

UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO  
CENTRO DE TECNOLOGIA E GEOCIÊNCIAS  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM REDE NACIONAL EM GESTÃO E  
REGULAÇÃO DE RECURSOS HÍDRICOS

**LORENA CARDIM FALCÃO**

**INFRAESTRUTURA VERDE COMO ESTRATÉGIA DE GESTÃO DE RECURSOS  
HÍDRICOS EM ÁREA URBANA EM RECIFE (PE)**

Recife

2018

**LORENA CARDIM FALCÃO**

**INFRAESTRUTURA VERDE COMO ESTRATÉGIA DE GESTÃO DE RECURSOS  
HÍDRICOS EM ÁREA URBANA EM RECIFE (PE)**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Rede Nacional em Gestão e Regulação de Recursos Hídricos, da Universidade Federal de Pernambuco, como requisito parcial para a obtenção do título de Mestre em Gestão e Regulação de Recursos Hídricos.

Área de concentração: Regulação e Governança de Recursos Hídricos.

Orientadora: Prof.<sup>a</sup> Dr.<sup>a</sup> Suzana Maria Gico Lima Montenegro.

Recife

2018

Catálogo na fonte  
Bibliotecária Margareth Malta, CRB-4 / 1198

- F178i Falcão, Lorena Cardim.  
Infraestrutura verde como estratégia de gestão de recursos hídricos em área urbana em Recife (PE)/ Lorena Cardim Falcão. – 2018.  
72 folhas, il., gráfs., tabs.
- Orientadora: Profa. Dra. Suzana Maria Gico Lima Montenegro.
- Dissertação (Mestrado Profissional) – Universidade Federal de Pernambuco. CTG. Programa de Pós-Graduação em Gestão e Regulação de Recursos Hídricos em Rede Nacional, 2018.  
Inclui Referências.
1. Gestão e Regulação de Recursos Hídricos. 2. Infiltração. 3. Parques urbanos. 4. Método Beerkan. 5. Hydrus. I. Montenegro, Suzana Maria Gico Lima (Orientadora). II. Título.
- UFPE
- 333.91 CDD (22. ed.) BCTG/2020-258

**LORENA CARDIM FALCÃO**

**INFRAESTRUTURA VERDE COMO ESTRATÉGIA DE GESTÃO DE RECURSOS  
HÍDRICOS EM ÁREA URBANA EM RECIFE (PE)**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Rede Nacional em Gestão e Regulação de Recursos Hídricos, da Universidade Federal de Pernambuco, como requisito parcial para a obtenção do título de Mestre em Gestão e Regulação de Recursos Hídricos.

Aprovada em: 03/12/2018.

**BANCA EXAMINADORA**

---

Prof<sup>ª</sup>. Dr<sup>ª</sup>. Suzana Maria Gico Lima Montenegro (Orientadora)

Universidade Federal de Pernambuco

---

Prof<sup>ª</sup>. Dr<sup>ª</sup>. Sylvana Melo dos Santos (Examinadora Interna)

Universidade Federal de Pernambuco

---

Prof. Dr. Artur Paiva Coutinho (Examinador Externo)

Universidade Federal de Pernambuco

---

Prof<sup>ª</sup>. Dr<sup>ª</sup>. Simone Rosa da Silva (Examinadora Externa)

Universidade de Pernambuco

Dedico esse trabalho ao meu avô Geraldo, que em vida me mostrou a importância do conhecimento.

## AGRADECIMENTOS

Agradeço à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal Nível Superior - Brasil (CAPES).

Agradeço também ao Programa de Mestrado Profissional em Rede Nacional em Gestão e Regulação de Recursos Hídricos - ProfÁgua, Projeto CAPES/ANA AUXPE Nº. 2717/2015, pelo apoio técnico científico aportado até o momento

À minha orientadora, Professora Suzana Montenegro, por toda orientação, paciência e conhecimento passado ao longo de todo o curso.

Ao Professor Arthur Coutinho, professor do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil e Ambiental da UFPE, por todo o auxílio, contribuição e incentivo nessa fase final.

Aos professores do programa do ProfÁgua do Pólo UFPE, pelos conhecimentos transmitidos ao longo desses meses.

Aos meus chefes na Companhia Pernambucana de Saneamento, por me possibilitarem seguir com esse mestrado.

Ao DEN/UFPE (Departamento de Energia Nuclear), por me permitir utilizar o Laboratório de Física do Solo.

Aos colegas do DEN/UFPE, sem os quais eu não teria conseguido terminar esse trabalho, em especial a Neto I, Neto II, Victor Hugo, Maurício, Suellem, Lucas.

Aos colegas da minha turma do mestrado, que tanto me ajudaram nesse novo mundo de conhecimentos, em especial a minha amiga Ilana, que levo comigo para o resto da vida.

Aos meus pais, Derivaldo e Ann, que sempre fizeram o que estivesse em seu alcance por mim.

Às minhas irmãs, Rebeca e Mirele, que me aguentam há tanto tempo.

E por fim, ao meu noivo Rômulo, que com todo o seu companherismo me deu suporte em todos os momentos e não me deixou desistir.

E não há melhor resposta que o espetáculo da vida: vê-la desfiar seu fio, que também se chama vida, ver a fábrica que ela mesma, teimosamente, se fabrica, vê-la brotar como há pouco em nova vida explodida; mesmo quando é assim pequena a explosão, como a ocorrida; mesmo quando é uma explosão como a de há pouco, franzina; mesmo quando é a explosão de uma vida severina. (MELO NETO, 2007).

## RESUMO

A urbanização, ao substituir a paisagem natural por superfícies impermeabilizadas e canalização da drenagem, provoca bruscas alterações ambientais. Em consequência, no ciclo hidrológico a taxa de infiltração é reduzida e o volume de escoamento superficial elevado, aumentando a ocorrência de problemas relacionados à água no meio urbano, como alagamentos e inundações. Assim, é essencial o desenvolvimento de intervenções estruturais e estratégicas na gestão de recursos hídricos que reduzam os riscos associados aos eventos críticos como inundações. Infraestruturas verdes são intervenções que melhoram a capacidade da natureza em captar, regular, filtrar e/ou entregar água de maneira segura a seus usuários, através da proteção e/ou otimização do ecossistema hídrico. Parques urbanos podem contribuir diretamente para a redução dos riscos de ocorrência de inundações, caso incluam a implantação de infraestruturas verdes e, portanto, de coberturas permeáveis que reduzirão o escoamento superficial. Para comprovar esse benefício, entretanto, é essencial analisar o processo de infiltração nessas coberturas. O objetivo principal dessa pesquisa é demonstrar a importância de proposta de infraestrutura verde na cidade do Recife para a gestão de recursos hídricos através do estudo e da comparação da capacidade de infiltração em diferentes superfícies. Considerando-se esse objetivo, foram realizados ensaios de infiltração ensaios de caracterização física em três diferentes superfícies de parque urbano da cidade do Recife e em um pavimento permeável existente no sítio experimental do Grupo de Recursos Hídricos e do Grupo de Física do Solo da UFPE. A metodologia Beerkan foi utilizada para estimar as propriedades hidráulicas dos solos daquelas superfícies. O modelo Hydrus 1D foi utilizado para simular os processos hidrológicos em cada cobertura, considerando-se a precipitação de uma chuva de intensidade constante para a cidade do Recife associada a um tempo de retorno de 10 anos. Para um mesmo volume de água aplicado, houve uma redução no escoamento superficial nas superfícies com maior grau de permeabilidade. Comprovou-se, então, que infraestruturas verdes são estratégias sustentáveis de gestão de recursos hídricos, visto que atuam reaproximando os processos hidrológicos do ciclo hidrológico original.

Palavras-chave: Infiltração. Parques urbanos. Método Beerkan. Hydrus.

## ABSTRACT

Urbanization causes serious environmental changes by replacing the natural landscape with impermeable surfaces and drainage channels. In the hydrological cycle, the infiltration rate is reduced, and the volume of superficial flow is increased, resulting in more problems related to water in urban areas like floods. Therefore, the development of structural interventions and strategies in water resources management is essential to reduce the associated risks to critical events such as floods. Green infrastructures are interventions that improve the nature's capacity of collecting, regulating, filtering and delivering water in a safe way to users, through the protection, and/or optimization of the water ecosystem. Urban parks can directly reduce the risk of floods, provided that they include the implementation of green infrastructures. For example, permeable coverages reduce superficial flow. To prove this benefit, it is necessary to analyze the infiltration process in these kinds of coverages. The main goal of this research is to advocate the importance of proposals regarding green infrastructure in the city of Recife for the water resources management. We aim to achieve this goal through a detailed study and a critical comparison of infiltration capacity among different surfaces. Infiltration tests were done in three different surfaces of urban parks from the city of Recife, and a pilot project of permeable pavement, together with a granulometric analysis of the soil. The Beerkan methodology was used to estimate the hydraulic properties of the soil of each surface. To simulate the hydrologic processes in each coverage we used the Hydrus 1D models. We assumed a rainfall with constant intensity associated with a return time of 10 years. The results show that for the same volume of water, there is a reduction in the surface flow for surfaces with a higher degree of permeability. Therefore, we prove that green infrastructures are sustainable strategies for water resources management since they reduce the effects of urbanization on the original hydrologic cycle.

Keywords: Infiltration. Urban parks. Beerkan method. Hydrus.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1-	Classes texturais do solo adotada pela Sociedade Brasileira de Ciência do Solo...	16
Figura 2-	Efeito da urbanização nos processos hidrológicos .....	22
Figura 3-	Esquema de um jardim de chuva .....	25
Figura 4-	Exemplo de um jardim de chuva .....	26
Figura 5-	Jardim de chuva em um estacionamento .....	26
Figura 6-	Alagado natural, manguezal na Indonésia .....	27
Figura 7-	Alagado construído com fluxo superficial.....	27
Figura 8-	Representação em profundidade de alagado construído.....	28
Figura 9-	Esquema de uma biovaleta .....	29
Figura 10-	Exemplo de biovaleta em um estacionamento.....	29
Figura 11-	Exemplo de aplicação de canteiro pluvial de passagem de água.....	30
Figura 12-	Exemplo de aplicação de canteiro pluvial de armazenamento e absorção de água .....	30
Figura 13-	Perspectiva preliminar do Projeto Parque Capibaribe .....	31
Figura 14-	Bacia de Detenção em Porto Alegre (RS) .....	32
Figura 15-	Bacia de retenção em Porto Alegre, RS.....	33
Figura 16-	Telhado verde em Chicago (US) .....	34
Figura 17-	Localização das áreas de estudo na cidade do Recife.....	37
Figura 18-	Precipitação Média Mensal LAMEPE/ITEP - 2007-2012 .....	38
Figura 19-	Superfícies em que foram realizados os ensaio de infiltração no Parque Treze de Maio e no sítio experimental no CTG/UFPE .....	40
Figura 20-	Etapas dos ensaios de granulometria .....	41
Figura 21-	Aplicação do método Beerkan.....	42
Figura 22-	Retirada de amostra indeformada usando o coletor de Uhland .....	43

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO.....</b>	<b>12</b>
1.1	PROBLEMÁTICA E JUSTIFICATIVA.....	12
1.2	OBJETIVOS.....	14
<b>1.2.1</b>	<b>Objetivo Geral.....</b>	<b>14</b>
<b>1.2.2</b>	<b>Objetivos Específicos.....</b>	<b>14</b>
<b>2</b>	<b>FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....</b>	<b>15</b>
2.1	SOLO.....	15
<b>2.1.1</b>	<b>Características Físicas.....</b>	<b>16</b>
<b>2.1.2</b>	<b>Processo de Infiltração da Água no Solo.....</b>	<b>17</b>
2.1.2.1	Processo de Infiltração em Solo Saturado.....	18
2.1.2.2	Equação de Richards.....	19
<b>2.1.3</b>	<b>Propriedades Hidrodinâmicas do Solo.....</b>	<b>19</b>
2.2	URBANIZAÇÃO E DRENAGEM URBANA.....	20
2.3	INFRAESTRUTURA VERDE E SUSTENTABILIDADE.....	22
<b>2.3.1</b>	<b>Jardins de Chuva.....</b>	<b>25</b>
<b>2.3.2</b>	<b>Alagados Construídos.....</b>	<b>26</b>
<b>2.3.3</b>	<b>Biovaletas.....</b>	<b>28</b>
<b>2.3.4</b>	<b>Canteiro Pluvial.....</b>	<b>29</b>
<b>2.3.5</b>	<b>Espaços Verdes Permeáveis.....</b>	<b>30</b>
<b>2.3.6</b>	<b>Bacia de Detenção.....</b>	<b>31</b>
<b>2.3.7</b>	<b>Bacia de Retenção.....</b>	<b>32</b>
<b>2.3.8</b>	<b>Telhado Verde.....</b>	<b>33</b>
<b>2.3.9</b>	<b>Pavimento Poroso/Permeável.....</b>	<b>34</b>
2.4	RECIFE E PLANO DIRETOR DE DRENAGEM E MANEJO DE ÁGUAS PLUVIAIS.....	35
<b>3</b>	<b>MATERIAIS E MÉTODOS.....</b>	<b>37</b>
3.1	REGIÃO DE ESTUDO.....	37
3.2	MÉTODO BEERKAN.....	38
<b>3.2.1</b>	<b>Caracterização Experimental e Amostragens.....</b>	<b>39</b>
<b>3.2.2</b>	<b>Distribuição do Tamanho das Partículas.....</b>	<b>40</b>
<b>3.2.3</b>	<b>Ensaio de Infiltração.....</b>	<b>41</b>
<b>3.2.4</b>	<b>Determinação da Umidade Inicial e Final.....</b>	<b>42</b>

<b>3.2.5</b>	<b>Determinação da Massa Específica do Solo e das Partículas .....</b>	<b>42</b>
<b>3.2.6</b>	<b>Estimativa das Propriedades Hidrodinâmicas do Solo .....</b>	<b>43</b>
3.2.6.1	Determinação dos parâmetros de forma (m, n e $\eta$ ).....	43
3.2.6.2	Determinação dos parâmetros de normalização ( $\theta_s$ , $K_s$ e $h_g$ ).....	44
3.3	Modelagem Numérica .....	47
<b>3.3.1</b>	<b>Hipóteses e considerações adotadas utilizando o HYDRUS 1-D .....</b>	<b>48</b>
<b>4</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÃO.....</b>	<b>49</b>
<b>5</b>	<b>CONCLUSÃO.....</b>	<b>65</b>
	<b>REFERÊNCIAS.....</b>	<b>66</b>

## 1 INTRODUÇÃO

Nesta seção será apresentada a importância e a motivação da pesquisa desenvolvida a partir da problemática analisada e a partir dessa discussão serão definidos os objetivos do trabalho.

### 1.1 PROBLEMÁTICA E JUSTIFICATIVA

A urbanização, apesar de representar um processo de desenvolvimento, implica em um conjunto de desafios, incluindo o desenvolvimento das infraestruturas de abastecimento de água, esgotamento sanitário, drenagem urbana (águas pluviais) e resíduos sólidos na mesma proporção de crescimento dos centros urbanos. No Brasil, de acordo com o levantado pelo IBGE (2010), o percentual da população residente em área urbana aumentou de 45,1% em 1960 para 84,4% em 2010 e em números inteiros de 32.004.817 para 160.925.792. Dado que não houve crescimento planejado, a atual infraestrutura de muitas cidades brasileiras não suporta essa elevada taxa populacional, levando a ocorrência de inúmeros problemas.

No que se refere aos recursos hídricos, a infraestrutura de drenagem insuficiente associada a eventos de precipitações extremas e ao aumento de superfícies impermeáveis podem conduzir a eventos hidrológicos extremos como inundações (LI et al., 2018). A presença majoritária de superfícies impermeáveis, como o asfalto e o concreto, reduz a taxa de infiltração da água precipitada e incrementa o escoamento superficial, sobrecarregando o sistema de drenagem e aumentando o volume e a velocidade do escoamento superficial e, portanto, implicando em mudanças significativas no ciclo hidrológico que comprometem a segurança da população. Assim, é essencial o desenvolvimento de intervenções estruturais e estratégicas na gestão de recursos hídricos que garantam a oferta de água e reduzam os riscos associados aos eventos críticos.

Medeiros e Afonso (2017) demonstram que para auxiliar os sistemas de águas urbanas de forma sustentável, surge a infraestrutura verde (IV). Essas infraestruturas propiciam a integração da natureza na cidade, mitigando os impactos ambientais advindos da urbanização, e também a adaptação para enfrentar os problemas causados pelas alterações climáticas, tais como chuvas mais intensas e frequentes, aumento das temperaturas, desertificação e perda de biodiversidade (HERZOG e ROSA, 2010a).

De acordo com Carasek et al. (2017) parques urbanos se destacam entre os sistemas de IV pela elevada presença de cobertura vegetal e superfícies permeáveis. Inseridos nos planos urbanísticos, os parques passaram a ter função não só de lazer, mas também de funcionalidade

hidrológica do ambiente urbano (ANGULURI e NARAYANAN, 2017). Superfícies vegetadas em ambientes urbanos reduzem o escoamento superficial, propiciando a infiltração da água no solo (BERLAND et al., 2017).

Uma outra infraestrutura projetada para permitir a infiltração da água são os pavimentos permeáveis (PP), que conduzem parte do escoamento de águas pluviais para um reservatório de elevada porosidade e permeabilidade (ZHU et al., 2019). Pavimentos permeáveis são técnicas compensatórias de drenagem cada vez mais utilizadas em calçadas e estacionamentos (ZHU et al., 2019; SAADEH et al., 2019). Os benefícios hidrológicos do PP incluem a redução do volume de escoamento, redução da vazão de pico, atraso no tempo de pico e aumento da recarga das águas subterrâneas (TÖRZS et al., 2019).

Dada a importância dessas infraestruturas, na busca pelo reequilíbrio do ciclo hidrológico, muitas cidades vêm adotando as mesmas, como é o caso da cidade do Recife, no Estado de Pernambuco. Em 2013, a Prefeitura em convênio com o INCITI – Pesquisa e Inovação para as Cidades, grupo de pesquisa da Universidade Federal de Pernambuco, lançou o Projeto Parque Capibaribe. Conforme Secretaria do Meio Ambiente da Prefeitura do Recife (2018), o principal objetivo do projeto é transformar a cidade em uma cidade-parque, visando elevar a taxa de área verde pública, que hoje é de 1,2 m<sup>2</sup> por habitante, para 20 m<sup>2</sup> por habitante em 2037.

Ao adotar várias tipologias de infraestrutura verde, o projeto possivelmente atenuará os efeitos negativos da urbanização sobre ciclo hidrológico e sobre as características naturais de drenagem. A comprovação desse impacto positivo, portanto, é essencial para evidenciar os projetos de infraestruturas verdes como estratégias de gestão de recursos hídricos.

Assim, a pesquisa foi desenvolvida com base nessa proposta de infraestrutura verde a ser implantada na cidade do Recife pelo Projeto Parque Capibaribe. Dado que o Projeto prevê um sistema de parques integrados ao longo de 15 km em cada margem do rio Capibaribe com implantação de grandes áreas de superfícies permeáveis (PREFEITURA DA CIDADE DO RECIFE, 2013), será analisada a infiltração em diferentes superfícies no Parque Treze de Maio, um outro parque urbano já existente na mesma cidade, e em projeto piloto de pavimento permeável no Centro de Tecnologia e Geociências (CTG), na Universidade Federal de Pernambuco (UFPE), para comparar a infiltração em diferentes superfícies e, então, verificar o benefício que superfícies com maior permeabilidade apresentam em áreas urbanas.

## 1.2 OBJETIVOS

Ao desenvolver o estudo proposto por esse trabalho sob determinadas premissas, foram delimitados os objetivos gerais e específicos apresentados a seguir.

### 1.2.1 Objetivo Geral

Analisar a importância de proposta de infraestrutura verde na cidade do Recife para a gestão de recursos hídricos através do estudo e da comparação da capacidade de infiltração em diferentes superfícies.

### 1.2.2 Objetivos Específicos

- a) Caracterizar as infraestruturas verdes como estratégias de minimização de impactos na drenagem urbana pela aproximação ao ciclo hidrológico natural;
- b) Comparar a capacidade de infiltração em diferentes superfícies de parque urbano e em projeto piloto de pavimento permeável na cidade do Recife a partir de ensaios de infiltração;
- c) Simular a infiltração e o escoamento em 03 superfícies de parque urbano e em uma superfície de projeto piloto de pavimento permeável.

## 2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Neste capítulo serão desenvolvidos os principais tópicos relacionados a temática da pesquisa.

### 2.1 SOLO

O estudo da infiltração da água em diferentes superfícies implica analisar a participação do solo no processo, bem como a interferência de suas diversas características. Assim, necessita-se entender o conceito de solo.

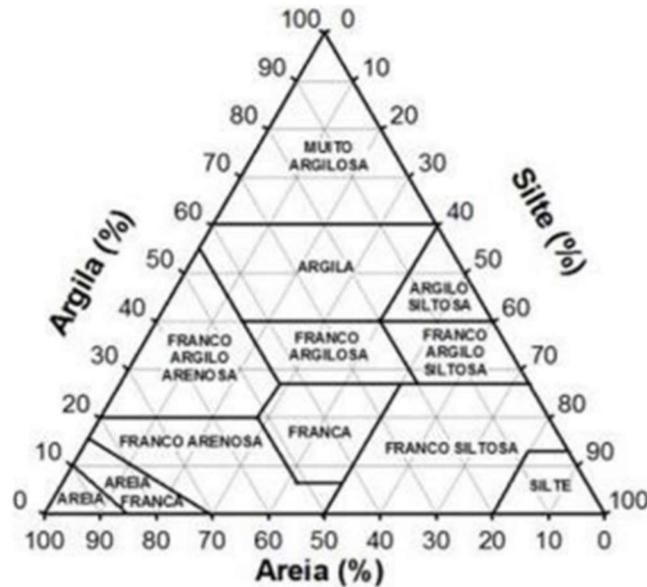
Conforme NBR 6502 (ABNT/1995), solo é definido como o material proveniente da decomposição das rochas pela ação de agentes físicos ou químicos, podendo ou não ter matéria orgânica. As modificações de natureza física geram a desagregação das rochas, as de natureza química a decomposição. O conjunto desses processos é denominado intemperismo e depende de vários fatores, como clima, relevo, fauna, flora, tipo de rocha e tempo de exposição, sendo responsável por moldar as características físicas, químicas e mineralógicas do solo. A partir dele são constituídos agregados de tamanhos diversos separados por vazios, chamados de poros e ocupados por água ou ar.

O solo pode ser definido, então, como um sistema trifásico integrado pelas fases sólida, líquida e gasosa (PREVEDELLO, 1996). Apenas parte do volume total é ocupado por partículas sólidas, que se acomodam formando a estrutura. O volume restante representa o volume de vazios.

As partículas constituintes da fase sólida de natureza inorgânica ou mineral são diferenciadas por classes de tamanho, também chamadas de frações granulométricas, e definidas a seguir (EMBRAPA, 2013): areia grossa (0,2 a 2 mm), areia (0,05 a 2 mm), silte (0,02 a 0,05 mm), argila (menor do que 0,02 mm). Cada classe de tamanho pode conter partículas de mesma classe mineral e um solo raramente contém apenas uma fração granulométrica. A proporção relativa das classes de tamanho das partículas em um determinado solo define a classe textural do mesmo, propriedade que influencia na capacidade de retenção de água, no movimento e na disponibilidade de água do solo. (RIBEIRO et al., 2012).

Para estabelecer a classe textural de um solo específico a Sociedade Brasileira de Ciência do Solo utiliza a classificação da Departamento de Agricultura dos Estados Unidos (USDA, 2003), delineada no triângulo textural apresentado na Figura 01.

Figura 1 - Classes texturais do solo adotada pela Sociedade Brasileira de Ciência do Solo



Fonte: Cavalcanti, 2012.

Além da textura é possível analisar a estrutura do solo, definida como o arranjo estabelecido pela ligação das partículas primárias do solo entre si por substâncias diversas encontradas no solo, como matéria orgânica. É a estrutura do solo que dá origem aos agregados, unidades estruturais separadas entre si por superfícies de fraqueza e que têm grande influência no armazenamento de água (EMBRAPA, 2013).

Assim, a estrutura do solo, juntamente com a sua textura, com o tipo e a quantidade de argila e com o teor de matéria orgânica que ele contém, são os fatores que influenciam a disponibilidade de água no solo (KLEIN e LIBARDI, 2000). Supõe-se, então, que também são atributos que diferenciarão o processo de infiltração em cada tipo de superfície.

### 2.1.1 Características Físicas

Adicionalmente à textura e estrutura, o solo também pode ser classificado com relação às relações entre as massas e os volumes das três fases que o compõem determinando as características físicas do mesmo. Essas podem ser dadas por:

- a) Massa Específica do Solo ( $\rho_d$ ): é definida como a razão entre a massa de partículas sólidas ( $M_s$ ) e o volume total da amostra do solo ( $V_t$ ), sendo representada pela Equação 1.

$$\rho_d = \frac{M_s}{V_t} \quad (1)$$

- b) Massa Específica das Partículas do Solo ( $\rho_s$ ): é definida como a razão entre a massa de partículas sólidas ( $M_s$ ) e o volume das partículas ou dos sólidos ( $V_s$ ), sendo representada pela Equação 2.

$$\rho_s = \frac{M_s}{V_s} \quad (2)$$

- c) Porosidade ( $\eta$ ): é definida como a razão entre o volume de poros (volume de ar mais volume de água), dito volume de vazio ( $V_v$ ), e o volume total da amostra ( $V_t$ ), o que poder ser visualizado na Equação 3.

$$\eta = \frac{V_v}{V_t} \quad (3)$$

- d) Umidade Gravimétrica ( $W$ ): é definida como a razão entre a massa de água e a massa de partículas sólidas, conforme demonstrado na Equação 4.

$$W = \frac{M_L}{M_s} \quad (4)$$

- e) Umidade Volumétrica ( $\theta$ ): representa o volume de água no solo e é definida como a razão entre o volume de água e a volume total de uma amostra de solo, conforme demonstrado na Equação 5.

$$\theta = \frac{V_L}{V_t} \quad (5)$$

- f) Grau de Saturação ( $S$ ): representa a relação entre o volume de água e o volume de poros, descrita na Equação 6.

$$S = \frac{V_L}{V_v} \quad (6)$$

### 2.1.2 Processo de Infiltração da Água no Solo

As características físicas, químicas e mineralógicas do solo conjuntamente são determinantes da permeabilidade do mesmo que, por sua vez, influi diretamente na capacidade de infiltração: quanto mais permeável for o solo, maior será a quantidade de água que ele pode absorver. Para entender relação, precisa-se compreender o processo de infiltração da água no solo e as suas causas.

No ciclo hidrológico, a infiltração representa a entrada de água no solo através de sua superfície e depende do umedecimento do perfil. Nesse processo a velocidade da entrada de água decrescerá com o tempo, a medida que o solo for armazenando água, e assumirá um valor constante denominado de velocidade de infiltração básica. (POTT e MARIA, 2003).

Esse movimento da água no solo ocorre pela influência dos potenciais gravitacional, matricial, osmótico e de pressão, que atuam na fase líquida do solo e representam os trabalhos realizados quando um volume ou massa infinitesimal de água em um estado padrão é levado reversivelmente para o mesmo estado respectivo do solo. A soma dos potenciais fornece o potencial total de água do solo, expresso em unidade de energia por massa (J/Kg), energia por volume (J/m<sup>3</sup>) ou energia por unidade de peso (J/N) (COUTINHO, 2011).

Assim, a partir da adição da água a um solo seco, ela desloca gradualmente o ar nos espaços porosos e quando todos os poros, grandes e pequenos, são preenchidos, o solo é dito estar saturado ou em sua capacidade máxima de infiltração (LIBARDI, 2012). A taxa de infiltração de água no solo é elevada no início do processo e decresce exponencialmente com o tempo, aproximando-se de um mínimo e tornando-se constante quando o solo se encontra saturado (ALVES SOBRINHO et al. 2013).

Como destaca Lima e Silans (1999), a estimativa da taxa de infiltração no solo é condicionante para determinar a repartição da precipitação em infiltração e escoamento superficial. O conhecimento do processo de infiltração e sua relação com as características do solo, portanto, são essenciais para análise da drenagem de uma bacia.

A caracterização das variáveis que interferem na infiltração, bem como a definição da intensidade com que afetam, apresenta grande complexidade e por isso foram desenvolvidos diversos modelos empíricos e físicos, que simplificam o estudo da infiltração da água no solo.

#### 2.1.2.1 Processo de Infiltração em Solo Saturado

O Engenheiro hidráulico Henry Darcy, em 1856, após uma série de experimentos em colunas de areia, na vertical, sob condições saturadas, chegou à Equação 7, denominada como a lei de Darcy (MONTEIRO, 2007).

$$q = -K_s \frac{\Delta H}{\Delta z} \quad (7)$$

Em que  $q$  é a densidade de fluxo [L T<sup>-1</sup>];  $K_s$  é a condutividade hidráulica do solo saturada [L T<sup>-1</sup>]; e  $\Delta H/\Delta z$  é o gradiente de potencial total da solução na direção vertical  $z$ .

### 2.1.2.2 Equação de Richards

Richards (1931) combinou a equação da continuidade com a equação de Darcy-Buckingham, obtendo a equação diferencial que governa o movimento de água em solos não saturados, também conhecida como equação de Richards (ALVES, 2009), podendo ser escrita, para um fluxo vertical  $z$ , como demonstra a Equação 8.

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left[ K(\theta) \frac{\partial h}{\partial z} \right] \quad (8)$$

Sendo  $\partial \theta / \partial t$  a variação da quantidade de água com o tempo.

Assim, para solucionar a equação geral do fluxo em meios porosos não saturados, aplicada a um problema específico, precisam ser conhecidas às relações entre umidade do solo e potencial matricial da água no solo  $\theta(h)$ , e entre condutividade hidráulica e potencial matricial ou a umidade volumétrica,  $K(h)$  ou  $K(\theta)$  (COUTINHO, 2011).

### 2.1.3 Propriedades Hidrodinâmicas do Solo

A relação fundamental entre a umidade do solo ( $\theta$ ) e o potencial mátrico ( $h$ ) é chamada de curva de retenção de água no solo e a relação entre a condutividade hidráulica em condições não saturadas e a umidade volumétrica é denominada curva de condutividade, sendo as duas variáveis, umidade volumétrica e potencial matricial, dependentes da textura, da estrutura das partículas do solo, da conectividade e do tamanho dos poros.

A curva de retenção de água no solo que determina a quantidade de água que um solo consegue armazenar a um certo potencial matricial. Graficamente a curva de retenção de água no solo representa a relação entre teor de água  $\theta$  e o potencial matricial (em escala logarítmica), com decréscimo lento e contínuo dessas variáveis durante a drenagem do solo, o qual é dependente das características intrínsecas de cada solo, restando da ação conjunta dos atributos como textura, estrutura, mineralogia e matéria orgânica (BEUTLER et al., 2002; MACHADO et al., 2008; SILVA et al., 2010).

É a textura do solo, principalmente o teor de argila, que define em boa parte a distribuição do diâmetro dos poros do solo e determina, assim, a área de contato entre as partículas sólidas e a água, sendo por isso responsável pela força de retenção da água, principalmente em baixos potenciais (REICHARDT, 1987).

Já a condutividade hidráulica representa a facilidade com o que o solo conduz água e varia água em função da umidade do solo, atingindo seu valor máximo na saturação, chamado de condutividade hidráulica de saturação ( $K_s$ ) e que, de acordo com Coutinho (2011) é uma

constante dependente da permeabilidade intrínseca do solo, propriedade relacionada a sua geometria porosa, e da viscosidade do fluido que escoar, propriedade relacionada à temperatura.

Alterações na superfície natural de uma bacia, portanto, ao modificar a textura e estrutura do solo da região, alteram sua capacidade de retenção e de condução na água e assim o processo de infiltração desse recurso no solo. Assim, a ocupação e substituição do solo natural pelo homem representa também alteração na capacidade de infiltração do solo, o que deve ser levado em consideração na escolha das formas dessa ocupação, para que as alterações causadas no ciclo hidrológico representem menores riscos para o centro urbano que se forma.

## 2.2 URBANIZAÇÃO E DRENAGEM URBANA

Segundo o IBGE (2010), a taxa de urbanização do Brasil, definida como percentagem da população da área urbana com relação a população total do país, era cerca de 30% em 1940 e aumentou para 85% em 2010. Devido a esse desenvolvimento urbano das últimas décadas e a concentração de grande parte da população predominantemente em pequenos espaços, sem planejamento prévio, os ecossistemas terrestres e aquáticos estão sendo seriamente impactados, assim como a própria população devido aos problemas advindos da falta de controle do espaço urbano.

Com diferença de grau e intensidade, todas as cidades brasileiras exibem problemáticas parecidas. O seu tamanho, tipo de atividade, região em que se inserem, entre outros, são elementos de diferenciação, mas em todas elas problemas como os de emprego, habitação dos transportes, do lazer, da água, dos esgotos, da educação e saúde são genéricos e revelam enormes carências (SANTOS, 1993).

Silva e Romero (2010) explicam que como a expansão urbana se dá sob um modelo de ocupação dispersa, em que a cidade se lança sobre a paisagem natural, se apropriando e eliminando recursos naturais, geram problemas ambientais. Um desses é a impermeabilização do solo decorrente da pavimentação excessiva.

A expansão urbana, portanto, impacta diretamente sobre o ciclo hidrológico, dado que o processo de urbanização interfere no regime de escoamento das águas pluviais devido à impermeabilização do solo e a canalização da drenagem (CAMPANA e TUCCI, 1994). Somado a estes dois fatores, devemos considerar que os projetos de drenagem no Brasil ainda são tratados sob o conceito de escoar as águas o mais rapidamente possível, referentes a fase higienista, conforme podemos observar na Tabela 01, na qual são apresentadas as fases da gestão de água urbanas (TUCCI, 2008).

Tabela 1 - Fases da Gestão de Águas Urbanas

Fase	Características	Conseqüências
Pré-higienista: até início do século XX	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.
Higienista: antes de 1970	Transporte de esgoto distante das pessoas e canalização do escoamento.	Redução das doenças, mas rios contaminados, impactos nas fontes de água e inundações.
Corretiva: entre 1970 e 1990	Tratamento de esgoto doméstico e industrial, amortecimento do escoamento.	Recuperação dos rios, restando poluição difusa, obras hidráulicas e impacto ambiental.
Desenvolvimento sustentável: depois de 1990	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, 2008.

Ainda analisando a Tabela 1, verifica-se que apesar da implantação da sustentabilidade iniciar-se depois de 1990, o Brasil ainda precisa incrementar bastante suas ferramentas de gestão de águas urbanas, visto que é conhecido que muitos centros urbanos ainda lidam frequentemente com dificuldade no escoamento pluvial em eventos de chuva intensa que acabam gerando inundações.

Como mostra Fontes (2003), a ocorrência de inundações urbanas é consequência direta do aumento do escoamento superficial e da diminuição da infiltração devido às profundas modificações no uso do solo geradas pelo processo de urbanização e que alteram permanentemente as respostas hidrológicas das áreas urbanizadas.

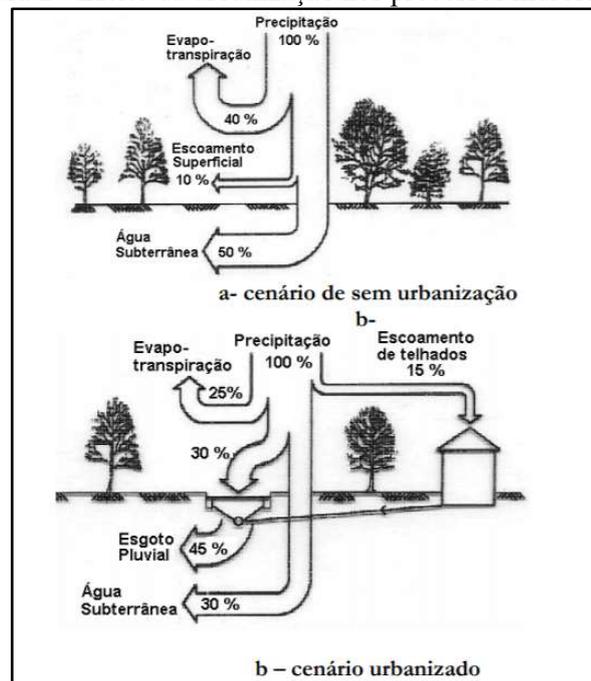
O volume que escoava lentamente pela superfície do solo e ficava retido pelas plantas, pelos efeitos da urbanização, passa a escoar através de superfícies impermeáveis, condutos e canais, exigindo maior capacidade de escoamento e aumento das seções e declividade do conduto ou canal. As vazões máximas também aumentam, antecipando seus picos no tempo, e a vazão máxima média de inundação, por sua vez, pode aumentar de seis a sete vezes (TUCCI, 2005).

Na Figura 2 apresenta-se comparação do processo hidrológico entre um cenário sem urbanização e outro com urbanização. Pode-se observar que após um evento de precipitação apenas 30% do volume de água infiltra no subsolo no cenário com urbanização, enquanto que em um cenário natural, até 50% da água precipitada infiltra. Além disso, também no cenário

com urbanização a evapotranspiração é reduzida, apenas 25% da água precipitada, quando no cenário sem urbanização tem-se cerca de 40% do volume precipitado sofrendo evapotranspiração.

Assim, um centro urbano deve estar com o sistema de drenagem pluvial preparado para drenar esse volume de água que não infiltra e nem é evapotranspirado, equivalente a cerca de 45% do volume precipitado. A falta de infraestruturas adequadas para drenar esse volume ou reduzi-lo, através do aumento da capacidade de infiltração e/ou evapotranspiração da região, gera um volume grande de escoamento superficial, provocando as enchentes ou cheias.

Figura 2 - Efeito da urbanização nos processos hidrológicos



Fonte: Tucci, 2005.

a) cenário sem urbanização e b) cenário urbanizado

Por conseguinte, em razão da alteração do ciclo hidrológico aliada à falta de infraestrutura adequada e de um efetivo ordenamento de solo urbano, várias cidades brasileiras têm enfrentado o dilema das inundações e enchentes urbanas, que vêm colocando em xeque os atuais modelos de políticas urbanas de uso e ocupação do solo, principalmente as habitacionais e ambientais (BENINI, 2015).

### 2.3 INFRAESTRUTURA VERDE E SUSTENTABILIDADE

Conforme analisado por Souza (2013), em vários aspectos da infraestrutura urbana brasileira, tem-se clareza de que há necessidade de mudança de paradigma: substituir a gestão da oferta (estágio atual da abordagem – solução tradicional) pela gestão da demanda (visando

à sustentabilidade do sistema – abordagem alternativa ou compensatória). Na drenagem urbana e manejo de águas pluviais, a gestão da oferta tem como solução a ampliação dos condutos e aumento da eficiência hidráulica, com vistas a acelerar o escoamento, já a gestão da demanda significa a compensação dos efeitos da urbanização sobre o ciclo hidrológico e com isso redução problemas gerados. Uma ferramenta da gestão da demanda seriam as infraestruturas verdes.

O Guia de Infraestrutura Verde (PNUD, 2014) define infraestrutura verde como uma rede estrategicamente planejada de zonas naturais e seminaturais de alta qualidade, com outros elementos ambientais, desenhada e gerida para proporcionar uma ampla gama de serviços ecossistêmicos e proteger a biodiversidade tanto dentro de assentamentos rurais quanto urbanos. Ainda, põe ênfase no objetivo da infraestrutura verde ser o de melhorar a capacidade da natureza em gerar bens e serviços ecossistêmicos múltiplos e valiosos, de maneira sustentável (UNEP, 2014).

No âmbito da água, a infraestrutura verde se refere à proteção dos ecossistemas naturais ou seminaturais que fornecem serviços de água que complementam, aumentam ou substituem aqueles que são providos por obras de infraestrutura cinza (ECHAVARIA et al, 2015). Infraestrutura cinza, por sua vez, refere-se aos primeiros elementos construtivos que resolvem os principais problemas dos centros urbanos, como as estradas para a frota de veículos, as redes de drenagem para escoamento das águas das chuvas, pavimentação, entre outros, e que acarretam no distanciamento do ciclo hidrológico natural. Assim, as infraestruturas verdes irão atuar em conjunto com as cinzas reaproximando e reintegrando o centro urbano à natureza ao propiciar a melhora da capacidade de captação, regulação, filtragem e/ou entrega da água de maneira segura a seus usuários, através da proteção e/ou otimização do ecossistema hídrico.

Como afirma Herzog (2010b), a infraestrutura verde é composta por redes multifuncionais de fragmentos permeáveis e vegetados, preferencialmente arborizados (inclui rios, canais, ruas e propriedades públicas e privadas) e interconectados, que reestruturam o mosaico da paisagem. Tipologias multifuncionais de infraestruturas verdes têm sido desenvolvidas de modo a manter ou restabelecer as dinâmicas naturais dos fluxos hídricos, dentre outros objetivos.

Deste modo, a adoção da infraestrutura verde em projetos de intervenções urbanas pode representar a quebra de paradigmas através da promoção da construção de cidades sustentáveis e inteligentes, que contribuem para a oferta de espaços multifuncionais que buscam a melhoria da qualidade de vida e ambiental para todos que vivem em cidades (BENINI, 2015).

No Quadro 1 são apresentados alguns exemplos de infraestrutura verde e os serviços ecossistêmicos que fornecem, bem como seu correspondente em infraestrutura cinza.

Quadro 1 - Exemplos de Infraestrutura Verde com os serviços ecossistêmicos que fornece e a Infraestrutura Cinza correspondente

INFRAESTRUTURA VERDE	SERVIÇO ECOSISTÊMICO		CORRESPONDENTE EM INFRAESTRUTURA CINZA	
Re/Florestamento e Conservação Florestal	Gestão da Oferta de Água (Incluindo Mitigação das Secas)		Barragens, Sistema de Bombeamento e Tratamento de Água Subterrânea e Sistemas de Distribuição de água	
<i>Wetlands</i>				
Captação de Água Pluvial				
Espaços Verdes				
Pavimentos Permeáveis	Gestão da Qualidade da Água		Sistema de Tratamento de Água	
Re/Florestamento e Conservação Florestal				
Recuperação Mata Ciliar				
<i>Wetlands</i>				
Espaços Verdes			Purificação da Água	
Pavimentos Permeáveis			Controle da Erosão	Proteção de Encostas e Revestimento e Taludes
Re/Florestamento e Conservação Florestal				
Recuperação Mata Ciliar			Controle Biológico	Sistema de Tratamento de Água
Re/Florestamento e Conservação Florestal				
Recuperação Mata Ciliar			Controle da Temperatura da Água	Barragens
<i>Wetlands</i>				
Re/Florestamento e Conservação Florestal				
Recuperação Mata Ciliar				
<i>Wetlands</i>	Gestão do Eventos Extremos (Inundações)		Barragens e Diques	
Re/Florestamento e Conservação Florestal				
Recuperação Mata Ciliar				
<i>Wetlands</i>				
Telhados Verdes			Controle das Inundações das Áreas Ribeirinhas	
Espaços Verdes			Escoamento das Águas Pluviais	Sistema de Drenagem Pluvial Urbano
Espaços Verdes				
Captação de Água Pluvial				
Pavimento Permeável				

Fonte: Adaptado de UNEP, 2014.

A partir do Quadro 1 verifica-se que as infraestruturas telhados verdes, espaços verdes, captação de água pluvial e pavimento permeável são as fornecedoras do serviço ecossistêmico escoamento das águas pluviais e, portanto, otimizadoras do sistema de drenagem pluvial urbano e importantes para a minimização do impacto de eventos extremos. Pode-se observar, ainda, que o pavimento permeável também fornece o serviço de purificação da água.

Assim, no que se refere ao manejo de águas pluviais, as funções exercidas pelas tipologias de infraestrutura verde podem ser: purificação (sedimentação, filtração e absorção biológica), detenção, retenção, condução e infiltração (SINGAPORE, 2011).

Herzog (2010a) elenca algumas tipologias de infraestrutura verde que podem interferir na drenagem, arborização e/ou pavimentação e promovem a filtração, detenção e retenção da água de chuvas no local e a promoção da permeabilidade do solo e consequente diminuição do escoamento superficial, tais quais: alagados construídos (*wetlands*), biovaletas, canteiro

pluvial, espaços verdes permeáveis, bacia de sedimentação, jardins de chuva, bacias de retenção, bacia de detenção, teto verde, pavimentos porosos, dentre outras.

### 2.3.1 Jardins de Chuva

Como define Cormier e Pelegrino (2008), os jardins de chuva são depressões topográficas, existentes ou impostas artificialmente para receberem o escoamento da água pluvial proveniente de telhados e demais áreas impermeabilizadas limítrofes. O solo é tratado com insumo para ter maior porosidade e permitir maior infiltração da água, esse composto orgânico acrescentado ao solo também contém microrganismos e bactérias que removem os poluentes difusos trazidos pelo escoamento superficial. As plantas, por sua vez, atuam aumentando a evapotranspiração e também removendo os poluentes. A Figura 3 traz as principais camadas de um jardim de chuva e as Figura 4 e 5 exemplos reais de jardim de chuva.

Em trabalho que analisou a implantação de projeto de jardim de chuva na cidade do Recife, Melo et al. (2014) mostram que as principais funções do sistema são retenção, filtração e infiltração e que é essencial haver um dimensionamento do sistema prevendo os eventos de precipitação de maiores magnitudes para que a função de retenção para qual o sistema é projetado, que inclui o retardo do escoamento superficial, suporte a lâmina gerada pela precipitação até que as águas conservadas sobre sua superfície se infiltrem ou evaporem.

Figura 3 - Esquema de um jardim de chuva



Fonte: Cormier; Pelegrino, 2008.

Figura 4 - Exemplo de um jardim de chuva



Fonte: Stormwater Management Manual, 2016.

Figura 5 - Jardim de chuva em um estacionamento



Fonte: UNEP, 2014.

### 2.3.2 Alagados Construídos

Baseados nos alagados naturais, tais como mangues, pântanos e várzeas, os alagados construídos são formados por uma extensa superfície vegetada coberta por água, normalmente com pouca profundidade (HERZOG e ROSA, 2010; SINGAPORE, 2011). Nas Figuras 6 e 7 pode-se verificar exemplos de um alagado natural e um alagado construído, respectivamente.

Figura 6 - Alagado natural, manguezal na Indonésia



Fonte: UNEP, 2014.

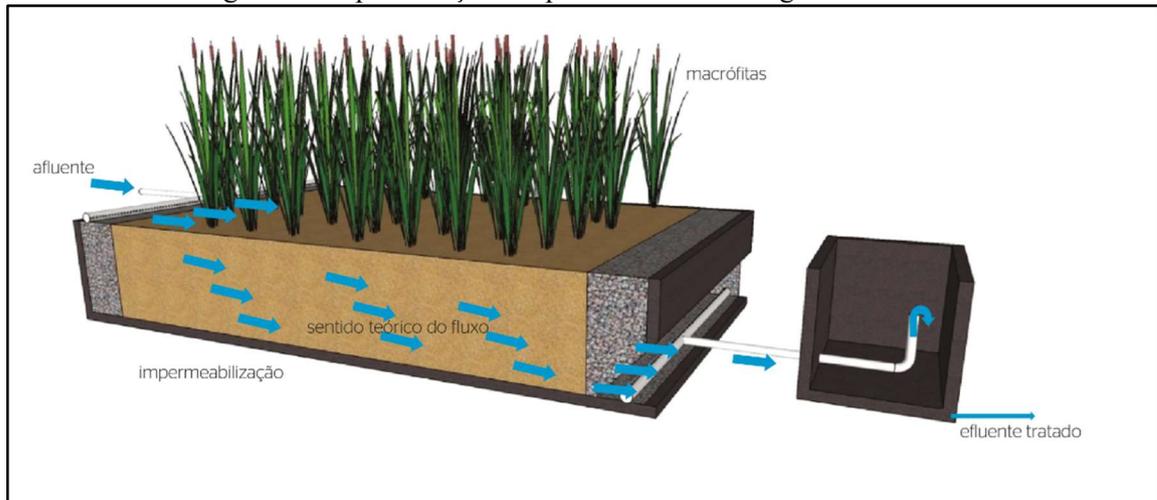
Figura 7 - Alagado construído com fluxo superficial



Fonte: Poças, 2015.

Conforme demonstra Salati (2001), essas infraestruturas podem ser utilizadas para pré-tratamento de águas pluviais, para tratamento secundário e terciário de esgoto urbano (águas residuárias) e para purificação de grandes volumes de água para enquadramento de rios na Classe 2, a partir de rios na classe 3 ou 4. Elas atuam recebendo a água e promovendo a retenção e a remoção de contaminantes. A Figura 8 demonstra como se dá o fluxo da água em um alagado construído.

Figura 8 - Representação em profundidade de alagado construído



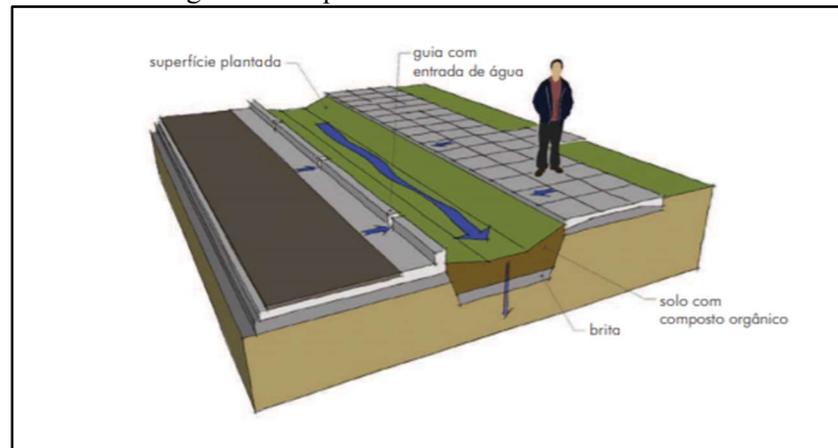
Fonte: Sezerino *et. al.*, 2015.

No Brasil o desenvolvimento dessas infraestruturas se intensificou a partir do ano 2000, com aplicações de sistemas de alagados construídos para o tratamento de diferentes águas residuárias, distribuídas ao longo de todo o território nacional, sob diferentes formas e arranjos, com diferentes materiais filtrantes e macrófitas empregadas (SEZERINO *et. al.*, 2015).

### 2.3.3 Biovaletas

As biovaletas, ou valetas de biorretenção, são compostas por depressões lineares preenchidas com vegetação, solo e demais elementos filtrantes, que processam uma limpeza da água da chuva enquanto aumentam seu tempo de escoamento, o qual é direcionado para jardins de chuva ou sistemas convencionais de retenção e ddetenção das águas (CORMIER e PELEGRINNO, 2008). A Figura 9 traz o esquema de uma biovaleta a partir de um corte transversal e a Figura 10 traz um exemplo de aplicação em um estacionamento.

Figura 9 - Esquema de uma biovaleta



Fonte: Cormier; Pelegrinno, 2008.

Figura 10 - Exemplo de biovaleta em um estacionamento.



Fonte: Cormier; Pelegrinno, 2008.

### 2.3.4 Canteiro Pluvial

Canteiros pluviais consistem em jardins de chuva compactados em pequenos espaços urbanos que além de sua capacidade de infiltração, podem incluir um extravasador. Há, ainda, exemplos sem a infiltração, porém que mantêm as capacidades de evaporação, evapotranspiração e transbordamento (CORMIER e PELEGRINNO, 2008; HERZOG, 2009). Nas Figuras 11 e 12 verificam-se respectivamente um exemplo de canteiro pluvial para passagem de água e outro de armazenamento e absorção de água.

Figura 11 - Exemplo de aplicação de canteiro pluvial de passagem de água



Fonte: Frischenbruder; Pellegrino, 2005.

Figura 12 - Exemplo de aplicação de canteiro pluvial de armazenamento e absorção de água



Fonte: Frischenbruder; Pellegrino, 2005.

### 2.3.5 Espaços Verdes Permeáveis

São os espaços livres que apresentam algum tipo de vegetação (espontânea ou plantada) e que, assim, contribuem em termos ambientais (fotossíntese, evapotranspiração, sombreamento, permeabilidade, conservação da biodiversidade e mitigação dos efeitos da poluição sonora e atmosférica), podendo ser utilizados também para atividades sociais, ecológicas, científicas ou culturais (BENINI, 2015).

Um exemplo de espaço verde permeável é o Projeto Parque Capibaribe, que está sendo implantado na cidade do Recife, prevê o desenvolvimento de grandes espaços verdes ao longo das margens do rio Capibaribe. A Figura 13 mostra a perspectiva preliminar do projeto.

Figura 13 - Perspectiva preliminar do Projeto Parque Capibaribe



Fonte: Secretaria de Planejamento e Gestão do Recife, 2015.

### 2.3.6 Bacia de Detenção

Também denominada de lagoa seca, consiste em uma depressão vegetada que durante as chuvas recebe as águas, contribuindo para a diminuição do escoamento superficial, retardando a entrada das águas no sistema de drenagem e possibilitando a infiltração com a recarga de aquíferos (HERZOG, 2009).

Assim, o objetivo principal dessas infraestruturas é manter armazenado um volume de água por um determinado tempo. Esse tempo que o volume de água precipitado permanece dentro da bacia de retenção dependerá das estruturas de saída da mesma (SILVA, 2009).

Uma bacia de retenção, então, não possui um nível permanente de água, como pode ser visualizado no exemplo da Figura 14.

Figura 14 - Bacia de Detenção em Porto Alegre (RS)



Fonte: Silva, 2009.

### 2.3.7 Bacia de Retenção

Consiste numa lagoa integrada ao sistema de drenagem da infraestrutura verde que recebe o escoamento superficial, isto é, uma lagoa cuja capacidade de água é superior ao volume de água permanente. Assim, acomoda o excesso de água das chuvas, alivia o sistema de águas pluviais e evita inundações ao mesmo tempo em que pode contribuir para a descontaminação de águas poluídas por fontes difusas (HERZOG, 2009).

Nas bacias retenção o tratamento da água se dá pela sedimentação e por processos biológicos, visto que elas possuem volumes permanentes acima do nível para controle de poluentes como sedimentos, lixo, metais, bactérias, óleos e graxas e substâncias orgânicas. Já suas capacidades de água máximas são usadas para controle de erosão de canais, que têm período de retorno típico de 2 anos, e para controle de alagamentos, com período de retorno variáveis (SILVA, 2009).

Ressalta-se que uma parte da água pluvial captada permanece retida entre os eventos de precipitação das chuvas, por isso também é chamada de lagoa pluvial. (CORMIER e PELEGRINNO, 2009). Na Figura 15 confirma-se esse volume de água que permanece retido.

Figura 15 - Bacia de retenção em Porto Alegre, RS



Fonte: Silva, 2009.

### 2.3.8 Telhado Verde

Consiste em cobertura vegetal que recobre os tetos, coleta e filtra a água substituindo a área natural de infiltração das águas alterada pela edificação. Assim, são estruturas que absorvem a água das chuvas, reduzem o efeito da ilha de calor urbano, contribuem para a eficiência energética das edificações, criam hábitat para vida silvestre e, de fato, estendem a vida da impermeabilização do telhado. (HERZOG, 2010c; CORMIER e PELEGRINNO, 2011).

A vegetação é plantada em cima do solo tratado com compostos orgânicos e areia. É espalhado sobre uma base composta por uma barreira contra raízes, um reservatório de drenagem e uma membrana à prova de água (CORMIER e PELEGRINNO, 2011). A Figura 16 apresenta uma aplicação dessa infraestrutura verde na cidade de Chicago, nos Estados Unidos.

Os fatores que mais influenciam o funcionamento dessa tipologia de infraestrutura verde são tanto os tipos de vegetação e solo utilizados, como a espessura dessas camadas, portanto, parâmetros construtivos da estrutura, tais como delimitação da área, limitação do substrato e vegetação, altura da camada de substrato, impermeabilização, entre outros, devem levar em consideração as condições climatológicas locais (SANTOS et al., 2013).

Figura 16 - Telhado verde em Chicago (US)



Fonte: UNEP, 2014.

### 2.3.9 Pavimento Poroso/Permeável

São pavimentos drenantes que reduzem a impermeabilidade das superfícies urbanas, visto que permitem a infiltração das águas pluviais. Assim, reduzem o escoamento superficial (*runoff*) e conseqüentemente as inundações. Podem ser usados em calçadas, vias, estacionamentos, pátios, quintais residenciais, parques e praças. Como exemplos de materiais pode-se citar: asfalto poroso, concreto permeável, blocos intertravados, brita e pedriscos (HERZOG, 2010c).

A estrutura de um pavimento permeável do tipo concreto permeável é formada por uma camada superficial com os blocos de concreto, preenchidos com solo se forem do tipo vazado, sobre uma camada de areia, abaixo uma camada de material drenante grosseiro, que funciona como reservatório, e por último o solo natural. A capacidade total de infiltração dessa infraestrutura, portanto, dependerá da capacidade dos elementos referentes a solo utilizados e ela deve ser suficiente para garantir o armazenamento e/ou infiltração subterrânea (COUTINHO et. al., 2016).

A infraestrutura do pavimento permeável incrementa tanto a evaporação, como a infiltração da água no solo e, por isso, reduz drasticamente o escoamento superficial, representando uma ferramenta promissora para a gestão dos recursos hídricos nos centros urbanos (COUTINHO et al.,2016).

## 2.4 RECIFE E PLANO DIRETOR DE DRENAGEM E MANEJO DE ÁGUAS PLUVIAIS

A cidade do Recife é um dos vários centros urbanos brasileiros que precisam lidar com problemas referentes à drenagem não satisfatória das águas pluviais. Almeida e Corrêa (2012) mostram que:

“o desenvolvimento do espaço urbano do Recife se deu à custa de consideráveis modificações ambientais das planícies e estuários, e seu complexo paisagístico composto por manguezais, restingas, deltas intralagunares e arrecifes, para dar lugar à segurança do estabelecimento urbano. O processo de urbanização recente possui características semelhantes ao que se passou com outras grandes metrópoles brasileiras. O incremento populacional vivenciado nas cidades a partir de meados do século XX promoveu uma série de mudanças estruturais na sociedade brasileira como um todo, incluindo a degradação socioambiental generalizada e o comprometimento das condições de sobrevivência dos habitantes das metrópoles.”

Portanto, além da alteração de superfícies importantes no equilíbrio do ciclo hidrológico da cidade, a ocupação ocorreu desordenadamente. Para ordenar essa ocupação do espaço urbano foram desenvolvidos posteriormente normativos. Assim, a ordenação do espaço urbano, atualmente, se faz por meio da aplicação eficaz das legislações federal, estadual e municipal. Dentre as leis, salienta-se: a Constituição Federal, que define a obrigatoriedade e competências do trato da questão urbana; o Estatuto da Cidade, que veio reforçar o planejamento e gestão deste espaço; e o Plano Diretor Urbano, que é um conjunto de procedimentos, regulamentações e leis que ordenam localmente os espaços urbanos no Brasil. Espécie do gênero Plano Diretor, conta-se ainda com o Plano de Drenagem Urbana, que deve ser planejado de forma integrada com os outros melhoramentos urbanos (rede de água, esgoto, iluminação pública, pavimentação, etc. (RIGHETTO *et al.*, 2009)

O Plano Diretor de Drenagem Urbana tem como meta buscar planejar a distribuição da água no tempo e no espaço, com base na tendência de ocupação urbana compatibilizando esse desenvolvimento e a infraestrutura para evitar prejuízos econômicos e ambientais. Para atender essa meta ele tem como um dos princípios a valorização dos mecanismos naturais de escoamento na bacia hidrográfica, preservando, quando possível, os canais naturais (TUCCI, 2002).

Conforme diagnóstico de macrodrenagem do Plano Diretor de Drenagem da cidade de 2017, a pluviosidade média do Recife é da ordem de 2.000 mm/ano. O Plano também demonstra que as características peculiares da cidade quanto à sua geomorfologia, aliadas a um processo de urbanização realizado às custas da ocupação do espaço natural das águas apontam para uma crescente dificuldade de escoamento das águas pluviais no território municipal. Esta

circunstância sobrecarrega as estruturas do sistema de drenagem e provoca, em muitos casos, inundações indesejáveis, às vezes permanentes, nas áreas mais baixas. Bairros situados em áreas baixas como Setúbal, Imbiribeira, Santo Amaro, Madalena e Mustardinha, além de todas as ocupações ribeirinhas, exemplificam o problema.

Confirma-se, a partir do diagnóstico do Plano de 2017, então, a urgência do planejamento e do desenvolvimento de infraestruturas que reduzam os riscos associados aos eventos extremos na cidade do Recife. O Plano Diretor da cidade de 2015, apesar de prever as medidas padrões higienistas de gestão das águas urbanas, como a canalização, já previa implementação de medidas sustentáveis, como o desenvolvimento do Projeto Parque Capibaribe.

O Projeto Parque Capibaribe é resultado de um convênio entre o INCITI – Pesquisa e Inovação para as Cidades, grupo transdisciplinar de pesquisa vinculado à Universidade Federal de Pernambuco (UFPE), e a Prefeitura da Cidade do Recife. Ele prevê um sistema de parques integrados no Recife, que se estenderá ao longo das duas margens do rio Capibaribe, totalizando 30 km de intervenções próximas ao curso d'água (INCITI, 2018). Ao propor o desenvolvimento de parques, o projeto consequentemente viabiliza a implantação de tipologias multifuncionais permeáveis e vegetadas que irão promover o restabelecimento da dinâmica natural do fluxo hídrico, otimizando a gestão de recursos hídricos na cidade.

### 3 MATERIAIS E MÉTODOS

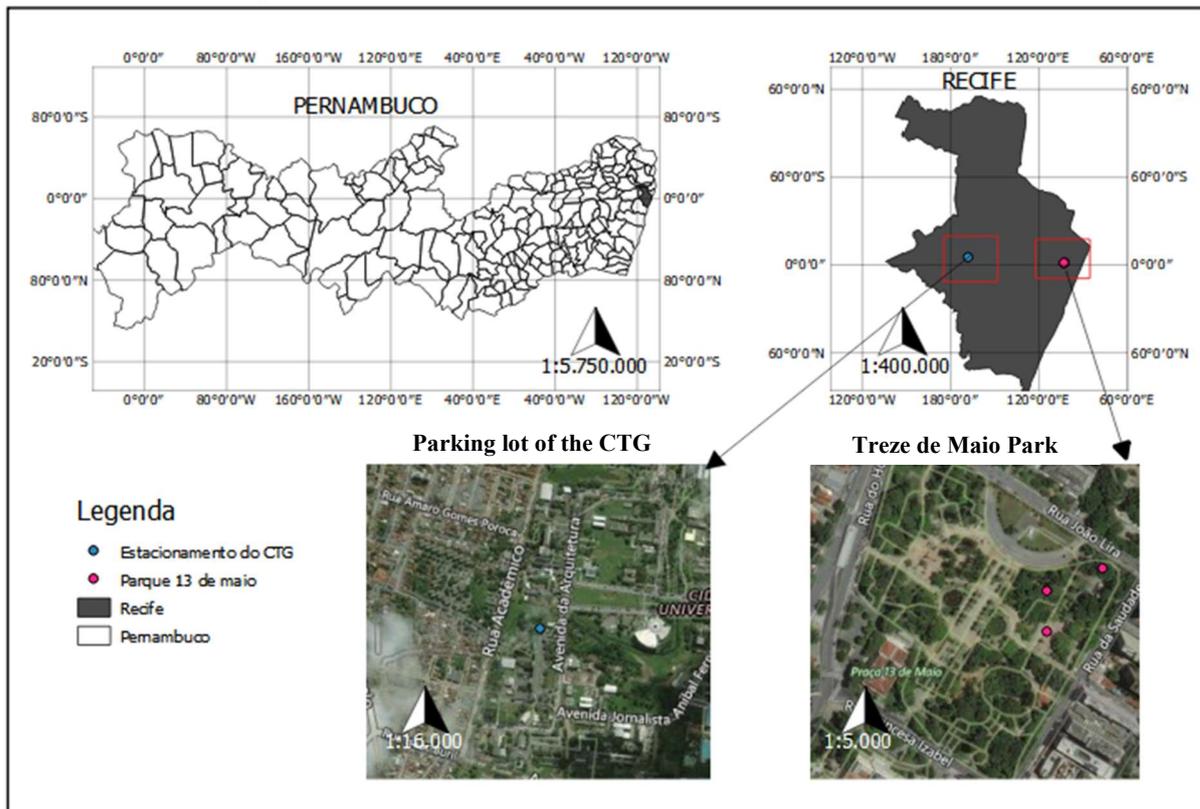
Para construir as análises propostas pelo trabalho foi desenvolvida a metodologia discutida no presente capítulo, nas regiões definidas a seguir.

#### 3.1 REGIÃO DE ESTUDO

O parque Treze de Maio e o Centro de Tecnologia e Geociências (CTG) da Universidade Federal de Pernambuco localizam-se na cidade do Recife, que encontra-se próxima ao paralelo  $8^{\circ}04'03''$  sul e ao meridiano  $34^{\circ}55'00''$  oeste e ocupa uma área de 218,435 quilômetros quadrados no estado de Pernambuco, conforme mostra a Figura 17.

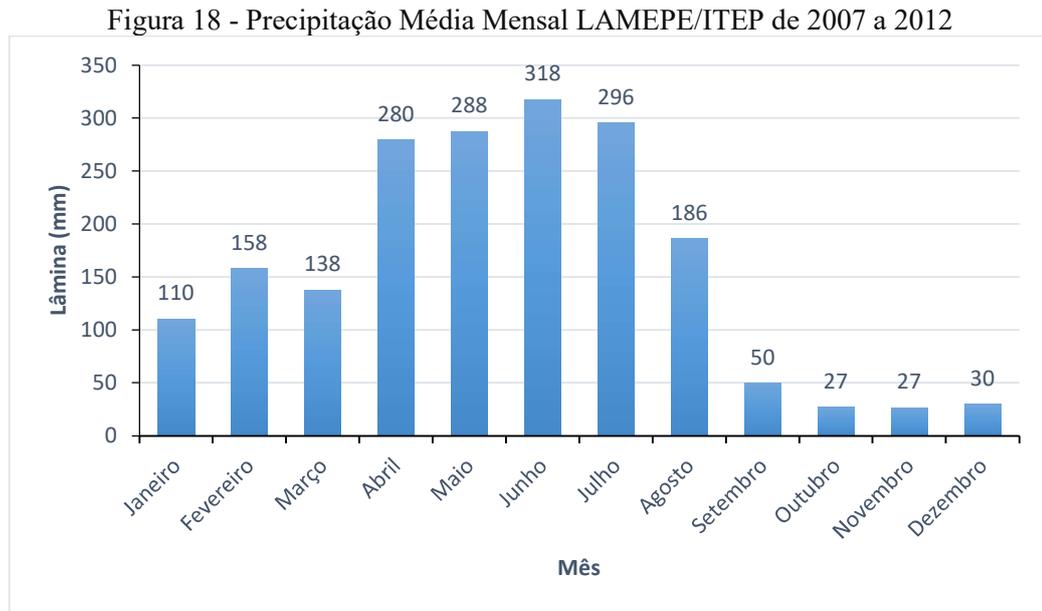
A cidade é caracterizada pelo clima Tropical Úmido, tipo As' a Ams' na classificação de Köppen, com temperaturas médias mensais sempre superiores a  $18^{\circ}\text{C}$ , elevada umidade relativa do ar, baixas amplitudes térmicas e precipitações abundantes ao longo do ano (IBGE, 2002; FIDEM, 2003). De acordo com os dados das Normais Climatológicas do Brasil (1981-2010), a temperatura média anual da cidade é de  $25,9^{\circ}\text{C}$ , com máxima de  $30,7^{\circ}\text{C}$  e mínima de  $20,9^{\circ}\text{C}$ , a umidade relativa do ar média anual é de 78,3%.

Figura 17 - Localização das áreas de estudo na cidade do Recife



Fonte: A Autora (2018).

Com relação ao regime pluviométrico, a partir de dados de precipitação obtidos no *site* da APAC, da estação no LAMEPE/ITEP, pode-se afirmar que no período de 2007 a 2012 a média de precipitação anual 2224,28 mm anuais, a máxima foi 3097,90 mm anuais e a mínima 1574,00 mm anuais. A precipitação média mensal referente ao período de janeiro de 2007 a dezembro 2012 é demonstrada na Figura 18.



Fonte: A Autora (2018).

### 3.2 MÉTODO BEERKAN

A metodologia Beerkan, idealizada por Haverkamp et al. (1994), permite determinar a curva de retenção de água no solo,  $\theta(h)$ , e a curva de condutividade hidráulica do solo,  $K(\theta)$ , através dos modelos de van Genuchten (1980) e Brooks e Corey (1964), definidos pelas Equações 9 e 10. O método utiliza as propriedades dinâmicas e estáticas do solo, como a distribuição do tamanho das partículas e ensaios de infiltração simplificados, para obtenção dos parâmetros de forma e normalização (HAVERKAMP et al., 1998; LASSABATÈRE et al., 2006; SOUZA et al., 2008).

$$\theta(h) = (\theta_s - \theta_r) \cdot \left[ 1 + \left( \frac{h}{h_g} \right)^n \right]^{-m} + \theta_r, \text{ com } m = 1 - \frac{2}{n} \text{ (Burdine, 1953)} \quad (9)$$

E

$$K(\theta) = K_s \cdot \left( \frac{\theta}{\theta_s} \right)^\eta, \quad (10)$$

Sendo  $\theta$  a umidade volumétrica [ $L^3 L^{-3}$ ];  $\theta_r$  e  $\theta_s$  as umidades volumétricas residual e saturada [ $L^3 L^{-3}$ ], respectivamente;  $h$  o potencial matricial [L];  $h_g$  [L] o inverso do comprimento capilar de  $h$  a partir do qual ocorre a dessaturação, conhecido como potencial de entrada de ar;  $m$  e  $n$  são parâmetros de forma;  $K_s$  a condutividade hidráulica saturada do solo [ $L T^{-1}$ ] e  $\eta$  o parâmetro de forma para a curva de condutividade hidráulica.

As Equações 09 e 10 contêm seis parâmetros desconhecidos: três de forma ( $m$ ,  $n$  e  $\eta$ ) e três de normalização ( $\theta_s$ ,  $K_s$ ,  $h_g$ ). Os dois parâmetros de forma são relacionados à textura, obtidos através da distribuição do tamanho das partículas,  $F(D)$ . Os parâmetros de normalização dependem das propriedades estáticas (estrutura) dos solos, determinados por intermédio de ensaios de infiltração.

Os parâmetros de forma e normalização, bem como as curvas de retenção de água no solo e condutividade hidráulica foram obtidos através do programa BEST (*Beerkan Estimation of Soil Transfer Parameters through Infiltration Experiments*), desenvolvido por Lassabatère et al. (2006). O programa BEST foi executado através do software Scilab versão 6.0.0.

### 3.2.1 Caracterização Experimental e Amostragens

Para aplicar a metodologia BEERKAN foram realizados ensaios de infiltração em 03 áreas diferentes do Parque Treze de Maio e em projeto de pavimento permeável no CTG, mostradas na Figura 19. No Parque Treze de Maio foram escolhidas as 03 superfícies a seguir: área gramada, área sem grama e área de playground infantil.

Ao longo do presente trabalho, as 04 áreas estudadas estão denominadas conforme a Tabela 2.

Tabela 2 - Denominação das áreas estudadas

Superfície	Referência
Área sem Grama	SUPERFÍCIE 1
Área Gramada	SUPERFÍCIE 2
Playground Infantil	SUPERFÍCIE 3
Pavimento Permeável	SUPERFÍCIE 4

Fonte: A Autora (2018).

Em cada uma dessas superfícies foram realizadas 04 repetições do ensaio de infiltração, denominadas R1, R2, R3 e R4, totalizando 16 repetições.

Figura 19 - Superfícies em que foram realizados os ensaios de infiltração no Parque Treze de Maio e no sítio experimental no CTG/UFPE



Fonte: A Autora (2018).

- A) Superfície sem grama, B) Superfície com grama, C) Playground infantil e D) Pavimento permeável na UFPE.

Todas as análises laboratoriais foram realizadas no Laboratório de Física do Solo no Departamento de Energia Nuclear da Universidade Federal de Pernambuco.

### 3.2.2 Distribuição do Tamanho das Partículas

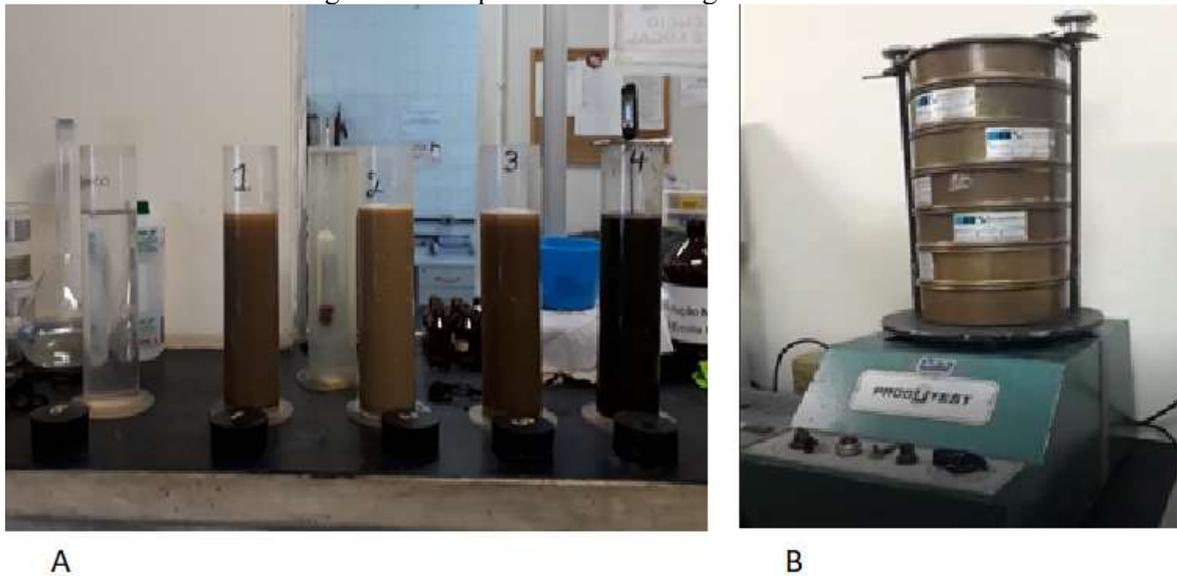
A distribuição do tamanho das partículas de natureza inorgânica ou mineral foi determinada através análise granulométrica do solo.

Foram coletadas amostras deformadas do solo próximas a cada ponto escolhido em que seriam realizados os ensaios de infiltração para ser feita análise granulométrica conforme norma 7181 da ABNT. Essa análise é composta pelas etapas de:

- a) Secagem do solo;
- b) Destorroamento do solo;
- c) Peneiramento do solo utilizando uma peneira de 2,0 mm de diâmetro;

- d) Análise da sedimentação utilizando 70 gramas da amostra do solo peneirada e 125 ml de uma solução de hexametáfosfato de sódio, conforme Figura 20;
- e) Lavagem do solo em peneira de 0,074 mm de diâmetro;
- f) Nova secagem em estufa;
- g) Peneiramento fino utilizando um agitador mecânico com um jogo de peneiras de 1,2 - 0,6 - 0,42 - 0,30 - 0,15 e 0,074 mm de diâmetro apresentado na Figura 20.

Figura 20 - Etapas dos ensaios de granulometria



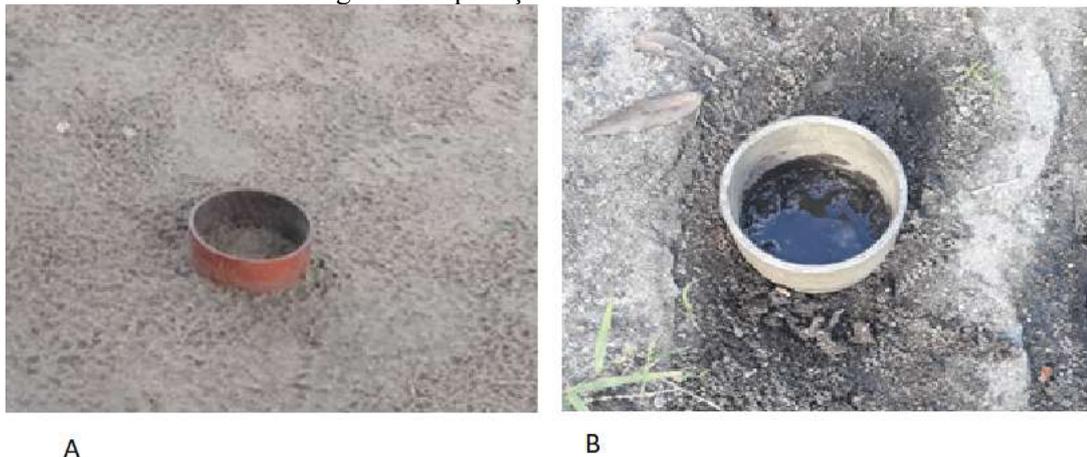
Fonte: A Autora (2018).  
A) Sedimentação e B) Peneiramento.

O que ficou retido nas peneiras nessa etapa final foi pesado para conhecimento da quantidade de areia que tinha a amostra de solo. Subtraindo-se dos 70 gramas iniciais obteve-se a quantidade de silte e argila que havia na amostra. A classificação da textura foi realizada de acordo com o triângulo textural adotado pela Sociedade Brasileira de Ciência do Solo.

### 3.2.3 Ensaio de Infiltração

Nas superfícies escolhidas para realização da presente pesquisa, realizou-se o despejo sucessivo do volume de 50 cm<sup>3</sup> de água no interior de um infiltrômetro de anel simples de raio de 75 cm cravado na superfície pretendida. No caso do pavimento permeável o infiltrômetro de anel simples tinha raio de 40 cm e foi fixado no interior vazado, conforme mostrado na Figura 21.

Figura 21 Aplicação do método Beerkan



A

B

Fonte: A Autora (2018).

A) Solo sem grama do Parque Treze de Maio e B) Pavimento permeável.

Toda vez que a lâmina do volume anterior se infiltrava totalmente, um novo volume de 50 cm<sup>3</sup> de água era vertido. Esse lançamento repetiu-se até o atingimento do estágio estacionário, isto é, até a relação entre o volume de água infiltrado e o tempo se tornar uma constante. Para conhecimento desse estágio, o intervalo de tempo entre o despejo e a infiltração dos 50 cm<sup>3</sup> foi anotado continuamente até se tornar igual entre os sucessivos despejos.

### 3.2.4 Determinação da Umidade Inicial e Final

A umidade inicial do solo representa o conteúdo de água presente no solo no momento anterior a realização do ensaio de infiltração. Para aferição da umidade inicial do solo, determinou-se massa de água presente em amostra de solo nas condições da coleta (EMBRAPA, 2017). A amostra, mantida sob as condições na qual foi coletada, transportada para o laboratório em embalagem impermeável e vedada, e pesada, seguida da determinação da massa da amostra de partículas sólidas em estufa. A massa de água presente na amostra foi então obtida por diferença.

### 3.2.5 Determinação da Massa Específica do Solo e das Partículas

Durante os ensaios de infiltração foram coletadas amostras de cada ponto escolhido para posterior determinação da massa específica do solo, da massa específica das partículas e das umidades inicial e final de acordo com Manual de Métodos de Análise do Solo da (EMBRAPA, 2017).

As umidades inicial e final foram aferidas a partir da pesagem da amostra úmida e da amostra seca após secagem em estufa. O método de determinação da massa específica do solo

visa medir essa propriedade através de um volume conhecido do solo. Para determinação do volume do solo foram coletadas amostras indeformadas por meio de um cilindro de volume interno conhecido através do coletor de Uhland, conforme Figura 22.

Figura 22 - Retirada de amostra indeformada usando o coletor de Uhland



Fonte: A Autora (2018).

A amostra do solo coletada no procedimento acima foi pesada após secagem em estufa para então calcular-se a massa específica do solo.

A massa específica das partículas, por sua vez, foi obtida através de experimento laboratorial que envolveu duas etapas: a obtenção de 20 gramas da amostra do solo após secagem em estufa e a determinação de seu volume. A determinação do volume da amostra foi obtida por meio da medida da diferença entre o volume de um líquido necessário para preencher um recipiente calibrado vazio e o volume do líquido necessário para completar o volume do recipiente contendo 20 gramas da amostra seca.

### 3.2.6 Estimativa das Propriedades Hidrodinâmicas do Solo

Assim, a partir da caracterização física e das curvas de infiltração da água no solo, foi aplicado o algoritmo BEST para processamento da rotina de cálculo da metodologia Beerkan para estimativa das propriedades hidrodinâmicas do solo.

#### 3.2.6.1 Determinação dos parâmetros de forma (m, n e $\eta$ )

Os parâmetros de forma podem ser determinados assumindo a similaridade de forma entre a distribuição das partículas  $F(D)$  e a curva de retenção de água no solo  $\theta(h)$ . Harverkamp e Parlange (1986) apresentaram a seguinte Equação 11 para expressar  $F(D)$ .

$$F(D) = \left[ 1 + \left( \frac{D_g}{D} \right)^N \right]^{-M}, \text{ com } M = 1 - \frac{2}{N} \quad (11)$$

Onde  $D$  é o diâmetro da partícula [L],  $D_g$  é um parâmetro de escala do tamanho das partículas [L] e  $M$  e  $N$  são parâmetros de forma da curva de distribuição do tamanho das partículas.

Os parâmetros de forma da curva de retenção  $m$  e  $n$  são obtidos a partir do índice de forma do meio  $p_m$  das relações apresentadas nas Equações 12 e 13.

$$m = \frac{1}{p_m} \cdot \left( \sqrt{1 + p_m^2 - 1} \right) \quad (12)$$

$$n = \frac{2}{1-m} \quad (13)$$

$p_m$  é estimado a partir de  $m$  e  $n$  pela Equação 14 (ZATARÁIN et al., 2003).

$$p_m = \frac{M \cdot N}{1+M} \cdot (1 + \kappa)^{-1} \quad (14)$$

Sendo  $\kappa$  um coeficiente definido por Fuentes et al. (1998) conforme Equação 15.

$$\kappa = \frac{2 \cdot s - 1}{2 \cdot s(1-s)} \quad (15)$$

$s$  é a dimensão fractal relativa. A dependência de  $s$  ( $s = D_f/E$ , na qual  $D_f$  é a dimensão fractal do solo e  $E = 3$  a dimensão de Euclides. Com respeito à porosidade total do solo ( $\eta$ ) é definida pela Equação 16 (FUENTES, 1992).

$$(1 - \eta)^s + \eta^{2 \cdot s} = 1 \quad (16)$$

No caso da equação da curva de condutividade hidráulica de Brooks e Corey (1964), o seu parâmetro de forma,  $\eta$ , pode ser expresso como função do produto dos parâmetros de forma da curva de retenção e do fator de tortuosidade ( $p$ ), conforme Equação 17.

$$\eta = \frac{2}{mn} + 2 + p \quad (17)$$

Sendo  $p = 1$  para o modelo de Burdine (1953).

### 3.2.6.2 Determinação dos parâmetros de normalização ( $\theta_s$ , $K_s$ e $h_g$ )

A umidade volumétrica saturada do solo ( $\theta_s$ ), primeiro parâmetro de normalização, foi estimado a partir da massa específica do solo e da umidade gravimétrica saturada. Os parâmetros  $K_s$  e  $h_g$  são obtidos através da modelagem dos experimentos de infiltração. Para uma fonte de água circular com dado potencial de pressão da água sobre uma superfície de solo uniforme e com um conteúdo de água inicial uniforme ( $\theta_0$ ), a infiltração acumulada tridimensional  $I(t)$  e a taxa de infiltração  $q(t)$  podem ser aproximadas pelas equações para o regime de fluxo transitório (Equações 18 e 19) e estacionário (Equações 20 e 21) (HAVERKAMP et al., 1994):

$$I(t) = S\sqrt{t} + [a \cdot S^2 + b \cdot K_s]t \quad (18)$$

$$q(t) = \frac{S}{2\sqrt{t}} + [a \cdot S^2 + b \cdot K_s] \quad (19)$$

$$I_{+\infty}(t) = [a \cdot S^2 + K_s]t + c \frac{S^2}{K_s} \quad (20)$$

$$q_{+\infty}(t) = q_{+\infty} = a \cdot S^2 + K_s \quad (21)$$

Onde:

$$a = \frac{\gamma}{r\Delta\theta} \quad (22)$$

$$b = \left(\frac{\theta}{\theta_s}\right)^\eta + \frac{2-\beta}{3} \left(1 - \left(\frac{\theta}{\theta_s}\right)^\eta\right) \quad (23)$$

$$c = \frac{1}{2 \left[1 - \left(\frac{\theta}{\theta_s}\right)^\eta\right] \cdot (1-\beta)} \cdot \ln\left(\frac{1}{\beta}\right) \quad (24)$$

Sendo  $S$  a sorvidade [ $L T^{-1/2}$ ],  $r$  o raio do cilindro [ $L$ ],  $\gamma$  igual a 0,75 e  $\beta$  igual a 0,6 (valores aplicáveis para a maioria dos solos, quando  $\theta_0 < 0,25\theta_s$ ).

Para determinação de  $K_s$  e  $S$ , o BEST utiliza as Equações 25 e 26, equivalentes às Equações 18 e 19, obtidas pela substituição de  $K_s$  em função da sorvidade  $S$  e da taxa de infiltração no regime estacionário  $q_{+\infty}$ , ou seja, a Equação 21 nas Equações 18 e 19.

$$I(t) = S\sqrt{t} + [a(1-b)S^2 + b \cdot q_{+\infty}]t \quad (25)$$

$$q(t) = \frac{S}{2\sqrt{t}} + [a(1-b)S^2 + b \cdot q_{+\infty}] \quad (26)$$

O ajuste das Equações 25 e 26 aos dados experimentais da infiltração acumulada ( $I_{\text{exp}(t)}$ ) é obtido pela minimização da clássica função objeto dada pela Equação 27.

$$f_1(S, K_s, k) = \sum_{i=1}^k [I_{\text{exp}}(t_i) - I(t_i)]^2 \quad (27)$$

Na qual  $k$  é o número de pontos considerado no regime transitório. O algoritmo usado na minimização da função objetivo,  $f_1(S, K_s, k)$ , é o de Marquardt (1963) e o desempenho dos ajustes é analisado pelos valores correspondentes ao erro quadrático médio (EQM) dado pela Equação 28.

$$EQM = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^k [I_{exp}(t_i) - I(t_i)]^2}{\sum_{i=1}^k (I_{exp}(t_i))^2}} \quad (28)$$

Inicialmente, o BEST estima um valor máximo para a sorvidade,  $S_{MAX}$ , a partir do ajuste dos dados experimentais com as Equações 25 e 26, assumindo um fluxo de água dependendo exclusivamente da capilaridade, considerando  $b$  igual a zero.

Como as Equações 18, 19, 25 e 26 são válidas apenas para o regime transitório, é possível que os ajustes não sejam feitos para todos os valores de  $k$ . A sorvidade então é estimada para valores de  $k$  de no mínimo cinco pontos para um máximo de  $N_{tot}$ .  $S_{MAX}$  é considerada o valor máximo de toda a sequência de pontos. Para obter valores positivos de  $K_s$ , são levadas em consideração as seguintes condições:  $S_{MAX}$  deve ser menor do que a taxa de infiltração no regime estacionário ( $q_{+\infty}$ ) dividido pelo coeficiente  $a = \gamma/r\Delta\theta$ . Desse modo, a sorvidade máxima  $S_{MAX}$  é então definida pela Equação 29.

$$S_{MAX} = \underset{N_{obs}=5 \dots N_{tot}-1}{MAX} \left[ \underset{MIN}{\left( S_{N_{obs}}(b-0), \sqrt{\frac{q_{+\infty}}{a}} \right)} \right] \quad (29)$$

$$\text{Sendo } b = \frac{2-\beta}{3}$$

Na obtenção de  $K_s$  é considerado o valor verdadeiro de  $b$ , conforme Equação 23. O ajuste é executado minimizando a função objeto definida pela Equação 27. Como os ajustes pelas Equações 25 e 26 nem sempre são válidas para todos os pontos ( $0 \dots k$ ), o BEST ajusta os dados para um mínimo de cinco pontos a um máximo de  $N_{tot}$ . Para cada subconjunto de dados que contém os  $k$  primeiros pontos, o BEST estima a sorvidade  $S(k)$ , a condutividade hidráulica  $K_s(k)$  em função de  $S(k)$  e da Equação 21 para um tempo máximo  $t_{max}(k)$  definido pela Equação 30.

$$t_{max} = \frac{1}{4(1-b)^2} t_{grav} \quad (30)$$

Sendo  $t_{grav}$  o tempo gravimétrico definido por Philip (1969). O  $t_{max}(k)$  é o tempo máximo para o qual as expressões para o regime transitório são consideradas válidas, logo, o tempo mais longo do subconjunto de dados  $t_k$  é comparado com  $t_{max}(k)$ . Os valores de  $S(k)$  e  $K_s(k)$  são considerados válidos para  $t_k$  menores do que  $t_{max}(k)$ . A partir daí serão escolhidos os valores correspondentes ao maior  $k$ .

Após a determinação de  $\theta_s$  e  $K_s$ , o parâmetro  $h_g$  é obtido pela Equação 31 (LASSABATÈRE et al., 2006):

$$h_g = - \frac{s^2}{c_p(\theta_s - \theta_0) \left(1 - \left(\frac{\theta_0}{\theta_s}\right)^\eta\right) K_s} \quad (31)$$

Onde  $c_p$  é um parâmetro que depende apenas dos parâmetros de formas  $n$ ,  $m$  e  $h$ , conforme demonstrado pela Equação 32 (HAVERKAMP et al., 1998; CONDAPPA et al., 2002; LASSABATÈRE et al., 2006).

$$c_p = \Gamma \left(1 + \frac{1}{n}\right) \cdot \left[ \frac{\Gamma(n\eta - \frac{1}{n})}{\Gamma(n\eta)} + \frac{\Gamma(n\eta + m - \frac{1}{n})}{\Gamma(n\eta + m)} \right] \quad (32)$$

Onde  $\Gamma$  é a função gama clássica.

### 3.3 MODELAGEM NUMÉRICA

A análise de desempenho das técnicas compensatórias também pode ser realizada através de modelos matemáticos para simulações numéricas que descrevam o escoamento e a transferência da água no solo em relação à situação existente ou na análise de diferentes cenários, que permitam conhecer as características e benefícios provenientes da sua utilização em meios urbanos, bem como as necessidades de intervenções de manutenção para segurança de funcionamento adequado do sistema (RIBAS, 2017).

A dinâmica da água nas superfícies selecionadas para o trabalho, então, foi modelada numericamente a partir do Modelo Hydrus 1D e dos parâmetros hidráulicos obtidos a partir do BEST.

O Hydrus é um programa computacional que simula a dinâmica da água, o transporte de calor e de solutos em solos saturados e não saturados, cultivados ou não. Para a simulação dos processos de transferência de água, ele resolve numericamente as equações de Richards, com o uso de elementos finitos (ALVES, 2009).

A rotina para a dinâmica da água em um meio poroso unidimensional, isotérmico, parcialmente saturado é descrito por uma forma modificada da Equação de Richards (Equação 33) pelo qual não se considera os efeitos da fase gasosa e do gradiente térmico no fluxo da água.

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial t} \left[ K \left( \frac{\partial h}{\partial x} + \cos \alpha \right) \right] - S \quad (33)$$

Na qual,  $h$  é o potencial mátrico da água no solo, L;  $\theta$  é a umidade volumétrica da água, L<sup>3</sup> L<sup>-3</sup>;  $t$  é o tempo, T;  $x$  é a coordenada espacial, L;  $S$  é um termo de sumidouro, L<sup>3</sup> L<sup>-3</sup> T<sup>-1</sup>;  $\alpha$  é o ângulo entre a direção do fluxo e o eixo vertical (ou seja,  $\alpha=0^\circ$  para fluxo vertical,  $90^\circ$  para fluxo horizontal e  $0^\circ < \alpha < 90^\circ$  para fluxo inclinado).

As propriedades hidráulicas de um solo não saturado,  $\theta(h)$  e  $K(h)$ , são de maneira geral funções não lineares do potencial mátrico ou da umidade volumétrica. O programa HYDRUS-1D permite o uso de 5 modelos analíticos para as propriedades hídricas: Brooks e Corey (1964); van Genuchten (1980); Vogel e Cislárová (1988), Kosugi (1996); e Durner (1994).

### 3.3.1 Hipóteses e considerações adotadas utilizando o HYDRUS 1-D

O Hydrus foi parametrizado considerando-se:

- a) O modelo de van Genuchten (1980) sob hipótese de Mualem para descrever as propriedades hidráulicas do solo, assim, as propriedades hidrodinâmicas obtidas após a aplicação do algoritmo BEST foram ajustadas do modelo de distribuição dos poros de Burdine para o modelo de distribuição dos poros de Mualem, a partir do RETC, para poderem ser utilizadas como entrada no Hydrus.
- b) A condição de fronteira superior foi a condição atmosférica, dado que foi utilizada simulação de chuva com tempo de retorno 2, 5 e 10 anos, a partir de curva de IDF da cidade do Recife (Equação 34) gerada por Coutinho et al. (2010), pelo método da relação entre durações ( $i$  - mm/h,  $T_r$  - anos e  $t$  em min).

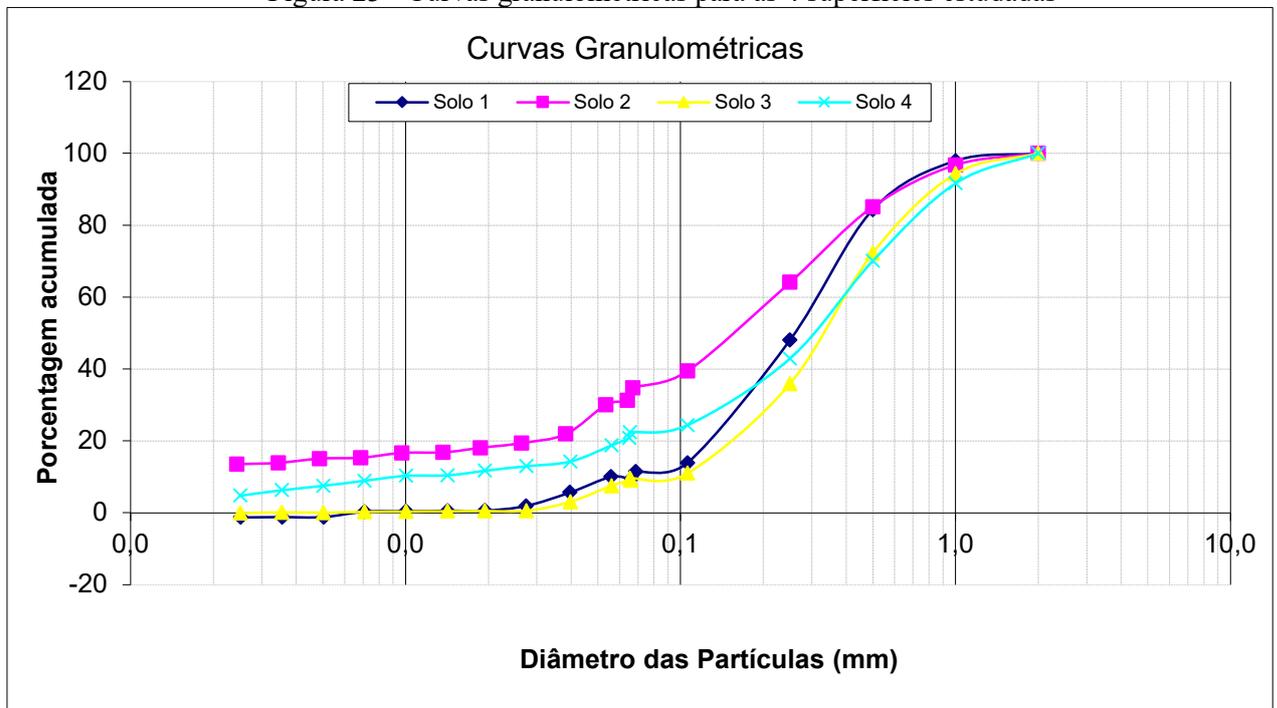
$$i = \frac{662,83 \times T_r^{0,2522}}{(t+3,797507)^{0,7488}} \quad (34)$$

- c) Quatro perfis de solo, utilizando a ferramenta “Soil Profile-Grafical editor”. Cada perfil com um metro de espessura e dividido em 300 nós.
- d) A condição de fronteira inferior foi a de drenagem livre e, então, o gradiente hidráulico entre a superfície e a condição limite inferior é igual a 1.
- e) A condição inicial utilizada para as quatro superfícies foram as correspondentes a capacidade de campo. Obtida utilizando-se o coletor de Uhland, que permitiu a coleta de uma amostra indeformada do solo de cada ponto do experimento de infiltração, e com isso o conhecimento da relação entre umidade volumétrica, umidade gravimétrica e massa específica do solo.

#### 4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Na Figura 23 são apresentadas as curvas granulométricas obtidas. Observa-se uma predominância dos diâmetros das partículas na faixa de textura da areia. Além disso, os resultados do ensaio demonstraram que a porcentagem de areia é maior no solo 03, área do playground infantil. Esse resultado comprova o esperado para essa superfície, visto que a NBR 16.071 (ABNT, 2012) recomenda que o piso dos playgrounds infantis atendam ao requisito de amortecimento aos impactos causados por eventuais quedas das crianças, sendo o piso de areia uma das superfícies apropriadas.

Figura 23 - Curvas granulométricas para as 4 superfícies estudadas



Fonte: A Autora (2018).

Na Tabela 3 são mostrados os resultados obtidos para a classificação textural, a massa específica do solo, a massa específica das partículas do solo e a porosidade de cada superfície.

Tabela 3 - Resultados da análise granulométrica

Superfície	% de Argila	% Silte	% Areia	Textura	pd (g/cm <sup>3</sup> )	ps (g/cm <sup>3</sup> )	φ (%)
1	0,00%	10,73%	89,27%	Areia-franca	1,22	2,35	48%
2	13,55%	17,71%	68,74%	Franco-arenosa	1,63	2,35	31%
3	0,00%	9,23%	90,77%	Arenosa	1,57	2,41	35%
4	4,79%	16,03%	79,18%	Areia-franca	1,10	2,27	52%

Fonte: A Autora (2018).

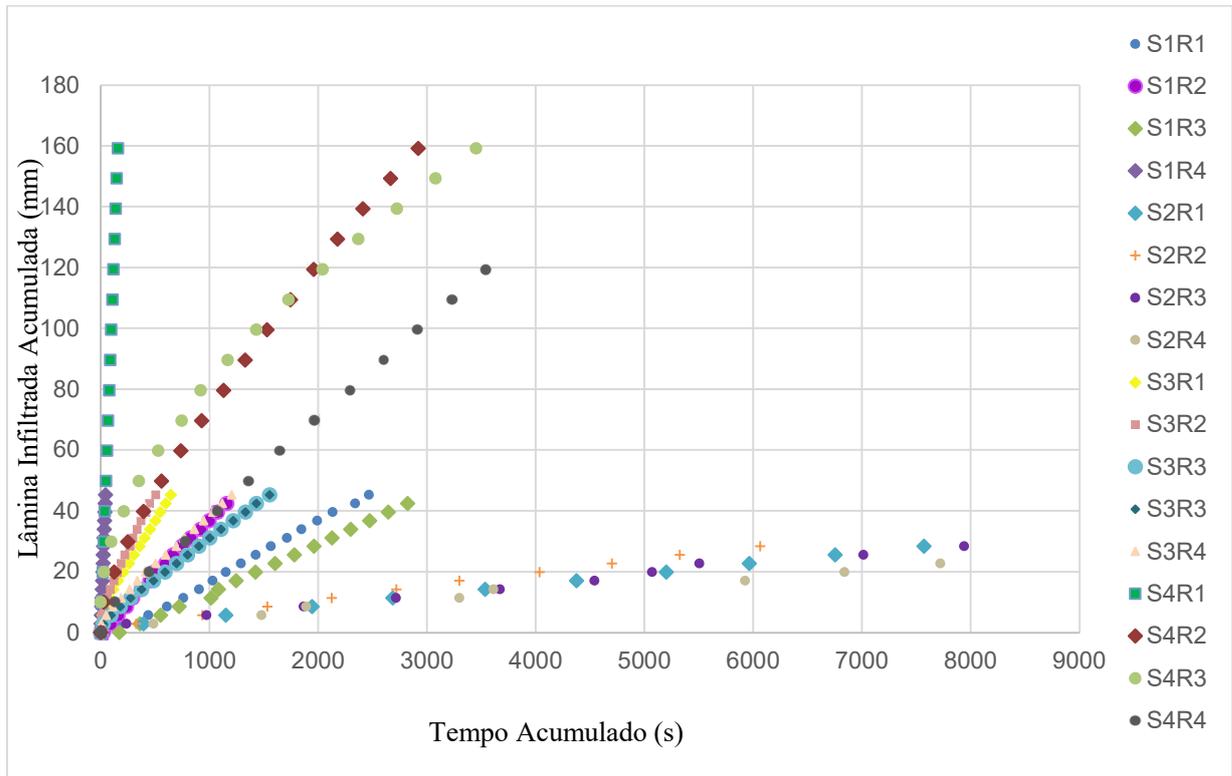
Observa-se que os solos que apresentaram maior porosidade foram o da área sem grama e o pavimento permeável, ambos de classe textural areia-franca. Uma porosidade alta indica a predominância de vazios (ar e água), o que justificaria o menor valor de massa específica das partículas encontrado na superfície de pavimento permeável.

Os menores valores para porosidade, por sua vez, foram observados na área gramada e no playground infantil, indicando que suas partículas tendem estar agregadas em íntimo contato. A área gramada apresentou maior valor para massa específica do solo, o que, conforme Suzuki (2005), pode representar um grau de compactação elevado, que reduz a porosidade do solo, diminuindo a aeração do solo e aumentando a densidade, enquanto um grau de compactação muito baixo pode indicar solo muito solto, comprometendo a retenção de água.

O playground infantil apresentou maior valor densidade específica das partículas do solo, resultado esperado, por ser único com textura arenosa e, então, com o maior percentual de quartzo, partículas com maiores diâmetros.

A partir das medições de campo dos ensaios de infiltração, foi possível construir as curvas de infiltração para cada repetição do experimento em todas as superfícies, conforme o Gráfico 1. É possível verificar que há uma variação considerável na inclinação das curvas, isto é, na velocidade de infiltração da água no solo. A superfície 2, área gramada, apresentou as menores inclinações ao longo de suas curvas.

Gráfico 1 - Lâminas infiltradas acumuladas em todas as 04 repetições nas 04 superfícies estudadas

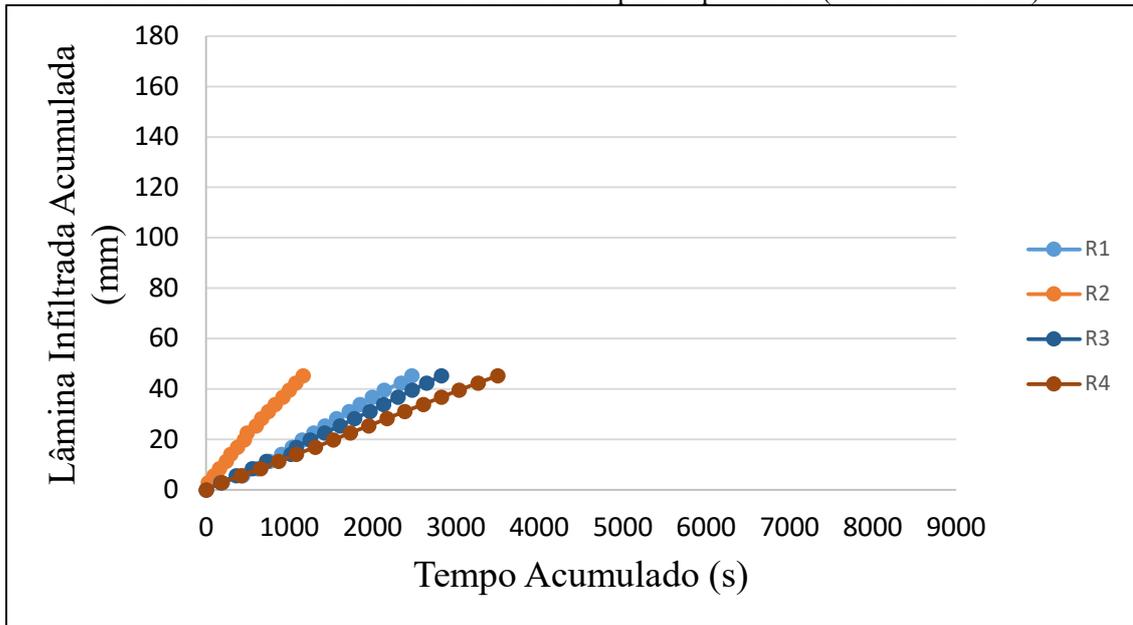


Fonte: A Autora (2018).

S1R1 – repetição 1 na superfície 1, S1R2- repetição 2 na superfície 1, S1R3 – repetição 3 na superfície 1, S1R4 – repetição 4 na superfície 1; analogamente para as outras 03 superfícies.

Analisando as curvas de infiltração em cada superfície apresentadas nos Gráficos 2, 3, 4 e 5, observa-se que a área gramada apresentou as menores lâminas infiltradas acumuladas e os maiores tempos acumulados para estabilização, resultado coerente com a hipótese de compactação do solo. O pavimento permeável, por sua vez, apresentou as maiores lâminas acumuladas e a superfície do playground infantil apresentou o menor tempo de estabilização.

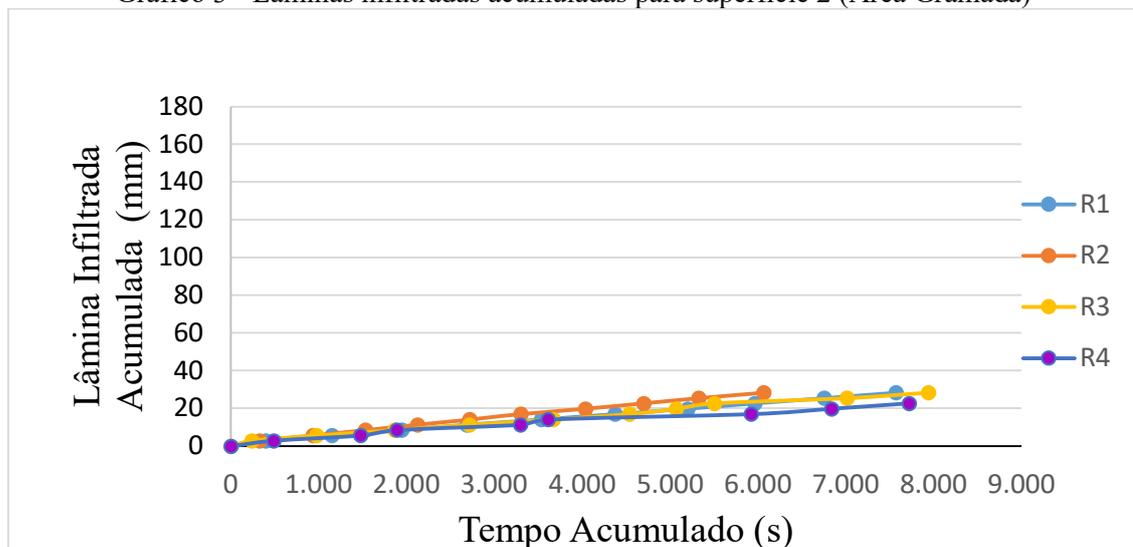
Gráfico 2 - Lâminas infiltradas acumuladas para superfície 1 (Área sem Grama).



Fonte: A Autora (2018).

R1 – repetição 1, R2 – repetição 2, R3- repetição 3, R4 – repetição.

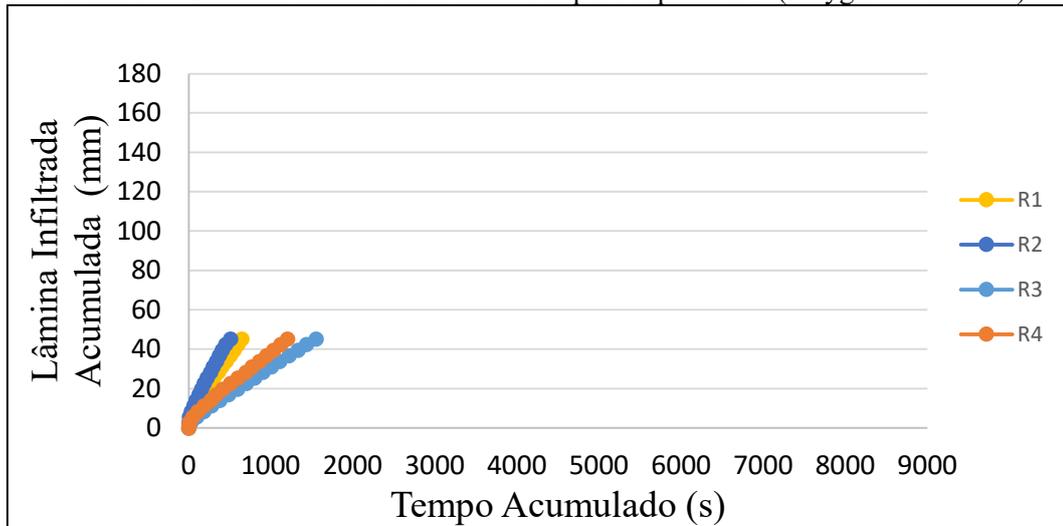
Gráfico 3 - Lâminas infiltradas acumuladas para superfície 2 (Área Gramada)



Fonte: A Autora (2018).

R1 – repetição 1, R2 – repetição 2, R3- repetição 3, R4 – repetição.

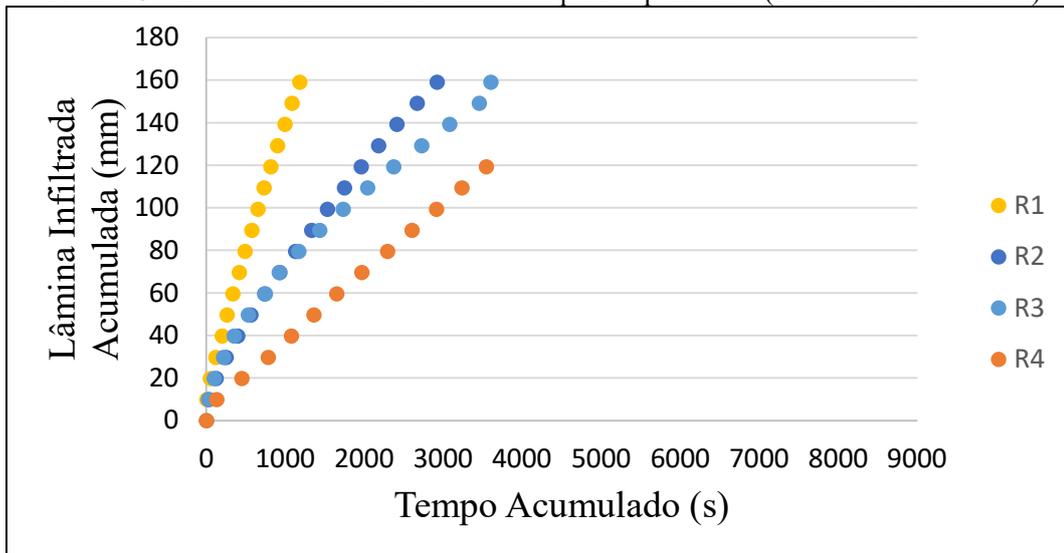
Gráfico 4 - Lâminas infiltradas acumuladas para superfície 3 (Playground Infantil)



Fonte: A Autora (2018).

R1 – repetição 1, R2 – repetição 2, R3- repetição 3, R4 – repetição.

Gráfico 5 - Lâminas infiltradas acumuladas para superfície 4 (Pavimento Permeável)



Fonte: A Autora (2018).

R1 – repetição 1, R2 – repetição 2, R3- repetição 3, R4 – repetição.

Há uma indicação, portanto, da influência da textura do solo no movimento da água no mesmo, visto que a área gramada, com maior percentual de argila e de textura franco-arenosa, apresentou maior tempo acumulado para estabilização e o solo do playground infantil, de textura arenosa, apresentou menor tempo.

A lâmina mínima acumulada na área gramada foi de 22,64 mm em 7721 segundos e sua lâmina máxima de 28,29 mm no intervalo de tempo de até 6065 segundos. O pavimento permeável, por outro lado, apresentou as maiores lâminas infiltradas acumuladas, tendo sido sua lâmina máxima de 159,15 mm em 1179 segundos e sua lâmina mínima de 119,37 mm em 3544 segundos. A superfície do playground infantil apresentou lâmina máxima e mínima iguais

de 45,27 mm e tempo mínimo acumulado de infiltração de 644 segundos e a área sem grama apresentou lâmina máxima de 28,29 mm no intervalo de tempo acumulado de até 6065 e lâmina mínima de 22,63 mm, no intervalo de tempo acumulado de 7721 segundos.

Com relação às propriedades hidrodinâmicas, os parâmetros de forma das curvas de retenção e de condutividade hidráulica foram estimados para cada amostra do solo em que foi realizada uma repetição do ensaio de infiltração. Visto que foram realizadas 04 repetições em cada superfície e que foram analisadas 04 superfícies, totalizando 16 repetições, calculou-se a média por superfície dos resultados obtidos para cada parâmetro. Essa média dos parâmetros por superfície é apresentada na Tabela 4.

Tabela 4 - Parâmetros de forma e parâmetros de normalização para as superfícies estudadas

AMOSTRA	$\theta_s$ (cm <sup>3</sup> /cm <sup>3</sup> )	hg (mm)	Ks (mm/s)	n	$\eta$	m	Cp	S (mm/s <sup>0,5</sup> )
Superfície 1 Repetição 1	0,481	-0,922	0,016	2,593	6,375	<b>0,229</b>	1,846	0,101
Superfície 1 Repetição 2	0,481	-9,447	0,029	2,593	6,375	<b>0,229</b>	1,846	0,428
Superfície 1 Repetição 3	0,481	-1,836	0,016	2,593	6,375	<b>0,229</b>	1,846	0,138
Superfície 1 Repetição 4	0,481	-2,623	0,012	2,593	6,375	<b>0,229</b>	1,846	0,143
Média Superfície 1	0,481	-3,707	0,018	2,593	6,375	<b>0,229</b>	1,846	0,203
Desvio Padrão Superfície 1	0,000	3,889	0,008	0,000	0,000	<b>0,000</b>	0,000	0,152
CV Superfície 1	0%	105%	42%	0%	0%	<b>0%</b>	0%	75%
Superfície 2 Repetição 1	0,306	-15,049	0,003	2,260	10,678	<b>0,115</b>	2,205	0,096
Superfície 2 Repetição 2	0,306	-16,763	0,003	2,260	10,678	<b>0,115</b>	2,205	0,108
Superfície 2 Repetição 3	0,306	-24,511	0,002	2,260	10,678	<b>0,115</b>	2,205	0,110
Superfície 2 Repetição 4	0,306	-10,892	0,003	2,260	10,678	<b>0,115</b>	2,205	0,080
Média Superfície 2	0,306	-16,804	0,003	2,260	10,678	<b>0,115</b>	2,205	0,099
Desvio Padrão Superfície 2	0,000	5,699	0,000	0,000	0,000	<b>0,000</b>	0,000	0,014
CV Superfície 2	0%	34%	14%	0%	0%	<b>0%</b>	0%	14%
Superfície 3 Repetição 1	0,349	-55,438	0,030	2,641	6,120	<b>0,243</b>	1,818	0,707
Superfície 3 Repetição 2	0,349	-58,623	0,038	2,641	6,120	<b>0,243</b>	1,818	0,823
Superfície 3 Repetição 3	0,349	-32,680	0,016	2,641	6,120	<b>0,243</b>	1,818	0,398
Superfície 3 Repetição 4	0,349	-42,144	0,019	2,641	6,120	<b>0,243</b>	1,818	0,491
Média Superfície 3	0,349	-47,221	0,026	2,641	6,120	<b>0,243</b>	1,818	0,605
Desvio Padrão Superfície 3	0,000	12,038	0,010	0,000	0,000	<b>0,000</b>	0,000	0,195

CV Superfície 3	0%	25%	40%	0%	0%	<b>0%</b>	0%	32%
Superfície 4 Repetição 1	0,515	-	0,023	2,281	10,107	<b>0,123</b>	2,168	1,138
Superfície 4 Repetição 2	0,515	-67,727	0,013	2,281	10,107	<b>0,123</b>	2,168	0,796
Superfície 4 Repetição 3	0,515	-94,695	0,008	2,281	10,107	<b>0,123</b>	2,168	0,753
Superfície 4 Repetição 4	0,515	-20,990	0,017	2,281	10,107	<b>0,123</b>	2,168	0,493
Média Superfície 4	0,515	-70,933	0,015	2,281	10,107	<b>0,123</b>	2,168	0,795
Desvio Padrão Superfície 4	0,000	36,207	0,006	0,000	0,000	<b>0,000</b>	0,000	0,265
CV Superfície 4	0%	51%	42%	0%	0%	<b>0%</b>	0%	33%

Fonte: A Autora (2018).

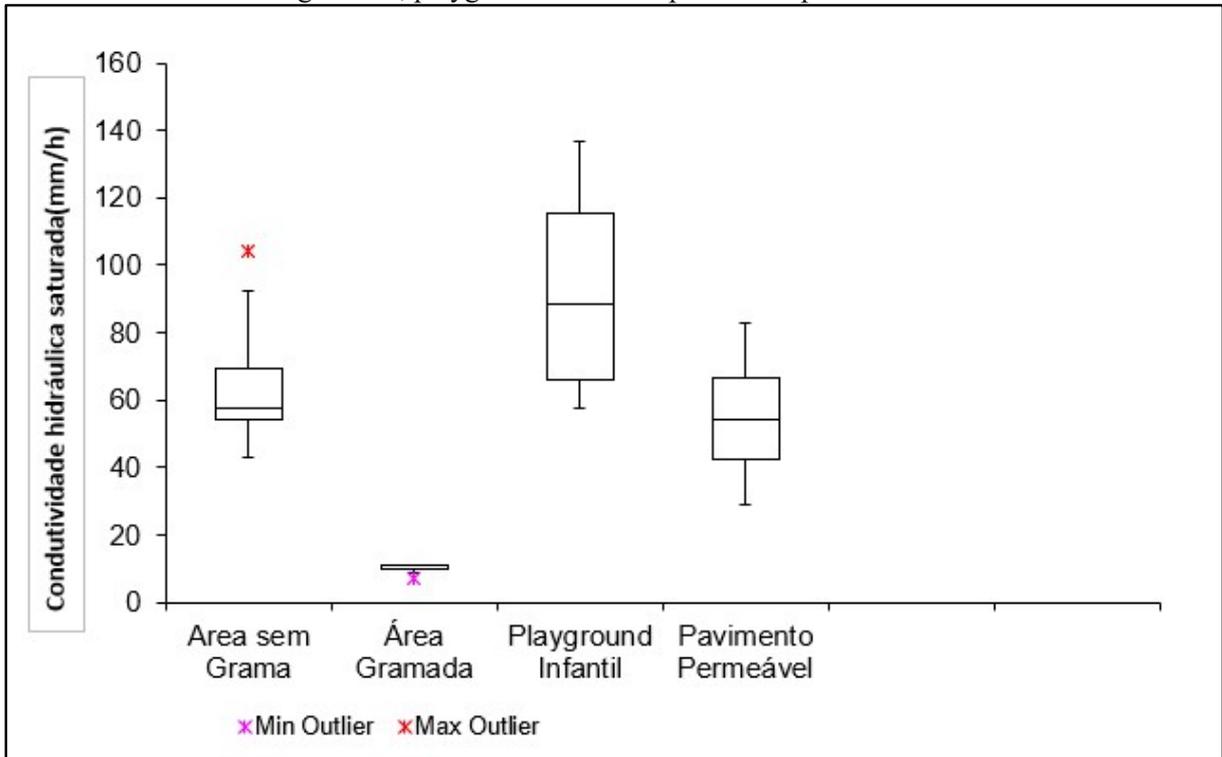
A partir da Tabela 4, verifica-se que a superfície que apresentou maior média para  $K_s$  foi a superfície 3 (playground infantil), enquanto a superfície 2, área gramada, apresentou a menor média para  $K_s$ , apesar dessas superfícies apresentarem porosidades com valores próximo, como mostrado na Tabela 4. O que reflete a afirmação de Mesquita e Moraes (2008) de que a condutividade hidráulica saturada é mais dependente da estrutura do que da textura do solo, ou seja, a forma e continuidade dos poros são variáveis com maior influência do que o volume de poros.

A área do playground infantil também apresentou o maior valor para  $n$ . Tal parâmetro está relacionado à distribuição granulométrica, de modo que quanto maior o diâmetro das partículas maior o valor  $n$ . Esse resultado corrobora com os resultados apresentados na Tabela 4, onde pode ser verificado que os valores de  $n$  apresentaram-se diretamente proporcionais aos percentuais de areia.

Verifica-se que a área gramada apresentou menor  $K_s$  e menor  $\theta_s$ , o que poderia ser justificado pela possível compactação do solo. Alerta-se, então, para a necessidade de se haver os devidos cuidados para que uma superfície gramada possa oferecer todos os seus serviços ecossistêmicos, o que inclui aumento da taxa de infiltração.

Assim, os ensaios realizados no playground infantil demonstraram maior condutividade hidráulica saturada dessa superfície. Em média, seguindo o critério da condutividade hidráulica saturada, as áreas a serem priorizadas seriam o playground infantil, seguido da área sem grama, do pavimento permeável e da área gramada, conforme apresentado no gráfico *box plot* do Gráfico 6.

Gráfico 6 - Box plot para a condutividade hidráulica saturada para as superfícies: área sem grama, área gramada, playground infantil e pavimento permeável



Fonte: A Autora (2018).

Além disso, do ponto de vista hidrológico, todas as superfícies apresentam potencial de elevada infiltração e baixa capacidade de geração de escoamento superficial direto. Essa hipótese pode ser plausível, uma vez que conforme classificação proposta por Rawls et al., (1992), solos com condutividade hidráulica saturada maior que 7,6mm/h, podem ser inseridos como pertencentes ao grupo hidrológico do tipo A do *Soil Conservation Service* (SCS) e, como pode-se verificar na Tabela 05, todas as amostras apresentaram condutividade hidráulica saturada superior a 0,0021 mm/s, isto é, 7,6 mm/h.

A SCS é uma metodologia que permite, com base no parâmetro curva número (CN), identificar características referentes ao potencial de escoamento superficial nas diferentes superfícies ((USDA-SCS, 1972). Ela afirma que na sequência de um evento de precipitação intensa, a razão entre a altura de precipitação retida na bacia hidrográfica após o início do escoamento superficial e a capacidade máxima de retenção de água na bacia é igual à razão entre a precipitação real e o escoamento superficial potencial (PONCE, 1989, p. 156). Assim, tem-se a relação dada pela Equação 35.

$$\frac{\text{Chuva Excedente Real}}{\text{Chuva Excedente Potencial}} = \frac{\text{Infiltração Real}}{\text{Infiltração Potencial}} \quad (35)$$

Onde a chuva excedente real ( $Q$ , em mm) é a parcela da chuva que se transforma em escoamento superficial direto; chuva excedente potencial ( $P$ , em mm) equivale a chuva de todo evento excluídas as perdas iniciais ( $A_i$ , em mm) devido à retenção em depressões no terreno e a intercepções; infiltração real representa a diferença entre a chuva excedente potencial e real e infiltração potencial ( $S$ , em mm) seria a altura infiltrada máxima correspondente à capacidade de absorção de água no solo. O método estima que as perdas iniciais são aproximadamente 20% de  $S$  e assim obtém a Equação 36 e a Equação 37.

$$\frac{Q}{P-0,2S} = \frac{P-0,2S-Q}{S} \quad (36)$$

E

$$Q = \frac{(P-0,2S)^2}{(P+0,8S)}, \text{ para } P > S \quad (37)$$

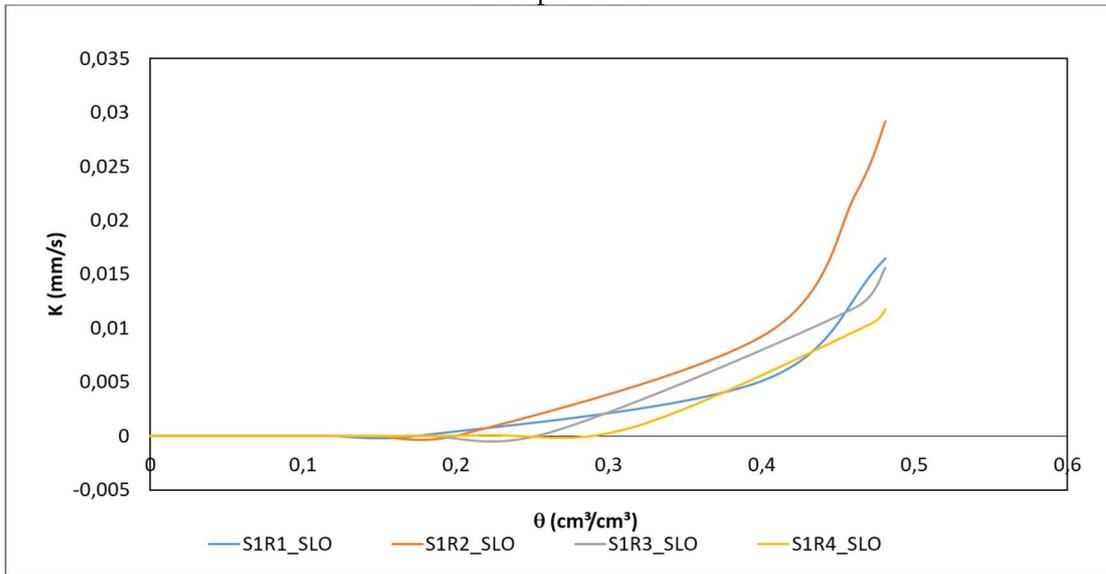
Analisou-se, ainda, o valor de  $S$  em função do tipo de solo, do uso do solo e da condição de umidade inicial do solo a partir da análise de mais de três mil tipos de solo com suas respectivas coberturas vegetais e plantações (SANTOS e LOLLO, 2016). A SCS, então criou uma variável auxiliar  $CN$  (*curve number*) e definiu uma relação empírica entre a capacidade de armazenamento da bacia ( $S$ ) e o índice  $CN$ , demonstrada na Equação 38.

$$CN = \frac{1000}{10 + \frac{S}{25,4}} \quad (38)$$

Conforme essa relação empírica, os solos foram classificados nos grupos hidrológicos A, B, C e D. Os solos das superfícies estudadas, pertencentes ao grupo hidrológico A, seriam solos arenosos, com baixo teor de argila, inferior a uns 8%, que não são compostos por rochas nem camadas argilosas e nem mesmo densificadas até a profundidade de 1,5 m. O teor de húmus é muito baixo, não atingindo 1% (SANTOS e LOLLO, 2016).

As curvas de condutividade hidráulica em função da umidade obtidas para cada superfície sob a hipótese de Burdine estão apresentadas nos Gráficos 7, 8, 9 e 10. A superfície do playground infantil apresentou curvas de condutividade hidráulica com maiores inclinações.

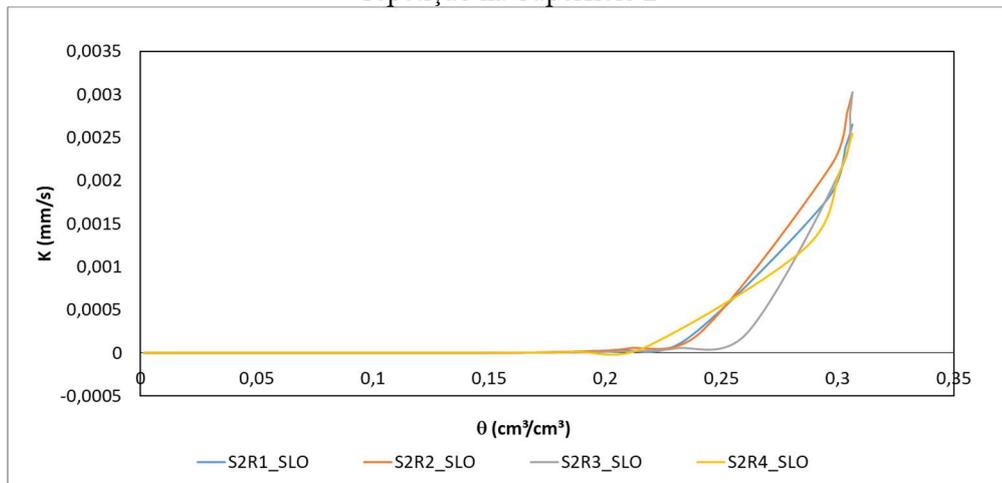
Gráfico 7 - Curvas de condutividade hidráulica em função da umidade volumétrica para cada repetição na Superfície 1



Fonte: A Autora (2018).

S1R1 – repetição 1 na superfície 1, S1R2- repetição 2 na superfície 1, S1R3 – repetição 3 na superfície 1, S1R4 – repetição 4 na superfície 1.

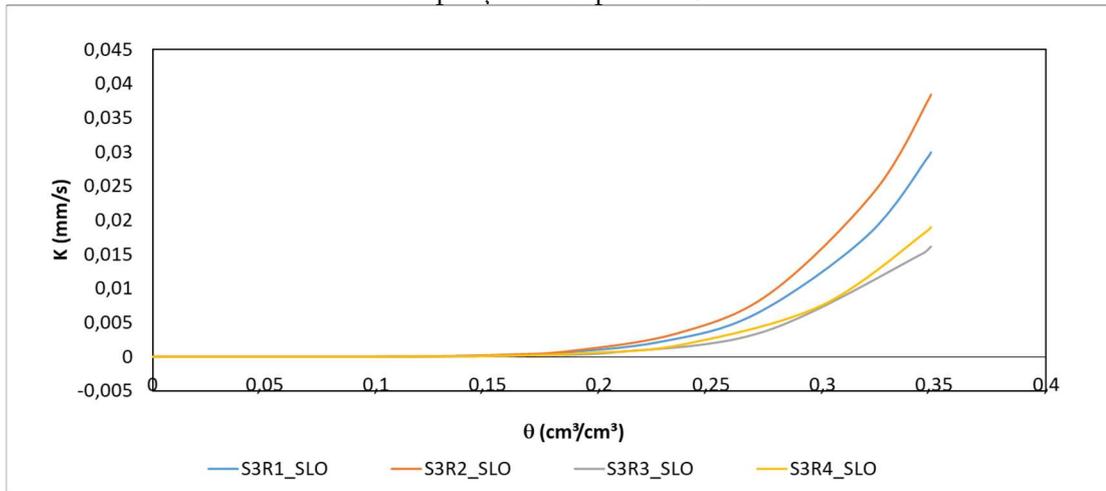
Gráfico 8 - Curvas de condutividade hidráulica em função da umidade volumétrica para cada repetição na Superfície 2



Fonte: A Autora (2018).

S2R1 – repetição 1 na superfície 2, S2R2- repetição 2 na superfície 2, S2R3 – repetição 3 na superfície 2, S2R4 – repetição 4 na superfície 2.

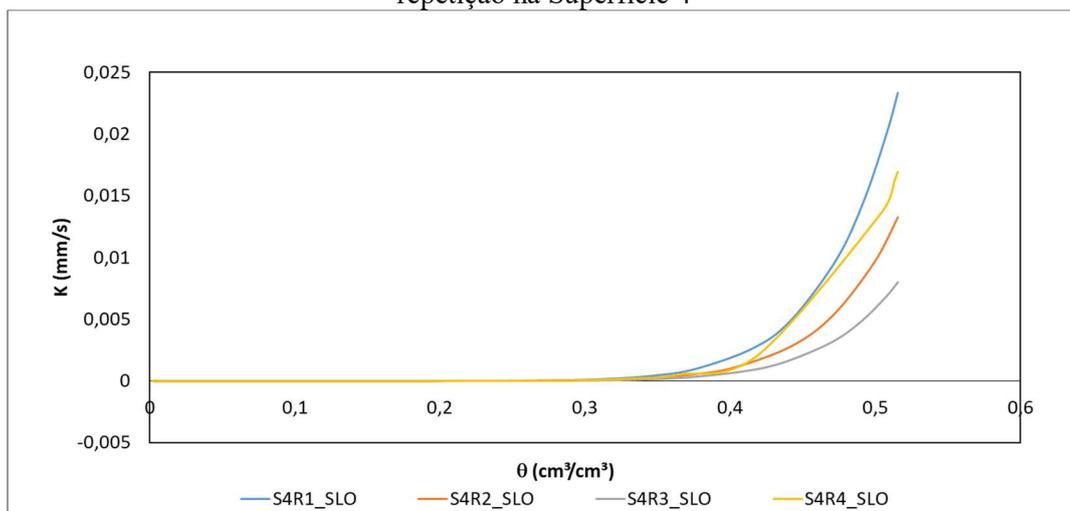
Gráfico 9 - Curvas de condutividade hidráulica em função da umidade volumétrica para cada repetição na Superfície 3



Fonte: A Autora, 2018.

S3R1 – repetição 1 na superfície 3, S3R2- repetição 2 na superfície 3, S3R3 – repetição 3 na superfície 3, S3R4 – repetição 4 na superfície 3.

Gráfico 10 - Curvas de condutividade hidráulica em função da umidade volumétrica para cada repetição na Superfície 4



Fonte: A Autora, 2018.

S4R1 – repetição 1 na superfície 4, S4R2- repetição 2 na superfície 4, S4R3 – repetição 3 na superfície 4, S4R4 – repetição 4 na superfície 4.

Aplicada a hipótese de Mualem com o uso do RETC, por sua vez, os parâmetros da curva de retenção foram corrigidos para os resultados apresentados na Tabela 5.

Tabela 5 - Parâmetros da curva de retenção para as superfícies 1, 2 3 e 4 após mudança da hipótese de Burdine para a hipótese de Mualem

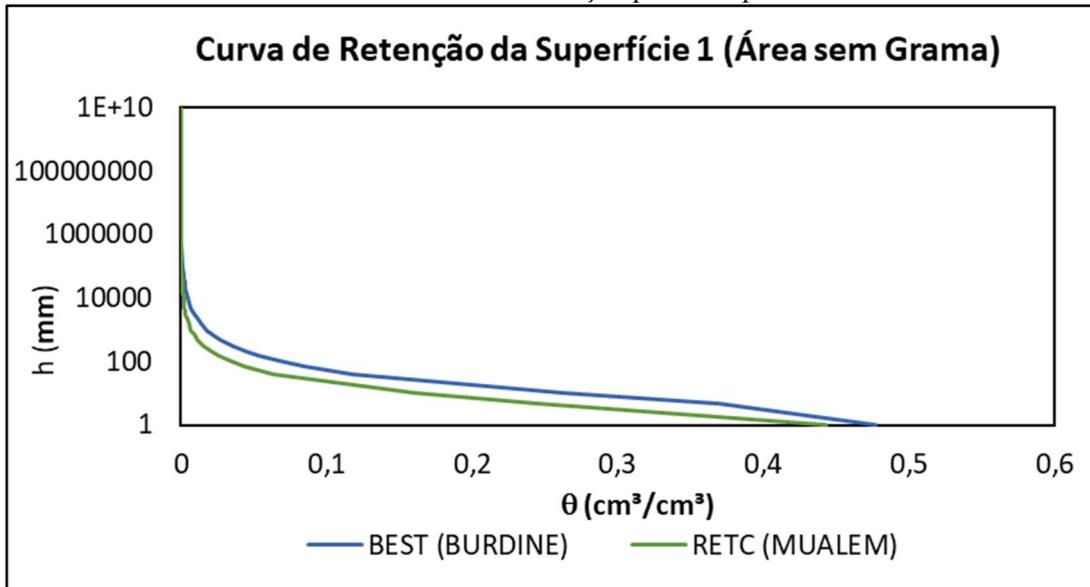
AMOSTRA	qs (cm³/cm³)	α(1/mm)	hg (mm)	n	m
Superfície 1 Repetição 1	0,491	0,828	-1,208	1,687	0,407
Superfície 1 Repetição 2	0,491	0,827	-1,209	1,687	0,407

<b>Superfície 1 Repetição 3</b>	0,493	0,419	-2,385	1,695	0,410
<b>Superfície 1 Repetição 4</b>	0,492	0,291	-3,440	1,696	0,410
<b>Média Superfície 1</b>	0,492	0,591	-2,060	1,691	0,409
<b>Desvio Padrão Superfície 1</b>	0,001	0,278	1,074	0,005	0,002
<b>CV Superfície 1</b>	0%	47%	52%	0%	0%
<b>Superfície 2 Repetição 1</b>	0,309	0,033	-15,049	1,404	0,288
<b>Superfície 2 Repetição 2</b>	0,309	0,290	-16,763	1,411	0,291
<b>Superfície 2 Repetição 3</b>	0,308	0,186	-24,511	1,452	0,311
<b>Superfície 2 Repetição 4</b>	0,309	0,464	-10,892	1,386	0,279
<b>Média Superfície 2</b>	0,309	0,243	-16,804	1,413	0,292
<b>Desvio Padrão Ponto 2</b>	0,001	0,181	5,699	0,028	0,014
<b>CV Superfície 2</b>	0%	74%	34%	2%	5%
<b>Superfície 3 Repetição 1</b>	0,349	0,011	-55,438	2,126	0,530
<b>Superfície 3 Repetição 2</b>	0,349	0,010	-58,623	2,153	0,536
<b>Superfície 3 Repetição 3</b>	0,350	0,020	-32,680	1,933	0,483
<b>Superfície 3 Repetição 4</b>	0,349	0,149	-42,144	2,008	0,502
<b>Média Superfície 3</b>	0,349	0,047	-47,221	2,055	0,512
<b>Desvio Padrão Superfície 3</b>	0,000	0,068	12,038	0,103	0,025
<b>CV Superfície 3</b>	0%	142%	25%	5%	5%
<b>Superfície 4 Repetição 1</b>	0,515	0,004	-100,322	2,015	0,504
<b>Superfície 4 Repetição 2</b>	0,516	0,006	-67,727	1,833	0,454
<b>Superfície 4 Repetição 3</b>	0,515	0,005	-94,695	1,991	0,498
<b>Superfície 4 Repetição 4</b>	0,518	0,232	-20,990	1,457	0,314
<b>Média Superfície 4</b>	0,516	0,062	-70,933	1,824	0,442
<b>Desvio Padrão Superfície 4</b>	0,001	0,113	36,207	0,258	0,089
<b>CV Superfície 4</b>	0%	184%	51%	14%	20%

Fonte: A Autora (2018).

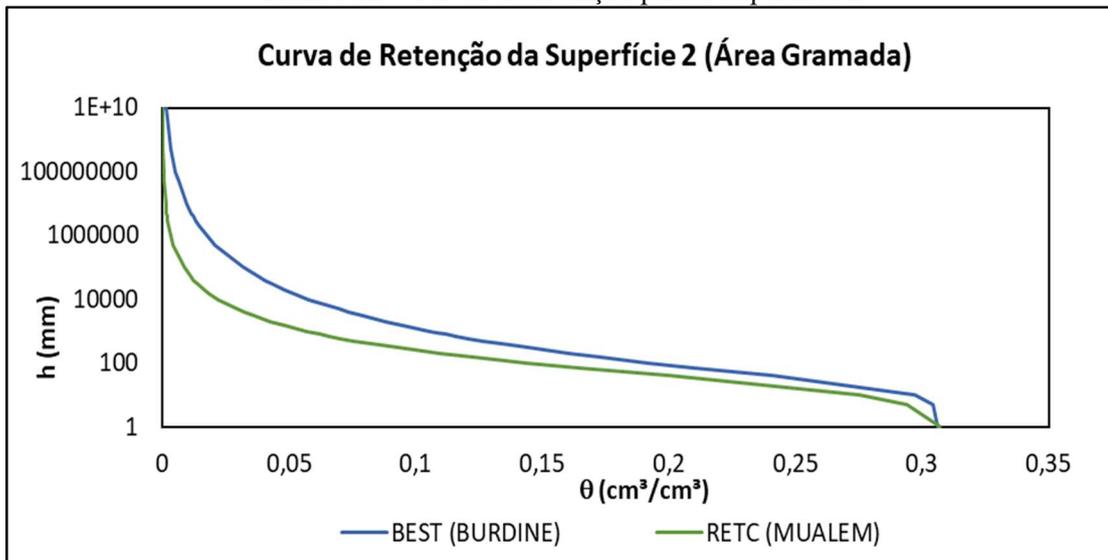
Pode-se observar que o parâmetro  $n$  apresentou valores maiores e o  $m$  valores menores sob hipótese de Mualem. O parâmetro  $n$  reflete-se na inclinação da curva de retenção e o parâmetro  $m$  na inflexão da parte inferior da curva de retenção e no patamar mínimo da mesma (van Genuchten, 1980). Confirma-se essa relação, analisando as curvas de retenção obtidas para cada superfície sob as duas hipóteses apresentadas nos Gráfico 11, 12, 13 e 14.

Gráfico 11 - Curvas de retenção para a Superfície 1



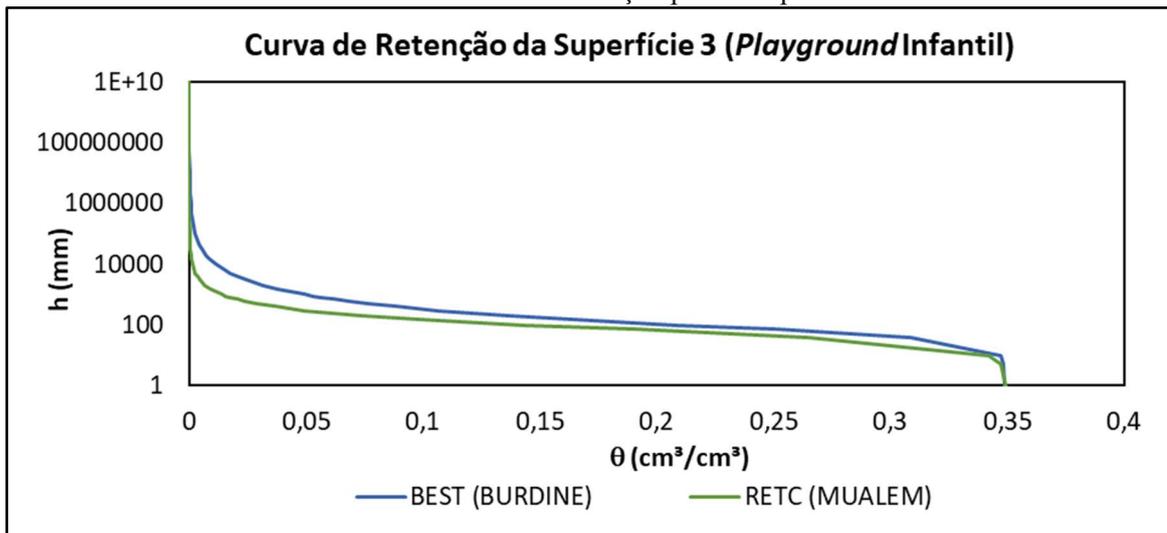
Fonte: A Autora (2018).

Gráfico 12 - Curvas de retenção para a Superfície 2



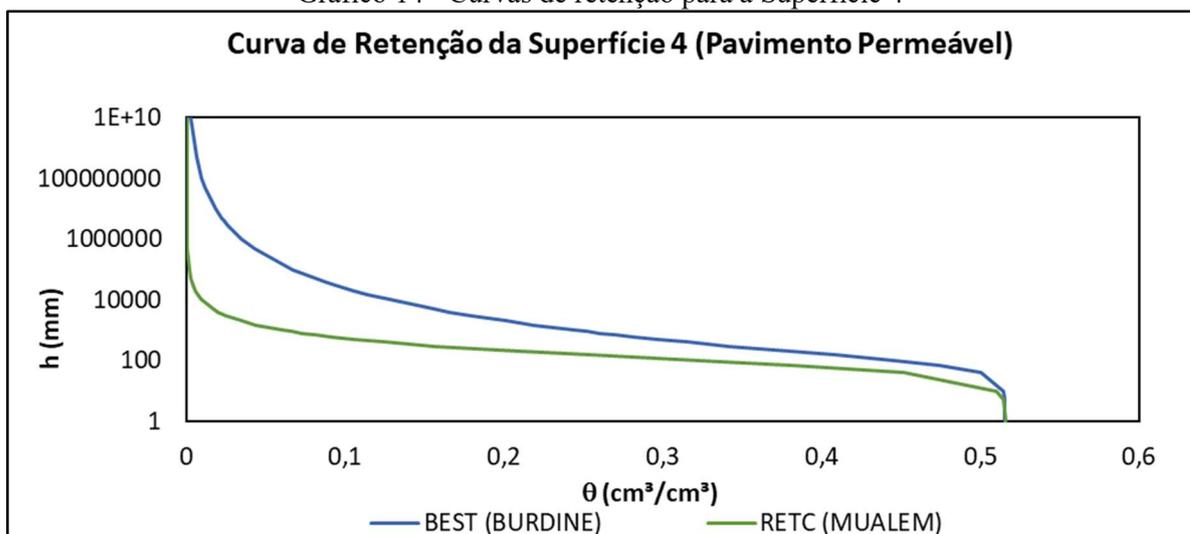
Fonte: A Autora (2018).

Gráfico 13 - Curvas de retenção para a Superfície 3



Fonte: A Autora (2018).

Gráfico 14 - Curvas de retenção para a Superfície 4



Fonte: A Autora (2018).

A hipótese de Mualem apresentou ajustes confiáveis, visto que nas 04 superfícies os valores da umidade nos pontos próximo a saturação e os valores das umidades mais baixas coincidiram.

A definição da capacidade de geração de escoamento superficial de cada superfície pode ser definida pelos valores do coeficiente de escoamento superficial. Com os dados da granulometria do solo natural, foram simulados, utilizando o Hydrus1D, o escoamento superficial gerado por uma chuva de intensidade constante para uma duração de 30 minutos e tempo de retorno de 10 anos para a cidade do Recife, conforme equação de intensidade duração e frequência determinada para a cidade do Recife por Coutinho et al.(2010). Escolheu-se o tempo de retorno de 10 anos por se tratar de superfícies que compõem cenários públicos e a

literatura sugerir tempo de retorno entre 2 a 10 anos para área comerciais e avenidas, devendo ser escolhido o limite superior quando a falta de drenagem na região causas grandes transtornos para a cidade. Com relação ao tempo de duração da chuva, para minimizar os riscos do projeto, deve ser igual ao tempo de concentração.

Na Tabela 6 são apresentadas a precipitação total e efetiva gerada através da simulação.

Tabela 6 - Coeficiente de escoamento superficial direto para a superfície sem grama, superfície gramada, playground infantil e pavimento permeável

<b>Superfície</b>	<b>Precipitação Total (mm)</b>	<b>Precipitação Efetiva (mm)</b>	<b>Coeficiente de Escoamento</b>
Área sem Grama	39	0,12	0,30
Área Gramada	39	32,5	0,83
Playground Infantil	39	0,0	0,0
Pavimento Permeável	39	10,5	0,27

Fonte: A Autora, 2018.

A superfície do playground infantil apresentou o menor coeficiente de escoamento superficial, com precipitação efetiva igual a 0 mm, ou seja, a simulação de chuva não gerou lâmina de escoamento superficial. Enquanto que a área gramada apresentou o maior coeficiente de escoamento superficial.

Analisando todos os resultados apresentados na Tabela 6, que a maior parte da lâmina precipitada foi convertida em lâmina infiltrada, com exceção da área gramada, em que apenas 6,5 mm de lâmina de água infiltrou e reflete a hipótese de compactação do solo.

Todas as superfícies estudadas, por apresentarem algum grau de permeabilidade, obtiveram redução no escoamento superficial gerado pela simulação de chuva constante com relação ao que seria gerado em uma superfície impermeável com taxa de infiltração nula, ou seja, escoamento superficial de toda a precipitação. Ressalta-se que as áreas analisadas não estão tendo a devida manutenção, como por exemplo o projeto de pavimento piloto que estava sem alguma limpeza, conforme Figura 19, e a área gramada, com resultados indicando solo compactado, possivelmente devido ao uso como passagem de pedestre. Essa falta de manutenção adequada representa uma margem para incrementos na infiltração, havendo caso haja os cuidados necessários para cada tipo de superfície.

Uma infraestrutura verde relacionada à gestão das águas urbanas, portanto, ao pressupor o uso de superfície permeável reduz o escoamento superficial na região, reaproximando o ciclo

hidrológico urbano do natural. Essas infraestruturas não comprometem a drenagem pluvial em outra região ao reduzir a drenagem da bacia em que está localizada, nem comprometerão a drenagem da bacia em que está localizada em um período mais adiante, desde que tomadas as devidas medidas para manutenção. Assim, mostram-se como uma solução sustentável e alinhada aos Objetivos do Desenvolvimento Sustentável definidos pelas Nações Unidas que incluem a disponibilidade e gestão sustentável da água e saneamento para todos (PNUD, 2018).

## 5 CONCLUSÃO

A partir da aplicação da metodologia Beerkan e seguindo o critério da condutividade hidráulica saturada, as superfícies a serem priorizadas seriam as equivalentes a do playground infantil, seguido da área sem grama, do pavimento permeável e da área gramada.

Com relação a geração de escoamento superficial, as superfícies a serem priorizadas também seriam a do playground infantil, seguido da área sem grama, do pavimento permeável e da área gramada.

Em 03 superfícies, playground infantil, área sem grama e pavimento permeável, as simulações numéricas demonstraram que a maior parte da lâmina precipitada foi convertida em infiltração, evidenciando a importância ambiental de superfícies permeáveis na redução do escoamento superficial e confirmando que infraestruturas verdes são estratégias sustentáveis que reaproximam o ciclo hidrológico urbano ao natural.

Apesar da área gramada não ter mostrado resultados condizentes com o esperado devido a falta de manutenção adequada, comprova-se, a partir do resultado das três outras superfícies, o impacto positivo, na gestão de recursos hídricos, da implementação de projetos compostos por infraestruturas verdes como um parque urbano. Confirmou-se que é possível aumentar o percentual do volume infiltrado em um evento de precipitação a partir do uso daquelas superfícies .

Analisando a situação da cidade do Recife em dias de eventos de precipitação intensa, confirma-se a urgência de serem desenvolvidos e implementados novos projetos compostos por infraestruturas verde. O Parque Capibaribe, então, ao prever a implementação de parques integrados ao longo de 15 km da margem do Rio Capibaribe, compostos por áreas verdes, representará um grande avanço na gestão de recursos hídricos da cidade.

## REFERÊNCIAS

- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 16071**: Playgrounds. Rio de Janeiro: ABNT, 2012.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6502**: Rochas e solos. Rio de Janeiro: ABNT, 1995.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7181**: solo: análise granulométrica. Rio de Janeiro: ABNT, 1984. 13 p.
- ALMEIDA, L. Q.; CORRÊA, A. C. B. Dimensões da negação dos rios urbanos nas metrópoles brasileiras: o caso da ocupação da rede de drenagem da planície do Recife, Brasil. **Geo UERJ**, v.1, n. 23, p. 114-135, 2012.
- ALVES, E. M. **Aplicação do programa HYDRUS -1D em solo cultivado com feijão Caupi**. 2009. Dissertação (Mestrado em Tecnologia Energéticas e Nucleares) – Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2009. 83 f.
- ANGULURI, R.; NARAYANAN P. Role of green space in urban planning: Outlook towards smart cities. **Urban Forestry & Urban Greening**, n. 25, p. 58-65, 2017.
- BALDESSAR, S. M. N. **Telhado verde e sua contribuição na redução da vazão da água pluvial escoada**. 2012. Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Construção Civil, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2012. 125 f.
- BENINI, S. M. **Infraestrutura verde como prática sustentável para subsidiar a elaboração de planos de drenagem urbana: estudo de caso da cidade de Tupã/SP**. 2015. Tese (Doutorado em Geografia) - Faculdade de Ciência e Tecnologia, Universidade Estadual de São Paulo, Presidente Prudente, 2015. 220 p.
- BERLAND, A., SHIFLETT, S. A., SHUSTER, W. D., GARMESTANI, A. S., GODDARD, H. C., HERRMANN, D. L., e HOPTON, M. E. The role of trees in urban stormwater management. **Landscape and Urban Planning**, v. 162, p. 167-177, 2017.
- BEUTLER, A. N.; CENTURION, J. F.; SOUZA, Z. M.; ANDRIOLI, I.; ROQUE, C. G. Retenção de água em dois tipos de Latossolos sob diferentes usos. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 26, n. 3, p.829-834, 2002.
- BROOKS, R. H.; COREY, A. T. **Hydraulic properties of porous media**. Hydrology Paper, n.3, Fort Collins: Colorado State University, 1964. 27f.
- CAMPANA, N. A.; TUCCI, C. E. M. Estimativa de área impermeável de microbacias urbanas. **Caderno de Recursos Hídricos**, v. 12, n. 2, p. 79-94, 1994.
- CARASEK, M., MELO, E. F. R. Q.; MELO, R. H. R. Q. Parques urbanos na promoção da qualidade de vida estudo de caso em Passo Fundo, RS. **Revista Nacional de Gerenciamento de Cidades**, v.5, p. 35, 2017.

CAVALCANTI, G. I. F. N. **Caracterização hidrodinâmica de solos de unidades geoambientais de Pernambuco a partir da metodologia Beerkan**. 2012. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2012. 97f.

CONDAPPA, D.; SORIA UGALDE, J. M., ANGULO-JARAMILLO, R., HAVERKAMP, R. **Méthode Beerkan**. Caractérisation des propriétés hydrodynamiques des sols non saturés. Rapport Interne Hydrologie de la Zone Non Saturés - LTHE, Grenoble: Université de Grenoble, 2002. 82 p.

CORMIER, N. S.; PELLEGRINO, P. R.M. Infraestrutura verde: uma estratégia paisagística para a água urbana. **Paisagem e Ambiente**, n. 25, p. 127-142. 2008.

COUTINHO, A. P; SILVA, F. B; SILVA, R. O; ANTONINO, A. C. D; MONTENEGRO, S. M. G. L. Determinação de equações de chuvas intensas para municípios das mesorregiões do Estado de Pernambuco com dados pluviométricos. *In*: SIMPÓSIO DE RECURSOS HÍDRICOS DO NORDESTE, 2010, Fortaleza. **Anais** [...]. Fortaleza: SRHN, 2010. 14 p.

COUTINHO, A. P., LASSABATÈRE, L. MONTENEGRO, S., ANTONINO, C. D. A., ANGULO-JARAMILLO, R., CABRAL, J. J. S. P. Hydraulic characterization and hydrological behavior of a pilot permeable pavement in an urban center, Brazil: Hydrological behavior of a permeable pavement in an urban center. **Hydrological Processes**, v. 30, 4242–4254, 2016.

COUTINHO, A. P. **Pavimento permeável como técnica compensatória na drenagem urbana da Cidade do Recife**. 2011. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2011. 153 p.

DURNER, W. Hydraulic conductivity estimation for soils with heterogeneous pore structure. **Water Resource Research**, Washington, v. 30, n.1, p. 211 - 223. 1994.

ECHAVARIA, M.; ZAVALA, P.; CORONEL, L.; MONTALVO, T.; AGUIRRE, M. L. **Infraestructura verde en el sector de agua potable en America Latina y el Caribe: tendencias, retos y oportunidades**. Associação de Entes Reguladores de Água e Saneamento das Américas. 40p, 2015.

EMBRAPA. **Avaliação visual para o monitoramento da qualidade estrutural do solo: VESS e VSA**. 2015.

EMBRAPA. **Manual de métodos de análises de solos**. Rio de Janeiro: Embrapa-CNPQ, 2017. 212 p.

EMBRAPA. **Sistema Brasileiro de Classificação de Solos**. 3.ed. Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 2013. 312p.

ESTADOS UNIDOS. Department of Agriculture. Soil Science Division Staff. **Soil survey manual**. USDA Handbook 18. Government Printing Office Washington, 2017.

FONTES; A. R. M.; BARBASSA, A. P. Diagnóstico e prognóstico da ocupação e da impermeabilização urbana. **RBRH – Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, São Paulo, v. 8, n.2, p. 137 – 142, abr/jun 2003.

FRISCHENBRUDER, M., PELLEGRINO, P. Using Greenways to Reclaim Nature in Brazilian Cities. In: **Landscape and Urban Planning**. 67-78 p. 2005.

FUNDAÇÃO DE DESENVOLVIMENTO MUNICIPAL. Programa Viva o Morro. **Diagnóstico ambiental, urbanístico e social dos morros**. Coords. ALHEIROS, M. M.; SOUZA, M. A. A.; BITOUN, J.; GONÇALVES, E. M.; MEDEIROS, SÔNIA M. G. M. Recife: FIDEM, 2003.

HAVERKAMP, R.; PARLANGE, J.Y. Predicting the water-retention curve from particle-size distribution: I. sandy soils without organic matter. **Soil Science Society of America Journal, Madison**, v. 142, n.6, p. 325-339, 1986.

HAVERKAMP, R; ROSS, P. J.; SMETTEM, K. R. J.; PARLANGE, J. Y. The dimensional analysis of infiltration from the disc infiltrometer. 2. Physically based infiltration equation. **Water Resources Research**, v.30, n.3, p.2931-2935, 1994.

HAVERKAMP, R.; BOURAOUI, F.; ANGULO-JARAMILLO, R.; ZAMMIT, C.; DELLEUR, J.W. Soil properties and moisture movement in the unsaturated zone. In: DEULLEUR, J.W. (Ed.). **CRC Ground Water Engineering Handbook**, 120 p., 1998.

HERZOG, C. P.; ROSA, L. Z. Infraestrutura verde: sustentabilidade e resiliência para a paisagem urbana. **Revista LABVERDE**, São Paulo, v. 1, p. 92-115, set. 2010a. Disponível em: <http://www.revistas.usp.br/revistalabverde/article/view/61281>. Acesso em: 12 jan. 2018.

HERZOG, Cecilia P. Green infrastructure as a strategy to reinstate resilience to an urban watershed in Rio de Janeiro, Brazil. In: **Sessão paralela - Intelligent Urban Fabric**. 1st World Congress on Cities and Adaptation to Climate Change. Resilient Cities 2010. Bonn, 2010b. Disponível em: <http://resilientcities.iclei.org/bonn2010/program/sunday-30-may/parallel-sessions-g/#c194>.

HERZOG, Cecília Polacow. **Infra-estrutura verde para cidades mais sustentáveis**. Secretaria do Ambiente. Versão Executiva. [S. I.]: ICLEI Brasil, 2010c.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **Sinopse do Censo Demográfico 2010**. Rio de Janeiro: IBGE, 2010. Disponível em: [www.ibge.gov.br](http://www.ibge.gov.br). Acesso em: 17 jul. 2019.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **Censo demográfico 1940-2010**. Disponível em: <https://seriesestatisticas.ibge.gov.br/series.aspx?vcodigo=POP122>. Acesso em: 17 fev. 2018.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **Informações Ambientais**. – Mapa de Clima do Brasil. Disponível em: [ftp://geoftp.ibge.gov.br/informacoes\\_ambientais/climatologia/mapas/brasil/Map\\_BR\\_clima\\_2002.pdf](ftp://geoftp.ibge.gov.br/informacoes_ambientais/climatologia/mapas/brasil/Map_BR_clima_2002.pdf)> Acesso em: 21 fev. 2018.

KOSUGI, K. Lognormal distribution model for unsaturated soil hydraulic properties. **Water Resources Research**, Washington, v .32, n.9, p 2697 -2703, 1996.

LASSABATÈRE, L.; ANGULO-JARAMILLO, R.; SORIA, J. M.; CUENCA, R.; BRAUD, I.; HAVERKAMP, R. Beerkan estimation of soil transfer parameters through infiltration experiments – BEST. **Soil Science Society of American Journal**, v.70, p.521-532, 2006.

LIMA, C. A. G.; SILANS, A. P. Variabilidade espacial da infiltração de água no solo. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v.34, n.12, p.2311-2320, 1999.

MACHADO, J.L.; TORMENA, C.A.; FIDALSKI, J. e SCAPIM, C.A. Inter-relações entre as propriedades físicas e os coeficientes da curva de retenção de água de um Latossolo sob diferentes sistemas de uso. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, vol.32, n.2, p. 495-502, 2008.

MEDEIROS, C. F.; AFONSO, S. Espaços livres públicos: utilização de infraestrutura verde para otimizar a drenagem urbana nos centros históricos tombados. **Paisagem e Ambiente**, São Paulo, n. 39, p. 83-111, 2017.

MELO, T. dos A. T. DE; COUTINHO, A. P.; CABRAL, J. J. da S. P.; ANTONINO, A. C. D.; CIRILO, J. A. Jardim de chuva: sistema de biorretenção para o manejo das águas pluviais urbanas. **Ambiente Construído**, Porto Alegre, v. 14, n. 4, p. 147-165, 2014.

MELO NETO, J. C. Morte e Vida Severina. Ed. Alfaguara, Rio de Janeiro, 169 p., 2007.

MESQUITA, M. G. B. F.; MORAES, S. F. A dependência entre a condutividade hidráulica saturada e atributos físicos do solo. **Ciência Rural**, v.34, n.3, p.963-969, 2004.

BRASIL. Ministério do Meio Ambiente. **Recursos Hídricos**. Águas Subterrâneas.Ciclo Hidrológico. Disponível em: <http://www.mma.gov.br/agua/recursos-hidricos/aguas-subterraneas/ciclo-hidrologico.html>. Acesso em: 12 jan. 2018.

MONTEIRO, A. L. N. Avaliação de lavagem incompleta de sais em Neossolo Flúvico utilizando modelagem computacional. 2007. Tese (Doutorado em Agronomia - Ciência do Solo) - Universidade Federal Rural de Pernambuco, Recife, 2007. 103p.

POÇAS, C. D. **Utilização da tecnologia de wetlands para tratamento terciário: controle de nutrientes**. 2015. Dissertação (Mestrado) - Curso de Ambiente, Saúde e Sustentabilidade, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2015. 109 p. Disponível em: [www.teses.usp.br/teses/disponiveis/6/6139/tde23112015.../CristianeDiasPocas.pdf](http://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/6/6139/tde23112015.../CristianeDiasPocas.pdf). Acesso em: 10 dez. 2018.

PORTLAND. **Stormwater Management Manual (SWMM)**. 502 p., 2016. Disponível em: <https://www.portlandoregon.gov/bes/64040>. Acesso em: 20 out. 2018.

POTT, C. A. & DE MARIA, I.C. Comparação de métodos de campo para determinação da velocidade de infiltração básica. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.27, p.19-27, 2003.

PREFEITURA DA CIDADE DO RECIFE. Secretaria de Desenvolvimento Sustentável e Meio Ambiente do Recife. **Parque Capibaribe**. Recife: PCR; UFPE, 2013. Convênio Técnico. Disponível em: <http://parquecapibaribe.org/>. Acesso em: 12 jan. 2018.

PREFEITURA DA CIDADE DO RECIFE. Secretaria de Desenvolvimento Sustentável e Meio Ambiente do Recife. **Parque Capibaribe**. Recife, PE. 2018. Disponível em: <http://meioambiente.recife.pe.gov.br/parque-capibaribe>. Acesso em: 17 fev. 2018.

PREFEITURA DA CIDADE DO RECIFE. Secretaria de Planejamento e Gestão. **Plano Diretor de Drenagem da Cidade do Recife**. 2015. Disponível em: <http://conselhodacidade.recife.pe.gov.br/sites/default/files/biblioteca/PDDR%20-20PLANO%20DIRETOR%20DE%20DRENAGEM%20DO%20RECIFE.pdf>. Acesso em: 12 jan. 2018.

PREFEITURA DA CIDADE DO RECIFE. Secretaria de Planejamento e Gestão. **Plano Diretor de Drenagem da Cidade do Recife**. 2017. Disponível em: <http://conselhodacidade.recife.pe.gov.br/sites/default/files/PDDR%20apresenta%C3%A7%C3%A3o%20para%20o%20Conselho%20da%20Cidade%2014032017.pdf>. Acesso em: 12 jan. 2018.

PREVEDELLO, C. L. **Física do solo com problemas resolvidos**. Curitiba, Salesward-Discovery, 1996. 446p.

PROGRAMA DAS NAÇÕES UNIDAS PARA O DESENVOLVIMENTO - PNUD. Cartilha de Perguntas e Resposta dos ODS. 2018. Disponível em: <http://www.br.undp.org/content/brazil/pt/home/library/ods/cartilha-de-perguntas-e-respostas-dos-ods.html>. Acesso em: 20 out. 2018.

REICHARDT, K. **A água em sistemas agrícolas**. São Paulo: Manole, 188p., 1987.

REICHARDT, K.; TIMM, L. C. **Solo, planta e atmosfera: conceitos, processos e aplicações**. São Paulo: Manole, 2004. 478 p.

RIBAS, L. V. S. **Experimentação e modelagem numérica do fenômeno de infiltração em um pavimento permeável para drenagem urbana**. 2007. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) Universidade Federal de Pernambuco, 2007. 153 p.

RIBEIRO, M. R.; OLIVEIRA, L. B. de; ARAÚJO FILHO, J. C. de. III – Caracterização morfológica do solo. *In*: KER, J. C.; CURI, N.; SCHAEFER, C. E. G. R.; VIDAL-TORRADO, P. **Pedologia: fundamentos**. Viçosa, MG: SBCS, 2012.

RIGHETTO A. M. **Manejo de águas pluviais urbana**. PROSAB 5. Rio de Janeiro: ABES, 396 p., 2009.

SAADEH, S.; RALLA, A.; AL-ZUBI, Y.; WU, R. e HARVEY, J. Application of fully permeable pavements as a sustainable approach for mitigation of stormwater runoff. **International Journal of Transportation Science and Technology**, v.8, n.4, p. 338-350, 2019.

SALATI, E. **Controle de qualidade de água através de sistemas de Wetlands construídas**. Trabalho de pesquisa científica da CEA/UNESP – Universidade de Santo Amaro, São Paulo, 16 p., 2001.

SANTOS, F. M.; LOLLO J. A. Cartografia digital para estimativa de escoamento superficial visando ao planejamento urbano. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 21, n. 4, p. 663-675, 2016.

SANTOS, Milton. **A Urbanização brasileira**. São Paulo: Hucitec, 1993.

SANTOS, P. T. da S.; SANTOS, S. M. dos; MONTENEGRO, S. M. G. L.; COUTINHO, A. P.; MOURA, G. S. S. de; ANTONINO, A. C. D. Telhado verde: desempenho do sistema construtivo na redução do escoamento superficial. **Ambiente Construído**, Porto Alegre, v. 13, n. 1, p. 161-174, jan./mar. 2013.

SEZERINO, P.H.; BENTO, A.P.; DECEZARO, S.T.; MAGRI, M.E.; PHILIPPI, L.S. Experiências brasileiras com wetlands construídos aplicados ao tratamento de águas residuárias: parâmetros de projeto para sistemas horizontais. **Eng. Sanit. Ambient.**, Rio de Janeiro, v. 20, n. 1, p. 151-158, 2015.

SILVA, A.P.; TORMENA, C.A.; DIAS JUNIOR, M.S.; IMHOFF, S. e KLEIN, V.A. Indicadores da qualidade física do solo. *In*: VAN LIER. Q. J. (Ed.) – **Física do Solo**. Viçosa, Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 298 p., 2010.

SILVA, G.J.A. da; ROMERO, M.A.B. Urbanismo Sustentável no Brasil e a Construção de Cidades para o Novo Milênio. *In*: SEMINÁRIO INTERNACIONAL ARQUITETURA, URBANISMO, DESIGN: Mensagens e Produtos para Ambientes Sustentáveis. 8. 2010. São Paulo. **Anais [...]**. São Paulo: Universidade de São Paulo, 2010.

SILVA, M. K. **Modelo para pré-dimensionamento de bacias de retenção para controle da poluição difusa das águas pluviais no município de Porto Alegre**. 2009. Dissertação (Mestrado em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2009. 140 p.

SINGAPORE. **ABC Waters Design Guidelines**. Public Utilities Board (“PUB”). 2. ed., 2011. Disponível em: [http://www.pub.gov.sg/abcwaters/abcwatersdesignguidelines/Documents/ABCWatersDesignGuidelines\\_2011.pdf](http://www.pub.gov.sg/abcwaters/abcwatersdesignguidelines/Documents/ABCWatersDesignGuidelines_2011.pdf). Acesso em: 20 de outubro de 2018.

SOBRINHO, T. A.; VITORINO, A.T.C.; SOUZA, L.C.F.; GONÇALVES, M.C., CARVALHO D.F. Infiltração de água no solo em sistemas de plantio direto e convencional. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.7, n.2, p.191-196, 2003.

SOUZA, E. S.; ANTONINO, A. C.D; ANGULLO-JARAMILLO, Rafael; MACIEL NETTO, A. Caracterização hidrodinâmica de solos: aplicação do método Beerkan. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental** (Impresso), v. 12, p. 128-135, 2008.

SOUZA, V. C. B. Gestão da drenagem urbana no Brasil: Desafios para a sustentabilidade. **Revista Eletrônica de Gestão e Tecnologias Ambientais, GESTA**, v. 1, n. 1, p. 58 – 72, 2013.

SUZUKI, L.E.A.S. **Compactação do solo e sua influência nas propriedades físicas do solo e crescimento e rendimento de culturas**. 2005. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria. 149 p., 2005.

TÖRZS, T.; LU, G.; MONTEIRO, A. O.; WANG, D.; GRABE, J. e OESER, M. Hydraulic properties of polyurethane-bound permeable pavement materials considering unsaturated flow. **Construction and Building Materials**, v. 212, p. 422-430, 2019.

TUCCI, C. E. M. Águas urbanas. **Revista Estudos Avançados**, USP, v. 22, n 63, p.97-112, 2008.

TUCCI, C. E. M. Gerenciamento de Drenagem Urbana. **RBRH - Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v.7, n.1, p. 5-27, 2002.

TUCCI, C.E.M. **Gestão de Águas Pluviais Urbanas**, Ministério das Cidades, Global Water Partnership, World Bank, Unesco. 2005.

UNITED NATIONS ENVIRONMENT PROGRAMME. **Green Infrastructure Guide for Water Management**: Ecosystem-based management approaches for water-related infrastructure projects. 2014. Disponível em:

[http://cmsdata.iucn.org/downloads/green\\_infrastructure\\_guide.pdf](http://cmsdata.iucn.org/downloads/green_infrastructure_guide.pdf)>. A em: 13 de julho de 2017.

UNITED STATES DEPARTMENT OF AGRICULTURE - SOIL CONSERVATION SERVICE – USDA-SCS. **National engineering handbook, hydrology section**. Washington, D.C., 1972.

VAN GENUCHTEN, M.Th. A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v.44, p. 892-898, 1980.

VOGEL, T.; CÍSLEROVÁ, M. On the reliability of insaturated hydraulic conductivity calculated from the moisture retention curve. **Phoenix**, v.3, n .1, p. 1- 15. 1988.

ZATARÁIN, F.; FUENTES, C.; HAVERKAMP, R.; ANTONIO, A. C. D. Predicción de la forma de la característica de humedad del suelo a partir de lacurvaganulométrica. *In*: CONGRESO NACIONAL DE IRRIGACION, 13., 2003, Zacatecas. **Resumos** [...]. Zacatecas: CNI, 2003.

ZHU, H. ; YU, M. ; ZHU, J. ; LU, H. ; CAO, R. Simulation study on effect of permeable pavement on reducing flood risk of urban runoff. **International Journal of Transportation Science and Technology**, v. 8, p. 373-382, 2019.