aprimorada do bairro** - a infraestrutura tradicional de gerenciamento de águas pluviais inclui canos, emissários, canais de concreto e bacias vedadas inestéticas. O uso amplo do LID pode aumentar os valores das propriedades e melhorar as comunidades, tornando-as mais bonitas, sustentáveis e amigáveis à vida selvagem.

O manual EPA (2012) enfatiza que quando implementado de forma ampla, o LID também pode mitigar o efeito da ilha de calor urbano (por infiltração de água escorrendo de pavimentos quentes e sombreamento e minimizando superfícies impermeáveis), mitigar as mudanças climáticas (sequestrando carbono em plantas), economizar energia (com telhados verdes, sombreamento de árvores e custos reduzidos / evitados de tratamento de água), reduzir a poluição do ar (reduzindo o ozônio ao nível do solo), aumentar os valores das propriedades (melhorando a

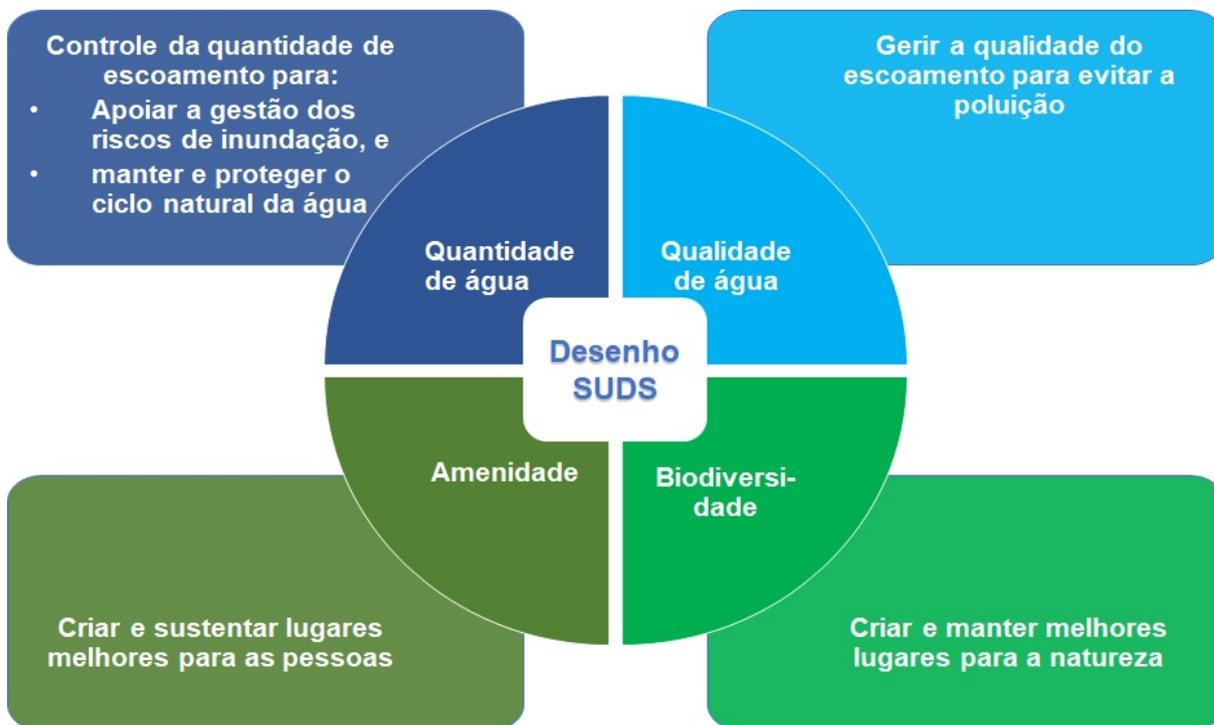
estética da vizinhança e conectando os ambientes naturais e construídos), e aumentar a recarga das águas subterrâneas.

### 2.2.3 Sistema de Drenagem Urbana Sustentável – SUDS

O Sistema de Drenagem Urbana Sustentável (SUDS) é considerado alternativa viável para a drenagem urbana em um clima alterado. SUDS, como um conceito, existe desde os anos 1970, mas tem ganhado atenção crescente na comunidade de pesquisa durante as últimas décadas devido às implementações em grande escala (HAGHIGHATAFSHAR; YAMANEE-NOLIN; LARSON, 2019).

Os sistemas de drenagem urbana sustentáveis oferecem soluções para problemas na gestão de águas pluviais, implementando medidas de evapotranspiração, infiltração e retenção na fonte, a fim de alcançar um ciclo da água mais natural (CANHOLI, 2013; FLETCHER et al., 2015).

Os SUDS são concebidos para maximizar as oportunidades e benefícios que pode-se obter com a gestão das águas superficiais. Há quatro categorias principais de benefícios que podem ser alcançados: quantidade de água, qualidade da água, amenidade e biodiversidade. Estes são referidos como os quatro pilares do design dos SUDS (BALLARD et al., 2015), observados na Figura 2.4.



**Figura 2.4 – Principais categorias de benefícios.**  
Fonte: Ballard et al. (2015). Adaptado pelo autor.

Conforme Ballard et al. (2015) e Digman et al. (2015), a concepção do SUDS deve, tanto quanto possível, basear-se nos seguintes elementos:

- Utilizar o escoamento de águas superficiais como um recurso;
- Gerir as águas pluviais perto do local onde estas caem;
- Gerir o escoamento de água na superfície;
- Permitir que a água da chuva penetre no solo;
- Promover a evapotranspiração;
- Retardar e armazenar o escoamento para imitar as características do escoamento natural;
- Reduzir a contaminação do escoamento através da prevenção da poluição e controlar o escoamento na fonte;
- Tratar os escoamentos para reduzir o risco de contaminantes urbanos causadores de poluição ambiental.

Ao contrário das medidas de engenharia convencionais e monofuncionais, as medidas SUDS podem se tornar uma ferramenta de planeamento adicional para projetar sistemas urbanos mais resilientes e reavaliar a relação entre os componentes construídos e não construídos do ambiente urbano (LENNON; SCOTT; O'NEILL, 2014).

A provisão de mitigação de escoamento contra inundações pluviais, bem como a melhor proteção da dimensão hidrológica da paisagem, é alcançada através da infiltração, retenção e evapotranspiração (PAPPALARDO et al., 2017), que são fornecidos por soluções como telhados verdes, pavimentos permeáveis, jardins de chuva, trincheiras de infiltração e pântanos construídos. Consequentemente, a capacidade do sistema urbano de gerenciar os fluxos de água é aprimorada juntamente com a integração desses sistemas de drenagem de base natural, fortalecendo, assim, o desempenho geral do assentamento urbano.

Embora o tratamento de águas pluviais com SUDS tenha muitas vantagens, nem sempre é a melhor opção em todos os casos, pois depende de condições ambientais e de infraestrutura específicas dentro de cada bacia. Por exemplo, se um sistema de drenagem de águas pluviais funcional de tamanho apropriado e uma instalação de tratamento centralizada já existirem em uma bacia hidrográfica urbana, continuar com esta abordagem ainda pode ser a melhor alternativa. Os requisitos de manutenção individuais dos diferentes sistemas é outra questão importante que

deve ser considerada no processo de tomada de decisão. Embora a manutenção contínua de instalações de tratamento de águas pluviais centralizadas possa ser relativamente simples e rotineira, garantir que os dispositivos SUDS sejam mantidos de maneira adequada pode, muitas vezes, representar desafios significativos (DIERKES; LUCKE; HELMREICH, 2015).

A incerteza na probabilidade de se obter todos os benefícios do SUDS vem de várias formas, incluindo (mas não se limitando a): dados físicos, mudanças ao longo do tempo e desempenho operacional. Obviamente, essa incerteza não se limita ao SUDS, e é provável que se aplique igualmente a outras formas de infraestrutura de drenagem (DIGMAN et al., 2015).

#### 2.2.4 Desenvolvimento Urbano Sensível à Água – WSUD

De acordo com Faustino (2017), o nascimento da ideia de WSUD e seu amadurecimento ocorreram entre o final da década de 1980 e meados da década de 1990, período mais relevante para sua formulação, com importantes ações para disseminar a ideia, o que só ocorre a partir de 2010.

O programa implantado no final da década de 1990 envolveu parcerias entre agências de governos, serviços públicos, indústrias e comunidades para a criação e implementação de programas de economia de água bem-sucedidos, que utilizavam água, empresas que fabricavam e forneciam equipamentos e empresas que ofereciam serviços para ajudar os clientes na manutenção de seus jardins (ANDRADE et al., 2018).

O Programa conta também com uma abordagem de “Desenho Urbano Sensível à Água” que reconhece a influência da configuração urbana nos fluxos de água e o ciclo da água urbano como recurso: a água potável, a água da chuva, as águas de drenagem, os cursos d’água potável, as águas cinzas, as águas negras e as águas subterrâneas, além da mineralização de água (WONG et al., 2013).

WSUD se define como a integração do planejamento urbano com a gestão, proteção e conservação do ciclo urbano da água, que assegura que a gestão urbana da água é sensível aos processos hidrológicos e ecológicos naturais. Wong (2006) declara que o termo WSUD compreende duas partes – “Sensível à Água” e “Desenho Urbano”. Desenho urbano é um campo bem reconhecido associado ao planejamento e concepção arquitetônica de ambientes urbanos, abrangendo

questões que tradicionalmente têm surgido fora do domínio da água, mas que, no entanto, interagem ou têm implicações para os efeitos ambientais no solo e na água. A WSUD introduz a "sensibilidade à água" na concepção urbana, ou seja, visa assegurar que à água seja dada a devida proeminência dentro dos processos de concepção urbana. O termo "Sensível à Água" desafia um novo paradigma na gestão integrada do ciclo urbano da água que integra as várias disciplinas da engenharia e ciências ambientais associadas à prestação de serviços de água, incluindo a proteção dos ambientes aquáticos em áreas urbanas. Os valores comunitários e as aspirações dos lugares urbanos regem necessariamente as decisões de concepção urbana e, por conseguinte, as práticas de gestão da água.

Na WSUD, o ciclo das águas é identificado como elemento essencial para conduzir o ordenamento urbano, presumindo que o respeito ou a recuperação das dinâmicas hidrológicas em meio urbano deve orientar o urbanismo. O objetivo desse processo é a criação de cidades sensíveis às águas, que assegurem a equidade intergeracional e demonstrem resiliência às mudanças climáticas por meio de uma infraestrutura adaptável e multifuncional somada a um desenho urbano que contribua para reforçar um comportamento sensível à água (WONG; BROWN, 2009).

Segundo Meldrum e Smyth (2017), o principal objetivo do WSUD é introduzir a gestão sustentável das águas superficiais na paisagem urbana. As técnicas WSUD são usadas para lidar com a água especificamente dentro da área urbana, trazendo uma abordagem mais holística e estética para a gestão da água e para atender não apenas a critérios de quantidade, qualidade e comodidade, mas também de estética, saúde e bem-estar; além de fornecer planejamento integrativo. O Quadro 2.3 demonstra a síntese conceitual da aplicação do WSUD.

**Quadro 2.3 – Síntese conceitual do WSUD.**

<b>Aspectos conceituais</b>	
<b>Princípios</b>	Inserir a hidrologia no planejamento urbano
	Gestão em nível de bacia hidrográfica
	O manejo total do ciclo hidrológico
	Mimetizar os processos naturais
	Controle da poluição na fonte
	Áreas de reserva devem ser integradas à paisagem natural urbana

**Quadro 2.3 – Síntese conceitual do WSUD.**

(conclusão)

<b>Aspectos conceituais</b>	
<b>Princípios</b>	Vegetação como elemento de projeto
<b>Objetivos</b>	Reduzir a demanda por água potável com instalações eficientes e reuso de água das chuvas e cinzas
	Minimizar a produção de esgotos e tratá-los até um padrão aceitável para reuso de efluentes e/ou lançamentos em corpos receptores
	Assegurar a proteção da integridade ecológica dos corpos receptores mantendo o regime hidrológico da bacia
	Proteger os sistemas naturais e valorizá-los como elemento da paisagem urbana
	Aproximar as condições hidrológicas de pós-ocupação às de pré-ocupação
	Agregar valor ao reduzir custos de desenvolvimento e implantação de infraestrutura convencional
<b>Ferramentas</b>	Melhores práticas de planejamento: ferramentas de projeto sensíveis à água
	Melhores Práticas de Manejo: técnicas para a redução da demanda por água potável e técnicas para o manejo de águas pluviais

**Fonte: Faustino (2017).**

### 2.2.5 Infraestrutura Verde - GI

Segundo Azevedo (2019), o termo Infraestrutura verde está inserido em um contexto muito mais amplo, se baseando em uma estrutura ecológica necessária para a sustentabilidade ambiental, social e econômica. A mesma se difere das práticas tradicionais de planejamento de espaços abertos, mesclando ações de conservação com o desenvolvimento do uso do solo aplicado na infraestrutura existente.

Essa metodologia pode ter diferentes contextos, no entanto, esses conceitos convergem significativamente dentre as definições disponíveis no que envolve áreas verdes naturais e em áreas urbanas e rurais, que é sobre a conexão de áreas verdes abertas e que essa infraestrutura pode fornecer múltiplos benefícios à população (DAVIES et al., 2015).

O termo “infraestrutura” indica um sistema de administração ou de manejo que dá suporte a um serviço ou função específica, geralmente funções como transporte, comunicação, geração e distribuição de energia. Relaciona-se, portanto, com importantes atividades humanas. O acréscimo de “verde” à palavra

“infraestrutura” mantém o sentido de suporte a essas atividades, mas denota um viés de sustentabilidade ao termo (MOURA, 2013).

Portanto, a abordagem de Infraestrutura Verde, no gerenciamento de águas pluviais, representa uma série de medidas que utilizam sistemas de vegetação/solo ou sistemas de engenharia para captar e reutilizar, armazenar, infiltrar ou evapotranspirar águas pluviais de modo a reduzir os fluxos para o sistema de drenagem convencional, ao mesmo tempo em que oferece uma série de outros benefícios ambientais e sociais (AZEVEDO, 2019).

Em apoio ao aumento da conexão com a natureza, mais de 40 anos de pesquisa têm dado argumentos convincentes mostrando que experiências da natureza em áreas verdes estão ligadas a uma amplitude de resultados positivos de bem-estar humano. Esses incluem melhor saúde física, melhora do bem-estar mental, maior bem-estar social e promoção de comportamentos positivos de saúde, como a atividade física (SANDIFER; SUTTON-GRIER; WARD, 2015; SHANAHAN et al., 2016).

A integração do GI nas cidades é uma estratégia central de longo prazo para os urbanistas cumprirem metas mais amplas em relação: ao equilíbrio ambiental (CORTINOVIS; GENELETTI, 2018; LI et al., 2016); à sustentabilidade (ARTMANN et al., 2017; LI et al., 2016; MOLLA, 2015); e a contextos urbanos saudáveis (CORTINOVIS; GENELETTI, 2018; GUPTA et al., 2016; KABISCH et al., 2016; SONTER et al., 2016). Especificamente, a conexão do ambiente urbano com áreas naturais melhora o bem-estar da comunidade e o desempenho da dinâmica natural (KABISCH et al., 2016; SONTER et al., 2016; ŽLENDER; THOMPSON, 2017).

Exemplos dos benefícios das árvores e da vegetação incluem a captação de água, filtração, infiltração, decomposição dos poluentes e a absorção de nutrientes e toxinas. Em nível macro, os componentes podem incorporar vários processos de nível micro e levar a processos maiores e a sistemas mais complexos, tais como reservas naturais, parques e paisagens. Além disso, a GI parece sobrepor-se ao Desenvolvimento de Baixo Impacto (LID) e ao Desenho Urbano Sensível à Água (WSUD), sobre os quais existem numerosos trabalhos. Independentemente da escala de um projeto, os sistemas de GI, que simulam processos e ciclos naturais e são consonantes com os próprios processos da natureza, são considerados benéficos. Embora exista alguma confusão (e potencialmente continua a existir) com

o uso das várias terminologias, a Infraestrutura Verde difere de termos como Edifícios Verdes e Desenvolvimento de Baixo Impacto (GAMAGE et al., 2014).

O Quadro 2.4 compara os três termos em relação à definição, à escala principal, a exemplos e aos benefícios esperados.

**Quadro 2.4 – Terminologias ligadas à Infraestrutura Verde.**

	<b>Infraestrutura Verde</b>	<b>Edifícios Verdes</b>	<b>Desenvolvimento de Baixo Impacto (LID)</b>
<b>Definição</b>	"Uma rede interligada de áreas naturais e outros espaços abertos que conserva os valores e funções naturais dos ecossistemas, sustenta o ar e a água limpos e fornece um vasto leque de benefícios para as pessoas e para a vida selvagem. Utilizada neste contexto, a Infraestrutura Verde é o quadro ecológico para a saúde ambiental, social e econômica - em suma, o nosso sistema natural de apoio à vida" (BENEDICT; MCMAHON, 2002).	"A prática de criar estruturas e usar processos ambientalmente responsáveis e eficientes em termos de recursos ao longo do ciclo de vida de um prédio, desde a implantação até o projeto, construção, operação, manutenção, renovação e desconstrução" (EPA, 2011)	"Uma estratégia de projeto do local com o objetivo de manter ou replicar o regime hidrológico de pré-desenvolvimento através do uso de técnicas de projeto para criar uma paisagem hidrológica funcionalmente equivalente" (EPA, 2000).
<b>Área de interesse</b>	Macroescala - ou seja, em termos de regiões e paisagens.	Edifícios: uso eficiente de energia, água e recursos.	Os meios específicos do local para compensar os impactos do ambiente construído. Gestão da água como um foco específico nos EUA.
<b>Exemplos</b>	Espaços abertos verdes, como parques, florestas, zonas úmidas, cinturões verdes, corredores verdes.	Fontes renováveis de energia para iluminação, aquecimento e outras coisas. Telhados vivos.	Instalações de biorretenção, jardins de chuva, telhados vegetativos, barris de chuva e pavimentos permeáveis.
<b>Benefícios esperados</b>	Muitos, dependendo do tipo e da escala da prática GI. Por exemplo, as reservas naturais podem ajudar a proteger a vida selvagem, enquanto uma prática como telhados vivos, pode ajudar a minimizar os impactos do escoamento superficial.	Impacto ambiental minimizado dos edifícios, incluindo impacto no uso da energia e recursos da água. Saúde e segurança dos habitantes. Redução dos custos associados à água, energia, recursos, entre outros gastos.	Mitigação dos impactos associados à infraestrutura cinza - por exemplo, jardins de chuva para reduzir o escoamento das águas pluviais.

**Fonte: Gamage et al. (2014). Adaptado pelo autor.**

De acordo com Davies et al. (2015), em um nível geral, podem ser identificados cinco grandes conjuntos de interesses em GI:

1. Gestão sustentável de recursos - particularmente relacionada com o papel da GI na gestão da terra e dos recursos hídricos, incluindo a produção (por exemplo, culturas energéticas e alimentares), controle da poluição, melhoria do clima e aumento da porosidade da cobertura do solo;

2. Biodiversidade - particularmente relacionada com a importância da conectividade dos habitats numa variedade de escalas de paisagem;

3. Recreação - particularmente relacionada com as vias verdes e a utilização de itinerários não rodoviários para dirigir ao público questões de saúde e qualidade de vida;

4. Paisagem - examinar recursos tais como: espaços verdes e corredores de estética, experiencial e pontos de vista funcionais;

5. Desenvolvimento regional e promoção - particularmente no que diz respeito a questões de comunidades sustentáveis relacionados com a qualidade ambiental global e a qualidade de vida.

Em termos de terminologia, enquanto as práticas sob denominação de LID também podem ser categorizadas sob GI, o foco para GI é mais amplo em uma perspectiva de nível de região. Portanto, em uma perspectiva local, o LID é semelhante à GI em termos de práticas e benefícios acumulados (GAMAGE et al., 2014).

### **2.3 Pavimento em Concreto Permeável**

O concreto permeável foi usado pela primeira vez em 1852 na Europa; o continente estava deficiente de habitações, então necessitou desenvolver novos métodos de construção. No Reino Unido, duas casas foram construídas a partir de cimento, brita e água. Segundo os registros do (ACI 552R-10, 2010), esse tipo de concreto não foi citado na literatura até o ano de 1923, quando 50 casas de dois pavimentos foram construídas em Edimburgo, na Escócia, utilizando como agregados o clínquer.

O boletim do ACI 552R-10 (2010) fez uma análise histórica sobre o tema, em que consta que antes da Segunda Guerra Mundial, a produção de concreto permeável estava limitada a casas de dois andares. Porém, depois de 1946, o concreto permeável era usado para uma gama muito mais ampla de aplicações. Isso se deu devido à grande quantidade de agregados graúdos disponíveis. O boletim

argumenta que a principal vantagem ao uso desse material era o menor consumo de cimento, em relação ao concreto convencional associado a eventuais vantagens no custo de execução, quando a mão de obra era escassa.

Ghafoori (1995) revela que nos anos 70 os EUA começaram a utilizar o concreto permeável, não relacionando à redução de custos, materiais, propriedades de isolamento térmico, mas sim a sua capacidade permeável. O objetivo principal era mitigar os efeitos de inundações que estavam se tornando frequentes devido ao processo de impermeabilização em áreas de construções recentes.

A partir da década de 90, aparecem estudos do uso do concreto permeável como uma solução aos sistemas de drenagem, sendo utilizado para armazenar temporariamente o excedente pluvial, reduzindo a incidência de inundações, ajudando na redução da quantidade do escoamento superficial dessas águas, além de permitir a infiltração natural e contribuir para o desenvolvimento sustentável (LAMB, 2014).

Essas vastas vantagens tornaram o pavimento permeável objeto de estudo na comunidade científica internacional, promovendo a intenção de caracterizá-lo e normatizá-lo, visando a sua popularização (MARUYAMA; FRANCO, 2016; JUNIOR, 2019).

O concreto permeável consiste num cimento hidráulico com vazios interligados; como resultado gera um material altamente permeável, permitindo que a água passe rapidamente; é composto por cimento Portland, agregado graúdo, pouco ou nenhum agregado miúdo e água (ACI 552R-10, 2010). Já na NBR 16416 ABNT (2015), é o concreto com vazios interligados que permitem a percolação da água pela ação da gravidade.

Para Pereira e Barbosa (2015), o concreto permeável possui altos índices de vazios interligados entre si, que permitem a passagem dos fluidos, resultando em uma elevada permeabilidade.

O concreto permeável possui uma importante aplicação para construções sustentáveis, sendo uma tecnologia de baixo impacto e muito utilizado para preservar a qualidade da água. O uso adequado do concreto permeável está entre as melhores práticas de gestão, reconhecida pela Agência de Proteção Ambiental (EPA) dos EUA, devido ao controle de poluição e gestão de águas pluviais.

Possui como característica uma menor resistência mecânica comparado com o concreto convencional, sendo mais vulnerável quando em cargas de tráfego em movimento. A norma NBR 16416 ABNT (2015) apresenta a parâmetros de resistência mecânica e espessura mínima do revestimento de concreto permeável, como disposto na Tabela 2.1.

**Tabela 2.1 – Resistência mecânica e espessura mínima do revestimento permeável**

Tipo de revestimento	Tipo de solicitação	Espessura mínima (mm)	Resistência mecânica característica (MPa)	Método de ensaio
Peça de concreto (juntas alargadas ou áreas vazadas)	Tráfego de pedestres	60	$\geq 35,0^a$	ABNT NBR 9781
	Tráfego leve	80		
Peça de concreto permeável	Tráfego de pedestres	60	$\geq 20,0^a$	
	Tráfego leve	80		
Placa de concreto permeável	Tráfego de pedestres	60	$\geq 2,0^b$	ABNT NBR 15805
	Tráfego leve	80		
Concreto permeável moldado no local	Tráfego de pedestres	60	$\geq 1,0^c$	ABNT NBR 12142
	Tráfego leve	100	$\geq 2,0^c$	

Notas:  
<sup>a</sup> determinação da resistência à compressão, conforme a ABNT NBR 9781.  
<sup>b</sup> determinação da resistência à flexão, conforme a ABNT NBR 15805.  
<sup>c</sup> determinação da resistência à tração na flexão, conforme a ABNT NBR 12142.

**Fonte: NBR 16416 ABNT (2015).**

O pavimento permeável tem seu funcionamento baseado em alguns princípios. São eles (SUZUKI; AZEVEDO; JÚNIOR, 2014):

- Entrada imediata da água da chuva no corpo do pavimento. Tal fato pode ocorrer de forma distribuída, caso de revestimentos porosos, ou ser localizada. Neste último caso, utilizam-se drenos laterais ou bocas de lobo;
- Estocagem temporária da água da chuva na estrutura reservatório no interior do pavimento, nos vazios desta camada;
- Evacuação em baixa velocidade da água, a qual se dá por infiltração no solo. O tempo de infiltração recomendado é de 24 à 72hs. Tal fato colaborará para que a água pluvial lançada nos rios e córregos adentre neles em um tempo maior do que normalmente ocorreria num sistema de

pavimentação convencional, o que ajuda a evitar os problemas de alagamentos e enchentes.

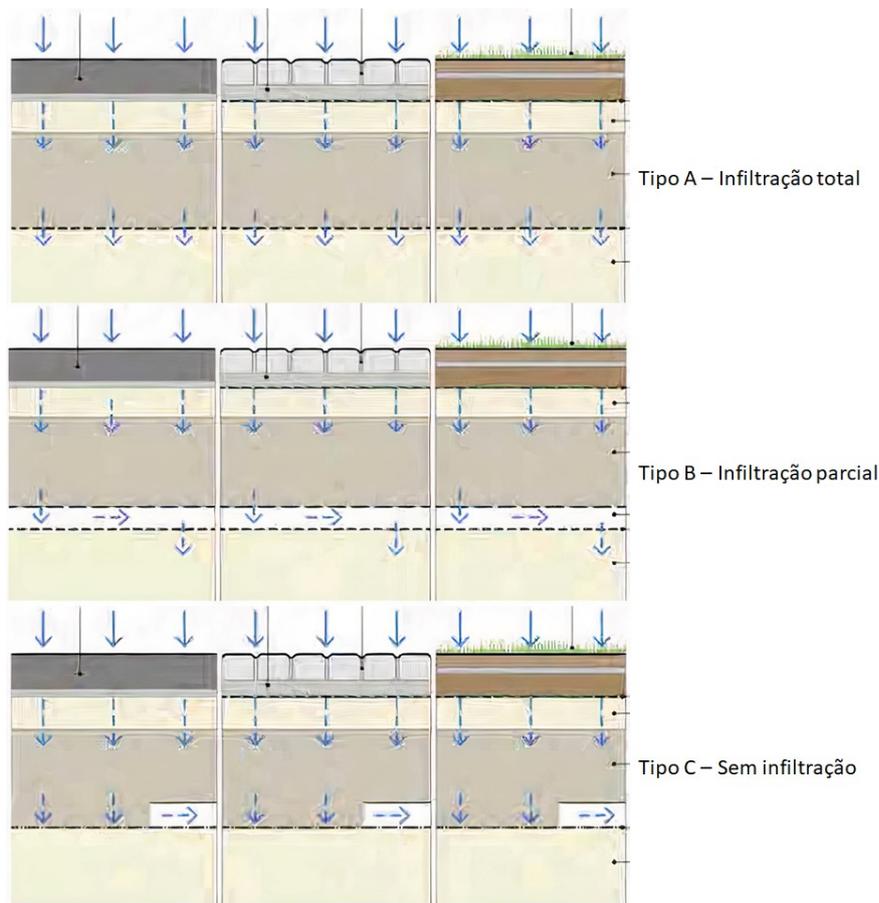
Os autores Suzuki, Azevedo e Júnior (2014) afirmam que, com base nos princípios indicados anteriormente, os pavimentos permeáveis podem ser classificados em quatro tipos:

- Tipo 1: tem revestimento e reservatório poroso e a água sai por infiltração no solo;
- Tipo 2: tem revestimento e reservatório poroso, mas com manta impermeável, de modo que a água saia por coletor, não por infiltração;
- Tipo 3: tem revestimento impermeável associado a coletor que direciona a água a reservatório poroso. Esta água é armazenada e infiltra no solo;
- Tipo 4: tem revestimento impermeável, associado a coletor que direciona a água a reservatório poroso e a água armazenada é direcionada a coletor e deste para exutório.

Segundo Marchioni e Silva (2011) e Ballard et al. (2015), o projeto de pavimento permeável pode se enquadrar em três categorias básicas, que dependem do armazenamento da água provido pelo reservatório e da capacidade de infiltração do solo, conforme o fluxo hidráulico. As categorias são: tipo A (infiltração total no solo); tipo B (infiltração parcial no solo) e tipo C (sem infiltração no solo), conforme Figura 2.5.

Para que seja eficiente, o sistema do pavimento permeável deve ter manutenção periódica evitando a colmatagem, que é o entupimento dos vazios que garantem a permeabilidade do pavimento. Nos primeiros dois anos, há uma tendência do concreto poroso em perder 50% da permeabilidade e continuar perdendo até perder por completo após sete anos. No caso de concreto permeável moldado in loco, a manutenção é feita com a retirada de 3 ou 4cm da camada mais externa, que é substituída por nova camada de revestimento (MAZZONETTO, 2011).

Sansalone et al. (2012) afirmam que realizando a manutenção pelo método de aspiração, mesmo após ocorrer colmatagem, há uma recuperação de 96% da condutividade hidráulica, além de ser um método de manutenção comum, bem desenvolvido e sustentável.



**Figura 2.5 – Estrutura do poço de infiltração.**  
**Fonte: Ballard et al. (2015). Adaptado pelo autor.**

Puliti et al. (2012) citam as vantagens e desvantagens dos pavimentos permeáveis:

- Tratamento da água da chuva, através da remoção de poluentes;
- Diminuição da necessidade de meio-fio e canais de drenagem;
- Aumento da segurança e conforto em vias, pela diminuição de derrapagens e ruídos;
- Dispositivo de drenagem que se integra completamente à obra, não necessitando de espaço exclusivo para o dispositivo.

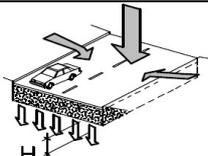
Sobre as desvantagens do pavimento permeável (PULITI ET AL., 2012):

- Pouca perícia dos engenheiros e contratantes em relação à tecnologia;
- O pavimento poroso tem a tendência de se tornar obstruído, se inapropriadamente instalado ou mantido;

- O pavimento poroso envolve um risco de falha considerável (devido à colmatação ou má construção);
- Há o risco de contaminação do aquífero, dependendo das condições do solo e da suscetibilidade do mesmo.

Silveira e Goldenfum (2007) demonstram o modelo de cálculo manual para o pré-dimensionamento de pavimentos permeáveis (Tabela 2.2), o pavimento é admitido como tendo uma camada suporte porosa (geralmente brita) abaixo do pavimento (revestimento) propriamente dito. O que é pré-dimensionado é a espessura dessa camada reservatório. Para o pavimento permeável, tem-se a área de percolação coincidente com a área do dispositivo em planta.

**Tabela 2.2 – Equações de pré-dimensionamento do pavimento permeável.**

Dispositivo	Representação esquemática	Fórmula de pré-dimensionamento	
		H	$V_{m\acute{a}x}$
Pavimento permeável		$H = \frac{V_{m\acute{a}x}}{\eta}$	$V_{m\acute{a}x} = \left( \sqrt{\frac{a}{60}} \sqrt{\beta T^{b/2}} - \sqrt{\frac{c}{60}} \sqrt{q_s} \right)^2$

Notas:

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

$V_{m\acute{a}x}$  = Volume de dimensionamento (mm)

$\eta$  = porosidade do material de enchimento do dispositivo

a, b, c = parâmetros da equação IDF de Talbot

$\beta$  = produto do coeficiente de escoamento pela razão entre a área contribuinte e a área do dispositivo

T = período de retorno (anos)

$q_s$  = vazão de saída constante do dispositivo (mm.h<sup>-1</sup>)

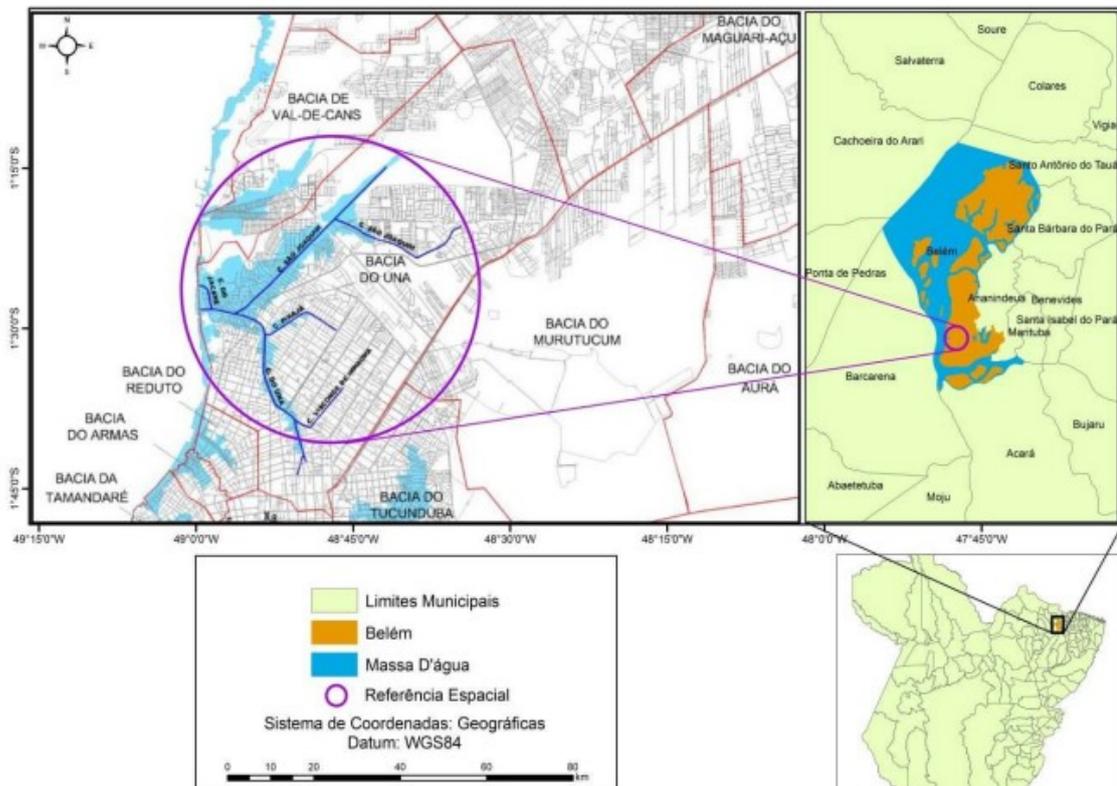
**Fonte: Silveira e Goldenfum (2007). Adaptado pelo autor.**

## 2.4 Bacia do Una

A Bacia Hidrográfica do Igarapé do Una situa-se na Região Metropolitana de Belém (RIBEIRO et al., 2015). Abrange uma área total de 4.401 hectares. Composta por 22 bairros, 14 de forma parcial (Benguí, Castanheira, Cabanagem, Maracangalha, Marco, Mangueirão, Miramar, Nazaré, Parque Verde, Reduto, São Brás, Souza, Umarizal e Val-de-Cans) e 8 de forma integral (Barreiro, Fátima,

Marambaia, Pedreira, Sacramento, Telégrafo, Umarizal e Una), conforme a Figura 2.6 (SILVA, 2004).

Segundo os parâmetros de pesquisa de Cruz (2018), a Bacia do Igarapé do Una é a mais extensa e mais populosa da Região Metropolitana de Belém, com mais de 500 mil habitantes, contudo, não apresenta representativa densidade populacional com 119 hab/ha.



**Figura 2.6 – Bacia do Igarapé do Una.**  
**Fonte: Prefeitura Municipal de Belém, 2014. Adaptado pelo autor.**

A fase estudos para o projeto Una remonta ainda na década de 1980, no entanto somente em 1993 foi devidamente iniciado através da assinatura entre o Governo do Estado e o BID (Banco Interamericano de Desenvolvimento). Em documentos públicos do Governo do Estado após a conclusão do projeto Una foi caracterizado dois objetivos centrais, o primeiro seria o de solucionar o problema das inundações nas zonas mais baixas da bacia através da instalação de um sistema de drenagem eficiente e o segundo foi o de prover a todos os habitantes da Bacia uma infraestrutura adequada em termos de vias de acesso, cobertura das

redes de água potável, esgoto sanitário, drenagem pluvial e coleta de lixo, com a finalidade de melhorar a qualidade de vida da população.

Porém esses objetivos se mostraram ineficazes e contrários as expectativas esperadas, pois em 2005, na primeira estação das chuvas os moradores de diversos pontos visualizaram e experimentaram inundações provocadas pelo transbordamento dos canais de drenagem e esses episódios se repetiram pelos anos posteriores, como pode ser visto nas Figuras 2.7 e 2.8.

**Figura 2.7 – Inundações na Bacia do Una – Bairro da Pedreira**



Fonte: Jornal O liberal (2021).

**Figura 2.8 – Inundações na Bacia do Una – Bairro da Pedreira**



Fonte: Frente Bacia do Una (2021).

Nesse contexto a Bacia Hidrográfica do Igarapé do Una possui áreas alagadas e alagáveis que somam 798 ha, essas grandes áreas alagáveis apresentam uma característica em comum, a baixa declividade, com apenas 1,8%, que podem influenciar na velocidade de escoamento e no acúmulo de água (PORTELA, 2005); (RIBEIRO et al., 2015); (CRUZ, 2018).

O solo da Bacia do Una, segundo Vinagre et al. (2017) constitui-se de aluviões recentes (argila, areia e cascalho) com espessura de até 20m, apresentando restos de matéria orgânica que formam depósitos superficiais às margens dos igarapés e caracterizado por planícies de várzeas sujeitas a inundações periódicas.

Segundo Ribeiro et al. (2015) a Bacia do Una apresenta amplitude altimétrica de 35m, com altitude mínima de 5m, média de 22,5m e máxima de 40m, e a relação de relevo é de 4,46m/km, pouco declivoso, onde 60% mostra-se plano (declividade de 0 a 3%), apresentando escoamento lento, pois a amplitude altimétrica e relação de relevo definem, em parte, a velocidade de escoamento.

O escoamento superficial “C” varia entre 0 e 1, e quanto mais próximo de 1 maior será o escoamento superficial, ou seja, a água infiltra menos e a superfície é considerada impermeável. O mapeamento do solo realizado pelo Plano Municipal de Saneamento Básico de Belém – Pa, serviu de base para o cálculo do coeficiente de escoamento superficial, que leva diretamente em consideração a impermeabilização da bacia e as características das superfícies. As classes obtidas no processamento foram: Áreas Florestais; Superfícies Cultivadas; Superfícies Gramadas; Solo Exposto; Revestimento Primário; Revestimento Betuminoso; Revestimento de Concreto; Telhados Cerâmicos; Superfícies Impermeáveis. Tais classes foram escolhidas por representarem os tipos de superfície utilizados na maioria das bibliografias que versam sobre o coeficiente de escoamento superficial, ou “C”, conforme apresentado a seguir na Tabela 2.3. Os valores médios observados em cada classe, arredondados com precisão de 0,05 serão utilizados para representar o “C” (PREFEITURA MUNICIPAL DE BELÉM, 2020).

**Tabela 2.3 – Coeficiente de escoamento superficial (C) adotado segundo as características de uso e ocupação do solo**

Características da superfície	Coeficiente escoamento “C”
Superfícies impermeáveis	0,95
Telhados cerâmicos	0,85
Revestimento Betuminoso (Pavimentação)	0,90
Revestimento de concreto	0,80
Revestimento primário (Solo/pedra)	0,50
Solo exposto	0,55
Superfícies gramadas	0,60
Superfícies cultivadas (agricultura)	0,25
Áreas florestais	0,20

**Fonte: Prefeitura Municipal de Belém (2020).**

O valor médio do coeficiente de escoamento superficial e as áreas de classe de uso e ocupação do solo da sub-bacia foram levantados e calculados e o resultado serviu de base para determinar o peso de cada classe dentro da bacia, então o valor determinado de C para as áreas foi multiplicado pelo valor relativo ao percentual de incidência, chegando ao valor médio ponderado de escoamento, conforme a Tabela 2.4.

**Tabela 2.4 – Coeficiente de escoamento superficial (C) médio da Bacia do Una**

Uso	C	Área (m <sup>2</sup> )	(%)	C médio
Áreas florestais	0,20	6.856.279,0	18,6	
Revestimentos primários	0,50	130.583,7	0,4	
Solos expostos	0,55	2.523.519,0	6,9	
Superfícies gramadas	0,60	6.668.970,7	18,1	
Revestimento de concreto	0,80	7.115.511,2	19,3	0,67
Telhados cerâmicos	0,85	5.693.850,3	15,5	
Revestimentos betuminosos	0,90	4.971.028,2	13,5	
Superfícies impermeáveis	0,95	2.850.657,9	7,7	
Total		36.810.400,0	100,0	

**Fonte: Prefeitura Municipal de Belém (2020).**

## 2.5 Precipitação na Cidade de Belém

Belém, capital do estado do Pará, possui uma área territorial de 1.059,406 km<sup>2</sup>, situada em uma zona equatorial, às margens da Baía do Guajará e Rio Guamá,

situa-se próximo a linha do equador, o que justifica as altas temperaturas, localizado nas coordenadas de latitude 01°26'S e longitude 48°26'W (DIAS; VALENTE; FERNANDES, 2020).

Ainda conforme Dias, Valente e Fernandes (2020) o clima é do tipo tropical úmido, com tipologia climática Af - Clima tropical úmido ou superúmido, sem estação seca, sendo a temperatura média do mês mais quente superior a 18°C (segundo a classificação de Köppen), que representa um clima equatorial chuvoso ou de floresta equatorial, caracterizado por sua grande precipitação anual acumulada, que ocorrem em dois períodos climáticos: um chuvoso (de dezembro a maio) e outro de estiagem (junho a novembro).

Segundo Melo et al. (2014) para medir a precipitação é necessário que se expresse a quantidade de chuva pela altura de água precipitada e acumulada sobre uma superfície plana e impermeável. Onde, para isso são necessários aparelhos denominados pluviômetros ou pluviógrafos, que realizam medidas periódicas, que variam de minutos a horas e as grandezas características para medições de precipitação são: altura pluviométrica, intensidade de precipitação e duração.

Cardoso et al. (2021) em seu estudo visualizou que as precipitações máximas coincidem com a época da estação de verão austral, mas a radiação recebida no topo da atmosfera em regiões próximas ao Equador varia bem pouco ao longo do ano. Outro fator de grande escala importante para a ocorrência de chuva nesta região é a proximidade da ZCIT (Zona de Convergência Intertropical) na qual os movimentos verticais ascendentes são fundamentais para a formação de nuvens convectivas.

Assim, o máximo de chuva ocorre no mês de março com média mensal de 450 mm (CARDOSO et al., 2021). Enquanto que, segundo Instituto Nacional de Meteorologia (2022), os menores acumulados mensais de precipitação, abaixo de 200 mm, ocorrem nos meses de junho a novembro, decorrente dos efeitos locais e de sistemas meteorológicos de mesoescala.

## **2.6 Modelagem Hidráulica**

Modelagem hidrológica é utilizada como mais uma tentativa de se representar e compreender a realidade do comportamento hidrológico em uma bacia

hidrográfica. Na maioria das vezes, os modelos desenvolvidos são operacionalizados em função de relações matemáticas (MACIEL, 2017).

Os modelos hidrológicos são capazes de gerar hidrogramas de cheia, resultantes de precipitações. Os hidrogramas gerados são utilizados como dados de entrada em modelos hidráulicos ou hidrodinâmicos, que por sua vez são capazes de calcular vazões (SILVA, 2016).

A modelagem hidrológica tem sido utilizada para prever eventos futuros potencialmente danosos à sociedade relacionados com o regime hídrico, e também tem sido utilizada para auxiliar os processos de tomada de decisão nas políticas públicas. Desde então, a modelagem hidrológica tem sido desenvolvida e tem originado modelos diversos, variando de acordo com os objetivos e a escala de aplicação, desde modelos voltados para o dimensionamento de reservatórios até modelos cujo objetivo é prever alterações nas vazões de uma bacia devido a mudanças climáticas (FILHO et al., 2013).

Silva (2016) cita que existem vários modelos hidrológicos disponíveis, e as principais diferenças entre eles são apontadas por meio de:

- Equações que regem os processos físicos;
- Parâmetros de entrada;
- Capacidade de simulação;
- Proposta de utilização;
- Limitações.

Os modelos são classificados, dentre outras formas, de acordo com o tipo de variáveis utilizadas na modelagem (estocásticos ou determinísticos), o tipo de relações entre essas variáveis (empíricos ou conceituais), a forma de representação dos dados (discretos ou contínuos), a existência ou não de relações espaciais (concentrados ou distribuídos) e a existência de dependência temporal (estacionários ou dinâmicos), conforme o Quadro 2.5 (MOREIRA, 2005).

**Quadro 2.5 – Classificação dos Modelos Hidrológicos.**

<b>Critério</b>	<b>Classificação</b>	<b>Subclasse</b>	<b>Característica</b>
<b>Descrição dos Processos</b>	Determinístico	Empírico	Não leva em conta a chance de ocorrência das variáveis envolvidas no processo, utilizando observações que não estão relacionadas com os fenômenos físicos.

**Quadro 2.6 – Classificação dos Modelos Hidrológicos.**

(conclusão)

<b>Critério</b>	<b>Classificação</b>	<b>Subclasse</b>	<b>Característica</b>
		Conceitual (Semi-conceituais & Físicos)	Semi-conceitual - Não leva em conta a chance de ocorrência das variáveis envolvidas no processo, procurando descrever todos os processos que envolvem um determinado fenômeno físico, mantendo um razoável empirismo. Físico – Também não leva em conta as chances de ocorrência, utilizando as principais equações diferenciais do sistema físico.
<b>Descrição dos Processos</b>	Não Determinístico	Probabilístico	Considera a chance de ocorrência das variáveis e introduz o conceito de probabilidade em sua formulação, tendo a variável interveniente um comportamento puramente aleatório.
		Estocástico	Considera a chance de ocorrência das variáveis e introduz o conceito de probabilidade em sua formulação, mas além da componente aleatória tem outra que permite contemplar a sequência temporal ou sequência espacial dos valores da variável.
<b>Variabilidade Espacial</b>	Concentrado		Não leva em conta a variabilidade espacial, ou seja, quando os seus parâmetros e variáveis variam somente em função do tempo.
	Distribuído		Quando as variáveis e parâmetros do modelo variam também segundo o espaço.
<b>Variabilidade temporal</b>	Contínuo		Quando os fenômenos são contínuos no tempo. Mesmo que um sistema se modifique continuamente, a simulação no modelo é feita em intervalos de tempos.
	Discreto		Quando os fenômenos são representados em intervalos de tempo discreto.
<b>Dependência Temporal</b>	Estático		Quando, para um conjunto de dados de entrada, produz-se um resultado oriundo da solução das equações do modelo em um único passo.
	Dinâmico		Quando utiliza o resultado de uma iteração como entrada para uma próxima iteração.
<b>Técnica de solução</b>	Numérico		Problemas gerais, independentemente da complexidade geométrica, dos parâmetros físicos e das relações constitutivas.
	Analítico		Problemas de geometria simples, parâmetros homogêneos e relações lineares.

**Fonte: Melo (2010).**

Conforme demonstrado no quadro anterior, os principais usos desse tipo de metodologia são segundo Lou (2010):

- **Comportamento dos fenômenos hidrológicos no exutório:** o detalhamento do modelo permite ao hidrólogo separar os fenômenos e, em

consequência, estudar a sensibilidade das variações para bacias com diferentes características, e ainda é possível testar e avaliar inúmeras formulações para o processo.

- **Análise de consistência e preenchimento de falhas:** devido à facilidade de operação e custo, é normal existirem séries mais longas de precipitação do que de vazão. Consequentemente, através do modelo, é possível, após o ajuste, estender a série de vazão com base na precipitação.
- **Previsão de vazão:** o controle de cheia, a operação de obras hidráulicas, a navegação, entre outros, dependem do conhecimento antecipado da ocorrência da vazão. Esse tipo de estimativa da vazão pode ser obtido com base na precipitação conhecida, na vazão de um posto de montante ou na correspondente combinação. As características da simulação para esse objetivo são diferentes das demais, no entanto, modelos semelhantes podem ser utilizados, mas com estruturas computacionais diferentes. O modelo de previsão em tempo atual deve buscar utilizar ao máximo as informações disponíveis no momento da previsão, atualizando parâmetros e/ou variáveis.
- **Dimensionamento e previsão de cenários de planejamento:** Conhecida a precipitação e o risco de sua ocorrência, é possível estimar a vazão resultante para cenários de uso e modificação da bacia, visando ao dimensionamento ou planejamento de alternativas de desenvolvimento do sistema. Nesse caso, os modelos hidrológicos utilizados podem ter algumas limitações quanto à simulação de certos cenários de desenvolvimento diferentes daquele do ajuste, como a modificação do uso do solo.
- **Efeitos resultantes da modificação do uso do solo:** a análise do escoamento presente nesta metodologia é um problema complexo, que requer uma técnica mais sofisticada do que as utilizadas para resolver os problemas anteriores. Os modelos existentes, de forma geral, apesar de conceituais, possuem muitas formulações empíricas para representar os processos e, em consequência, parâmetros que se relacionam mais qualitativamente do que quantitativamente com a física da bacia. Mesmo nessas condições, os parâmetros englobam várias características da bacia,

o que dificulta qualquer análise quanto ao resultado da modificação de qualquer característica da bacia.

O Quadro 2.6 exemplifica alguns tipos de modelos, características e usos na modelagem hidrológica.

**Quadro 2.7 – Tipos de modelos, características e usos na modelagem hidrológica.**

Nome	Tipo	Estrutura	Características	Usos
<b>Precipitação-vazão</b>	Determinístico Empírico Conceitual	Comportamento	Calcula a vazão de uma bacia a partir da precipitação.	Extensão de séries de vazão; previsão em tempo atual; avaliação do uso da terra.
<b>Vazão-vazão</b>	Determinístico Empírico Conceitual		Calcula a vazão de uma seção a partir de um ponto a montante.	Extensão de séries de vazões; Dimensionamento; previsão de cheia.
<b>Geração estocástica de vazão</b>	Estocástico		Calcula a vazão com base nas características da série histórica.	Dimensionamento do volume de um reservatório.
<b>Fluxo saturado</b>	Determinístico		Determina o movimento, vazão potencial de águas subterrâneas, a partir de dados de realimentação, bombeamento etc.	Capacidade de bombeamento; nível do lençol freático; iteração rio-aquífero etc.
<b>Hidrodinâmico</b>	Determinístico		Sintetiza vazões em rios e rede de canais.	Simulação de alterações do sistema; efeitos de escoamento de jusante.
<b>Qualidade da água (de rios e reservatórios)</b>	Determinístico		Simula a concentração de parâmetros de qualidade da água.	Impacto de efluentes; eutrofização de reservatórios; condições ambientais.
<b>Rede de canais e condutos</b>	Determinístico	Comportamento e otimização.	Otimiza o diâmetro dos condutos e verifica as condições de projeto.	Rede de abastecimento de água; rede de irrigação.
<b>Operação de reservatórios</b>	Estocástico Determinístico		Determina a operação ótima de sistemas de reservatórios.	Usos múltiplos.
<b>Operação e gestão de sistemas múltiplos</b>	Estocástico, determinístico	Comportamento, otimização e planejamento.	Simula condições de projeto e operação de sistemas (usa vários modelos).	Reservatórios, canais, estações de tratamento, irrigação, navegação fluvial etc.

Fonte: Fayal (2008). Adaptado pelo autor.

## 2.7 Software Storm Water Management Model - SWMM

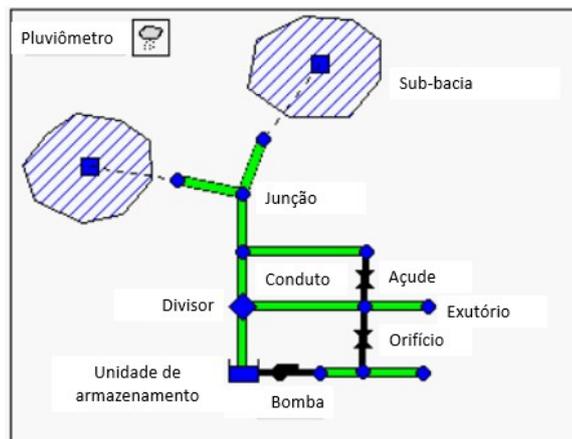
O Modelo de Gerenciamento de Águas Pluviais da EPA (SWMM) é um modelo dinâmico do tipo chuva-vazão de simulação de quantidade e qualidade de escoamento pluvial, utilizado para simulação de um único evento de chuva ou a simulação contínua de longo prazo em zonas urbanas. Foi desenvolvido em 1971,

onde passou por várias atualizações importantes. É um software amplamente utilizado em todo o mundo para planejamento, análise e projetos. Está relacionado com escoamento de águas pluviais e outros sistemas de drenagem em áreas urbanas e não urbanas. Fornece um ambiente integrado para a edição de dados de entrada da área de estudo, execução de simulações hidrológicas, hidráulicas e de qualidade da água, e visualização dos resultados em vários formatos. Esses incluem mapas de área de drenagem e sistema de transporte, ambos codificados por cores, gráficos e tabelas de séries cronológicas, gráficos de perfil, e análises estatísticas de frequência (ROSSMAN, 2015).

O programa considera vários processos hidrológicos que produzem o escoamento de água das áreas urbanas, dentre eles estão as precipitações variáveis no tempo (SANTINI JUNIOR, 2018), análise de riscos para inundações, infiltração da precipitação, detenção e retenção de chuva/drenagem através de dispositivos de baixo impacto (LID).

A análise desses processos é possível dividindo-se a área estudada em um conjunto de sub-áreas homogêneas e de captação menores, onde cada uma contém sua fração de sub-áreas permeáveis e impermeáveis. De acordo com Rossman (2015), o fluxo terrestre pode ser roteado entre sub-zonas, sub-bacias de captação ou entre pontos de entrada de um sistema de drenagem. Segundo Santini Junior (2018), o SWMM é altamente aplicado na hidrologia urbana, tendo diversas frentes de trabalho, e é importante ressaltar que, estes apresentam diversas evoluções no algoritmo do programa, o que faz com que o programa acompanhe o desenvolvimento acadêmico.

A Figura 2.8 mostra como o SWMM concebe os elementos físicos do sistema real, com um conjunto padrão de objetos de modelação; o Quadro 2.7 fornece um resumo dos vários tipos de ferramentas utilizados no SWMM.



**Figura 2.9 – Modelo conceitual do SWMM.**  
**Fonte: Rossman e Huber (2016). Adaptado pelo autor.**

**Quadro 2.8– Tipos de Módulos Disponíveis no SWMM.**

<b>Categoria</b>	<b>Tipo de Módulo</b>	<b>Descrição</b>
<b>Hidrológicos</b>	Pluviógrafo	Fonte dos dados de precipitação para as sub-bacias.
	Sub-bacias	Uma parcela do solo que recebe a precipitação e gera um escoamento superficial, levando essa massa até o sistema de drenagem (Via Nó) ou para outra sub-bacia.
<b>Hidrológicos</b>	Aquíferos	Uma área subsuperficial que recebe da infiltração da sub-bacia acima e realiza troca de fluxos com um ou vários nós.
	Acúmulo de neve	Neve acumulada nas sub-bacias.
	Hidrograma unitário	Uma função de resposta que descreve a quantidade de fluxo em relação ao tempo que é gerado por meio de uma unidade de chuva.
<b>Hidráulicos</b>	Junção	Um ponto no sistema em que os condutos se juntam com volume de armazenamento insignificante (Bueiros, conexões).
	Exutório	O ponto final do sistema onde a água descarrega em um corpo receptor (outro sistema, unidade de tratamento de água, rio) com lâmina d'água conhecida.
	Divisor	Um ponto no sistema onde o afluyente se divide em dois condutos por meio de uma função conhecida.
	Unidades de armazenamento	Lagos, represas ou tanques destinados ao armazenamento da água.
	Conduto	Um canal ou conduto que transporta água de um nó para o outro.
	Bomba	Dispositivo que eleva a energia do sistema.
	Regulador	Um estrangulador, orifício ou saída usado para direcionar e regular o fluxo entre dois nós do sistema de transporte.
<b>Qualidade de Água</b>	Poluente	Contaminante que pode acumular na sub-bacia e posteriormente lixiviado pela topografia ou ser introduzido diretamente no sistema.
	Uso do solo	Uma classificação usada para determinar a função de acúmulo de poluentes.
<b>Tratamento</b>	Controle LID	Dispositivos de baixo impacto, como uma célula de biorretenção, pavimento poroso, usados para reduzir o escoamento superficial através do aumento da infiltração.

### Quadro 2.7 – Tipos de Módulos Disponíveis no SWMM.

(conclusão)

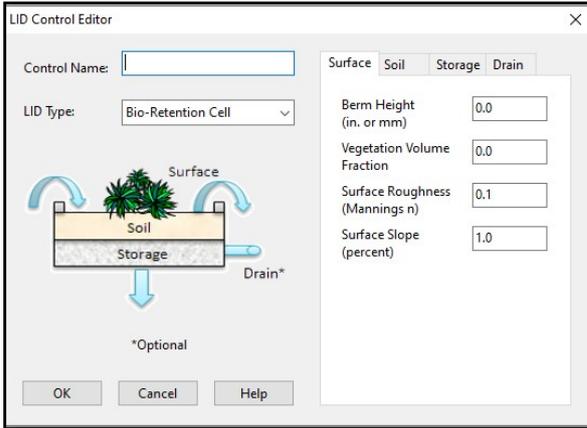
	Função de Tratamento	Uma função definida pelo usuário que descreve como a concentração do poluente é reduzida em um nó como função de certas variáveis (Concentração, vazão, nível d'água).
<b>Objetos de dados</b>	Curva	Uma função tabular que define a relação entre duas grandezas (Vazão e carga hidráulica da bomba, área da superfície e profundidade, etc.)
	Série Temporal	Uma função tabular que define como uma grandeza varia com o tempo (Precipitação, elevação, nível do exutório, etc.)
	Padrão Temporal	Um conjunto de fatores que se repete ao longo de um período de tempo (por exemplo, padrão horário diurno, padrão diário semanal, etc.).
	Regras de controle	Funções que determinam quando certas ações de controle serão tomadas (ligar ou desligar uma bomba, quando a lâmina d'água estiver acima ou abaixo de um dado valor).

**Fonte: Rossman e Huber (2016).**

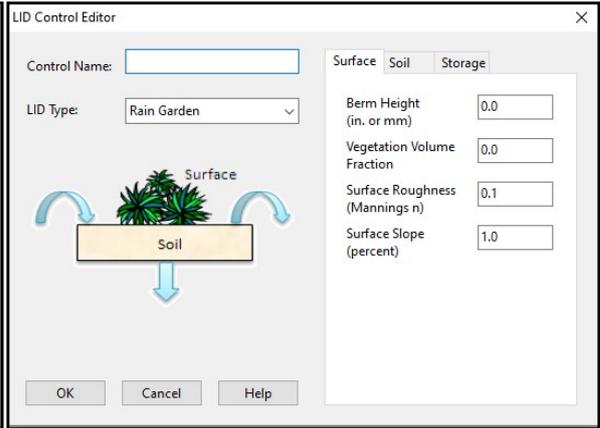
A versão mais recente, SWMM 5.1, configurou oito instalações técnicas LID, incluindo valas gramadas, instalações de desconexão de telhado, barril de chuva, pavimentos permeáveis, valas de infiltração, telhados verdes, jardins de chuva e unidades de bioretenção no módulo LID (XIE et al., 2017).

Módulos de controle LID que fornecem armazenamento de detenção, infiltração aprimorada e evapotranspiração de escoamento de áreas circunvizinhas localizadas (por exemplo, jardim de chuva, célula de biorretenção, pavimento permeável, trincheira de infiltração, etc.) foram implementados em SWMM para simular o comportamento hidrológico das tecnologias de controle desde 2005 (PALLA; GNECCO, 2015; ROSSMAN; HUBER, 2016; VERSINI et al., 2015). Os controles LID são representados por uma combinação de camadas verticais cujas propriedades (tais como: espessura das diferentes camadas, propriedades físicas dos materiais e características de drenagem subterrânea) são definidas em uma base por unidade de área (QIN; LI; FU, 2013). Isso permite que os LIDs que diferem apenas na cobertura de área, e não no design, sejam facilmente colocados em diferentes sub-bacias em uma área de estudo (PALLA; GNECCO, 2015).

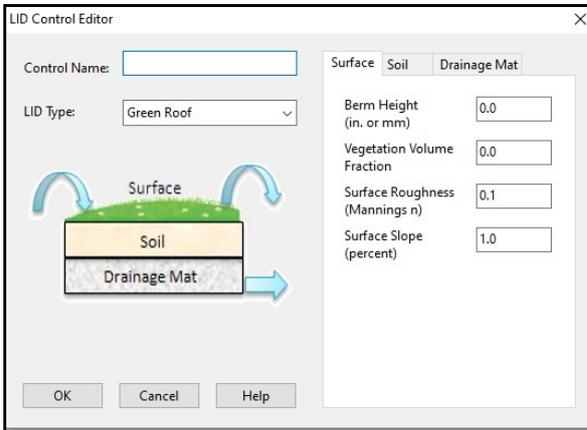
O diagrama esquemático dos oito elementos técnicos fornecidos no modelo SWMM-LID é mostrado na Figura 2.9 (KIM; CHOI; JOO, 2017).



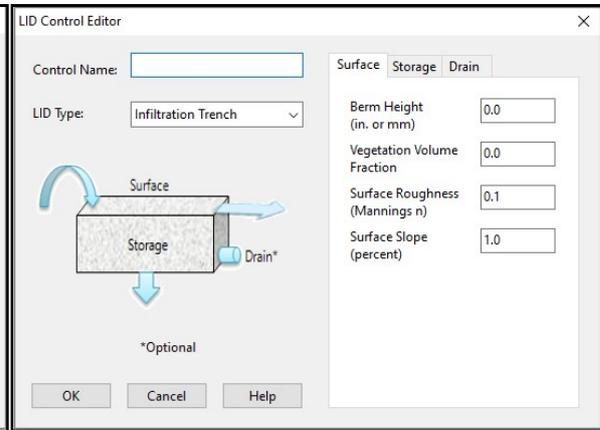
(a)



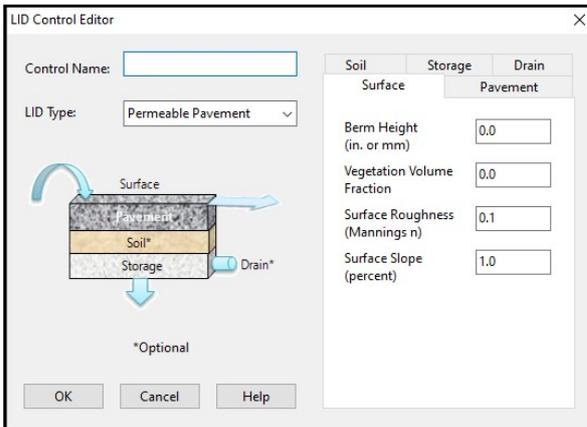
(b)



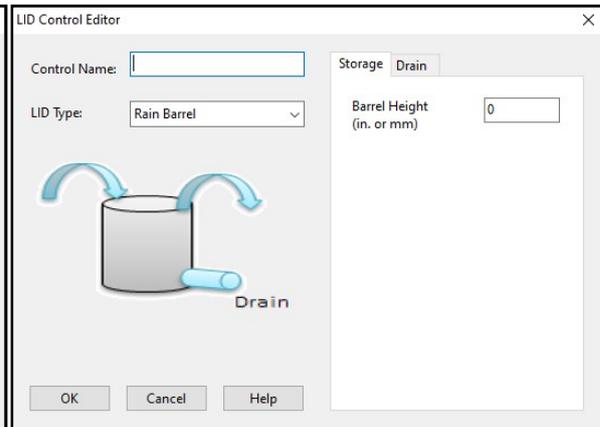
(c)



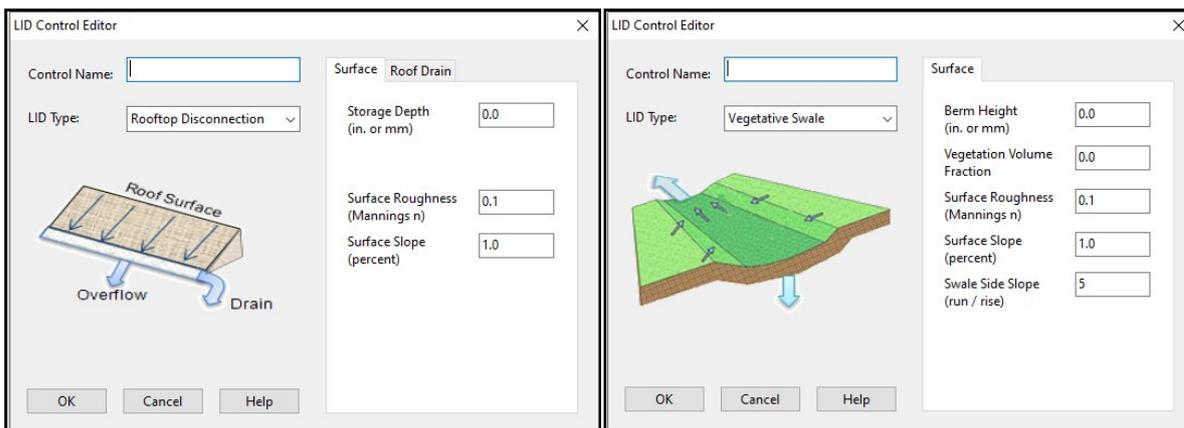
(d)



(e)



(f)



(g)

(h)

**Figura 2.10 – Elementos técnicos LID do SWMM.  
Fonte: Kim, Choi e Joo (2017)**

Cada uma das figuras apresentadas na Figura 2.9 representa:

(a) A célula de biorretenção retém, infiltra e evapora a chuva e o escoamento através da mistura da vegetação e do solo. Espaços de plantio ao longo da estrada, árvores nas ruas e vegetação de telhados podem ser simulados.

(b) Jardim de chuva é composto por uma camada superficial e uma camada de solo, e tem funções de penetração, armazenamento e armazenamento da água da chuva na camada de solo. Espaços de plantio ao longo de estradas, árvores de rua e espaços de vegetação podem ser simulados.

(c) Telhado Verde é um elemento técnico especializado em telhados ecológicos, e sua estrutura é dividida em camada superficial, camada de solo e manta de drenagem, e tem funções de penetração, armazenamento, armazenamento e drenagem das águas pluviais. Em geral, é possível simular o espaço de vegetação na cobertura do edifício.

(d) Trincheira de infiltração é um elemento técnico composto por uma camada superficial e uma camada de armazenamento, sendo o armazenamento e a drenagem da água da chuva as funções principais. O escopo de aplicação é alto para instalações LID onde as funções de armazenamento e drenagem são predominantes.

(e) Pavimento permeável é um elemento técnico especializado para estradas ou calçadas nos quais o material de pavimento permeável é aplicado e consiste em uma camada de superfície, camada de pavimento, camada de solo e camada de armazenamento. A função de penetração pode ser aplicada através do

pavimento permeável, sendo possível o armazenamento e armazenamento da água da chuva através da camada de solo e da camada de armazenamento. Além disso, a função de drenagem da água da chuva pode ser aplicada através de um tubo de drenagem instalado na camada de armazenamento.

(f) Barril de chuva é um barril de chuva representativo e sua função principal é armazenar precipitação. Na maioria dos casos, o desempenho do elemento técnico é determinado pelo tamanho da camada de armazenamento e a função de drenagem pode ser considerada.

(g) Desconexão do telhado é uma estrada pluvial instalada em um edifício geral e é um dos elementos técnicos aplicados para refletir o efeito de melhorar a função de drenagem pluvial.

(h) Vala Gramada é um elemento técnico composto apenas pela camada superficial, e a função do elemento técnico pode ser refletida de acordo com a condição de cobertura da camada superficial.

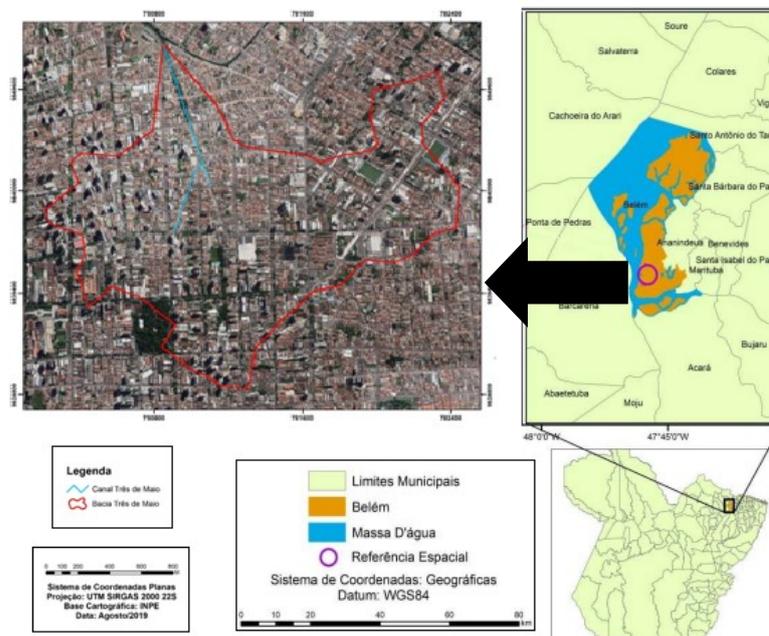
### **3 MÉTODO**

Este capítulo dá cumprimento aos objetivos elencados e justificados nos tópicos anteriores, o estudo da capacidade de infiltração de um trecho da Bacia do Una, denominada de Sub-bacia da Três de Maio, por meio de uma técnica LID do SWMM, inserindo variações de espessura da base e do revestimento de pavimentos permeáveis. Para isso, foi utilizada a modelagem matemática baseada em processos, fornecendo de forma econômica os efeitos de várias diretrizes de design no desempenho dos novos instrumentos de planejamento urbano e caracterizados vários processos de tratamento e otimização do desempenho no cumprimento das metas de qualidade hidráulica.

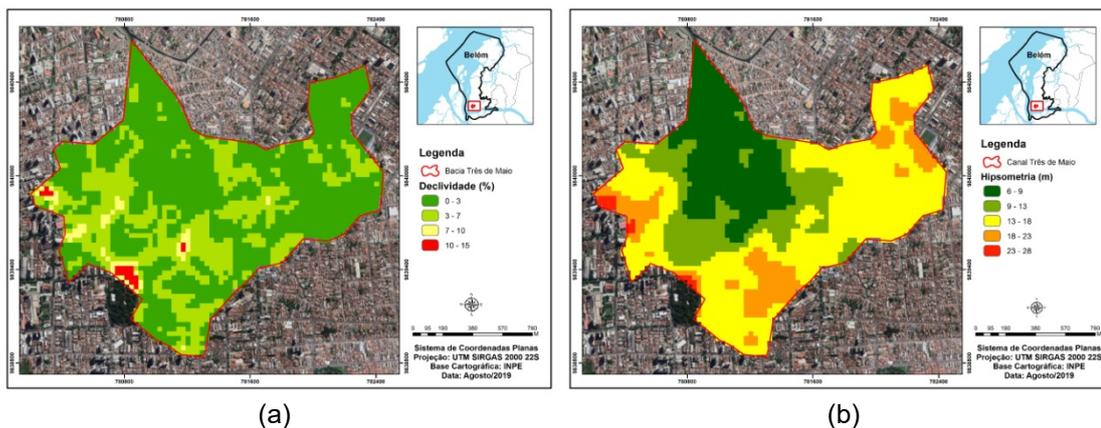
O método de aplicação do SWMM abordado facilitou a simulação e comparação dos fenômenos hidrológico-hidráulicos dos cenários, envolvendo o uso e ocupação do solo, através da inserção de medidas de controle na fonte. Adiante serão descritas as etapas que compõem a metodologia, assim como os dados e softwares para a realização do estudo.

#### **3.1 Caracterização da área de estudo**

Como objeto de estudo adotou-se a sub-bacia da Três de Maio, uma das sub-bacias que compõe a Bacia do Una. Formada por uma área total de 2,15 km<sup>2</sup>, encontra-se na Região Metropolitana de Belém, localizada entre as coordenadas UTM 9.838.800 e 9.840.600 Sul e 780.000 e 782.400 Oeste. A ocupação da sub-bacia é composta por residências unifamiliares, declividade entre 0% e 7%, hipsometria, variando entre 13 a 28 metros de altura no perímetro da sub-bacia e próximo ao canal entre 6 a 13 metros, conforme mostram as Figuras 3.10 e 3.11.

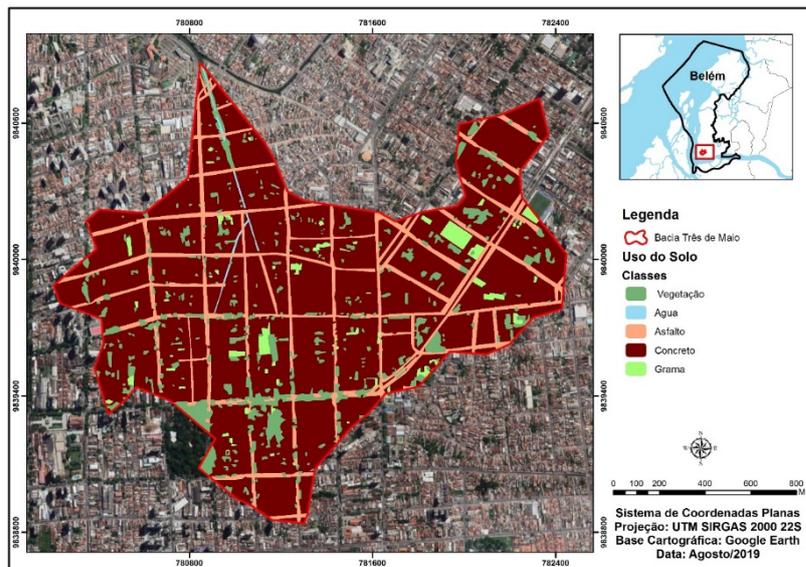


**Figura 3.11 – Localização da sub-bacia da Três de Maio.  
 Fonte: Autor (2023).**



**Figura 3.12 – Imagens da (a) Declividade e (b) Hipsometria.  
 Fonte: Autor (2019).**

A classificação do uso do solo da sub-bacia estudada se deu através de dados levantados com base de imagens de projeção do sistema UTM SIRGAS 2000 22S e auxílio de um software livre chamado QGis versão 3.2 para o tratamentos dos dados, foi categorizada a estimativa de áreas permeáveis (grama e vegetação) e impermeáveis (asfalto e concreto) com base na análise renderizada que o software oferece, os resultados deste tratamento mostraram que devido ao adensamento populacional na área de estudo, esta possui poucos pontos permeáveis e uma alta taxa de solo impermeabilizada, conforme mostra a Figura 3.12 e a Tabela 3.5.



**Figura 3.13 – Uso do solo.**  
**Fonte: Autor (2019).**

**Tabela 3.5 – Morfologia da sub-bacia**

<b>Classes</b>	<b>Área (m<sup>2</sup>)</b>	<b>Área (%)</b>
<b>Água</b>	7.524,94	0,35
<b>Grama</b>	47.529,81	2,20
<b>Vegetação</b>	206.644,91	9,57
<b>Asfalto</b>	275.394,81	12,75
<b>Concreto</b>	1.622.061,74	75,13

**Fonte: Autor (2019).**

### **3.2 Caracterização dos cenários de estudo**

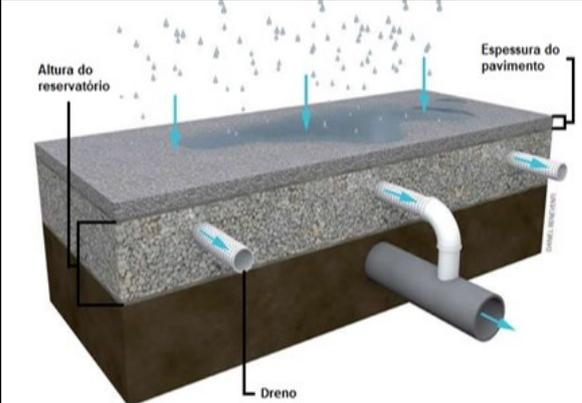
A análise de cenários tornou-se uma ferramenta fundamental para a quantificação dos impactos oriundos da ocupação do solo urbano e sua consequente impermeabilização. A partir dessa análise de impactos foi possível quantificar a taxa de permeabilidade mínima para evitar sobrecarga do sistema de drenagem. Para comparar os cenários foram utilizados os parâmetros de continuidade de fluxo, continuidade da quantidade de escoamento, volume infiltrado, volume de água recebida no exutório e a visualização do mapa fluxo de cada cenário. Esses parâmetros podem mensurar a eficiência do uso da tecnologia na área de estudo através de análises quantitativas e visuais.

As modelagens foram distribuídas da seguinte forma: cenário atual (referência) e 9 (nove) arranjos de sistemas drenantes, distribuídos em 3 (três)

espessuras para a camada de revestimento e 3 (três) para o reservatório do pavimento de concreto permeável. Para o dimensionamento da espessura dos pavimentos de concreto permeável, têm-se como parâmetro de partida a norma ABNT NBR 16416 (2015) que regulamenta os pavimentos permeáveis de concreto com seus requisitos e procedimentos, onde estipula a espessura mínima de 100 mm para vias com tráfego leve, assim partiu-se da espessura mínima até a de 300 mm, conforme o Quadro 3.8. Após análise no software SWMM da drenagem atual da Sub-bacia, foram ajustadas as dimensões da camada de reservatório de no mínimo 300 mm até o de 500 mm, buscando acumular o excedente de água não absorvido pelo sistema de drenagem. Como a norma não dispõe de valores máximos para espessuras de revestimento e reservatórios foram admitidos para aplicação nos cenários os valores de 300 mm e 500 mm, respectivamente.

**Quadro 3.9 – Dados dos cenários com a tecnologia LID para modelagem no SWMM.**

Cenário	Espessura do pavimento (mm)	Altura do reservatório (mm)	Norma
1	100	300	ABNT NBR 16416 Tráfego Leve Espessura mínima: 100 mm
2	100	400	
3	100	500	
4	200	300	
5	200	400	
6	200	500	
7	300	300	
8	300	400	
9	300	500	



**Fonte: Autor (2023).**

Os dados de caracterização do cenário referência baseiam-se no levantamento realizado pela Prefeitura Municipal de Belém (2020), deles extraiu-se a taxa de ocupação do solo. Para modelagem inicial, utilizaram-se os dados de taxa de permeabilidade presentes no relatório 3.4 da situação dos serviços de drenagem urbana e manejo de águas pluviais realizado pelo consórcio EGIS – AMPLA – revisão 2 (2020), conforme a Tabela 3.6.

**Tabela 3.6 – Uso do solo e taxa de permeabilidade.**

Categoria de Uso	Área do Lote (m <sup>2</sup> ) Min/Máx	Taxa de Permeabilidade	Taxa de
			Permeabilidade QGIs
Habitação	< 125/ >750	0,20	0,1177
Comércio e Serviço	125/ >2.000	0,10	0,00
	250/500	0,20	0,00
Indústria	500/2.000	0,25	0,00
	>2.000	0,30	0,00

**Fonte: Prefeitura Municipal de Belém (2020). Adaptado pelo autor.**

Os dados morfológicos da sub-bacia, apresentados na Figura 3.11 apontam uma região de baixo percentual de área permeável, com um total de áreas verdes (grama e vegetação) igual a 11,77%. Este fator levou a adoção de um cenário referência completamente pavimentado. Desta forma, para fins de modelagem, adotou-se como dado de entrada uma taxa de permeabilidade em ordem de 10% na categoria de uso de solo destinada a habitação, mantendo-o fixa em todos os cenários simulados.

Em uma segunda rodada optou-se por simular cenários com ajustes da legislação, atribuindo taxas de permeabilidade de 30% para lotes de habitação, e taxas de 25% para lotes de comércio e serviços. O intuito desses ajustes é promover uma equidade entre as áreas impermeáveis, tal qual pede a Lei Complementar de Controle Urbanístico nº 2 (1999), artigo 12, parágrafo I, alíneas c e g que estimulam a criação de áreas verdes e permeáveis.

Os parâmetros da rede de drenagem foram estipulados, pois não foram encontrados os projetos de microdrenagem e macrodrenagem da sub-bacia da Três de Maio nos órgãos responsáveis, foram enviados ofícios, no dia 13 de Maio de 2020 para a Companhia de Desenvolvimento e Administração da Área Metropolitana de Belém (CODEM), no dia 17 de Julho de 2020 para o Programa de Saneamento da Bacia da Estrada Nova (PROMABEN) e no dia 18 de Novembro de 2020 para Secretaria Municipal de Saneamento (SESAN), em todos não havia documentos referente a sub-bacia para análise do dimensionamento da drenagem enterrada, assim como, devido ao longo período solicitando informações órgãos não foi possível verificar in loco o diâmetro das tubulações.

Sendo assim foi convencionado um diâmetro para todos os condutos de 400 mm, uma declividade média de 0,5% (VINAGRE et al., 2017), o coeficiente de rugosidade de 0,01 (ROSSMAN, 2015), porcentagem da área superficial impermeável foi 87%, porcentagem levantada do UTM SIRGAS 2000 22S com auxílio do QGis versão 3.2.

Dados como área em hectares de cada sub-bacia, a largura característica do escoamento superficial, o coeficiente “n” de Manning para o escoamento superficial na parcela impermeável, o coeficiente “n” de Manning para o escoamento superficial na parcela permeável, profundidade do armazenamento em depressão na parcela impermeável, profundidade do armazenamento em depressão na parcela permeável e a porcentagem da área impermeável sem armazenamento em depressão, foram todos tabelados na manual do software (ROSSMAN, 2015). No parâmetro da modelagem usou-se o dia da maior precipitação da Região Metropolitana de Belém dos últimos 50 anos que ocorreu no dia 01/04/2005 e os parâmetros de etapas de relatório, tempo úmido, tempo seco e tempo de roteamento são estipulados pelo próprio software.

A Tabela 3.7 apresenta todos os parâmetros iniciais utilizados no software.

**Tabela 3.7 – Parâmetros iniciais utilizados no software.**

<b>Parâmetros de projeto</b>			
	<b>Sub-bacia 01</b>	<b>Sub-bacia 02</b>	<b>Sub-bacia 03</b>
<b>Área - ha</b>	58	75	81
<b>Largura - m</b>	2030	1950	2260
<b>% Declive</b>		0,5	
<b>% Impermeável</b>		87	
<b>N-Impermeável</b>		0,012	
<b>N-Permeável</b>		0,1	
<b>D-Armazenamento-Impermeável</b>		0,05	
<b>D-Armazenamento-Permeável</b>		0,05	
<b>% Zero-Impermeável</b>		25	
<b>Dados de Infiltração</b>		Número curva	

**Tabela 3.7– Parâmetros iniciais utilizados no software.**  
(conclusão)

<b>Parâmetros dos nós e condutos</b>	
<b>Diâmetro do conduto</b>	400 mm
<b>Geometria do conduto</b>	Circular
<b>Rugosidade do conduto</b>	0,01
<b>Unidade de fluxo</b>	Litro por segundo
<b>Distanciamento do conduto</b>	Elevação
<b>Método de encaminhamento de fluxo</b>	Onda Cinemática
<b>Equação de perda de carga</b>	Hazen-Willians
<b>Parâmetros da modelagem</b>	
<b>Data de início</b>	01/04/2005 - 00:00:00
<b>Data de término</b>	01/04/2005 - 23:00:00
<b>Etapa de tempo do relatório</b>	00:15:00
<b>Etapa de tempo úmido</b>	00:05:00
<b>Etapa e tempo seco</b>	01:00:00
<b>Etapa do tempo de roteamento</b>	00:00:30

**Fonte: Autor (2022).**

O modelo referência foi distribuído e estruturado com auxílio do software conforme os quantitativos apresentados na Tabela 3.8 exibindo a quantidade de bacias de contribuições, o valor do número curva e o inventário dos componentes e especificações dos dispositivos de drenagem utilizados.

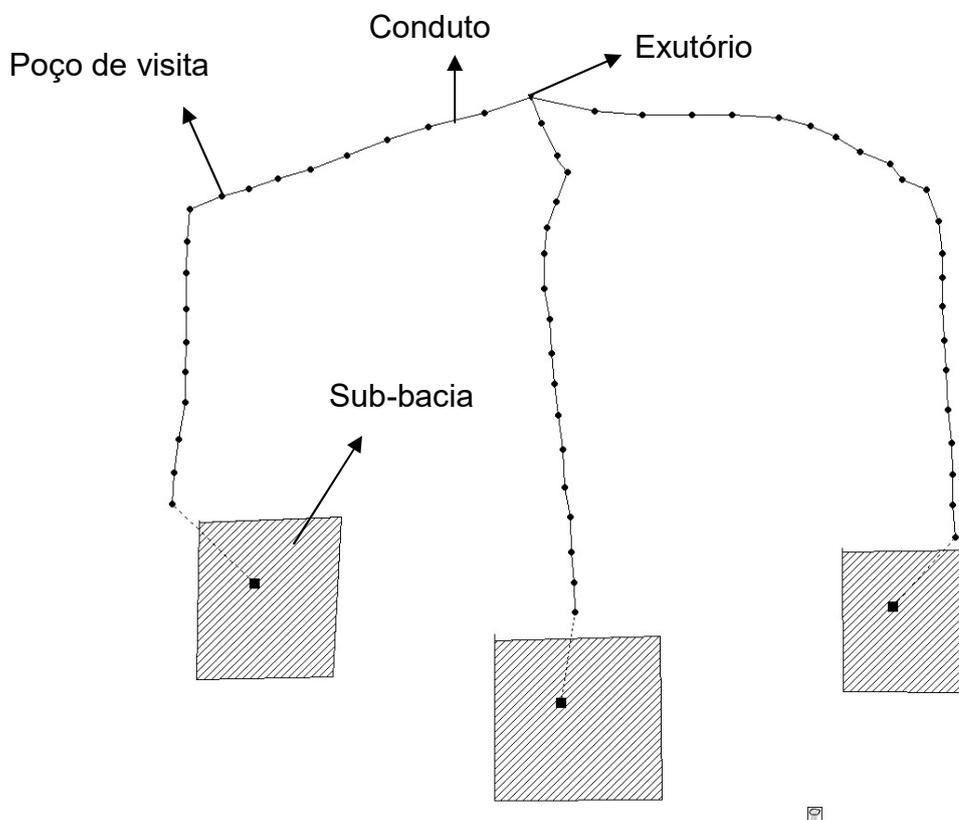
**Tabela 3.8 – Dados de entrada**

Poços de visita	57
Condutos	57
Sub-bacias	3
Exutório	1
Número curva	80
Área total (ha)	2,14

**Fonte: Autor (2022).**

O número curva é um parâmetro empírico utilizado para determinar o escoamento superficial direto a partir de excessos de precipitações, sendo completamente dependente do uso e ocupação do solo (MANUAL SWMM, 2019), então foi considerado o valor de 80 para a sub-bacia estudada.

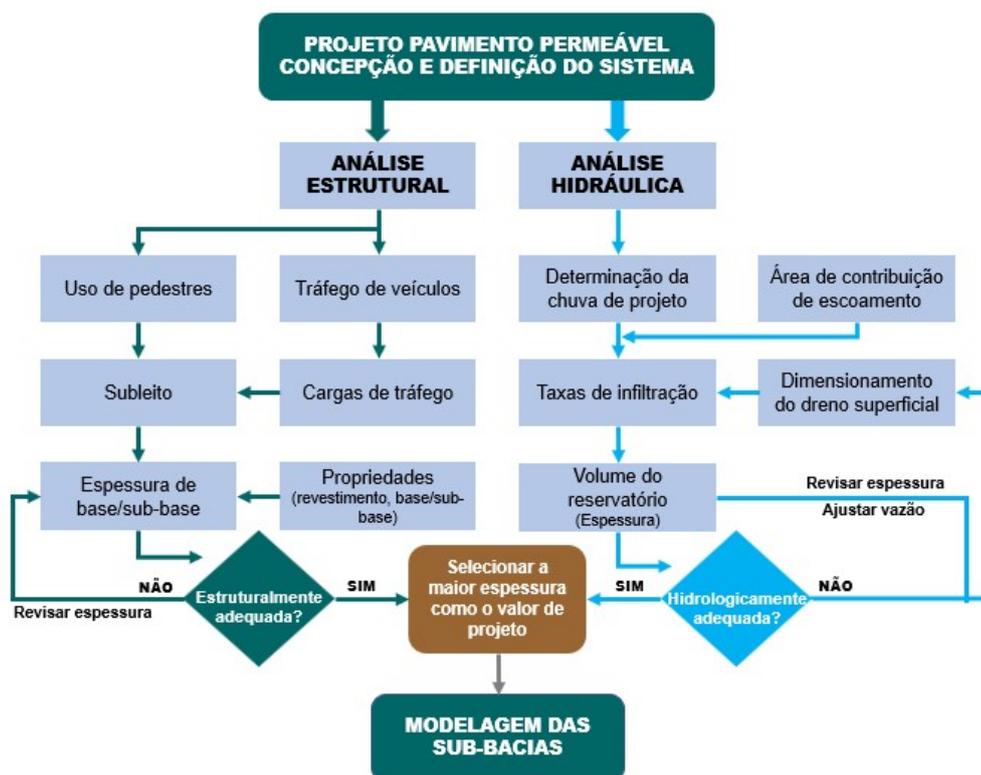
A Figura 3.13 mostra a disposição dos poços de visita e conduto do cenário referência. Importante destacar que essa disposição é recomendada pelo software e não necessariamente é a que se encontra no local.



**Figura 3.14 – Estruturado cenário referência obtida pelo software SWMM.  
Fonte: Autor (2022).**

### **3.3 Construção do modelo hidrológico-hidráulico no SWMM**

A partir da caracterização dos cenários de estudos propostos, iniciou-se o processo de análise estrutural e hidrológica do projeto conforme mostra a Figura 3.13. Esse fluxograma baseou-se em critérios necessários para as condições de uso dos sistemas LID (EISENBERG; LINDOW; SMITH, 2015). Todas as variáveis dispostas no fluxograma foram avaliadas para satisfazer o desenho dos cenários propostos. No caso do dimensionamento do pavimento, a determinação da espessura da camada de base/sub-base foi feita pelo menos duas vezes, uma para atender aos requisitos pretendidos do ponto de vista hidráulico e de gerenciamento pluvial e a outra para resistir aos esforços mecânicos ao qual o mesmo estará exposto pelo período de vida útil de projeto a partir do mínimo disposto na norma (NBR 16416 ABNT, 2015).



**Figura 3.15 – Fluxograma de análise estrutural e hidrológica.**  
**Fonte: Eisenberg, Lindow e Smith (2015). Adaptado pelo autor.**

### 3.3.1 Concepção e Definição do Sistema

Este projeto consistiu em construir modelos verificados e validados, a fim de avaliar critérios como maior captação de água no reservatório, retardar a vazão da água acumulada com destino ao exutório, restaurar a percolação de água no solo e restabelecer a capacidade de infiltração do solo para que apresente o melhor desempenho e eficiência para ser aplicado experimentalmente na área de estudo.

Os sistemas simulados foram propostos a partir de combinações de diferentes espessuras de revestimento do pavimento de concreto permeável e seu reservatório baseados sob no mínimo previsto na norma NBR 16416 (ABNT, 2015) vigente.

Com base no exposto foram considerados alguns fatores para o dimensionamento do reservatório do pavimento de concreto permeável conforme Balbo (2020), onde delimitará a sequência e os requerimentos dos procedimentos de cálculo, conforme apresentado no Quadro 3.11.

**Quadro 3.10 – Fatores concorrentes para o dimensionamento do reservatório**

Condicionante	Resposta	Medida de projeto	Resposta	Medida de projeto
Há áreas de contribuição laterais (lindeiras)?	*Sim	Considerar todas as áreas laterais e seus revestimentos superficiais específicos para a determinação das vazões de contribuição.	Não	Considerar apenas a área pavimentada de cumeeira sem área de contribuição em seu entorno.
Ocorre saturação e alteamento da lâmina d'água no topo do subleito no período crítico?	*Sim	Dimensionar para a condição de não infiltração de águas pelo subleito.	Não	Considerar parte da infiltração pelo subleito à profundidade máxima da altura máxima do lençol d'água.
Ocorrerá pico de chuva sucessivo após chuva intensa?	Sim	Repensar a duração da chuva intensa.	*Não	Dimensionar para a chuva crítica.
Solo de subleito impermeável?	*Sim	Considerar o uso de drenos perfurados e o destino da água percolada no pavimento.	Não	Considerar parte da infiltração pelo subleito à profundidade máxima de altura máxima do lençol d'água.
Revestimento de concreto como reservatório?	Sim	Considerar a altura calculada com sendo de revestimento + base.	*Não	Considerar base como reservatório livre da infiltração se o subleito for permeável.
Captação de água imediata para drenagem convencional ou para cisternas?	Sim	Dimensionar sem considerar infiltração no subleito; usar manta PEAD.	*Não	Considerar o reservatório de acúmulo de esvaziamento lento.
Exigência de filtragem de água para o subleito?	Sim	Especificar manta geotêxtil.	*Não	Não obrigatório o uso de manta geotêxtil.
* Ações realizadas na pesquisa.				

**Fonte:** Balbo (2020).

### 3.3.2 Precipitação de projeto

Com relação à precipitação de projeto, este estudo baseou-se no modelo chuva-vazão, método proposto por Ven Te Chow (CHOW, 2010) que tem sido utilizado em estimativas de vazões máximas (QUINONEZ FERNANDEZ, 2019; SIQUEIRA et al., 2023; VICENTE; FERNANDEZ, 2018). A estimativa das vazões de projeto é feita com base nos dados de chuvas intensas que ocorrem na respectiva bacia em estudo, em que se necessita de um padrão de precipitações para analisar o comportamento da sub-bacia hidrográfica e sua rede de drenagem. Neste método a chuva efetiva, ou seja, a chuva excedente é a maior responsável pelas vazões de cheias, principalmente em bacias de pequenas escalas e urbanizada. A partir do exposto, a chuva de projeto foi obtida com base na curva intensidade-duração-frequência da Região Metropolitana de Belém, apresentada nas Equações 3.1 e 3.2, que relaciona a intensidade de chuva com sua duração e frequência de ocorrência/tempo de recorrência (T).

$$i = \frac{KxTR^a}{(t+b)^c} \quad (3.1)$$

$$i = \frac{960,5846xTR^{0,954}}{(t+9,7993)^{0,7245}} \quad (3.2)$$

Quanto ao tempo de retorno, foi utilizado um tempo de 5 anos, conforme consta na literatura e de acordo com as recomendações aos sistemas de microdrenagem (BATISTA; BOLDRIN, 2018; MENDONÇA et al., 2023). Para calcular o tempo de concentração em bacias urbanas é comumente usada a fórmula de Kirpich (CASTILLO GARCÍA; ABREU FRANCO; ALVAREZ GONZÁLEZ, 2021; QUEIROZ; ALVES, 2020), conforme a Equação 3.3:

$$t_c = 0,019 \cdot L^{0,77} / S^{0,385} \quad (3.3)$$

Em que:

$t_c$  – Tempo de concentração (min)

L – Comprimento do talvegue (m)

S – Declividade do talvegue (m/m)

### 3.3.3 Modelo para determinação da infiltração

O presente trabalho aplicou o modelo chuva-vazão para simular a transformação de chuva em vazão, pois através deste modelo foram usados apenas dados de precipitação como forma de explicar o comportamento das vazões aos eventos de precipitação, buscando reproduzir as fases do ciclo hidrológico entre a precipitação e o escoamento no ponto de interesse.

Para estimar o escoamento superficial adotou-se a metodologia *Soil Conservation* que engloba informações referentes ao componente solo-vegetação, considerando tipo, uso, umidade e a condição hidrológica do solo. O índice de curva-número é o parâmetro adotado para se obter a condição de impermeabilidade, e mostra os valores das áreas de interesse da bacia, conforme a Tabela 3.9. Neste sentido, a sub-bacia analisada tem um solo que se enquadra na condição de solo C. Adotou-se uma chuva padronizada obtida a partir das relações de IDF da cidade de Belém, e um tempo de retorno de 5 anos por esse ser um valor indicado pelo plano diretor de drenagem de manejo de águas pluviais de Belém – PA para obras de microdrenagem, pois se trata de uma sub-bacia fechada com sistema de drenagem deficiente.

**Tabela 3.9 – Curva Número do Soil Conservation Service – SCS<sup>1</sup>**

Descrição do Uso de Terra	Classes Hidrológicas do Solo - NRCS			
	A	B	C	D
Terra cultivada				
• Sem tratamento para conservação	72	81	88	91
• Com tratamento para conservação	62	71	78	81
Pastagem				
• Condição ruim	68	79	86	89
• Condição boa	39	61	74	80
Campo				
• Condição boa	30	58	71	78
Floresta				
• Densidade baixa, coberturas pobres, sem cobertura	45	66	77	83
• Boa cobertura <sup>2</sup>	25	55	70	77

**Tabela 3.9 – Curva Número do Soil Conservation Service – SCS<sup>1</sup>**

Descrição do Uso de Terra	(conclusão) Classes Hidrológicas do Solo - NRCS			
	A	B	C	D
Áreas comerciais e de negócios (85% impermeáveis)	89	92	94	95
Áreas comerciais e de negócios (85% impermeáveis) Residencial <sup>3</sup>	81	88	91	93
Tamanho médio do lote (% impermeáveis <sup>4</sup> )				
• 0,05 ha ou menos (65)	77	85	90	92
• 0,10 ha (38)	61	75	83	87
• 0,13 ha (30)	57	72	81	86
• 0,20 ha (25)	54	70	80	85
• 0,40 ha (20)	51	68	79	84
Estacionamento pavimentado, telhados, calçadas etc. <sup>5</sup>	98	98	98	98
Ruas e estradas				
• Pavimentada com meio fio e drenagem <sup>5</sup>	98	98	98	98
• Em cascalho	76	85	89	91
• Sujas	72	82	87	89

1 Condição de umidade antecedente II; Fonte: SCS *Urban Hydrology for Small Watersheds*, 2nd Ed., (TR-55), June 1986.

2 Cobertura boa é aquela sem pastagem, sem serrapilheira e nem sub-bosque.

3 Curvas Números são determinadas assumindo que o escoamento a partir da casa e da garagem é conduzido para a rua, com uma parte mínima da água do telhado conduzida para gramados onde pode infiltrar.

4 As áreas permeáveis remanescentes (gramados) são consideradas em bom estado de conservação para estas Curvas Números.

5 Para alguns climas mais quentes, um número de curva 95 pode ser utilizado.

Solo A – solos que produzem baixo escoamento superficial e alta infiltração. Solos arenosos com pouco silte e argila (mais permeável);

Solo B – solos menos permeáveis, arenosos e profundos do que o solo A e com permeabilidade superior a média;

Solo C – solos que geram escoamento superficial acima da média e com capacidade de infiltração abaixo da média, contendo percentagem considerável de argila e pouco profundo;

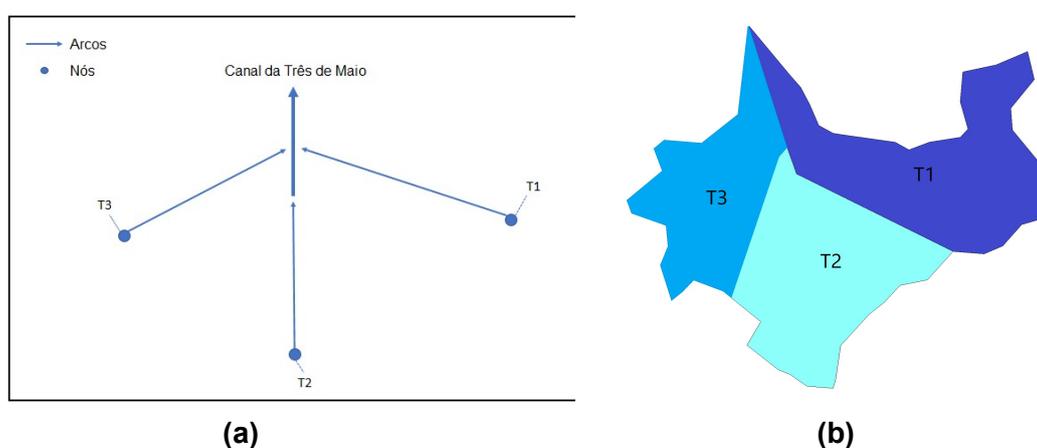
Solo D – solos contendo argilas expansivas e pouco profundas com baixa capacidade de infiltração, gerando a maior proporção de escoamento superficial (menos permeável).

**Fonte: Manual SWMM (2019).**

### 3.3.4 Construção do modelo conceitual e modelagem das sub-bacias

Para construção do modelo conceitual foi necessária a implementação de um sistema de previsão de vazões, que segue algumas etapas como a divisão da Bacia em sub-bacias. Foram verificadas as características físicas e hidrológicas da área estudada, por conseguinte, criada a base de dados históricos para analisar a consistência e a seleção das séries de chuvas simultâneas e para calibração do modelo.

A divisão das sub-bacias se deu pelo método do caminho crítico (tempo de concentração) de acordo com a Figura 3.14, que indica o maior caminho percorrido pela água até chegar ao exutório (JOÃO et al., 2019; SANTOS; AMORIM; PINHO, 2019). Para valores de  $n$  de Manning e de armazenamento em depressões, optou-se pelos adotados no manual do usuário do SWMM (ROSSMAN, 2015), assumindo valores para áreas impermeáveis de 0,011 para asfalto liso; 0,013 para concreto normal e, para áreas permeáveis, 0,15 para grama curta; e armazenamento em depressões para áreas permeáveis de 3,81 mm e para áreas impermeáveis de 1,90 mm. Com o incremento dos cenários LID, esses últimos parâmetros foram alterados.



**Figura 3.16 – (a) Caminho crítico e (b) Divisão das áreas de contribuição.**  
Fonte: Autor (2023).

## 4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

### 4.1 Efeitos da aplicação do sistema LID nos cenários

Na Tabela 4.19 estão apresentados os resultados fornecidos pelo software sobre os erros das simulações, os valores variaram entre -0,909 a -0,946.

**Tabela 4.10 – Erros das simulações**

Item	Cenário	Erro
1	Referência	- 0,235
2	1	- 0,946
3	2	- 0,927
4	3	- 0,909
5	4	- 0,946
6	5	- 0,927
7	6	- 0,909
8	7	- 0,946
9	8	- 0,927
10	9	- 0,909

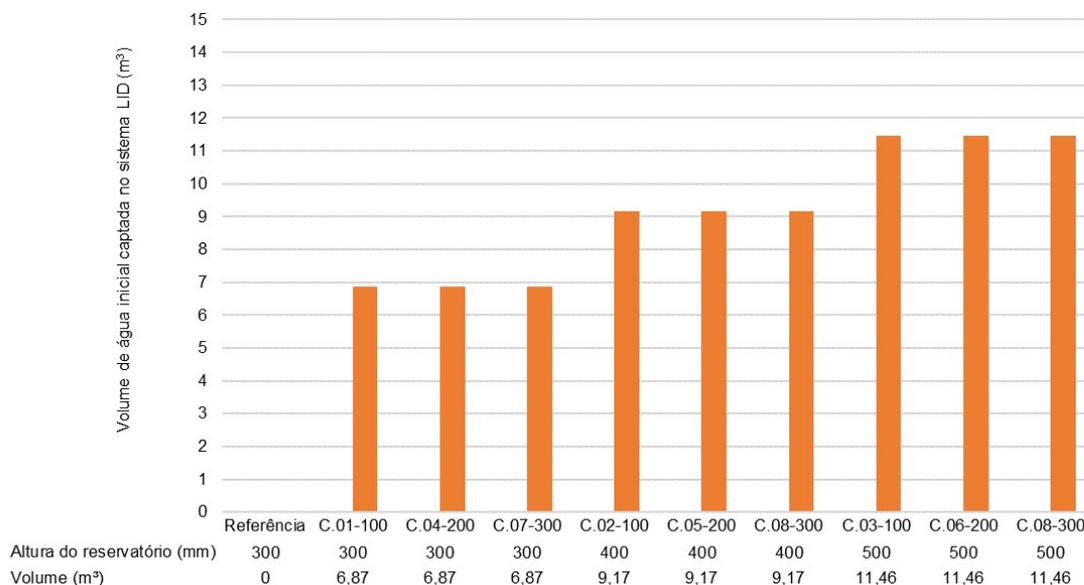
**Fonte: Autor (2023).**

Ao analisar os resultados obtidos pela modelagem, podem-se considerar os erros obtidos pela simulação como satisfatórios, uma vez que seu valor de erro foi inferior à 1%. Autores como Costa (2022) considera confiável os modelos que se enquadrem nesta faixa de erro.

Uma vez que em que todos seus cenários simulados os erros numéricos do modelo foram muito baixos, menores que 1%, sendo considerados insignificantes para o modelo matemático e podendo dizer que o modelo é confiável.

A figura 4.16 apresenta os resultados do estudo de armazenamento LID inicial, observa-se pelos modelos uma melhoria na captação da água pluvial, justifica-se este comportamento pela capacidade de retenção do material, que armazena a água no seu interior e libera com o passar do tempo, minimizando os problemas de inundações urbanas, uma vez que a água de escoamento superficial percola pelo pavimento reduzindo o volume superficial (BECKER; CONEGERO; PINHEIRO, 2021). Com relação ao volume captado nota-se uma similaridade entre os cenários que utilizam a mesma altura de camada de reservatório que são de 300

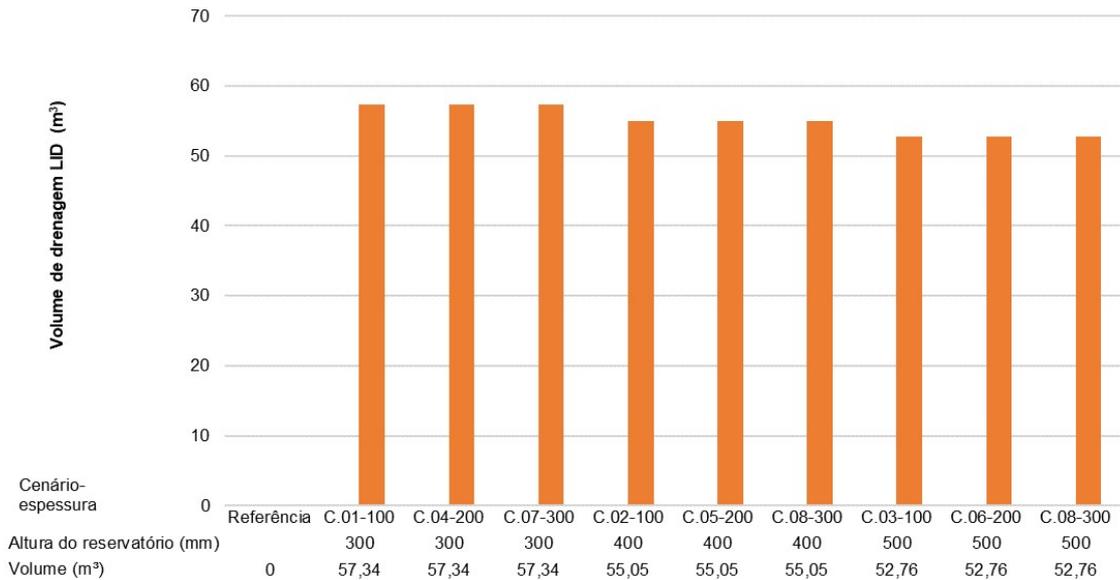
mm, 400 mm e 500 mm, evidenciando o efeito da altura no volume de água retido pelo sistema LID.



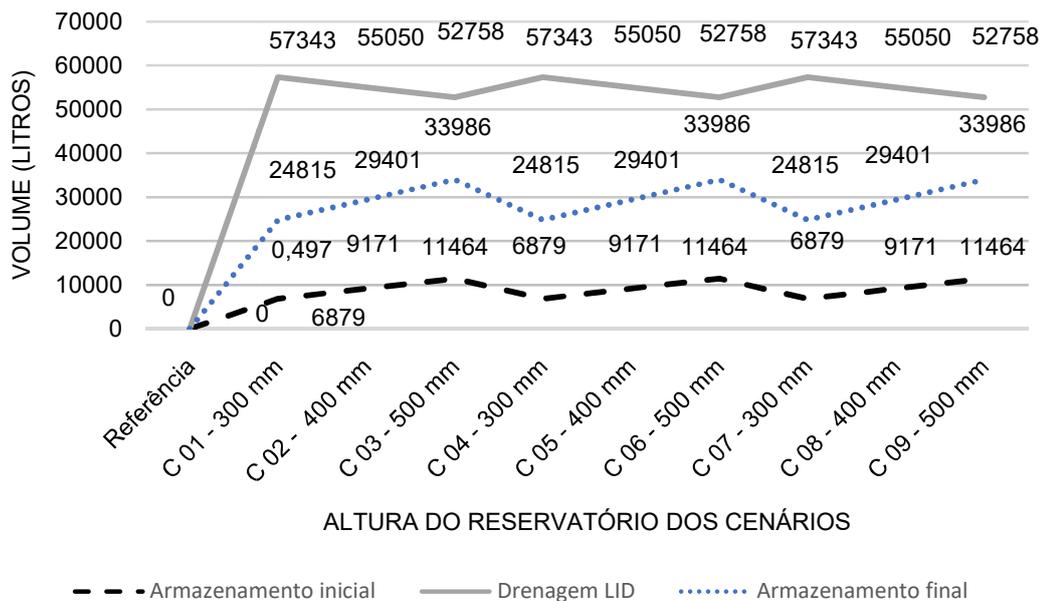
**Figura 4.17 – Armazenamento LID Inicial**  
**Fonte: Autor (2023).**

Lopes e Silva (2019) realizaram estudos com pequenos trechos de pavimentos permeáveis em que se variaram as alturas do revestimento de concreto permeável na faixa entre 400 a 600 mm e fixando a altura da camada de reservatório em 150 mm e atestaram que não houve uma mudança significativa na vazão nem na retenção das águas.

As Figuras 4.17 e 4.18 apresentam os volumes de drenagem LID para os cenários estudados. Nota-se que conforme se aumenta a altura dos reservatórios ocorre um pequeno decréscimo no volume de drenagem, pois durante toda a precipitação os cenários que possuem camada base de 300 mm de altura acumulam menos água que os demais cenários, ocasionando em um maior escoamento para o exutório.



**Figura 4.18 – Drenagem LID por altura de reservatório**  
**Fonte: Autor (2023).**



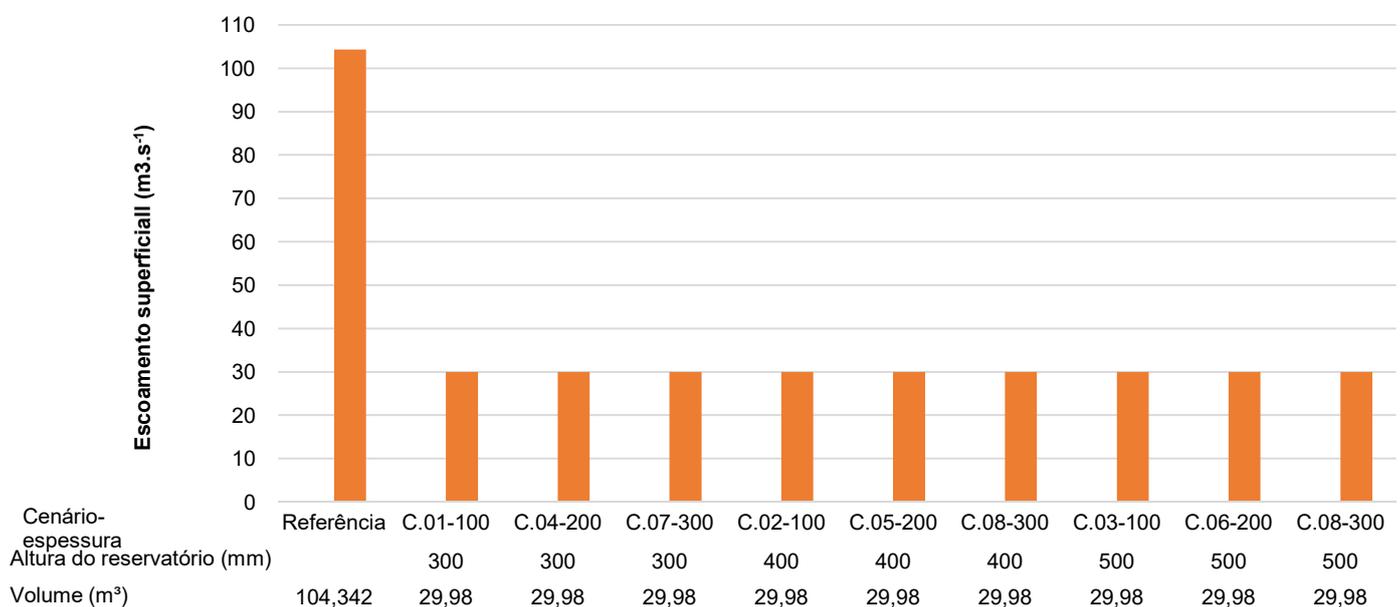
**Figura 4.19 – Armazenamento inicial x Drenagem LID x Armazenamento final**  
**Fonte: Autor (2023).**

Segundo Neto (2013) a permeabilidade é uma das maiores características do concreto permeável, sendo que as taxas de fluxo típicas de passagem de água através do concreto permeável são valores muito superiores à capacidade de infiltração da maioria dos solos.

Porém, em solos pouco permeáveis, o uso do concreto permeável sobre uma camada de assentamento permite gerar uma capacidade de retenção e reduzir

a quantidade de água que escoar superficialmente, especialmente, em eventos de chuvas intensas e de curta duração, que favorecem a ocorrência de inundações.

Na Figura 4.19 expõe os resultados do escoamento superficial para os diferentes cenários analisados. Note que as simulações com pavimentos permeáveis apresentam uma redução de mais de 70% e percebe-se também uma constância nos volumes de escoamento, que se justifica com a utilização do concreto permeável, independente de suas espessuras e altura dos reservatórios, a aplicação do sistema LID realizada no software resultou na recuperação parcial da capacidade de infiltração da área de estudo.



**Figura 4.20 – Escoamento superficial**  
**Fonte: Autor (2023).**

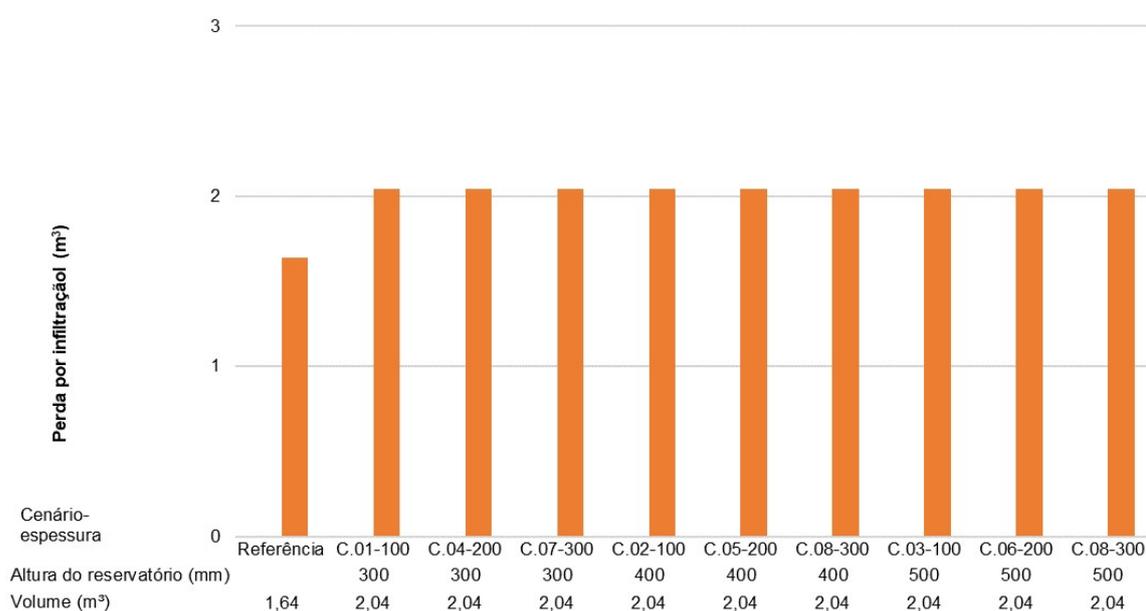
O software SWMM realiza seus cálculos de escoamento superficial com base na Equação 4.1, onde  $Q_d$  é o volume escoado de projeto ( $m^3.s^{-1}$ ),  $C$  é o coeficiente de runoff (adimensional),  $A_c$  é a área superficial de contribuição (ha) e  $i$  é intensidade pluviométrica ( $mm.h^{-1}$ ).

$$Q_d = C.A_c.i \tag{4.1}$$

Nota-se que o software gerou valores iguais para escoamento superficial em todos os cenários de pavimentos permeáveis no valor de 29,98 metros cúbicos. Puliti et al. (2012) estudaram a influência da taxa de infiltração e condutividade

hidráulica do solo após a implantação de pavimentos porosos na drenagem urbana, onde expuseram diversas vantagens e desvantagens, dentre as vantagens a recuperação da taxa de infiltração em terrenos com baixa percolação.

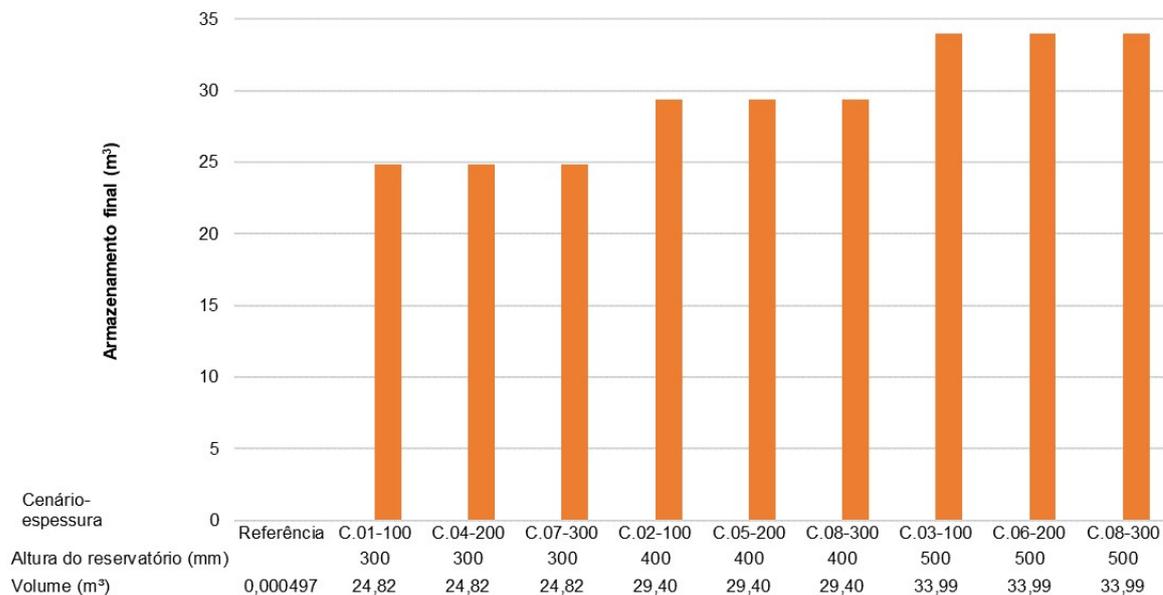
A Figura 4.20 apresenta os dados de perda por infiltração em volume, onde pelos resultados percebe-se um aumento de 24,51%, explica-se pela retirada de parte da camada de solo natural impermeável do terreno na simulação substituída por uma camada drenante (subleito) implicando no aumento da condutividade hidráulica do terreno natural que também justifica os resultados iguais em todos os cenários.



**Figura 4.21 – Perda por infiltração**  
**Fonte: Autor (2023).**

Tem-se na Figura 4.21 os resultados de armazenamento LID final. Nota-se que com o incremento do sistema LID houve uma maior retenção de água pluvial na base de pavimento permeável, que conforme os mesmos chegam ao seu limite de capacidade, a água escoava lentamente para a rede através dos drenos previstos em cada cenário, resultando na redução da velocidade do fluxo de escoamento na tubulação e implicando diretamente na descarga das águas no exutório, reduzindo de forma significativa o nível dos canais e evitando o retorno de água pluvial para as tubulações e poços e visita. Nuernberg (2021) e Sangalli (2021) constataram em suas pesquisas que parâmetro offset do dreno foi o parâmetro que mais influenciou

na modelagem, seguido pela porosidade da camada de assentamento e o índice de vazios da camada de armazenamento.



**Figura 4.22 – Armazenamento final**  
**Fonte: Autor (2023).**

## 4.2 Mapa de eficiência dos cenários

A partir dos dados coletados na modelagem determinou-se o carregamento recebido pelo exutório que foi de  $108,70 \times 10^6$  litros conforme consta na Tabela 4.11, onde nota-se que o fluxo de água na tubulação do sistema é de quase 100%, ou seja, esta trabalha praticamente em todo seu volume afogada, e como não há outras alternativas de reduzir o escoamento superficial o exutório recebe todo o volume acumulado.

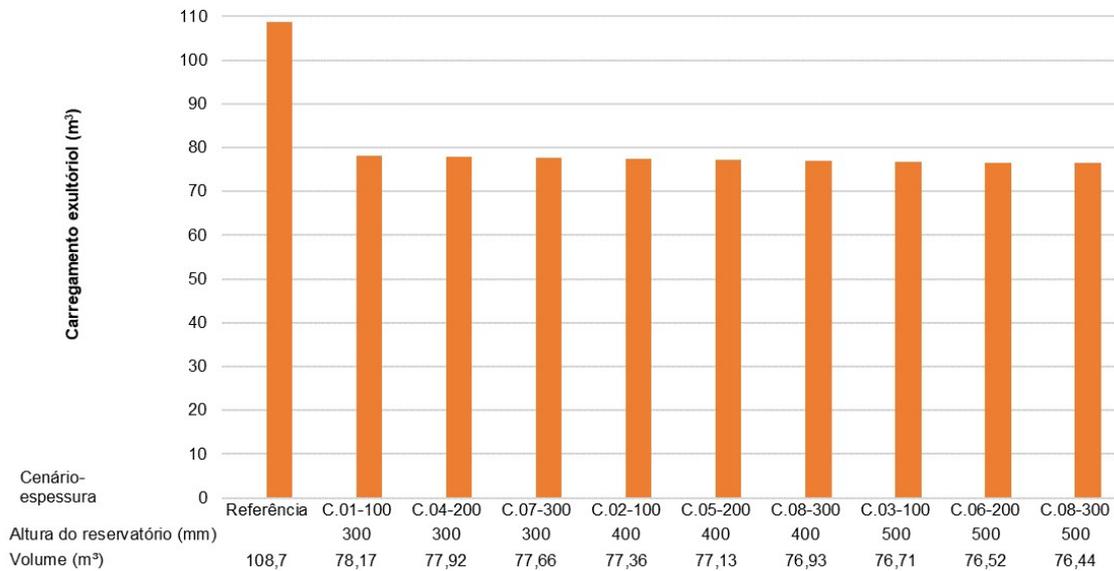
**Tabela 4.11– Carregamento recebido pelo exutório.**

Nó emissário	Fluxo/frequência %	Média/Fluxo LPS	Fluxo Máximo LPS	Volume total $10^6$ L
Exutório	99,49	1313,59	1342,59	108,70

**Fonte: Autor (2022).**

Na Figura 4.22 apresentam-se os dados da simulação do carregamento recebido com o incremento do sistema LID e percebe-se que houve uma redução de quase 30% no volume recebido pelo exutório, o fato justifica-se por ter se inserido pontos permeáveis através dos cenários de pavimentos permeáveis, onde aumentam a taxa de permeabilidade do terreno natural e reduz o escoamento

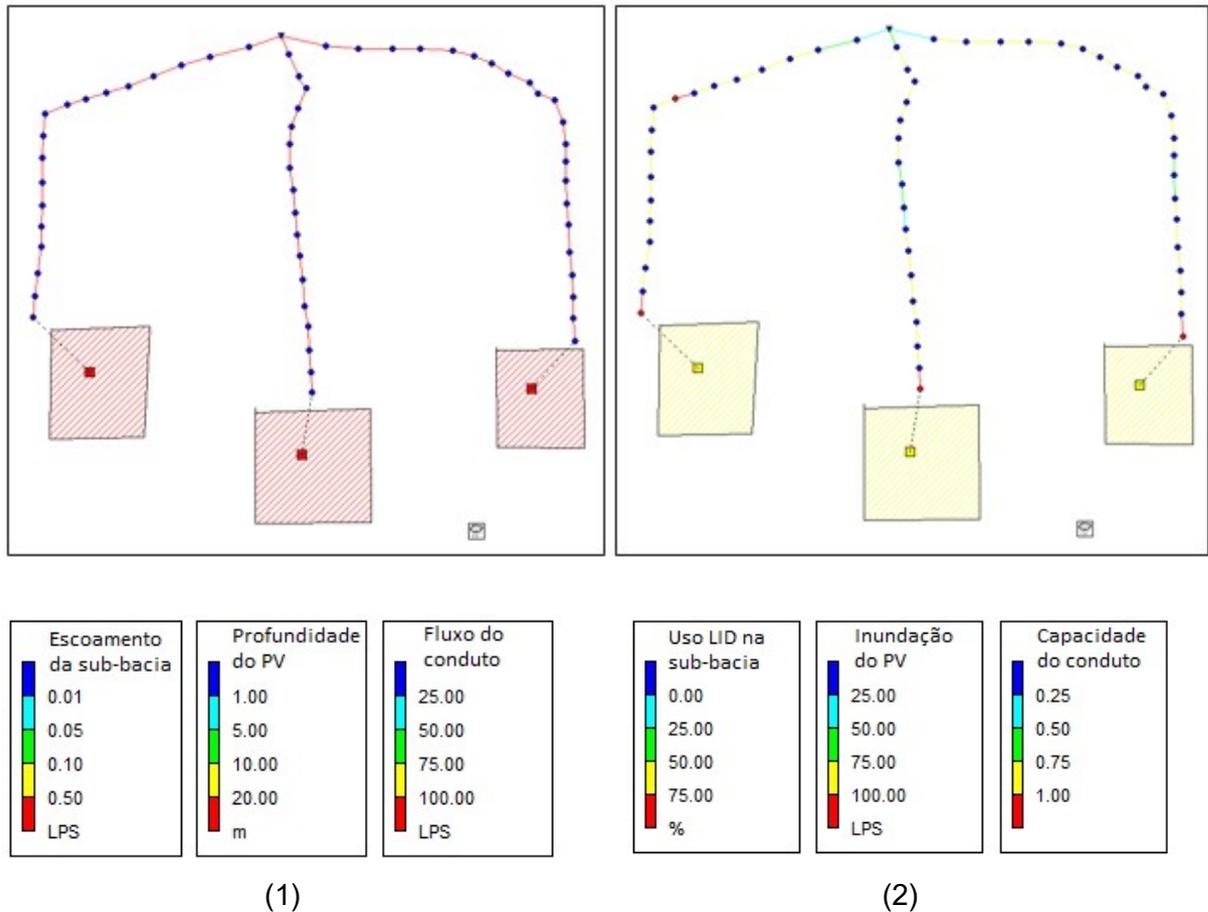
superficial, assim como, também houve o acúmulo de água nos reservatórios que ao chegarem a sua capacidade máxima escoam o excedente de água lentamente a rede de drenagem pelo dreno, e conseqüentemente, aliviando a recepção no exutório.



**Figura 4.23 – Carregamento recebido pelo exutório com LID**  
**Fonte: Autor (2023).**

Assim como acontece atualmente na área em estudo, a modelagem do cenário referência apresentou condutos que não suportaram a quantidade de água gerada pelas chuvas e houve inundação dos poços de visita e sobrecarga dos condutos, resultando em uma deficiência em quase todos os trechos do sistema de drenagem, conforme pode ser visto na Figura 4.23 (a).

O mapa na Figura 4.23 (b) demonstra a eficiência da aplicação do sistema LID na Sub-bacia. Todas as simulações realizadas no software dos sistemas de drenagem sofreram reduções nos níveis de sobrecarga em seus poços de visitas e condutos, visto que, como impacto houve um grande acúmulo no volume de água nos reservatórios (camada drenante).



**Figura 4.24 – Mapa de sobrecarga do sistema de drenagem - cenário referência (1) e cenários LID (2).**

**Fonte: Autor (2023).**

Após inserção do sistema LID houve uma redução significativa da sobrecarga dos pontos de drenagem, em que todos os 9 cenários aplicados obtiveram resultados similares na modelagem, gerando basicamente o mesmo mapa, com apenas 4 pontos de sobrecarga na tubulação e 4 poços de visita, pontos esses que de acordo com a legenda encontram-se em vermelho e que podem ser redimensionados para suportar a demanda recebida. Os demais dispositivos de drenagem suportaram os pontos de pico de intensidade pluvial não necessitando de intervenção e novo dimensionamento para o sistema de drenagem.

Os resultados dos nove cenários modelados mostraram que houve uma melhoria significativa perante a situação atual, diminuindo a vazão total ao exutório, evitando sobrecarga do sistema de drenagem e também foi percebida uma redução considerável no escoamento superficial que se manteve constante em todos os cenários em praticamente todas as áreas atingidas. A espessura da camada de

concreto permeável não teve uma contribuição significativa, foram utilizadas espessuras de 100, 200 e 300 mm, em todas as simulações a espessura não alterou os dados de volume acumulado, podendo ser utilizada a camada 100 mm que é a mínima aplicada na norma ABNT NBR 16.416. No entanto, houve um aumento gradual do armazenamento do dispositivo de baixo impacto aplicado no estudo, de forma lógica, pois houve um aumento no volume útil do reservatório de 300, 400 e 500 mm, implicando diretamente em todo o funcionamento do sistema de drenagem, pois reduziu a quantidade de água pluvial escoada diretamente ao sistema e em consequência houve uma redução na contribuição para o canal da Três de Maio. A Tabela 4.12 apresenta o resumo dos resultados obtidos de todos os cenários modelados.

**Tabela 4.12 – Resumo dos resultados dos cenários.**

	Modelagem 01 (100x300)		Modelagem 02 (100x400)		Modelagem 03 (100x500)	
	Volume Hectare – m	Profundidade mm	Volume Hectare – m	Profundidade mm	Volume Hectare – m	Profundidade mm
Armazenamento Inicial LID	6.879	32.143	9.171	42.857	11.464	53.571
Escoamento Superficial	29.978	140.084	29.978	140.084	29.978	140.084
Drenagem LID	57.343	267.959	55.050	257.245	52.758	246.531
Armazenamento final	24.815	115.958	29.401	137.387	33.986	158.815
Erro de Continuidade (%)	-0.946		-0.927		-0.909	
	Modelagem 04 (150x300)		Modelagem 05 (150x400)		Modelagem 06 (150x500)	
	Volume Hectare – m	Profundidade mm	Volume Hectare – m	Profundidade mm	Volume Hectare – m	Profundidade mm
Armazenamento Inicial LID	6.879	32.143	9.171	42.857	11.464	53.571
Escoamento Superficial	29.978	140.084	29.978	140.084	29.978	140.084
Drenagem LID	57.343	267.959	55.050	257.245	52.758	246.531
Armazenamento final	24.815	115.958	29.401	137.387	33.986	158.815
Erro de Continuidade (%)	-0.946		-0.927		-0.909	
	Modelagem 07 (200x300)		Modelagem 08 (200x400)		Modelagem 09 (200x500)	
	Volume Hectare – m	Profundidade mm	Volume Hectare – m	Profundidade mm	Volume Hectare – m	Profundidade mm
Armazenamento Inicial LID	6.879	32.143	9.171	42.857	11.464	53.571
Escoamento Superficial	29.978	140.084	29.978	140.084	29.978	140.084
Drenagem LID	57.343	267.959	55.050	257.245	52.758	246.531
Armazenamento final	24.815	115.958	29.401	137.387	33.986	158.815
Erro de Continuidade (%)	-0.946		-0.927		-0.909	

**Fonte: Autor (2023).**

Durante todas as modelagens houve 4 condutos que sobrecarregaram e causaram o afogamento dos seus respectivos poços de visita, gerando o extravasamento de água para a via. Esse fato sugere que os condutos foram subdimensionados ou que a inclinação esteja incorreta, então há a necessidade de uma intervenção mais invasiva para resolução do problema apontado pela simulação.

Em resumo, a tabela detalha a eficiência do Dispositivo de Baixo Impacto utilizado, como pode ser observado o aumento da espessura utilizada no pavimento não influencia no armazenamento inicial e nem no final de cada cenário, o que ratifica essa afirmação é a repetição do armazenamento em pavimentos com o mesmo volume de reservatório.

Nesse contexto e como grande parte do terreno da área estudada tem um grau de permeabilidade baixo, houve uma substituição da infiltração natural por um pavimento com uma alta taxa de permeabilidade, com base nisso, o sistema de pavimento permeável se mostrou ideal para ser utilizado em eventos de alta intensidade pluviométrica reduzindo de forma significativa o escoamento superficial e em concordância a isso retardando a vazão de água para o sistema de drenagem de forma mais lenta, em consequência aliviando a demanda de água para o exutório.

Por fim, o uso do pavimento permeável possui um grande potencial de captação de água em todos os cenários, se mostrando promissores para serem aplicados em áreas com um baixo grau de permeabilidade como nas vias de Belém que sofrem por anos com enchentes e inundações provenientes da impermeabilização urbana e pela defasada rede de drenagem existente. Com a proposta de aplicação do sistema de pavimento permeável para as autoridades competentes as comunidades residentes no entorno da Bacia do Una podem ter uma melhor qualidade de vida, reduzindo de forma significativa eventos de inundações que causam transtornos e prejuízos materiais aos residentes do local.

## **5 CONSIDERAÇÕES FINAIS**

A análise da capacidade de infiltração de diferentes cenários de pavimentos permeáveis na sub-bacia da Três de Maio, uma das sub-bacias da Bacia do Una, com o uso do software SWMM da EPA atendeu as expectativas. Nota-se que houve reduções significativas no escoamento superficial, alto índice de armazenamento nos reservatórios, aumento da taxa de infiltração no terreno natural e reduções de velocidade e recebimento do volume de água pelo exutório em todos os cenários simulados, por conseguinte, validando o uso do pavimento de concreto permeável como sistema de baixo impacto para aliviar o sistema de drenagem existente.

Analisando comparativamente cada cenário de inserção de pavimento permeável percebe-se que em todos ocorreram benefícios significantes com base no cenário referência e com resultados bem próximos uns dos outros. Como exemplo pode-se citar os mapas de sobrecarga do sistema de drenagem que foram gerados pelo software em que não se verificaram mudanças, assim como os resultados de perda por infiltração e redução no volume de escoamento superficial gerado. Portanto pode-se ser utilizado qualquer dos 9 cenários estudados para aplicação.

Dentre as 9 simulações foi avaliado o efeito da variação da espessura de concreto permeável na taxa de infiltração no terreno natural e notou-se que o mesmo não possui influência significativa, mesmo com o aumento das espessuras não foram alterados os resultados, portanto para efeito de custos pode-se utilizar a espessura mínima indicada na norma NBR 16.416 (ABNT, 2015), respeitando todos os parâmetros descritos para execução do elemento.

Assim como também foram avaliados os efeitos das espessuras da base permeável com relação à taxa de infiltração e depreendeu-se que esta sim influenciou consideravelmente nos resultados. Dentre elas os principais foram na alta de quase 25% na taxa de perda por infiltração, que se justifica por atingir uma camada mais profunda do solo natural, removendo parte do solo impermeável e recuperando a parte da permeabilidade natural do terreno. Outro ponto é o acúmulo de água pluvial na camada, onde alcançando o limite máximo suportado pelo reservatório o dreno escoava de forma lenta e gradativa a água para o exutório.

Com efeito, o pavimento permeável se mostra aceitável em todos os cenários, pois atendeu os objetivos geral e específicos elencados neste trabalho,

recuperando parcialmente a drenagem natural, aliviando os sistemas de drenagem e reduzindo a velocidade de escoamento de águas para o exutório.

Referente ao potencial de captação de água de cada cenário, ele se mostrou crescente conforme vai se aumentando a espessura da camada de base permeável, e conforme discriminado nos resultados se pode usar qualquer modelo simulado que serão atendidas as finalidades para qual foi desenvolvido neste trabalho.

### **5.1 Sugestões de pesquisas futuras**

- Execução do dispositivo LID mais viável financeiramente;
- Avaliar experimentalmente a recuperação da taxa de infiltração com o uso do pavimento permeável;
- Avaliar experimentalmente a durabilidade do sistema LID.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- 11.445. **Diretrizes nacionais para o saneamento básico.** Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico, p. 22, 2007.
- ABNT. NBR 16416 - **Pavimentos permeáveis de concreto - Requisitos e procedimentos.** Rio de Janeiro, 2015.
- ACI 552R-10. **Report on pervious concrete, American Concrete Institute.** USA, 2010.
- ACUNHA, B. V.; RUBIN, G. R.; SILVEIRA, A. L. L. DA. **Técnicas sustentáveis para manejo das águas pluviais: aplicação na infraestrutura verde.** Simpósio sobre Sistemas Sustentáveis, v. 01, p. 9, 2019.
- AHIABLAME, L. M.; ENGEL, B. A.; CHAUBEY, I. **Effectiveness of low impact development practices in two urbanized watersheds: Retrofitting with rain barrel/cistern and porous pavement.** Journal of Environmental Management, v. 119, p. 151–161, 2013.
- ANDRADE, L. M. S. et al. **Gestão Compartilhada Para Cidades Sensíveis À Água: O Agenciamento De Atores Para O Fortalecimento Do Lago Paranoá E O Enfrentamento Da Crise Hídrica Em Brasília.** Congresso Luso-Brasileiro para Planeamento Urbano, Regional, Integrado e Sustentável, p. 13, 2018.
- AQUAFLUXUS. **Drenagem Sustentável.** Rio de Janeiro: [s.n.].
- ARTMANN, M. et al. **How smart growth and green infrastructure can mutually support each other — A conceptual framework for compact and green cities.** *Ecological Indicators*, n. November 2016, p. 1–13, 2017.
- AUGUSTO, L. et al. **Modelo de gestão de drenagem urbana aplicada à Bacia do Una em Belém - Pa.** Revista da Universidade Vale do Rio Verde, v. 15, p. 253–267, 2017.
- AZEVEDO, F. S. **BIORRETENÇÃO: Tecnologia alternativa para manejo de águas pluviais urbanas aplicada a João Pessoa, PB.** Universidade Federal da Paraíba, p. 182, 2019.
- BALBO, J. T. **Pavimentos de concreto permeáveis: uma visão ambiental da tecnologia sustentável emergente.** São Paulo: Oficina de textos, 2020.

BALLARD, B. W. et al. **The SUDS manual (C753F)**. London: [s.n.].

BATISTA, J. A. N. & BOLDRIN, A. J. **Avaliação do desempenho hidráulico de um sistema de drenagem de águas pluviais urbanas**. Eng. Sanitária e Ambiental, v. 23, p. 263–273, 2018.

BECKER, N.; CONEGERO, M.; PINHEIRO, I. **Qualidade da água do escoamento superficial percolado em pavimento de concreto permeável dosado por diferentes métodos**. Revista de Gestão de Água da América Latina, v. 19, n. 1, p. 2– 0. 6 dez. 2021.

BELUSSI, A. C. DE O.; MÁXIMO, P. P.; RODRIGUES, P. S. H. **Uso de concreto permeável em pavimentos drenantes**. UNITOLEDO, p. 1–17, 2016.

BENEDICT, M. A.; MCMAHON, E. T. **Green Infrastructure: Smart Conservation for the 21st Century**. Sprawl Watch Clearing House, p. 36, 2002.

BRAGA, N. T. D. S. **Concretos permeáveis na Amazônia: Desafios e potencialidades Regionais**. Universidade Federal do Pará, p. 1–133, 2019.

BRUINSMA, J. et al. **Guidance for Usage of Permeable Pavement at Airports**. [s.l.: s.n.].

CANHOLI, A. P. **Drenagem Urbana e Controle de Enchentes**. 2. ed. São Paulo: Oficina de textos, 2014.

CANHOLI, J. F. **Medidas de Controle “in Situ” do Escoamento Superficial em Áreas Urbanas: Análise de Aspectos Técnicos e Legais**. Universidade de São Paulo, p. 184, 2013.

CARDOSO, L. K. S. et al. **Avaliação dos Índices Termodinâmicos na Previsibilidade de Chuvas em Belém-PA: o Uso Alternativo de Sondagens Atmosféricas por Satélite**. Anuário do Instituto de Geociências. Universidade Federal do Rio de Janeiro. p. 14, 2021.

CARDOSO, M. S. DA S. et al. **Ações de regularização fundiária e de mensuração das desconformidades urbanas: o caso das terras da União sob a tutela da Universidade Federal do Pará na cidade de Belém (PA)**. URBE - Revista Brasileira de Gestão Urbana, v. 6, n. 583, p. 307, 2014.

CARMO, W. J. E.; MARCHI, L. F. DE. **Uma visão holística do plano diretor de drenagem urbana**. p. 1–14, 2013.

CARVALHO, E. T. LEÃO. **Avaliação de elementos de infiltração de águas pluviais na zona norte da cidade de Goiânia**. p. 222, 2008.

CASTILLO GARCÍA, C. L.; ABREU FRANCO, D. E.; ALVAREZ GONZÁLEZ, M. **Evaluación de distintas fórmulas empíricas para el cálculo Del tiempo de concentración em lacuenca urbana Del río Bélico y Cubanicay, ciudad de Santa Clara.** Enfoque UTE, v. 12, n. 3, p. 51–64, 1 jul. 2021.

CHOW, V. TE. **Applied Hydrology.** [s.l.] Tata McGraw-Hill Education, 2010.

CHRISTOFIDIS, D.; ASSUMPÇÃO, R. DOS S. F. V.; KLIGERMAN, D. C. **Aevolução histórica da drenagem urbana: da drenagem tradicional à sintonia com a natureza.** Saúde em Debate, v. 43, n. spe3, p. 94–108, 2019.

CORTINOVIS, C.; GENELETTI, D. **Land Use Policy Ecosystem services in urban plans : What is there, and what is still needed for better decisions.** Land Use Policy, v. 70, n. March 2017, p. 298–312, 2018.

COSENTINO, L.; BORGES, M. M. **Benefícios da captação de água pluvial para a gestão urbana de recursos hídricos.** Livia Tavares Cosentino Marcos Martins Borges. n. September, 2016.

COSTA, T. F. **Aplicação do modelo SWMM para análise de inundações na área urbana de Itajubá-MG.** Itajubá: [s.n.].

CRUZ, C. C. D. C. S. **Uso e ocupação do solo nas bacias hidrográficas da região metropolitana de Belém: uma análise urbanística - ambiental.** Programa de pós-graduação em arquitetura e urbanismo, p. 183, 2018.

CRUZ, W. L. DA et al. **Análise da impermeabilização do solo na área da península D' Ponta da Areia- São Luís/MA.** Revista GeoUECE (Online), v. 08, p. 388–400, 2019.

DAVIES, C. et al. **Green Infrastructure planning guide.** [http://www.greeninfrastructurenw.co.uk/resources/North\\_East\\_Green\\_Infrastructure\\_Planning\\_Guide.pdf](http://www.greeninfrastructurenw.co.uk/resources/North_East_Green_Infrastructure_Planning_Guide.pdf), v. 1.1, p. Acesso em: 30 de out., 2015.

DIAS, L. C.; VALENTE, A. M. C.; FERNANDES, L. L. **Análise e correlação de variáveis climatológicas com os fenômenos climáticos e a urbanização na Cidade de Belém, no Estado do Pará, região Norte do Brasil.** Research, Society and Development. v. 9, n. 8, p. 22, 2020.

DIERKES, C.; LUCKE, T.; HELMREICH, B. **General technical approvals for decentralized sustainable urban drainage systems (SUDS) - the current situation in Germany.** Sustainability (Switzerland), v. 7, n. 3, p. 3031–3051, 2015.

DIGMAN, C. et al. **Getting the BeST from SuDS.** p. 1–5, 2015.

DUARTE LOPES, M.; BARBOSA LIMA DA SILVA, G. **Avaliação do efeito integrado de pavimento permeável e reservatório de retenção no controle do escoamento superficial**. Florianópolis: [s.n.].

EISENBERG, B.; LINDOW, K. C.; SMITH, D. R. **Permeable Pavements**. [s.l: s.n.].

EPA. **Low Impact Development (LID) A Literature Review**. United States Environmental Protection Agency, 2000.

EPA. **Green Building**. United States Environmental Protection Agency, p. 17, 2011.

EPA, U. S. **Benefits of Low Impact Development: How LID Can Protect Your Community's Resources**. United States Environmental Protection Agency, p. 2, 2012.

FAUSTINO, A. DA S. **Gestão de águas pluviais urbanas através da abordagem Water Sensitive Urban Design: desafios e potencialidades para o município de São Carlos - SP**. Universidade Federal de São Carlos, p. 198, 2017.

FAYAL, M. A. D. A. **Previsão de Vazão por Redes Neurais Artificiais e Transformada Wavelet**. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, p. 158, 2008.

FERREIRA, E. DE C. **Modelagem computacional com aplicação de técnicas de desenvolvimento de baixo impacto na bacia do riacho Moxotó na cidade de Recife/PE**. Universidade Federal de Pernambuco, v. 01, p. 90, 2017.

FILHO, G. M. M. et al. **Modelos Hidrológicos: Conceitos E Aplicabilidades**. Modelos Hidrológicos: Conceitos E Aplicabilidades, v. 6, n. 2, p. 35–47, 2013.

FISRWG. **Stream corridor restoration: Principles, processes and practices**. [s.l: s.n.].

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.

FRANÇA, L. R. C. **Aplicação de técnicas de desenvolvimento de baixo impacto no controle da poluição de águas em sistemas de drenagem urbana**. Universidade Federal de Campina Grande, p. 103, 2020.

FRENTE BACIA DO UNA. **Frente dos Moradores Prejudicados da Bacia do Una: "A maior reforma urbana da América Latina", ocorrida em Belém, capital do estado do Pará (Parte 2)**. <https://frentebaciadouna.blogspot.com/2014/02/a-maiorreforma-urbana-da-america.html>. Acessado em: 18 de abril., 2023.

GAMAGE, G. B. et al. **Greening cities: A review of green infrastructure.** Auckland: Transforming Cities: Innovations for Sustainable Futures, 2014.

GARRIDO NETO, P. DE S. et al. **Sistemas de drenagem urbana sustentáveis no mundo e no Brasil.** Brazilian Journal of Development, v. 5, n. 10, p. 18743–18759, 2019.

GÜLBAZ, S.; KAZEZYILMAZ-ALHAN, C. M. **Impact of LID Implementation on Water Quality in Alibeyköy Watershed in Istanbul, Turkey.** Environmental Processes, v. 5, p. 201–212, 2018.

GUPTA, K. et al. **GIS based analysis for assessing the accessibility at hierarchical levels of urban green spaces.** Urban Forestry & Urban Greening, 2016.

GUTIERREZ, A. I. R.; RAMOS, I. C. **Guia de Técnicas Sustentáveis em Drenagem Urbana.** Universidade Federal do Mato Grosso do Sul, p. 30, 2017.

HAGHIGHATAFSHAR, S.; YAMANEE-NOLIN, M.; LARSON, M. A physically based model for mesoscale SuDS – an alternative to large-scale urban drainage simulations. Journal of Environmental Management, v. 240, n. January, p. 527–536, 2019.

HOLMES, R. R.; HART, M. L.; KEVERN, J. T. **Enhancing the Ability of Pervious Concrete to Remove Heavy Metals from Stormwater.** Journal of Sustainable Water in the Built Environment, v. 3, n. 2, p. 04017004, 2017a.

HOLMES, R. R.; HART, M. L.; KEVERN, J. T. **Heavy metal removal capacity of individual components of permeable reactive concrete.** Journal of Contaminant Hydrology, v. 196, p. 52–61, 2017b.

HOSTILIO MAIA DE PAULA NETO. **Calibração e aplicação de um modelo swmm/lid para pavimentos permeáveis.** 2013.

JOÃO, C. P. M. et al. **Avaliação do tempo de concentração em uma pequena bacia hidrográfica do cerrado de Minas Gerais.** Revista Augustus, v. 24, p. 12–23, 2019.

JORNAL O LIBERAL. **Bacia do Una: Bairros têm 25 pontos de alagamento quando chove forte.** <https://www.oliberal.com/belem/bairros-que-compoem-a-baciado-una-tem-25-pontos-de-alagamento-quando-chove-forte-em-belem-1.459270>. Acessado em: 18 de abril., 2023.

JUNIOR, A. C. DE P. **Estudo do potencial de aplicação de resíduo de concreto em substituição ao agregado graúdo para concretos permeáveis.** Universidade Federal de Juiz de Fora, p. 163, 2019.

KABISCH, N. et al. **Urban green space availability in European cities.** Ecological Indicators, 2016.

KIM, G. M. et al. **Water purification characteristics of pervious concrete fabricated with CSA cement and bottom ash aggregates.** Construction and Building Materials, v. 136, p. 1–8, 2017.

KIM, J.; CHOI, S.; JOO, J. **EPA SWMM-LID Modeling for Low Impact Development.** Journal of the Korean Society of Hazard Mitigation, v. 17, n. 2, p. 415–424, 2017.

LAMB, G. S. **Desenvolvimento e Análise do Desempenho de Elementos de Drenagem Fabricados em Concreto Permeável.** Universidade Federal do Rio Grande do Sul, v. 1, p. 150, 2014.

LEI COMPLEMENTAR DE CONTROLE URBANÍSTICO nº 02. **Lei Complementar de Controle Urbanístico.** Câmara Municipal de Belém, p. 82, 1999.

LENNON, M.; SCOTT, M.; O'NEILL, E. **Urban Design and Adapting to Flood Risk: The Role of Green Infrastructure.** Journal of Urban Design, v. 19, n. 5, p. 745–758, 2014.

LI, F. et al. **Urban ecological infrastructure: An integrated network for ecosystem services and sustainable urban systems.** Journal of Cleaner Production, p. 32, 2016.

LIU, Y. et al. **Enhancing a rainfall-runoff model to assess the impacts of BMPs and LID practices on storm runoff.** Journal of Environmental Management, v. 147, p. 12–23, 2015.

LIU, Y. et al. **Environmental Modelling & Software Optimal selection and placement of BMPs and LID practices with a rainfall-runoff model.** Environmental Modelling and Software, v. 80, p. 281–296, 2016a.

LIU, Y. et al. **Sensitivity and Uncertainty Analysis of the L-THIA-LID 2 . 1 Model.** Water Resources Management, p. 4927–4949, 2016b.

LIU, Y. et al. **Science of the Total Environment Optimal selection and placement of green infrastructure to reduce impacts of land use change and climate change on hydrology and water quality: An application to the Trail Creek**

**Watershed , Indiana.** Science of the Total Environment, The, v. 553, p. 149–163, 2016c.

LIU, Y. et al. **Science of the Total Environment A review on effectiveness of best management practices in improving hydrology and water quality : Needs and opportunities.** Science of the Total Environment, v. 601–602, p. 580–593, 2017.

LIU, Y.; BRALTS, V. F.; ENGEL, B. A. **Science of the Total Environment Evaluating the effectiveness of management practices on hydrology and water quality at watershed scale with a rainfall-runoff model.** Science of the Total Environment, The, v. 511, p. 298–308, 2015.

LOU, R. F. **Modelagem hidrológica chuva-vazão e hidrodinâmica aplicada na bacia experimental do Rio Piabanha/RJ Rodrigo.** Universidade Federal do Rio de Janeiro, p. 190, 2010.

LUCAS, A. H. et al. **Avaliação da construção e operação de técnicas compensatórias de drenagem urbana: O transporte de finos, a capacidade de infiltração, a taxa de infiltração real do solo e a permeabilidade da manta geotêxtil.** Engenharia Sanitária e Ambiental, v. 20, n. 1, p. 17–28, 2015.

MACIEL, S. A. **Análise da relação chuva-vazão na bacia hidrográfica do rio Paranaíba, Brasil.** Universidade Federal de Uberlândia, p. 214, 2017.

MARCHIONI, M.; SILVA, C. O. **Sistemas Construtivos Pavimentos Permeáveis.** ABCP, p. 24, 2011.

MARTIN-MIKLE, C. J. et al. **Identifying priority sites for low impact development (LID) in a mixed-use watershed.** Landscape and Urban Planning, v. 140, p. 29–41, 2015.

MARUYAMA, C. M.; FRANCO, M. D. A. R. **Pavimentos Permeáveis E Infraestrutura Verde.** Periódico Técnico e Científico Cidades Verdes, v. 4, n. 9, p. 73–86, 2016.

MAZZONETTO, P. C. **Concreto permeável.** <http://infraestruturaurbana.pini.com.br/solucoes- tecnicas/13/artigo254488-1.aspx> - Acessado em 13/11/2020., 2011.

MELDRUM, A. L.; SMYTH, M. **Water sensitive urban design for glasgow city centre.** Procedia Environmental Science, Engineering and Management, v. 4, n. 4, p. 255–263, 2017.

MELO, A. M. Q. et al. **Digitalização de Pluviogramas para Fins de Determinação do Fator Energético da Chuva (R) para a Cidade de Belém-Pa.** Encontro Nacional de Engenharia de Sedimentos. p. 13, 2014.

MELO, H. D. A. **Integração entre modelos hidrológicos e sistemas de informações geográficas: uma avaliação metodológica.** Universidade Federal de Campina Grande, p. 119, 2010.

MENDES, A. T. **Dispositivos de drenagem urbana de baixo impacto para diminuição da vazão no sistema de microdrenagem da bacia urbana do córrego brejo comprido, Palmas – TO.** Universidade Federal de Tocantins, p. 119, 2019.

MENDONÇA, I. et al. **Equações de Chuvas Intensas para Auxílio das Obras de Drenagem Urbana no Estado do Pará.** Scientific Journal ANAP, v. 01, p. 1–15, 2023.

MIGUEZ, M. G.; VERÓL, A. P.; CARNEIRO, P. R. F. **Sustainable Drainage Systems: An Integrated Approach, Combining Hydraulic Engineering Design, Urban Land Control and River Revitalisation Aspects.** Drainage Systems, 2012.

MOLLA, M. B. **The Value of Urban Green Infrastructure and Its Environmental Response in Urban Ecosystem: A Literature Review** Mikias Biazen Molla Hawassa University, Wondo Genet College of Forestry and Natural resources , Department of Natural Resource. v. 4, n. 2, p. 89–101, 2015.

MONTES, R. M.; LEITE, J. F. **A Drenagem Urbana De Águas Pluviais E Seus Impactos Cenário Atual Da Bacia Do Córrego Vaca – Brava Goiânia - Go.** Em: Journal of Chemical Information and Modeling. [s.l: s.n.]. p. 30.

MOREIRA, I. A. **Modelagem hidrológica chuva-vazão com dados de radar e pluviômetros.** Universidade Federal do Paraná, p. 96, 2005.

MOURA, N. C. B. DE. **Biorretenção tecnologia ambiental urbana para manejo das águas de chuva.** Universidade de São Paulo, p. 177, 2013.

MWANGI, J. K. et al. **A modeling approach to evaluate the impact of conservation practices on water and sediment yield in Sasumua Watershed , Kenya.** v. 70, n. 2, p. 75–90, 2015.

NUERNBERG, J. K. **Proposta de Modelagem de Pavimentos Permeáveis do Tipo C como Sub-bacias Regulares Equivalentes.** Universidade Tecnológica Federal do Paraná, p. 160, 2021.

OLIVEIRA, A. P. DE. **A relevância da percepção do usuário na implantação e uso de técnicas compensatórias de drenagem nas áreas urbanas.** Cadernos Zygmunt Bauman, v. 8, p. 360–374, 2018.

PALLA, A.; GNECCO, I. **Hydrologic modeling of Low Impact Development systems at the urban catchment scale.** Journal of Hydrology, v. 528, p. 361–368, 2015.

PAPPALARDO, V. et al. **The potential of green infrastructure application in urban runoff control for land use planning: A preliminary evaluation from a southern Italy case study.** Ecosystem Services, v. 26, n. May, p. 345–354, 2017.

PEITER, T. V.; POLETO, C. **Estudos Dos Efeitos De Trincheiras De Infiltração Sobre O Escoamento Superficial.** Rea- Revista De Estudos Ambientais Da Furb, p. 57–67, 2012.

PEREIRA, K. K.; BARBOSA, M. P. **Desenvolvimento de composição de concreto permeável com agregados oriundos de resíduos de construção civil da região de campinas.** Encontro de Iniciação em Desenvolvimento Tecnológico e Inovação, p. 6, 2015.

PONTE, J. P. X. et al. **Urbanização e drenagem urbana: concepções divergentes na Bacia Da Estrada Nova, Belém-PA.** 3º Seminário Nacional sobre o Tratamento de Áreas de Preservação Permanente em Meio Urbano e Restrições Ambientais ao Parcelamento do Solo, n. 1, p. 1–16, 2014.

PORTELA, R. D. S. **Planejamento, Participação Popular e Gestão de Políticas Urbanas: A Experiência do Projeto de Macrodrenagem da Bacia do Una.** Ufpa, p. 213, 2005.

PREFEITURA MUNICIPAL DE BELÉM. **Plano Municipal de Saneamento Básico - Prefeitura Municipal de Belém.** Prefeitura de Belém, v. 2, p. 343, 2020.

PULITI, D. T. DE CARVALHO et al. **Pavimentos porosos e sua influência na drenagem urbana.** Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, p. 17, 2012.

QIN, H. PENG; LI, Z. XI; FU, G. **The effects of low impact development on urban flooding under different rainfall characteristics.** Journal of Environmental Management, v. 129, p. 577–585, 2013.

QUEIROZ, M.; ALVES, N. **Aplicação de diferentes fórmulas de tempo de concentração para uma bacia hidrográfica urbana.** Revista Tocantinense de Geografia, v. 09, p. 219–231, 2020.

QUINONEZ FERNANDEZ, O. V. **Simulação da vazão máxima pelo método de ven te chow (scs) em bacias hidrográficas urbanizadas de Marechal Cândido Rondon, Paraná** / simulationofpeakdischargefromurbanwatershedsat marechal cândido rondon (brazil) usingven te chowmethod. *GeographiaMeridionalis*, v. 4, n. 2, p. 246, 28 jan. 2019.

REIS ABREU, P. R.; DE OLIVEIRA ILHA, M. S. **Comparação de desempenho hidrológico de sistemas de infiltração de água de chuva: poço de infiltração e jardim de chuva**. *Ambiente Construído*, v. 14, n. 2, p. 79–90, 2014.

RIBEIRO, E. G. P. et al. **Caracterização morfométrica da bacia hidrográfica do igarapé 01/06/2015, , 2015**. (Nota técnica).

RODRÍGUEZ-ROJAS, M. I. et al. **A study of the application of permeable pavements as a sustainable technique for the mitigation of soil sealing in cities: A case study in the south of Spain**. *Journal of Environmental Management*, v. 205, p. 151–162, 2018.

ROSSMAN, L. A. **Storm water management model user’s manual Version 5.1**. National Risk Management Laboratory Office of Research and Development. United States Environmental Protection Agency, Cincinnati, Ohio., n. September, p. 352, 2015.

ROSSMAN, L. A.; HUBER, W. C. **Storm Water Management Model Reference Manual Volume I – Hydrology ( Revised )**. National Risk Management Laboratory Office Of Research And Development U.s. Environmental Protection Agency, v. I, p. 233, 2016.

SANDIFER, P. A.; SUTTON-GRIER, A. E.; WARD, B. P. **Exploring connections among nature , biodiversity , ecosystem services , and human health and well-being: Opportunities to enhance health and biodiversity conservation** \$. *Ecosystem Services*, v. 12, p. 1–15, 2015.

SANGALLI, N. C. R. **Modelagem Hidrológica de um Módulo Experimental de Pavimento Permeável Poroso Utilizando o EPA SWMM**. Universidade Tecnológica Federal DO Paraná, p. 97, 2021.

SANSALONE, J. et al. **Filtration and clogging of permeable pavement loaded by urban drainage**. *WaterResearch*, v. 46, n. 20, p. 6763–6774, 2012.

SANTINI JUNIOR, M. A. **Modelagem hidráulica/hidrológica do escoamento superficial com a utilização do SWMM integrado ao SIG: o exemplo de Ilha Solteira-SP.** Universidade Estadual Paulista “Julio de Mesquita Filho”, p. 173, 2018.

SANTOS, A.; AMORIM, R.; PINHO, V. **Apreciação do desempenho dos modelos de estimativa do tempo de concentração na bacia hidrográfica do rio Paraíba do Meio/AL.** Revista Eletrônica do Curso de Geografia - UFG/REJ, p. 1–15, 2019.

SANTOS, K. R. DOS. **Inundações urbanas: um passeio pela literatura.** Èlisée, Rev. Geo., v. 1, n. 1, p. 177–190, 2012.

SHANAHAN, D. F. et al. **Health Benefits from Nature Experiences Depend on Dose.** Nature Publishing Group, n. February, p. 1–10, 2016.

SILVA, D. F. **Análise da influência de microrreservatórios em um loteamento e seus efeitos em escala de bacia.** p. 172, 2016.

SILVA, K. R. M. DA. **A Implantação De Obras Civis E De Saneamento Na Bacia Do Una, Em Belém Do Pará, E As Condicionantes Relacionadas Às Características Geológicas E Geotécnicas.** Universidade Federal do Pará, p. 140, 2004.

SILVEIRA, A. L. L. DA; GOLDENFUM, J. A. **Metodologia Generalizada para Pré-Dimensionamento de Dispositivos de Controle Pluvial na Fonte.** v. 12, p. 157–168, 2007.

SIQUEIRA, M. M. et al. **Métodos de cálculo de vazão de escoamento superficial em bacias rurais de diferentes escalas.** Drainage flow calculation methods in different scale rural basins. Revista de Engenharia e Tecnologia, v. 15, p. 1–12, 2023.

- SONTER, L. J. et al. **Spatial and Temporal Dynamics and Value of Nature-Based Recreation**, Estimated via Social Media. p. 1–16, 2016.
- STANG, C. et al. **Conservation management practices: Success story of the Hog Creek and Sturgeon River watersheds , Ontario , Canada**. Journal of Soil and Water Conservation, v. 71, n. 3, p. 237–248, 2016.
- SUZUKI, C. Y.; AZEVEDO, A. M.; JÚNIOR, F. I. K. **Drenagem subsuperficial de pavimentos. Conceitos e dimensionamento**. 1ª Edição ed. São Paulo: Oficina de Textos, 2014.
- TUCCI, C. E. M. **Aspectos Institucionais no Controle de Inundações. I Seminário de Recursos Hídricos do Centro- Oeste**. Brasília, p. 16, 1999.
- TUCCI, C. E. M. **Gestão da Drenagem Urbana. DF: CEPAL**. Escritório no Brasil/IPEA, n. 2179–5495, p. 50, 2012.
- TUCCI, C. E. M.; MELLER, A. **Regulação das águas pluviais urbanas**. REGA, v. 4, p. 15, 2007.
- VERSINI, P. A. et al. **Assessment of the hydrological impacts of green roof: From building scale to basin scale**. Journal of Hydrology, v. 524, p. 562–575, 2015.
- VICENTE, O.; FERNANDEZ, Q. **Simulação da vazão máxima pelo método de vent e chow (scs) em bacias hidrográficas urbanizadas de Marechal Cândido Rondon, Paraná**. Geographia Meridionalis, v. 04, p. 246–268, 2018.
- VINAGRE, M. V. DE A. et al. **Modelo De Gestão De Drenagem Urbana Aplicado À Bacia Do Una Em Belém-Pa**. Revista Da Universidade Vale Do Rio Verde, v. 15, n. 1, p. 253–267, 2017.
- WONG, T. H. F. **Water sensitive urban design - the journey thus far**. Australasian Journal of Water Resources, v. 10, n. 3, p. 213–222, 2006.
- WONG, T. H. F. et al. Blue print 2013 – **Stormwater Management in a Water Sensitive City**. Cooperative Research Centre for Water Sensitive Cities, p. 83, 2013.
- WONG, T. H. F.; BROWN, R. R. **The water sensitive city: Principles for practice**. Water Science and Technology, v. 60, n. 3, p. 673–682, 2009.
- WRIGHT, T. J. et al. **Retrofitting LID Practices into Existing Neighborhoods: Is It Worth It ?** Environmental Management, v. 57, n. 4, p. 856–867, 2016.

- XIE, J. et al. **Study on storm-water management of grassed swales and permeable pavement based on SWMM.** Water (Switzerland), v. 9, n. 11, 2017.
- XIE, N.; AKIN, M.; SHI, X. **Permeable concrete pavements: A review of environmental benefits and durability.** Journal of Cleaner Production, v. 210, p. 1605–1621, 2019.
- YAHIA, A.; KABAGIRE, K. D. **New approach to proportion pervious concrete.** Construction and Building Materials, v. 62, p. 38–46, 2014.
- ZANANDREA, F. **Avaliação de Técnicas de Baixo Impacto no controle de Impactos hidrológicos em uma bacia urbana em consolidação.** Universidade Federal do Rio Grande do Sul, p. 93, 2016.
- ZHUANG, Y. et al. **Current patterns and future perspectives of best management practices research: A bibliometric analysis.** Journal of Soil and Water Conservation, v. 71, n. 4, p. 98–104, 2016.
- ŽLENDER, V.; THOMPSON, C. W. **Landscape and Urban Planning Accessibility and use of peri-urban green space for inner-city dwellers: A comparative study.** Elsevier, v. 165, p. 193–205, 2017.

## Página de assinaturas



**Junior Ishihara**  
868.009.572-91  
Signatário

### HISTÓRICO

- 10 mai 2023**  
09:17:50  **Junior Hiroyuki Ishihara** criou este documento. (E-mail: [jhi@ufpa.br](mailto:jhi@ufpa.br), CPF: 868.009.572-91)
- 10 mai 2023**  
09:17:52  **Junior Hiroyuki Ishihara** (E-mail: [jhi@ufpa.br](mailto:jhi@ufpa.br), CPF: 868.009.572-91) visualizou este documento por meio do IP 138.122.32.109 localizado em Breu Branco - Para - Brazil
- 10 mai 2023**  
09:18:05  **Junior Hiroyuki Ishihara** (E-mail: [jhi@ufpa.br](mailto:jhi@ufpa.br), CPF: 868.009.572-91) assinou este documento por meio do IP 138.122.32.109 localizado em Breu Branco - Para - Brazil

