

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO  
CENTRO DE TECNOLOGIA E GEOCIÊNCIAS  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL  
PROGRAMA DE PÓS – GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL**

**PAULO HENRIQUE LOPES BEZERRA**

**DINÂMICA DA ÁGUA EM TRINCHEIRA DE INFILTRAÇÃO  
EM LOTE URBANO**

**Recife**

**2018**

**PAULO HENRIQUE LOPES BEZERRA**

**DINÂMICA DA ÁGUA EM TRINCHEIRA DE INFILTRAÇÃO  
EM LOTE URBANO**

Dissertação submetida ao corpo docente do Programa em Engenharia Civil da Universidade Federal de Pernambuco – UFPE como parte dos requisitos necessários à obtenção do grau de Mestre em Engenharia Civil.

Área de concentração: Tecnologia Ambiental e Recursos Hídricos.

Orientadora: Profa. Dra. Suzana Maria Gico Lima Montenegro.

Coorientador: Prof. Dr. Artur Paiva Coutinho.

**Recife**

**2018**

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

B574d Bezerra, Paulo Henrique Lopes.  
Dinâmica da água em trincheira de infiltração em lote urbano / Paulo Henrique  
Lopes Bezerra. – 2018.  
87 folhas, il., gráfs., tabs.

Orientadora: Profa. Dra. Suzana Maria Gico Lima Montenegro.  
Coorientador: Prof. Dr. Artur Paiva Coutinho.

Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Pernambuco. CTG.  
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, 2018.  
Inclui Referências.

1. Engenharia Civil. 2. Drenagem urbana. 3. Técnicas compensatórias.  
4. Beerkan. 5. HYDRUS-1D. 6. Modelo Bouwer. I. Montenegro, Suzana Maria  
Gico Lima. (Orientadora). II. Coutinho, Artur Paiva. (Coorientador). III. Título.

UFPE

624 CDD (22. ed.)

BCTG/2018-396



UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO  
PROGRAMA DE PÓS – GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL  
A comissão examinadora da Defesa de Dissertação de Mestrado

**DINÂMICA DA ÁGUA EM TRINCHEIRA DE INFILTRAÇÃO EM LOTE URBANO**

Defendida por

Paulo Henrique Lopes Bezerra

Considerada o candidato APROVADO

Recife, 30 de julho de 2018

Orientadora – Profa. Dra. Suzana Maria Gico Lima Montenegro – UFPE

Coorientador – Prof. Dr. Artur Paiva Coutinho – UFPE

Banca Examinadora:

---

Profa. Dra. Suzana Maria Gico Lima Montenegro – UFPE

(orientadora)

---

Prof. Dr. Antônio Celso Dantas Antonino – UFPE

(examinador externo)

---

Prof. Dr. Edevaldo Miguel Alves – UFPE

(examinador externo)

## **AGRADECIMENTOS**

A Deus... por tudo.

Aos meus pais, Ana e Antônio, e minhas irmãs, Priscilla e Patrícia, por estarem sempre ao meu lado em toda minha caminhada, pelo amor, carinho e paciência nos momentos difíceis. Aos meus tios, Ilson e Eunice, pelo carinho e pela ajuda em minha educação.

A Jéssica Maria, minha namorada, por acreditar em mim, me ajudar e sempre me encorajar para superar qualquer adversidade. E sua família, Ester e Marcos por fazerem parte da minha vida.

À minha orientadora, Professora Suzana Montenegro, pelos ensinamentos e conhecimento repassado desde os tempos de Iniciação Científica na graduação até este trabalho.

Ao meu coorientador, Professor Artur Coutinho, que foi fundamental para o desenvolvimento deste trabalho e por ter se tornado um amigo.

Aos professores do Programa de Pós-Graduação, pelo apoio e conhecimento transmitido ao longo deste período.

Aos amigos do Grupo de Recursos Hídricos (GRH), Ana, Bruno, Albert e Tássia. Aos amigos do grupo de pesquisa de física dos solos, Ana Emília, Edevaldo, Felipe Galdino, Larissa Fernandes, Larissa Ribas, Maurício e Severino Martins, pela ajuda a em trabalhos de campo e conclusão deste trabalho.

A todos meus amigos pelo apoio e conselhos.

A FACEPE pela concessão da bolsa de mestrado.

A todos que, direta ou indiretamente, ajudaram para a obtenção do título de mestre.

## RESUMO

O constante crescimento da população urbana nas grandes cidades brasileiras provoca drástica mudança no uso e ocupação do solo dos centros urbanos. Essa mudança amplia a área impermeabilizada diminuindo a infiltração das águas pluviais no solo e aumenta o volume de escoamento superficial da vazão de pico do hidrograma urbano. Com isso, as técnicas compensatórias para a drenagem urbana visam o controle da precipitação efetiva. A trincheira de infiltração é uma técnica compensatória que consiste num reservatório preenchido com material granular, com o objetivo de infiltrar o volume escoado superficialmente gerado pelas precipitações pluviométricas, diminuindo a precipitação efetiva. O objetivo deste trabalho é o monitoramento de fluxo da água numa trincheira de infiltração instalada em um lote na cidade do Recife (PE). Neste trabalho foi avaliado o comportamento da trincheira com os eventos de precipitação por meio de sensores de níveis, taxas de armazenamentos e taxas de infiltração. Foram determinadas as características físicas e hidrodinâmicas do solo, através de ensaios de infiltração e aplicação da metodologia Beerkan. Ademais, foram realizadas simulações da dinâmica da água no solo da trincheira utilizando o HYDRUS-1D. O modelo Bouwer (1969) foi utilizado para realizar a modelagem analítica da trincheira de infiltração analisando os eventos precipitados, onde os parâmetros de resistências hidráulicas da base e paredes apresentaram valores diferentes para os diversos cenários estimados. Analisando os dados do monitoramento, verificou-se que a trincheira de infiltração obteve desempenho positivo, infiltrando uma grande parcela do volume escoado. A caracterização do solo - forneceu junto com a metodologia Beerkan - os parâmetros hidrodinâmicos do solo da trincheira. A classificação deste identificou a predominância de classe textural franca e franco-arenosa. As simulações utilizando o modelo Bouwer (1969) obtiveram alta correlação entre os dados observados e simulados para as vazões de infiltração. Apresentaram valores de resistências hidráulicas diferentes para a base e parede da estrutura. Por fim, a análise de sensibilidade da trincheira de infiltração utilizando o software HYDRUS – 1D mostrou-se mais sensível ao parâmetro  $K_s$  para a infiltração acumulada e  $\theta_s$  para o volume na trincheira de infiltração.

**Palavras-chave:** Drenagem urbana. Técnicas compensatórias. Beerkan. HYDRUS-1D. Modelo Bouwer.

## ABSTRACT

The constant growth of the urban population in large Brazilian cities causes a drastic change in the use and occupation of the soil of urban centers. This change extends the waterproofing area by reducing the infiltration of rainwater in the soil and increases the volume of surface flow of the peak flow of the urban hydrograph. Thus, the compensatory techniques for urban drainage aim at the control of effective precipitation. The infiltration trench is a compensatory technique consisting of a reservoir filled with granular material, with the purpose of infiltrating the surface drained volume generated by rainfall, decreasing the effective precipitation. The objective of this work is the monitoring of water flow in an infiltration trench installed in a lot in the city of Recife (PE). In this work the behavior of the trench with precipitation events was evaluated through level sensors, storage rates and infiltration rates. The physical and hydrodynamic characteristics of the soil were determined through infiltration tests and application of the Beerkan methodology. In addition, water dynamics simulations were performed on trench soil using HYDRUS-1D. The Bouwer model (1969) was used to perform the analytical modeling of the infiltration trench by analyzing the precipitated events, where the parameters of hydraulic resistances of the base and walls presented different values for the different estimated scenarios. Analyzing the monitoring data, it was verified that the infiltration trench obtained positive performance, infiltrating a large portion of the drained volume. Soil characterization - provided along with the Beerkan methodology - the hydrodynamic parameters of the trench soil. The classification of this identified the predominance of frank and sandy-loam textural class. The simulations using the Bouwer model (1969) obtained a high correlation between observed and simulated data for infiltration flows. They presented values of different hydraulic resistances for the base and wall of the structure. Finally, the sensitivity analysis of the infiltration trench using the HYDRUS - 1D software showed to be more sensitive to the parameter  $K_s$  for the accumulated infiltration and  $\theta_s$  for the volume in the infiltration trench.

**Keywords:** Urban drainage. Compensatory techniques. Beerkan. HYDRUS-1D. Model Bouwer.

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

|           |   |    |
|-----------|---|----|
| Figura 1  | - Vantagens da instalação de dispositivos de infiltração e percolação.....  | 20 |
| Figura 2  | - Exemplo de uma trincheira de infiltração.....   | 23 |
| Figura 3  | - Representação simplificada do sistema trifásico do solo.....  | 26 |
| Figura 4  | - Curva característica representativa de diferentes solos.....  | 30 |
| Figura 5  | - Representação da curva de condutividade hidráulica.....   | 31 |
| Figura 6  | - Notação utilizada por Bouwer (1969).....  | 36 |
| Figura 7  | - Curva que relaciona condutividade hidráulica e pressão intersticial..   | 37 |
| Figura 8  | - Localização da cidade do Recife.....  | 39 |
| Figura 9  | - Detalhes da Trincheira de Infiltração: vista em planta, corte longitudinal e vista 3D.....  | 42 |
| Figura 10 | - Trincheira de Infiltração e instrumentação para monitoramento: (1), piezômetro (2), piezômetro (3), vertedor triangular (4), caixa de passagem (5) e pluviômetro (6)..... | 43 |
| Figura 11 | - Curvas de infiltração acumulada em função do tempo da trincheira de infiltração.....  | 53 |
| Figura 12 | - Curva de retenção média para as camadas do solo da trincheira de infiltração ajustadas.....   | 58 |
| Figura 13 | - Curva de condutividade hidráulica média para as camadas do solo da trincheira de infiltração ajustadas.....   | 59 |
| Figura 14 | - Monitoramento contínuo da precipitação, vazão de entrada e nível de água no interior da trincheira de infiltração para o período de estudo analisado.....                 | 59 |
| Figura 15 | - Evento E1 da trincheira de infiltração.....   | 60 |
| Figura 16 | - Evento E2 da trincheira de infiltração.....   | 61 |
| Figura 17 | - Evento E3 da trincheira de infiltração.....   | 62 |
| Figura 18 | - Evento E4 da trincheira de infiltração.....   | 63 |
| Figura 19 | - Evento E5 da trincheira de infiltração.....   | 64 |
| Figura 20 | - Porcentagem do volume infiltrado por evento analisado.....  | 65 |

|           |   |  |    |
|-----------|---|--|----|
| Figura 21 | - | Evolução da infiltração no interior da trincheira de infiltração simulados pelo software HYDRUS 1D. Parâmetros: $\alpha$ (A), $K_s$ (B), $\theta_s$ (C) e $n$ (D)..... | 68 |
| Figura 22 | - | Volume da trincheira de infiltração simulado pelo HYDRUS 1D. Parâmetros: $\alpha$ (A), $K_s$ (B), $\theta_s$ (C) e $n$ (D).....  | 70 |
| Figura 23 | - | Varição dos parâmetros.....  | 72 |
| Figura 24 | - | Curva de recessão do evento 1.....   | 73 |
| Figura 25 | - | Ajuste do modelo de Bouwer para os dados observados.....   | 74 |

## LISTA DE TABELAS

|           |   |  |    |
|-----------|---|--|----|
| Tabela 1  | - | Caracterização de estruturas de drenagem compensatórias.....   | 21 |
| Tabela 2  | - | Médias mensais da normal climatológica no período de 1961 a 2016, na Estação do Recife (Curado): precipitação, evaporação, temperatura, umidade relativa e insolação.....              | 40 |
| Tabela 3  | - | Dados de entrada inseridos no HYDRUS-1D para análise de sensibilidade.....   | 49 |
| Tabela 4  | - | Massa específica do solo, massa específica das partículas do solo, porcentagem de argila, silte e areia e a classificação textural do perfil de solo da trincheira de infiltração..... | 52 |
| Tabela 5  | - | Parâmetros de forma das relações $h(\theta)$ e $K(\theta)$ .....   | 54 |
| Tabela 6  | - | Valores de $\theta_r$ , $\theta_s$ , $h_g$ , $K_s$ e $S$ obtidos através da metodologia Beerkan para diferentes camadas da trincheira de infiltração.....                              | 55 |
| Tabela 7  | - | Escalas características $\lambda_c$ , $\lambda_m$ e (quantidade de poros por metro quadrado ( $C\lambda_m$ )) do solo da trincheira de infiltração.....                                | 56 |
| Tabela 8  | - | Parâmetros hidráulicos ajustados para a hipótese de Mualen (1976) pelo RETC.....   | 57 |
| Tabela 9  | - | Monitoramento dos eventos analisados.....  | 66 |
| Tabela 10 | - | Taxas de infiltração em cada momento de recessão de cada evento e a média geral do estudo. Taxa em cm/h.....   | 67 |

## LISTA DE SÍMBOLOS

|                 |   |
|-----------------|---|
| A               | Parâmetro da equação de Philip                |
| C               | Coefficiente de escoamento                    |
| C(h)            | Capacidade Capilar                            |
| $C_{\lambda m}$ | Número de poros                               |
| D               | Diâmetro efetivo de uma partícula de solo     |
| $D_g$           | Parâmetro de escala do tamanho das partículas |
| F(D)            | Distribuição dos tamanhos das partículas      |
| g               | Aceleração da gravidade                       |
| $\psi$          | Potencial total                               |
| $\psi_g$        | Potencial gravitacional                       |
| $\psi_{os}$     | Potencial osmótico                            |
| $\psi_P$        | Potencial pressão                             |
| $h_g$           | Parâmetro de normalização                     |
| I               | Infiltração acumulada                         |
| i               | Taxa de Infiltração                           |
| $i_f$           | Taxa de Infiltração final                     |
| $i_i$           | Taxa de Infiltração Inicial                   |
| K               | Condutividade Hidráulica                      |
| $K_s$           | Condutividade Hidráulica Saturada             |
| $K_c$           | Condutividade Hidráulica da camada colmatada  |
| m               | Parâmetro de forma da curva de retenção       |
| M e N           | Parâmetro de forma da curva de F(D)           |
| $M_a$           | Massa de ar                                   |
| $M_l$           | Massa de Agua                                 |
| $M_s$           | Massa de sólidos                              |
| $M_t$           | Massa total de uma amostra de solo            |
| n               | Parâmetro de forma da curva de retenção       |
| $p_m$           | Índice de forma do meio                       |
| q               | Fluxo   |
| S               | Sorvidade do solo                             |

|             |   |
|-------------|---|
| $s$         | Dimensão fractal                                |
| TR          | Tempo de retorno                                |
| $V_a$       | Volume de ar                                    |
| $V_l$       | Volume de água                                  |
| $V_s$       | Volume de sólidos                               |
| $V_t$       | Volume total de uma amostra de solo             |
| $V_v$       | Volume de vazios                                |
| $z$         | Potencial gravitacional                         |
| $\alpha$    | Parâmetro de normalização                       |
| $\beta$     | Constante de decaimento                         |
| $\delta$    | Parâmetro de forma da difusividade              |
| $\eta$      | Parâmetro de forma da equação de Brooks & Corey |
| $\eta_b$    | porosidade da brita                             |
| $w$         | Umidade gravimétrica                            |
| $\theta_r$  | Umidade volumétrica residual                    |
| $\theta_s$  | Umidade volumétrica de saturação                |
| $\theta$    | Umidade volumétrica                             |
| $\lambda_c$ | Escala de comprimento capilar                   |
| $\lambda_m$ | Raio característico de poros                    |
| $\mu$       | Coefficiente de viscosidade dinâmica            |
| $\rho_a$    | Massa específica da água                        |
| $\rho_p$    | Massa específica das partículas de solo         |
| $\phi$      | Porosidade aparente                             |
| $e$         | Índice de vazios                                |
| GS          | Grau de saturação                               |
| $S_e$       | Saturação efetiva                               |
| $\rho$      | Massa específica do solo                        |
| $\sigma$    | Tensão superficial da água                      |

## SUMÁRIO

|            |   |           |
|------------|---|-----------|
| <b>1</b>   | <b>INTRODUÇÃO .....</b>   | <b>14</b> |
| <b>2</b>   | <b>OBJETIVOS.....</b>   | <b>17</b> |
| <b>3</b>   | <b>REVISÃO DE LITERATURA .....</b>  | <b>18</b> |
| <b>3.1</b> | <b>A urbanização e os impactos sobre a drenagem urbana .....</b>          | <b>18</b> |
| <b>3.2</b> | <b>Evolução dos sistemas de drenagem.....</b>                             | <b>18</b> |
| <b>3.3</b> | <b>Técnicas compensatórias .....</b>                                      | <b>19</b> |
| 3.3.1      | Sistemas de infiltração.....  | 19        |
| 3.3.2      | Trincheira de infiltração .....   | 22        |
| <b>4</b>   | <b>FUNDAMENTAÇÃO TEORICA .....</b>  | <b>26</b> |
| <b>4.1</b> | <b>Definição de solo.....</b>   | <b>26</b> |
| <b>4.2</b> | <b>Propriedades básicas do solo.....</b>                                  | <b>27</b> |
| 4.2.1      | Umidade gravimétrica .....  | 27        |
| 4.2.2      | Umidade volumétrica .....   | 27        |
| 4.2.3      | Massa específica do solo .....  | 27        |
| 4.2.4      | Massa específica das partículas do solo .....                             | 27        |
| 4.2.5      | Porosidade aparente.....  | 28        |
| 4.2.6      | Índice de vazios .....  | 28        |
| 4.2.7      | Grau de saturação .....   | 28        |
| 4.2.8      | Saturação efetiva.....  | 28        |
| 4.2.9      | Condutividade hidráulica.....   | 29        |
| <b>4.3</b> | <b>Potencial da água no solo.....</b>                                     | <b>29</b> |
| <b>4.4</b> | <b>Retenção da água no solo.....</b>                                      | <b>30</b> |
| 4.4.1      | Curva de retenção de água no solo .....                                   | 30        |
| 4.4.2      | Curva de condutividade hidráulica .....                                   | 31        |
| <b>4.5</b> | <b>Fluxo da água no solo em meio poroso saturado e não saturado .....</b> | <b>33</b> |
| 4.5.1      | Equação de Darcy.....   | 33        |

|            |  |           |
|------------|--|-----------|
| 4.5.2      | Equação de Darcy-Buckingham .....  | 33        |
| 4.5.3      | Equação de Richards .....  | 34        |
| <b>5</b>   | <b>HYDRUS 1 – D .....</b>  | <b>35</b> |
| <b>6</b>   | <b>MODELO DE BOUWER.....</b>   | <b>36</b> |
| <b>7</b>   | <b>MATERIAL E MÉTODOS.....</b>   | <b>39</b> |
| <b>7.1</b> | <b>Área de estudo .....</b>  | <b>39</b> |
| <b>7.2</b> | <b>Monitoramento da Trincheira de Infiltração .....</b>                                | <b>41</b> |
| <b>7.3</b> | <b>Análise da Trincheira de Infiltração .....</b>                                      | <b>43</b> |
| <b>7.4</b> | <b>Caracterização do solo.....</b>   | <b>44</b> |
| 7.4.1.     | Ensaio de infiltração .....  | 44        |
| 7.4.2      | Propriedades hidráulicas do solo .....   | 44        |
| 7.4.3      | O método Beerkan .....   | 45        |
| 7.4.4      | Definição dos parâmetros de forma utilizado pelo BEST .....                            | 46        |
| 7.4.5      | Definição dos parâmetros de normalização utilizado pelo BEST .....                     | 46        |
| 7.4.6      | Escalas características .....  | 47        |
| 7.4.7      | Ajuste dos parâmetros de curva de retenção pelo RETC .....                             | 47        |
| <b>7.5</b> | <b>Análise de sensibilidade do software HYDRUS-1D .....</b>                            | <b>48</b> |
| <b>7.6</b> | <b>Modelo de Bouwer .....</b>  | <b>49</b> |
| <b>8</b>   | <b>RESULTADOS E DISCUSSÕES .....</b>   | <b>52</b> |
| <b>8.1</b> | <b>Propriedades físicas e hidrodinâmicas do solo .....</b>                             | <b>52</b> |
| <b>8.2</b> | <b>Monitoramento dos processos de armazenamento da Trincheira de Infiltração .....</b> | <b>59</b> |
| <b>8.3</b> | <b>Análise de sensibilidade .....</b>  | <b>68</b> |
| <b>8.4</b> | <b>Análise do modelo de Bouwer .....</b>   | <b>73</b> |
| <b>9</b>   | <b>CONCLUSÕES .....</b>  | <b>76</b> |
| <b>10</b>  | <b>RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....</b>                                       | <b>78</b> |
|            | <b>REFERÊNCIAS .....</b>   | <b>79</b> |

## 1 INTRODUÇÃO

À medida que ocorre o aumento populacional nos centros urbanos, há uma expansão das superfícies impermeáveis através das construções de novas edificações. Essa expansão, aliada ao mau planejamento urbano e a falta de controle do uso e ocupação do solo, altera o equilíbrio dos componentes do ciclo hidrológico, como o escoamento superficial, a infiltração e recarga natural dos aquíferos.

Outras consequências hidrológicas da impermeabilização são o aumento do volume e da velocidade do escoamento superficial. Com isso, as técnicas de infiltração e retenção das águas pluviais, como jardins de chuva (MELO et al., 2014), trincheira de infiltração (MELO et al., 2016), bacia de infiltração (COUTINHO et al., 2015) e pavimentos permeáveis (COUTINHO et al., 2016; JABUR et al., 2015) surgem como alternativas para a diminuição da precipitação efetiva, auxiliando no controle do escoamento superficial próximo da fonte geradora (LUCAS et al., 2015).

As técnicas alternativas abrangem a compreensão dos efeitos negativos advindos da urbanização, visando atuar sobre as causas dos impactos hidrológicos. As técnicas compensatórias atuam nos processos de armazenamento, detenção, retenção, interceptação, evapotranspiração e infiltração das águas pluviais (NASCIMENTO e BAPTISTA, 2009).

Essas técnicas de detenção, armazenamento e infiltração das águas pluviais são propostas como mecanismos de preservação natural do escoamento superficial, diminuindo as vazões a jusante, maximizando o controle de escoamento na fonte geradora e prevenindo efeitos adversos na cidade e na população.

Em países como Alemanha e Austrália, as técnicas compensatórias são difundidas junto aos órgãos públicos e projetistas devido ao caráter sustentável dessas propostas (AHIABLAME et al., 2013). Alguns estudos sobre técnicas compensatórias foram realizados no Brasil, particularmente pelo Grupo de Recursos Hídricos e Grupo de Física de Solo da UFPE, dentre eles destacam-se o telhado verde (SANTOS et al., 2013), jardins de chuva (MELO et al., 2014), trincheira de infiltração (MELO et al., 2016), bacia de infiltração (COUTINHO et al., 2015) e pavimentos permeáveis (COUTINHO et al., 2016).

No Brasil, apesar do crescente aumento dos números de estudos sobre a aplicabilidade dessas técnicas, sua utilização ainda é modesta, tendo com um dos fatores a falta de políticas públicas de incentivo a sua implementação (REIS et al., 2013).

Dentre as técnicas compensatórias, a trincheira de infiltração é uma estrutura do tipo controle na fonte baseado principalmente no processo de infiltração das águas pluviais, capaz de reter temporariamente as águas, promovendo a recarga do lençol freático e o aumento da disponibilidade da água no solo. Quando utilizada em lotes urbanos, a trincheira de infiltração reduz o volume de escoamento superficial gerado pela precipitação efetiva e retarda o pico do hidrograma urbano (JÚNIOR et al., 2015).

Como elemento técnico de projeto da trincheira de infiltração, destaca-se a condutividade hidráulica saturada do solo suporte. Esse parâmetro interfere no tempo de esvaziamento das trincheiras de infiltração, sendo uma variável importante para não ocorrer extravasamento da estrutura. No caso particular da cidade do Recife, onde ocorrem eventos frequentes de precipitação nos meses de maio, junho e julho, o sistema de infiltração deve ser projetado para suportar sucessivos eventos de precipitação pluviométrica. A literatura recomenda diversos intervalos de tempo para o esvaziamento dessas estruturas, porém os mais usuais são de 72 horas (DUCHENE et al., 1994) e de 48 h (SMMWW, 2014).

A simulação do desempenho hidráulico e hidrológico das técnicas compensatórias por meio de modelos numéricos e analíticos permite considerar processos de fluxo da água que ocorre na camada do reservatório (COUTINHO et al., 2016). Possibilitando avaliar os diferentes cenários de funcionamento, permitindo o conhecimento da influência dos parâmetros do solo e no comportamento do balanço hídrico.

Além disso, o monitoramento contínuo e integrado das variáveis referentes à dinâmica de armazenamento e infiltração da água pluvial nas técnicas compensatórias, combinado com o monitoramento detalhado da precipitação pluviométrica, permite a obtenção da real contribuição dessas técnicas na recarga artificial num solo urbano, como da cidade do Recife.

A dificuldade da avaliação do desempenho das técnicas compensatórias de infiltração num solo urbano se deve a elevada heterogeneidade deste solo, bem como as incertezas relativas às propriedades hidrodinâmicas. A maioria das experiências relatadas na literatura a respeito do desempenho hidráulico das trincheiras de infiltração são em países de clima frio e temperado. Essa realidade ecoclimatológica é muito diferente da encontrada na cidade do Recife, onde

fatalmente as técnicas compensatórias são submetidas às condições de clima tropical, com chuvas frequentes e condições de solo e geologia amplamente afetada por fatores antrópicos.

Desta forma, este trabalho faz parte de um estudo contínuo sobre uma trincheira de infiltração, visando acompanhar e analisar o comportamento hidráulico do sistema, a partir dos dados de níveis da coluna d'água no interior do sistema e do tempo de esvaziamento, representado pelo movimento de recessão, ou seja, o processo de infiltração na interface técnica – solo natural.

## **2 OBJETIVOS**

Este tópico apresenta o objetivo geral e os objetivos específicos desta dissertação de mestrado.

### **Objetivo Geral:**

Avaliar a dinâmica da água em uma trincheira de infiltração para controle do escoamento superficial em um lote.

### **Objetivos Específicos:**

Avaliar e monitorar os processos hidrológicos superficiais e subsuperficiais envolvidos na dinâmica da água na trincheira de infiltração, desde a precipitação pluviométrica até a água atingir o lençol freático.

Avaliar a capacidade de retenção, armazenamento, infiltração e recarga artificial do lençol freático gerada pela trincheira de infiltração.

Efetuar simulações hidráulicas dos processos de transferência de água na interface trincheira e solo suporte da estrutura.

### **3 REVISÃO DE LITERATURA**

Este tópico apresenta uma revisão de literatura sobre trincheira de infiltração apresentando a evolução dos sistemas de drenagens convencionais até os alternativos.

#### **3.1 A urbanização e os impactos sobre a drenagem urbana**

Dos anos de 1950 para os anos 2000, a população mundial vivendo em áreas urbanas passou de 30% para 47%. A estimativa para 2030 são de 60% da população mundial vivendo em áreas urbanas. Na América do Sul, uma taxa de 75% da população vivendo em áreas urbanas no ano de 2000 e uma estimativa de 84% para o ano de 2030 (SILVA, 2006).

Devido ao processo de urbanização, a drenagem de águas pluviais em meio urbano é afetada. A enchente urbana é o problema mais visível associado à drenagem de águas pluviais. Porém, existem outros problemas como poluição de mananciais e erosão do solo.

A urbanização transforma o local com superfícies permeáveis e recoberto por vegetação natural e substituem por superfícies impermeáveis, com os telhados, ruas, calçadas e pátios, modificando o ciclo hidrológico local. Essas alterações da superfície ocasionam diminuição da capacidade de infiltração da bacia e perda da capacidade de armazenamento natural; aumento no volume de escoamento superficial; aumento nas vazões de pico; diminuem o tempo de concentração e reduzem a recarga dos aquíferos e a vazão de base (MAYS, 2001; WRIGHT e HEANEY, 2001).

#### **3.2 Evolução dos sistemas de drenagem**

O sistema de drenagem urbana segundo o conceito higienista começou a ser implantado por questões de saúde pública. Segundo Nascimento (1996), os problemas das águas pluviais e esgotos eram tratados através de um sistema unitário, tendo como objetivo de efetuar a retirada d'água dos centros urbanos de forma rápida, por canalização.

Com o avanço da urbanização de áreas cada vez maiores, os sistemas de drenagem projetados começaram a ser insuficientes, demandando o aumento dos diâmetros das tubulações, prática insustentável e com custos elevados, não sendo uma solução definitiva. Nesse contexto, começaram a surgir os reservatórios urbanos para amortecimento de cheias, onde armazenavam o volume precipitado de forma temporária para liberação gradual na rede de drenagem.

A partir de uma maior conscientização ecológica, surge o conceito ambientalista por volta de 1970. Com abordagens mais complexas e com maiores investimentos iniciais, apresentando por outro lado custos globais menores (SILVEIRA, 1998). Esse novo conceito se consolidou no cenário internacional, sendo uma alternativa para drenagem urbana, atuando no ciclo hidrológico, restaurando os processos naturais como a infiltração e a capacidade de armazenamento do solo (SILVA, 2006; SOUZA, 2002).

O Brasil utiliza o conceito higienista, retirando as águas pluviais o mais rápido possível das áreas urbanas. Esse fato decorre das poucas pesquisas aplicadas ao conceito ambientalista, que permitam adequar essas novas tecnologias para usos em diferentes locais (SILVA, 2006).

### **3.3 Técnicas compensatórias**

Este tópico apresenta informações sobre os sistemas de infiltração e as trincheiras de infiltração.

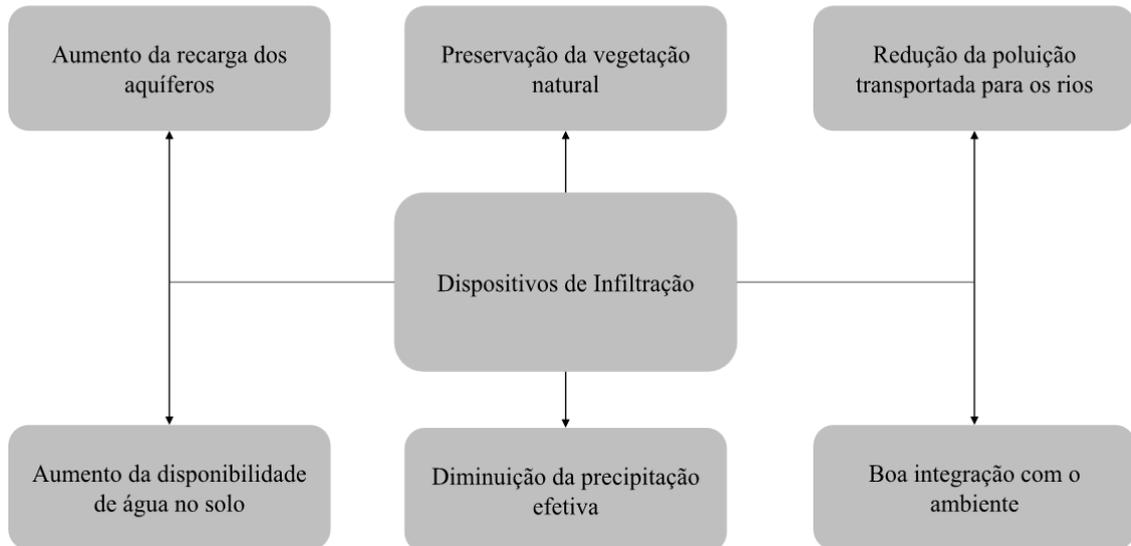
#### **3.3.1 Sistemas de infiltração**

Técnicas compensatórias são dispositivos que visam à diminuição de precipitação efetiva gerada pelo aumento impermeabilização ocasionada pela urbanização. Esses dispositivos armazenam o volume escoado na fonte geradora para posteriormente infiltrar essa água de forma gradual no subsolo (COUTINHO, 2011).

As técnicas compensatórias são estruturas que tentam recuperar as condições de pré-ocupação da bacia hidrográfica (ACIOLI, 2005). Esses dispositivos podem trabalhar na atenuação de vazões máximas e para redução dos volumes escoados. No primeiro caso, eles funcionam como reservatório de amortecimento, no segundo ocorre infiltração das águas pluviais.

As vantagens dos dispositivos que permitem maior infiltração e percolação resumem-se na Figura 1 (AZZOUT et al., 1994; BETTES, 1996; NASCIMENTO et al., 1997; SOUZA, 2002; BAPTISTA, 2005; COUTINHO, 2011).

Figura 1 – Vantagens da instalação de dispositivos de infiltração e percolação.



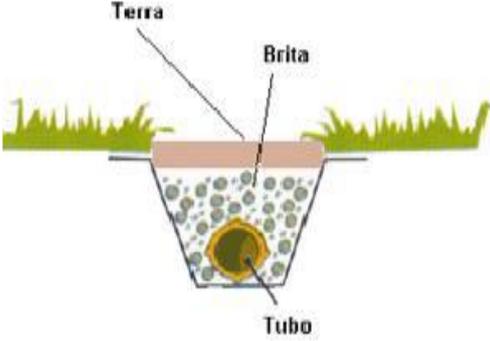
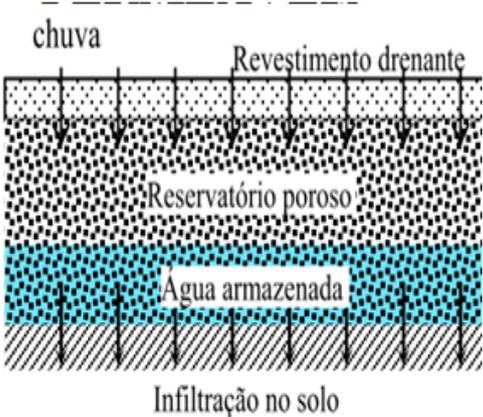
Fonte: Autor.

Para os dispositivos compensatórios de drenagem urbana, a capacidade de infiltração do solo é de extrema importância, pois é no solo que o sistema vai ser instalado e por isso há vários estudos relacionando a condutividade hidráulica como um fator essencial para instalação desses dispositivos no solo (COUTINHO, 2011; CARVALHO et al., 2012). Azzout et al. (1994) consideram que sistemas de infiltração são viáveis para serem implantados em solos com condutividade hidráulica superior a  $10^{-6}$  m/s. Valores de condutividade hidráulica entre  $10^{-6}$  e  $10^{-3}$  m/s são considerados suficientes (ALFAKIH et al., 1999 e BAPTISTA et al., 2005).

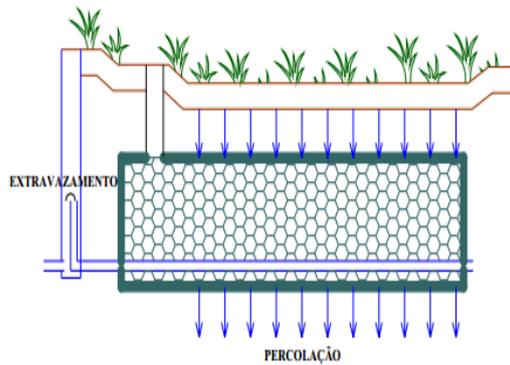
A condutividade hidráulica saturada é uma propriedade do solo importante para concepção e dimensionamento dos dispositivos de infiltração. Quando a condutividade hidráulica saturada é muito elevada, acaba favorecendo a contaminação das águas subterrâneas, com os poluentes carregados dos escoamentos superficiais. Uma condutividade hidráulica saturada elevada conduziria a uma baixa capacidade de filtração dos poluentes pelo solo e com isso o risco de contaminação do lençol freático. Condutividades hidráulicas baixas não são favoráveis a infiltração, pois está relacionado à capacidade de drenagem do sistema. (SILVA, 2007).

Dentre os dispositivos de infiltração, podem-se considerar a bacia de retenção, valetas de infiltração, trincheiras de infiltração, pavimentos permeáveis e poços de infiltração. Algumas estruturas e o conceito dos sistemas de infiltração são demonstrados na Tabela 1.

Tabela 1 – Caracterização de estruturas de drenagem compensatórias.

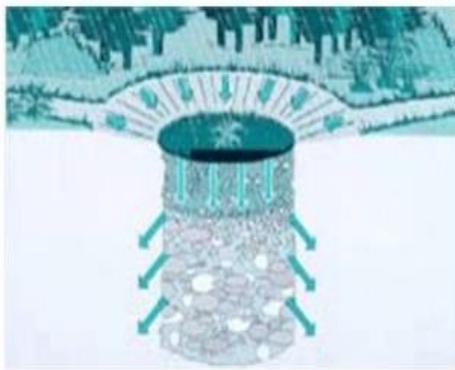
| Estrutura compensatória   | Definição geral   |
|---|---|
| <p data-bbox="365 577 636 611"><b>Bacia de infiltração</b></p>       | <p>Estrutura que tem por objetivo a regularização das vazões precipitadas, permitindo à restituição a jusante de vazões compatíveis com um limite previamente fixado ou imposto pela capacidade de vazão de uma rede ou curso de água existente (BILHANÇA, 2006).</p>   |
| <p data-bbox="354 996 647 1030"><b>Valetas de infiltração</b></p>  | <p>São usadas como técnicas compensatórias junto ao sistema viário, cumprindo a função de condução longitudinal. A entrada de água é feita de forma direta por escoamento superficial e, eventualmente, por afluyente via tubulação. A saída de água pode ser feita através da infiltração ou por deságue superficial, diretamente pelo corpo receptor (BAPTISTA et al., 2005).</p> |
| <p data-bbox="352 1556 649 1590"><b>Pavimento permeável</b></p>    | <p>São geralmente implantadas nas áreas urbanas como no sistema viário e em estacionamentos. Armazenam a água em reservatórios sob os pavimentos pelo tempo necessário para sua infiltração no solo, funcionam como reservatório de amortecimento mediante drenos auxiliares para o excesso de água (CAMPANA, 2003).</p>  |

### Trincheira de infiltração



São geralmente implantadas junto à superfície ou a pequena profundidade, com a finalidade de recolher as águas pluviais de afluência perpendicular ao seu comprimento, favorecendo a infiltração e o armazenamento temporário. São constituídas por valetas preenchidas por material granular.

### Poços de infiltração



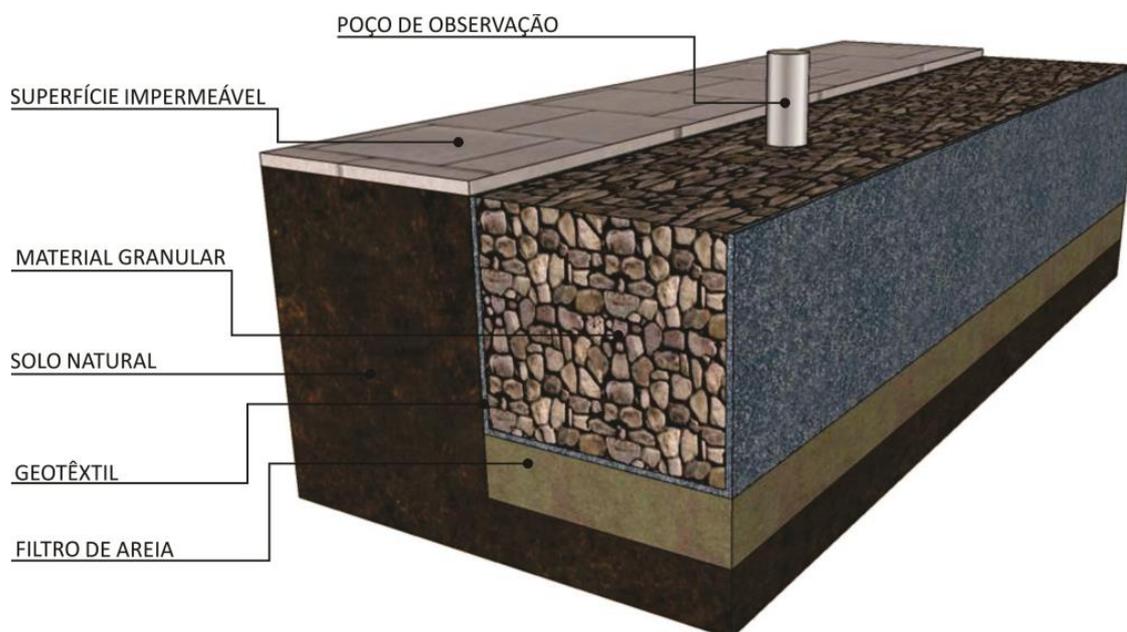
São dispositivos pontuais com pequena ocupação da área superficial, concebidos para evacuar as águas pluviais diretamente no subsolo, por infiltração. Esta técnica tem a vantagem de poder ser utilizada em zonas permeáveis ou zonas onde a camada superficial é pouco permeável, mas que apresentam capacidades significativas de infiltração nas camadas mais profundas (BAPTISTA et al.,2005).

Fonte: Adaptado de Mujovo (2014).

#### 3.3.2 Trincheira de infiltração

As trincheiras de infiltração são técnicas compensatórias de infiltração lineares e possuem dimensões de comprimento maiores que as dimensões de largura e profundidade. Sua finalidade é armazenar a água precipitada por determinado tempo, funcionando como um reservatório convencional da água pluvial urbana, favorecendo a infiltração dessa água armazenada para o subsolo. Esse sistema age reduzindo a precipitação efetiva e aumentando o armazenamento da água no solo (AZZOUT et al., 1994).

Figura 2 – Exemplo de uma trincheira de infiltração.



Fonte: Melo (2015).

As trincheiras de infiltração são áreas escavadas preenchidas com material granular, com alta porosidade, para a estabilidade dos taludes e controle para que materiais mais grosseiros não entrem no sistema. Para controle e prevenção dos finos, geralmente é utilizada manta geotêxtil. As trincheiras de infiltração são sistemas de controle na fonte geradora e geralmente instalados em pequenos lotes urbanos (MELO, 2016.a; JÚNIOR, 2015; CHAHAR et al., 2012).

Peiter e Poletto (2012) avaliaram em seus estudos a capacidade de armazenamento e a capacidade de infiltração de uma trincheira para quatro tipos de materiais de preenchimento (pedrisco, pedra britada, pedra de argila e rachão). Foi verificado que as trincheiras se apresentam como uma boa alternativa de controle do escoamento de cheias, mesmo em solos mais argilosos. A granulometria que possibilitou a maior infiltração de acordo com os estudos foi o rachão, seguido por pedra de argila, pedra britada e pedrisco.

As trincheiras de infiltração apresentam algumas vantagens de utilização, como: são bem integradas ao ambiente; o espaço pode ser utilizado para outros fins e podem ser instaladas em espaços sem finalidade. As trincheiras de infiltração também apresentam algumas desvantagens, como: dificuldade no tratamento das águas de escoamento; desempenho reduzido com o passar do tempo, em virtude da colmatção do sistema; e difícil monitoramento do seu

desempenho. Já sua instalação requer alguns cuidados, como: a verificação da camada impermeável e do lençol freático; a declividade do terreno; tipos e usos do solo; e cobertura vegetal (SOUZA, 2002).

Lucas et al. (2015), avaliaram aspectos da construção e operação de técnicas compensatórias em drenagem urbana e seus efeitos na taxa de infiltração dos sistemas: filtro – vala – trincheira de infiltração e poços de infiltração. Foi constatado neste trabalho que ocorreu o transporte de material fino para dentro do sistema mesmo ele estando protegido, e este material fino influenciou na permeabilidade da manta geotêxtil com uma redução de 30 a 90% para o sistema de filtro – vala – trincheira de infiltração e 40 a 70% para o poço de infiltração.

Júnior et al. (2015), observaram o comportamento de uma trincheira de infiltração instalada em um lote residencial, localizada em São Carlos-SP, durante um período de 5 meses. Foi constatado que a trincheira do estudo mencionado obteve um volume de infiltração em média de 8 m<sup>3</sup> ao mês com precipitações de 220 mm, onde o sistema tem um volume de armazenamento de 5,7 m<sup>3</sup>.

Graciosa et al. (2008.a), apresentaram um modelo bidimensional de infiltração para estimar o volume infiltrado e do campo de umidade em torno de uma trincheira de infiltração. Nesse estudo, foi observado à redução do volume escoado superficialmente devida a trincheira e o sistema mesmo em condições de saturação do solo, mostrou resultados satisfatórios na redução do escoamento superficial.

Melo et al. (2016.a), analisaram eventos de precipitação no ano de 2014 para a cidade de Recife de uma trincheira de infiltração instalada em lote urbano e observou resultados satisfatórios para redução do escoamento superficial, com capacidade mínima de infiltrar 64, 57% do volume de entrada de água, mesmo o solo não estando seco. Foi verificada a dificuldade de monitoramento desses sistemas em locais de elevada intensidade pluviométrica.

Graciosa et al. (2008.b), em seus estudos sobre trincheira de infiltração, propuseram uma metodologia para o dimensionamento desses sistemas. O método é baseado no balanço hídrico, sendo o volume de entrada estimado pela curva idf e o de saída pela taxa de infiltração do solo. Esses estudos foram realizados para dois tipos de solo, um arenoso e outro argiloso. Os dois modelos propostos foram calibrados com ensaios de campo e ambos apresentaram valores semelhantes para os volumes infiltrados.

Para o dimensionamento de uma trincheira de infiltração, destacam-se dois modelos e métodos utilizados, sendo o primeiro o método baseado no balanço hídrico realizado por Graciosa (2008.b) e o segundo da curva envelope, feitos por Santos (2014), Silveira e Goldenfum (2007) e Souza (2002).

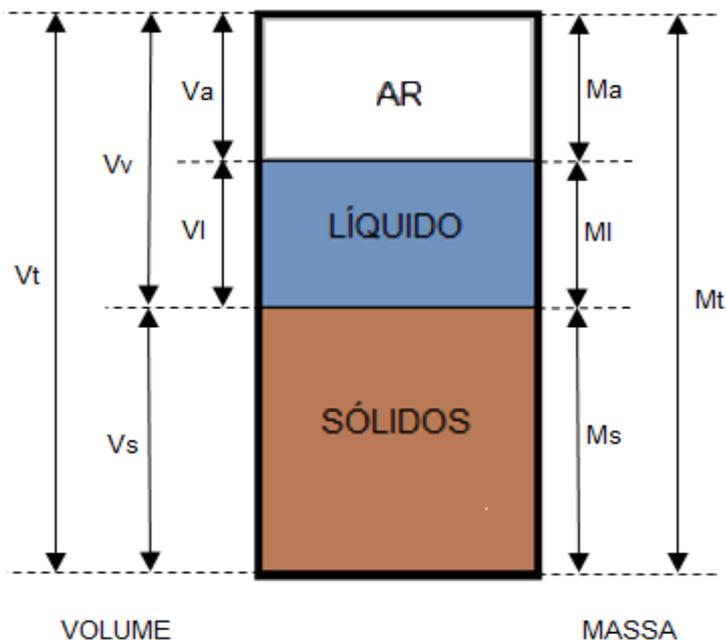
#### 4 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Neste tópico é feita uma fundamentação teórica com definição de solo, suas propriedades básicas, o potencial de água no solo, a retenção de água no solo e os fluxos de água em meio saturado e não saturado.

##### 4.1 Definição de solo

O solo é um sistema trifásico comportado por uma fase sólida, líquida e gasosa (Figura 3). A parte sólida é composta de matéria orgânica e mineral, a parte líquida é composta por soluções aquosas de sais minerais e componentes orgânicos, a parte gasosa é constituída por ar. Devido às partículas da parte sólida serem constituídas de partículas de diferentes diâmetros, surgem espaços vazios que são preenchidos em determinadas situações pelas outras partes do sistema (ALVES, 2009). Segundo Hilliel (1972), são nos poros do solo onde ocorrem os processos dinâmicos do ar e da solução do solo.

Figura 3 – Representação simplificada do sistema trifásico do solo.



Fonte: Autor.

Onde:  $V_t$  é o volume total da amostra de solo e  $V_v$  é o volume de vazios, consiste no volume de poros da amostra, isto é, a soma dos volumes ocupados por água ( $V_l$ ) e por volume de ar

( $V_a$ );  $V_s$  representa o volume de sólidos presente no solo.  $M_t$  é a massa total da amostra de solo,  $M_a$  a massa de ar,  $M_l$  a massa de líquidos e  $M_s$  a massa dos sólidos.

A partir da determinação dessas grandezas, podem-se estabelecer as relações entre elas, definindo algumas das propriedades básicas do solo.

## 4.2 Propriedades básicas do solo

Neste tópico são apresentadas as definições e suas respectivas formulas das propriedades básicas do solo.

### 4.2.1 Umidade gravimétrica

A umidade gravimétrica é a relação entre a massa de água e a massa de partículas sólidas do solo:

$$w = \frac{m_l}{m_s} \quad (1)$$

### 4.2.2 Umidade volumétrica

A razão entre o volume de água e o volume total de uma amostra de solo representa a umidade volumétrica:

$$\theta = \frac{V_l}{V_t} \quad (2)$$

### 4.2.3 Massa específica do solo

A massa específica do solo é representada pela razão entre a massa das partículas sólidas e o volume total da amostra:

$$\rho = \frac{m_s}{V_t} \quad (3)$$

### 4.2.4 Massa específica das partículas do solo

A massa específica das partículas solidas é a relação entre a massa das partículas sólidas pelo volume ocupado pelas partículas sólidas da amostra de solo analisada:

$$\rho_s = \frac{m_s}{V_s} \quad (4)$$

#### 4.2.5 Porosidade aparente

A razão entre o volume de vazios e o volume total de uma amostra de solo representa a porosidade aparente:

$$\phi = \frac{V_v}{V_t} \quad (5)$$

Onde essa expressão retrata a porcentagem de poros conectados e não conectados.

#### 4.2.6 Índice de vazios

O índice de vazios é a relação entre o volume de poros do solo e o volume das partículas sólidas, representado pela seguinte expressão:

$$e = \frac{V_v}{V_s} \quad (6)$$

#### 4.2.7 Grau de saturação

O grau de saturação é a razão entre o volume de água e o volume de poros existentes na amostra de solo:

$$GS = \frac{V_l}{V_v} \quad (7)$$

Observação: O grau de saturação deve ser expresso em porcentagem.

#### 4.2.8 Saturação efetiva

A saturação efetiva é a razão entre o volume de água e o volume de poros existentes na amostra de solo, onde a sua diferença para o grau de saturação é que no segundo o efeito da umidade volumétrica residual é desconsiderado.

$$S_e = \frac{V_l}{V_v} = \frac{\theta_x - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} \quad (8)$$

#### 4.2.9 Condutividade hidráulica

A condutividade hidráulica do solo é uma propriedade do meio poroso que expressa facilidade do solo em transportar água através dos poros. A passagem da água é afetada pela forma, tamanhos dos poros, propriedades do fluido e pelo teor de umidade presente no solo.

$$K(\theta) = \left( \frac{\kappa \rho g}{\mu_{vd}} \right) \cdot K_r(\theta) \quad (9)$$

Onde:  $K(\theta)$  é a condutividade hidráulica [ $L \cdot T^{-1}$ ],  $\kappa$  a permeabilidade intrínseca [ $L^2$ ],  $\rho$  a massa específica da água [ $M \cdot L^{-3}$ ],  $g$  é a aceleração da gravidade [ $M \cdot T^{-2}$ ],  $\mu_{vd}$  a viscosidade dinâmica da água [ $M \cdot T^{-1} \cdot L^{-1}$ ] e  $K_r(\theta)$  é definida como a permeabilidade relativa, a qual varia entre 0 e 1. A permeabilidade relativa considera a dependência da condutividade hidráulica sobre a umidade ( $\theta$ ) ou do potencial matricial ( $\psi_m$ ).

A diferença principal do escoamento em meio poroso saturado e não saturada é a condutividade hidráulica. Solos saturados apresentam condução máxima do fluido, pois os poros estão completamente preenchidos. Já no solo não saturado, a condução do fluido decresce, pois, seus poros estão preenchidos por água e ar. Desta forma, a condutividade hidráulica varia com o grau de umidade do solo e apresenta seu valor máximo na saturação (PAULETTO et al., 1988).

#### 4.3 Potencial da água no solo

A caracterização do estado de energia da água no solo é determinada pela energia potencial. O componente da energia cinética é praticamente desprezível, pois os escoamentos de água nesses casos são de baixas velocidades.

O movimento da água no solo ocorre quando existe diferença de potencial total. Assim, o potencial total de água no solo pode ser descrito como a soma das contribuições de outros potenciais (HILLEL, 1998).

$$\psi_t = \psi_p + \psi_g + \psi_o + \psi_m \quad (10)$$

O Potencial de pressão é considerado apenas quando a pressão sobre a água é positiva (pressão maior que a atmosférica). O potencial gravitacional representa a energia potencial devido à posição vertical do volume em consideração a um dado referencial do meio poroso. O

Potencial osmótico ou de soluto está relacionado à concentração de solutos da água no solo, geralmente é desprezível, pois a concentração é pequena. O potencial matricial ou mátrico descreve a contribuição das forças de retenção da solução no solo (capilaridade e adsorção).

Logo, desprezando a parcela de potencial osmótico e somando-se os termos, podemos obter o potencial total em termos de energia por unidade de peso (equação 11). Conhecendo os potenciais da água nos diversos pontos do solo, pode-se determinar o sentido do movimento.

$$H = \psi + z \quad (11)$$

Onde: H é o potencial total;  $\psi$  é o potencial de pressão (solo saturado) ou potencial matricial (solo não saturado) e z corresponde à altura em relação a algum nível de referência.

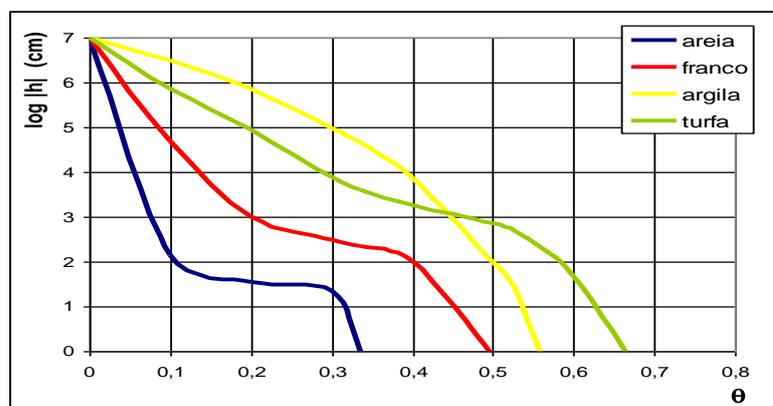
#### 4.4 Retenção da água no solo

Neste tópico apresenta as definições da curva de retenção de água no solo e da condutividade hidráulica.

##### 4.4.1 Curva de retenção de água no solo

A curva característica do solo ou curva de retenção de água no solo é a relação entre o potencial matricial de água no solo e a umidade do solo. Também pode ser expressa como a energia imposta para retirada do volume de água do solo (KLAR, 1988). Sendo essencial para modelagem de fluxo de água em meio não saturado, a curva de retenção de água no solo expressa uma importante medida da característica hidráulica do solo. As curvas são diferentes para cada tipo de solo, devido à distribuição dos poros (Figura 4).

Figura 4 – Curva característica representativa de diferentes solos.



Fonte: Autor.

Existem na literatura alguns modelos matemáticos que podem descrever a curva de retenção de água, como Brooks e Corey (1964), Haverkamp e Vauclin (1979) e van Genuchten (1980). Segundo Arraes (2014), as equações mais utilizadas em modelos matemáticos são as de Brooks e Corey (1964) e van Genuchten (1980).

A equação de Brooks e Corey (1964) é definida pela equação 12:

$$S_e = \left( \frac{\psi}{\psi_g} \right)^{-\eta} \quad (12)$$

Onde:  $S_e \leq 1$ , e  $\eta$  um parâmetro característico do solo, que indica a distribuição do tamanho dos poros.

A equação de van Genuchten (1980):

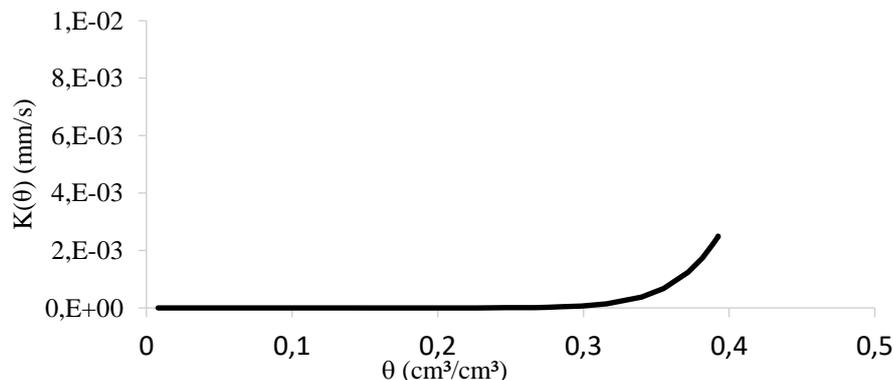
$$S_e = \frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} = [1 + |\alpha\psi|^n]^{-m} \quad (13)$$

Onde:  $m = 1 - 1/n$ ;  $n > 1$ , (Mualem, 1976) e  $m = 1 - 2/n$ ;  $n > 2$ , Burdine (1953), sendo  $S_e$  a saturação efetiva;  $\theta_r$  e  $\theta_s$  a umidade volumétrica residual e saturada, respectivamente;  $\alpha = 1/h_g$  a pressão de entrada de ar e  $n$  e  $m$  parâmetros de forma.

#### 4.4.2 Curva de condutividade hidráulica

A curva de condutividade hidráulica do solo é a relação entre a condutividade hidráulica e a umidade volumétrica, conforme é apresentado na Figura 5.

Figura 5 – Representação da curva de condutividade hidráulica.



Fonte: Autor.

Os modelos mais utilizados para determinação da condutividade hidráulica não saturada são os de Burdine (1953), Brooks e Corey (1964), Mualem (1976) e van Genuchten (1980).

O modelo de condutividade hidráulica de Burdine (1953) depende da saturação efetiva:

$$K_r = (S_e)^2 = \frac{\int_0^{S_e} \frac{1}{\psi^2} dS_e}{\int_0^1 \frac{1}{\psi^2} dS_e} \quad (14)$$

O modelo de condutividade hidráulica de Brooks e Corey (1964) representa a curva em função da umidade volumétrica:

$$K(\theta(\psi)) = K_s (S_e)^\eta = K_s \left( \frac{\theta(\psi) - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} \right)^\eta \quad (15)$$

O modelo de condutividade hidráulica de van Genuchten (1980) representa a curva em função da umidade volumétrica:

$$K(\theta(\psi)) = K_s (S_e)^2 \left( 1 - \left( 1 - (S_e)^{1/m} \right)^m \right) \quad (16)$$

O modelo de condutividade hidráulica de Mualem (1976) representa a curva em função da umidade volumétrica (Equação 17). Essa equação combinada a equação de van Genuchten (1980) (Equação 13), resultando na equação 18, que também retrata a curva de condutividade hidráulica.

$$K(\theta(\psi)) = (S_e)^{0,5} \left[ \frac{\int_0^{S_e} \frac{1}{\psi} dS_e}{\int_0^1 \frac{1}{\psi} dS_e} \right]^2 \quad (17)$$

$$K(\theta(\psi)) = K_s (S_e)^{0,5} \left( 1 - \left( 1 - (S_e)^{1/m} \right)^m \right)^2 \quad (18)$$

#### 4.5 Fluxo da água no solo em meio poroso saturado e não saturado

Nas condições de saturação, a umidade do solo é constante e aproximadamente igual à porosidade ( $\theta = \phi$ ) e a condutividade hidráulica também é constante, sendo chamada de condutividade hidráulica saturada ( $K_s$ ). Já em condições não saturadas, o teor de umidade está abaixo da saturação ( $\theta < \eta$ ). Problemas com condições de solo não saturado são mais complexos, pois há uma variação da umidade, variando a condutividade hidráulica e os potenciais.

##### 4.5.1 Equação de Darcy

A equação de Darcy (equação 19) quantifica a densidade de fluxo laminar de água em meio poroso saturado, determinando que o volume de água que passa por unidade de tempo e de área em um meio poroso é diretamente proporcional ao gradiente de potencial total e a condutividade hidráulica saturada.

$$Q = -K(\theta_s)A \frac{\Delta h_t}{L} = -K_s A \quad (19)$$

Onde: Q é o fluxo ( $L.T^{-1}$ );  $K_s$  a condutividade hidráulica do solo ( $L.T^{-1}$ ) em função de  $\theta_s$ , A é a área em um meio poroso e  $\Delta h_t/L$  é o gradiente de potencial total.

A equação de Darcy é aplicada em condições de escoamento laminar, onde as interações do solo e da água não ocasionam variações na fluidez e na permeabilidade mediante mudança de gradiente. A equação descreve em condições macro do fluxo de água pelo meio poroso (COUTINHO, 2011). A equação é válida havendo diferença de potencial do local de maior para o de menor potencial, o que justifica o sinal negativo da equação.

##### 4.5.2 Equação de Darcy-Buckingham

Buckingham, em 1907, fez o primeiro trabalho que se tem notícia sobre o movimento da água em solo com condições de não saturação. Nessa condição, quando atua o potencial mátrico e potencial gravitacional, os processos do fluxo são mais complexos, pois podem promover mudanças no estado e quantidade de água durante o fluxo. Sendo a equação de Darcy-Buckingham:

$$q = -K(\psi) \frac{\partial h_t}{\partial z} = -K(\psi) \left( \frac{\partial \psi(\theta)}{\partial z} + 1 \right) \quad (20)$$

O sinal negativo desta fórmula tem a mesma interpretação física da equação 19, que indica o fluxo de água se dá na direção ao menor potencial hidráulico.

#### 4.5.3 Equação de Richards

A equação de Richards (Equação 21) descreve o fluxo de água no solo nas duas condições, em condições saturadas e não saturadas. Richards (1931) combinou a equação de Darcy-Buckingham com a equação da continuidade.

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = - \left[ \frac{\partial q_x}{\partial x} + \frac{\partial q_y}{\partial y} + \frac{\partial q_z}{\partial z} \right] \quad (21)$$

Onde:  $q$  é a densidade de fluxo que entra no elemento de volume e pode ser decomposta nas três direções ortogonais  $x$ ,  $y$  e  $z$ , onde  $\theta$  é a umidade volumétrica.

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left[ K(\theta) \frac{\partial h}{\partial z} \right] \quad (22)$$

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

A resolução da equação de Richards é possível com informações relacionadas às condições de contorno e características hidrodinâmicas, como curva de retenção e curva de condutividade hidráulica, além de um estado inicial de pressão ou de conteúdo de água no solo. Lassabatère et al. (2006) e Bagarello et al. (2013), descrevem os parâmetros necessários para resolução da equação de Richards através da metodologia BEST. A partir de ensaios de infiltração com infiltrômetro de anel simples, podem-se obter parâmetros de forma e de escalas das curvas  $\theta$  e  $K(\theta)$ .

## 5 HYDRUS 1 – D

O HYDRUS1D é um programa computacional que resolve numericamente as equações de Richards (1931) e do transporte de soluto, com o uso de elementos finitos, e inclui modelagem inversa para estimar os parâmetros hidráulicos e de transporte (ALVES, 2009; COUTINHO, 2011).

Simunek et al. (2008), descreveram toda a história do desenvolvimento das várias versões programas HYDRUS com modelos e ferramentas relacionados, como STANMOD, RETC, ROSETTA, UNSODA, UNSATCHEM, HP1 e outros.

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 23), pelo qual não se consideram os efeitos da fase gasosa e do gradiente térmico no fluxo da água.

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left[ K(\psi) \left( \frac{\partial h}{\partial x} + \cos \alpha \right) \right] - S(\psi) \quad (23)$$

Onde:  $\psi$  é o potencial mátrico da água no solo [L];  $\theta$  é a umidade volumétrica da água [ $L^3 L^{-3}$ ];  $t$  é o tempo [T];  $x$  é a coordenada espacial [L];  $S$  é o termo de extração de água [ $L^3 L^{-3} T^{-1}$ ];  $\alpha$  é o ângulo entre a direção do fluxo e o eixo vertical ( $\alpha = 0^\circ$  para fluxo vertical,  $\alpha = 90^\circ$  para fluxo horizontal, e  $0^\circ < \alpha < 90^\circ$  para fluxo inclinado).

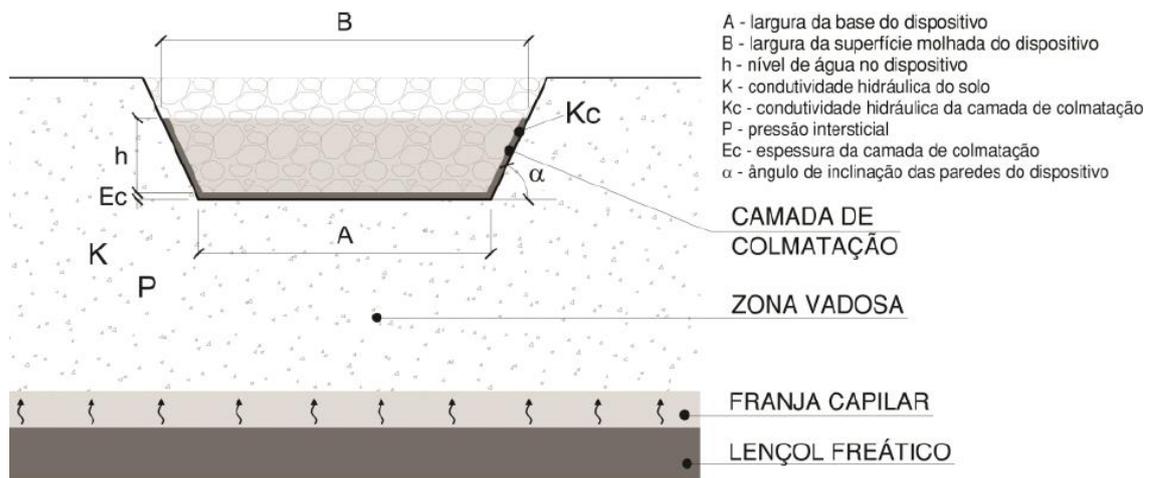
Segundo Simunek et al. (2016), existem diversos trabalhos com diferentes aplicações sendo utilizadas pelo *software* HYDRUS. Aplicações agrícolas foram usadas por Turkeltaub et al. (2014); Neto et al. (2016) utilizaram o HYDRUS 1-D em estudos de captação de água radicular e recarga de água subterrânea, Unold et al. 2009 e Engelhardt et al. 2015 usaram em transporte de contaminantes por produtos agrícolas. Estudos em técnicas alternativas - como pavimento permeável - foram desenvolvidos por Coutinho et al. (2016), usando o HYDRUS-1D para simular a eficiência do modelo.

## 6 MODELO DE BOUWER

O modelo de infiltração de Bouwer (1969), diferente dos modelos de Horton (1940) e Philip (1957) considera a camada de colmatção da estrutura. Em seus estudos, Bouwer (1969) verificou as ocorrências de resistências na base dos canais. Essa resistência (colmatção) do fundo da bacia altera a condutividade hidráulica e diminui a capacidade de infiltração do solo.

O modelo de Bouwer (1969) apresenta dois parâmetros para considerar a drenagem na camada do reservatório: a resistência hidráulica, devido ao estado de colmatção e a pressão intersticial abaixo da camada colmatada, que é dependente do tipo de solo. As variáveis do modelo de Bouwer (1969) são apresentadas na Figura 6.

Figura 6 – Notação utilizada por Bouwer (1969).



Fonte: Melo (2016).

Para que a formulação do modelo seja válida, é necessário que algumas condições sejam aplicadas (BOUWER 1969; SOUZA 2002; MELO 2016):

- A colmatção que reduz a capacidade de infiltração deve ter origem natural, ou seja, pela deposição de sedimentos sobre a superfície da estrutura;
- A condutividade hidráulica da camada colmatada ( $K_c$ ) sendo muito inferior a condutividade hidráulica do solo, o sistema estará em condições não saturadas. A base da estrutura deve estar acima da franja capilar e distante do lençol freático;

- Em regime permanente, a vazão de infiltração ocorre unicamente pela força de gravidade. Sendo o gradiente hidráulico de valor unitário;
- A pressão intersticial entre a camada colmatada e a franja capilar é uniforme.

Dessa forma a vazão de infiltração pode ser descrita em qualquer ponto do dispositivo, conforme Equação 24, baseada na equação de Darcy (equação 19).

$$q = K_c \frac{h+E_c-P}{E_c} \quad (24)$$

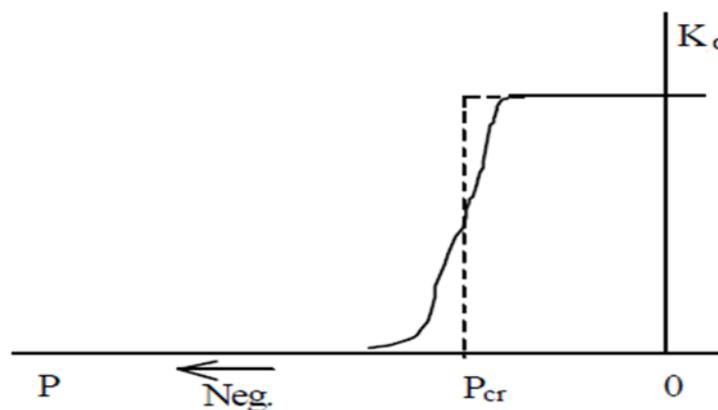
A relação entre a pressão intersticial e a condutividade hidráulica foi expressa por Gardner, conforme Equação 25 (BOUWER, 1969; SOUZA, 2002; MELO, 2016).

$$K_c = \frac{a}{(-P)^{n+b}} \quad (25)$$

Onde: a, b e n são coeficientes obtidos para cada tipo de solo.

Conforme o valor da condutividade hidráulica diminui, o valor da pressão intersticial torna-se mais negativo. Em um solo em condições naturais, no momento da saturação, P iguala-se a zero e  $K_c$  fica sendo  $a/b$ . O gráfico da razão entre  $K_c$  e P é demonstrado na Figura 7.

Figura 7 – Curva que relaciona condutividade hidráulica e pressão intersticial.



Fonte: Souza (2002).

A resistência hidráulica da camada colmatada pode ser expressa entre razão da espessura da camada colmatada e a condutividade hidráulica da camada colmatada, representando o tempo que a água atravessa a camada colmatada (Equação 26).

$$R_c = \frac{E_c}{K_c} \quad (26)$$

Efetuada algumas simplificações obtém-se a Equação 27, que representa a vazão de infiltração por unidade de área do dispositivo.

$$q = \frac{h - P_{cr}}{R_c} \quad (27)$$

Por ser uma variável difícil de calcular, a pressão intersticial pode ser substituída pela pressão crítica, pois varia a cada evento chuvoso em função da umidade inicial do solo (BOUWER, 1969; PROTON, 2008; MELO, 2016).

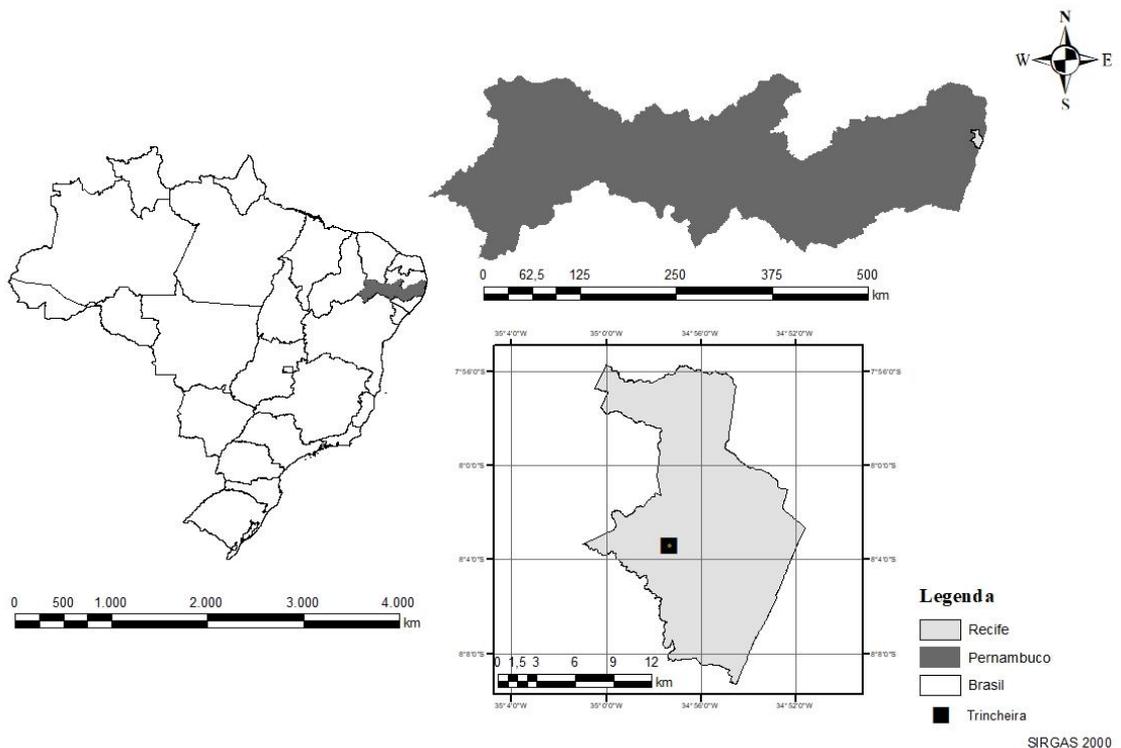
## 7 MATERIAL E MÉTODOS

Neste tópico são definidas a área de estudo da trincheira de infiltração, o monitoramento da trincheira de infiltração, a análise hidráulica, a caracterização do solo, a análise de sensibilidade do HYDRUS – 1D e a metodologia Bouwer.

### 7.1 Área de estudo

A trincheira de infiltração referente a este estudo está localizada na cidade de Recife, especificamente no Departamento de Energia Nuclear da Universidade Federal de Pernambuco (DEN/UFPE), conforme ilustra a Figura 8. A região apresenta cotas baixas com pequenas declividades.

Figura 8 – Localização da cidade do Recife.



Fonte: Autor.

A região possui clima tropical úmido do tipo As', segundo a classificação climática de Köppen, onde os meses de março a agosto registram os maiores volumes precipitados. A precipitação média anual é de 2.297,16 mm, com o valor máximo precipitado no mês de junho (386,17mm) e o mínimo no mês de novembro (38,81 mm) (Tabela 2).

Tabela 2 – Médias mensais da normal climatológica no período de 1961 a 2016, na Estação do Recife (Curado): precipitação, evaporação, temperatura, umidade relativa e insolação.

| Meses        | Precipitação<br>(mm) | Evaporação<br>(mm) | Temperatura<br>(°C) | Umidade<br>Relativa (%) | Insolação<br>(horas) |
|--------------|----------------------|--------------------|---------------------|-------------------------|----------------------|
| <b>JAN</b>   | 105,27               | 137,17             | 26,74               | 74,42                   | 233,22               |
| <b>FEV</b>   | 138,85               | 116,61             | 26,89               | 75,49                   | 205,89               |
| <b>MAR</b>   | 235,71               | 105,77             | 26,75               | 78,39                   | 215,10               |
| <b>ABR</b>   | 292,16               | 83,32              | 26,26               | 79,94                   | 196,39               |
| <b>MAI</b>   | 318,45               | 75,20              | 25,48               | 83,96                   | 188,16               |
| <b>JUN</b>   | 386,17               | 70,99              | 24,64               | 84,97                   | 163,15               |
| <b>JUL</b>   | 354,29               | 77,78              | 24,02               | 84,24                   | 169,28               |
| <b>AGO</b>   | 200,83               | 96,78              | 24,08               | 81,09                   | 199,78               |
| <b>SET</b>   | 109,68               | 115,72             | 24,88               | 77,92                   | 209,20               |
| <b>OUT</b>   | 57,84                | 139,24             | 25,77               | 74,50                   | 241,22               |
| <b>NOV</b>   | 38,81                | 144,82             | 26,35               | 72,96                   | 247,43               |
| <b>DEZ</b>   | 59,12                | 149,61             | 26,69               | 73,43                   | 241,56               |
| Média Mensal | <b>191,43</b>        | <b>109,42</b>      | <b>25,71</b>        | <b>78,44</b>            | <b>209,20</b>        |
| Total Anual  | <b>2.297,16</b>      | <b>1.313,01</b>    | -                   | -                       | <b>2.510,40</b>      |

. Fonte: INMET/BDMEP (2017).

A evaporação média anual alcança valores de 1.313,01 mm, acima da soma das precipitações para os meses mais secos, setembro e fevereiro. Contudo, a precipitação total anual supera a evaporação média anual em 984,15 mm, demonstrando um saldo positivo para os meses de chuva na região. O mês com maior taxa de evaporação é dezembro, com uma média de 149,61 mm (Tabela 2).

A temperatura média anual da região é de 25,71°C, com uma amplitude térmica de 2,87°C. A temperatura máxima encontrado é de 26,89°C com período mais quente nos meses

de dezembro a março. A temperatura mínima é de 24,02°C com o período mais frio nos meses de junho a setembro (Tabela 2).

A umidade relativa do ar tem valor médio anual de 78,44%, um valor considerado alto. Os meses com as menores e maiores umidades relativas são novembro e junho, respectivamente (Tabela 2).

Devido à proximidade da região com a zona equatorial, na qual há uma grande incidência de luz solar, os valores encontrados para a insolação média anual correspondem a 2.510,40 horas, com máximas de 247,43 horas no mês de novembro e de 163,15 horas no mês de junho (Tabela 2).

## **7.2 Monitoramento da Trincheira de Infiltração**

A trincheira de infiltração foi construída em 2014 e projetada para uma área de contribuição de 250 m<sup>2</sup>. Foi dimensionada pelo método da curva – envelope (*rain – envelope method*), para um tempo de retorno de 5 anos, sendo utilizado a equação de chuva da cidade do Recife.

A trincheira de infiltração possui a seguinte estrutura: após abertura da trincheira (escavação), construída de forma manual, o espaço foi coberto por uma manta geotêxtil para auxiliar na retenção de possíveis finos e após esse envelopamento a trincheira foi preenchida com brita tipo 19, sendo um material granular de porosidade de 33%. Na parte superior da estrutura foi colocada uma lona plástica para controlar a entrada de água no sistema. Nesse sentido, também foi construído uma caixa de entrada de água com um vertedor triangular para direcionar o volume escoado superficialmente.

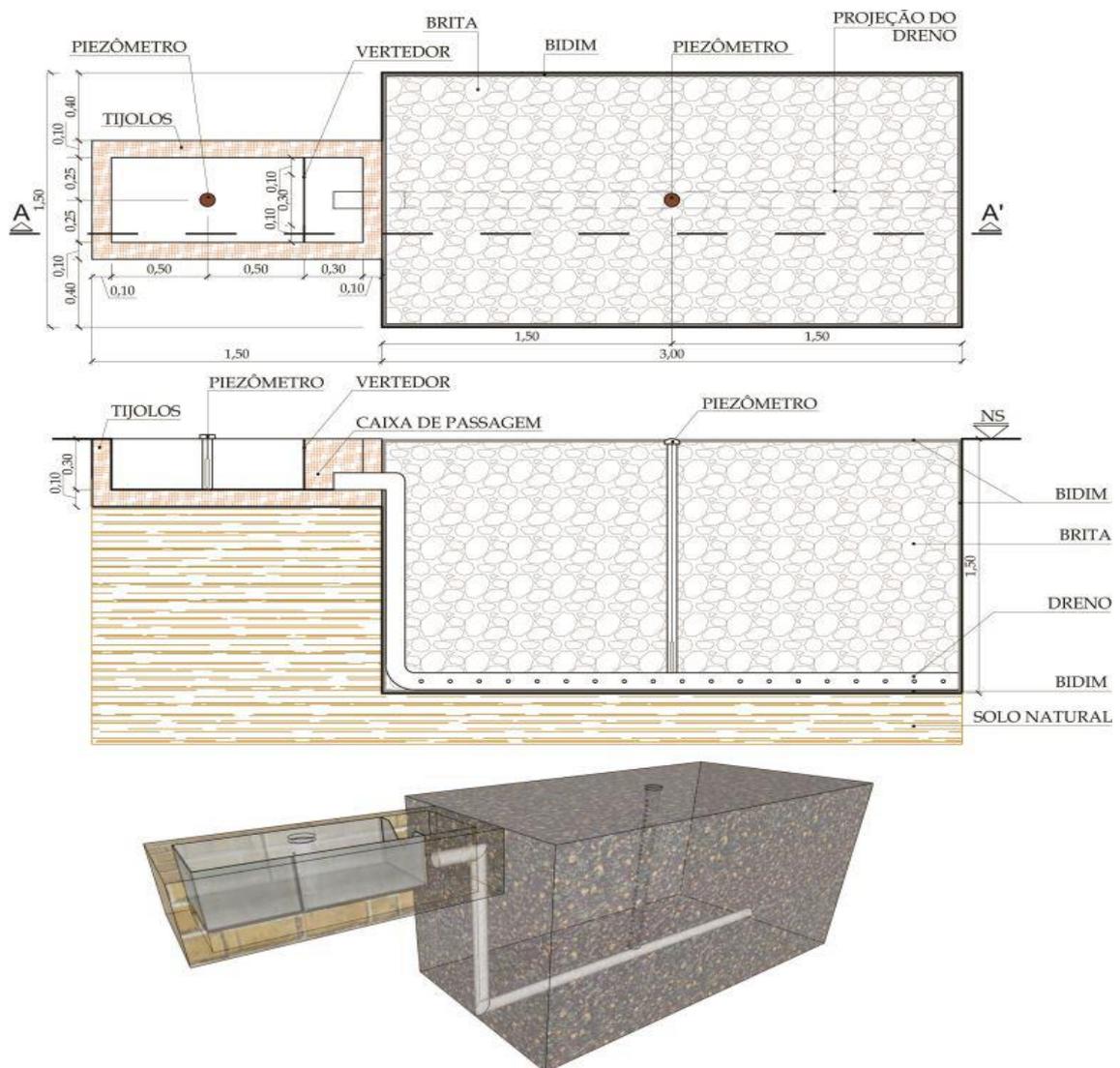
A trincheira de infiltração do estudo apresenta a seguintes dimensões: 1,5 metros de profundidade, 3 metros de comprimento e 1,5 metros de largura. Já a caixa de entrada da trincheira possui 30 centímetros de profundidade, 1,3 metros de comprimento e 50 centímetros de largura.

Para o monitoramento pluviométrico foi instalado um pluviômetro automático ao lado da estrutura, o TB4, um pluviômetro *tipping bucket* de alta qualidade com orifício de 8 polegadas e que mede precipitação em incrementos de 0.01 polegadas, com leituras de minuto a minuto, onde foi medido a precipitação do período chuvoso do ano de 2017.

Para a medição de nível e vazão de entrada na trincheira, foi instalado um piezômetro constituído de tubo de PVC na trincheira de infiltração e outro na caixa de entrada. Nos piezômetros estão instalados sensores de níveis automáticos, que medem a altura da coluna de água a cada minuto. Para leituras de vazão, a lâmina de água na caixa de entrada tem que superar a altura de 15 cm, acima da crista do vertedor (MELO, 2015).

O layout e os detalhes construtivos são encontrados com mais detalhes na Figura 9. Também são encontrados em SANTOS (2014) e MELO (2015).

Figura 9 – Detalhes da Trincheira de Infiltração: vista em planta, corte longitudinal e vista 3D.



Fonte: Melo (2015).

Figura 10 – Trincheira de Infiltração e instrumentação para monitoramento: (1), piezômetro (2), piezômetro (3), vertedor triangular (4), caixa de passagem (5) e pluviômetro (6).



Fonte: Autor.

### 7.3 Análise da Trincheira de Infiltração

A análise hidráulica da trincheira de infiltração foi realizada com base na relação, principalmente, entre a precipitação e o nível d'água no interior do sistema. A função de infiltração foi avaliada pela análise do decaimento do nível d'água e recessão, que também tem relação como tempo de esvaziamento do sistema. A capacidade do sistema em responder aos eventos de precipitação considerou as condições de umidade antecedente do solo natural.

McCuen (1998) classifica as condições iniciais de umidade do solo da seguinte forma: (I) condições de solo seco, com período chuvoso menor que 12,7 mm; (II) condições médias, com período chuvoso entre 12,7 e 27,94 mm e; (III) condições de solo úmido, com período chuvoso maior que 27,94 mm.

Foi considerado o tempo de esvaziamento máximo de 72 h, correspondendo a 100% de eficiência para as recessões com tempo menor ou igual a 72h, segundo Duchene et al. (1994).

#### **7.4 Caracterização do solo**

Neste tópico apresenta os procedimentos para determinar as características do solo analisado neste estudo de dissertação de mestrado.

##### **7.4.1. Ensaio de infiltração**

Os ensaios de infiltração foram realizados na superfície até uma profundidade de 160 cm e de 20 em 20 cm, no solo ao lado da trincheira de infiltração. Para o ensaio ser realizado, foi utilizado um infiltrômetro de anel simples com um diâmetro de 75 mm, e cravado a 1 cm de profundidade no solo. Essa cravação tem a finalidade de evitar as perdas laterais durante o processo de infiltração. Mais detalhes sobre o procedimento é encontrado em Souza et al., 2008.

Após a cravação do infiltrômetro no solo, foi inserido no anel um volume constante de água (50 ml), e em uma tabela foi preenchido o tempo que a lâmina de água leva para infiltrar totalmente. Após o volume de água infiltrar foi acrescentado mais água até o fluxo e o intervalo entre duas lâminas de água permanecer constante. Para cada profundidade foram realizados três ensaios de infiltração.

##### **7.4.2 Propriedades hidráulicas do solo**

Para a determinação das propriedades do solo foram coletadas amostras de solo indeformadas e deformadas de 20 em 20 cm até uma profundidade de 160 cm, ao lado da estrutura. Com isso, foram realizados ensaios de granulometria, umidade do solo, densidade de partículas e densidade do solo no laboratório de Física de Solos do Departamento de Energia Nuclear da UFPE (DEN/UFPE).

Nos ensaios de granulometria do solo foram analisados seguindo as diretrizes da NBR 7181 (ABNT, 1984). Neste ensaio foi realizado o peneiramento dos solos coletados em malhas graduadas para a determinação das frações mais grossas do solo, e o ensaio de sedimentação para determinação das frações finas.

Foram coletadas amostras antes de iniciar os ensaios de infiltração e após os ensaios para determinação da umidade volumétrica inicial do solo ( $\theta_0$ ) e final ( $\theta_f$ ).

Para a determinação da densidade de partícula foi utilizado o método do balão volumétrico, descrito pela Embrapa (1997), que consiste em colocar em um balão de 50 ml, com 20 g de terra fina seca em estufa e álcool etílico até completar o volume do balão volumétrico. O valor da densidade de partícula será expresso na seguinte fórmula:

$$\rho_p = \frac{m_s}{50 - V_a} \quad (28)$$

Na qual:  $\rho_p$  é a densidade de partícula ( $\text{g.cm}^{-3}$ );  $m_s$  é a massa do solo seco (g) a  $105^\circ\text{C}$ ;  $V_a$  é o volume de álcool etílico utilizado ( $\text{cm}^{-3}$ ).

Para a densidade do solo, foram retiradas amostras indeformadas cilíndricas, com auxílio do coletor de Uhland. As amostras de solo foram colocadas numa estufa a  $105^\circ\text{C}$  para secarem e só foram retiradas após um período de 24 horas. Após as amostras estarem secas, elas foram pesadas. A razão entre a massa do solo seco em estufa e o volume do cilindro que retirou a amostra indeformada foi determinada a densidade do solo.

#### 7.4.3 O método Beerkan

A metodologia Beerkan, um método semifísico, idealizado por Haverkamp et al. (1994), permite determinar a curva de retenção de água no solo,  $\theta(\psi)$ , e a curva de condutividade hidráulica do solo,  $K(\theta)$ , através dos modelos de van Genuchten (1980) e Brooks e Corey (1964). Nesse método,  $\theta(\psi)$  e  $K(\theta)$  podem ser descritas analiticamente por cinco parâmetros: dois de forma,  $m$  ou  $n$  e  $\eta$ , relacionados principalmente com a textura, e três de normalização  $\theta_s$ ,  $K_s$  e  $h_g$ , dependentes da estrutura do solo.

$$\theta(\psi) = (\theta_s - \theta_r) \cdot \left[ 1 + \left( \frac{\psi}{\psi_g} \right)^n \right]^{-m} + \theta_r \quad (29)$$

com  $m = 1 - \frac{2}{n}$  (Burdine, 1953)

e

$$K(\theta) = K_s \cdot \left( \frac{\theta}{\theta_s} \right)^\eta \quad (30)$$

As Equações (29) e (30) contêm seis parâmetros desconhecidos: três de forma ( $m$ ,  $n$  e  $\eta$ ) e três de normalização ( $\theta_s$ ,  $K_s$ ,  $h_g$ ).

#### 7.4.4 Definição dos parâmetros de forma utilizado pelo BEST

Os parâmetros de forma podem ser determinados assumindo a similaridade de forma entre a distribuição das partículas  $F(D)$ . Harverkamp e Parlange (1986) apresentaram a seguinte equação para expressar  $F(D)$ :

$$F(D) = \left[ 1 + \left( \frac{Dg}{D} \right)^N \right]^{-M} \quad \text{com} \quad M = 1 - \frac{2}{N} \quad (31)$$

Onde  $D$  é o diâmetro da partícula [L],  $Dg$  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.

$Pm$  é o índice de forma do meio, estimado a partir de  $M$  e  $N$  por (ZATARÁIN et al., 2003).

$$pm = \frac{MN}{1+M} (1 + \kappa)^{-1} \quad (32)$$

Sendo  $\kappa$  um coeficiente definido por Fuentes et al., (1998).

$$\kappa = \frac{2s-1}{2s(1-s)} \quad (33)$$

Sendo  $s$  a dimensão fractal.

#### 7.4.5 Definição dos parâmetros de normalização utilizado pelo BEST

Os parâmetros de normalização ( $hg$ ,  $K_s$ ) são alcançados por meio da minimização de  $I(S, K_s)$ , ou seja, dos quadrados das diferenças entre lâminas de água infiltrada verificadas e calculadas. Essas lâminas de água são calculadas pela equação proposta por Haverkamp et al. (1994), validada para tempos curtos e médios.

$$I(S, K_s) = \sum_{i=1}^{N_{obs}} \left( I_i - (S \cdot \sqrt{t_i} + a \cdot S^2 \cdot t_i + b_2 \cdot K_s \cdot t_i) \right)^2 \quad (34)$$

$$a = \frac{\gamma}{r \cdot \Delta\theta} \quad (35)$$

$$b_2 = \left( \frac{\theta_0}{\theta_s} \right)^\eta + \frac{2-\beta}{3} \cdot \left( 1 - \left( \frac{\theta_0}{\theta_s} \right)^\eta \right) \quad (36)$$

Onde  $S$  é a sorvidade,  $r$  o raio do cilindro,  $\gamma$  é igual a 0,75 e  $\beta$  é igual a 0,6.

#### 7.4.6 Escalas características

Durante o processo de infiltração tridimensional, os fatores que podem afetar o fluxo de entrada de água no solo são: a geometria da fonte de água, a capilaridade e a gravidade (SOUZA et al., 2008). Uma das formas de caracterizar esses fatores é a partir das escalas de comprimento capilar,  $\lambda_c$  [L] (WHITE e SULLY, 1987) e o raio característico dos poros hidraulicamente ativos,  $\lambda_m$  [L] (PHILIP, 1987) determinados, respectivamente, pelas equações:

$$\lambda_c = \frac{\delta S^2}{(\theta_s - \theta_0) K_s} \quad (37)$$

$$\lambda_m = \frac{\sigma}{\rho_a g \lambda_c} \quad (38)$$

Sendo  $\sigma$  a tensão superficial da água ( $0,0719 \text{ N m}^{-1}$ ),  $\rho_a$  a massa específica da água ( $10^3 \text{ kg m}^{-3}$ ),  $g$  a aceleração da gravidade ( $9,81 \text{ m s}^{-2}$ ) e  $\delta$  um parâmetro de forma da difusividade ( $1/2 \leq \delta \leq \pi/4$ ), o qual foi considerado igual a 0,55 (WHITE e SULLY, 1987).

De acordo com Souza et al. (2008), a escala de comprimento capilar representa a importância relativa das forças capilares em relação a gravidade quando a água é transmitida de uma fonte através do solo, com umidade inicial  $\theta_0$ . O raio característico de poros define a dimensão média dos poros que participam do processo de infiltração submetida à pressão aplicada  $h$ ; quanto maior for o raio característico,  $\lambda_m$ , maior é o efeito da gravidade em comparação ao da capilaridade (SOUZA et al., 2007).

Além disso, Souza et al. (2007) determinam o número de poros por unidade de área,  $C_{\lambda m}$  (Nº de poros  $\text{m}^{-2}$ ), utilizando a lei de Poiseuille para fluxo em um tubo capilar por:

$$C_{\lambda m} = \frac{8\mu K_s}{\rho_a g \pi \lambda_m^4} \quad (39)$$

Sendo  $\mu$  a viscosidade dinâmica da água ( $0,00089 \text{ kg m}^{-1} \text{ s}^{-1}$ ).

#### 7.4.7 Ajuste dos parâmetros de curva de retenção pelo RETC

Os parâmetros  $h_g$ ,  $m$  e  $n$  foram determinados, utilizando a equação de van Genuchten com a condição de Burdine (1953), conforme a equação 29. Porém o *software* HYDRUS 1 – D utiliza a equação de van Genuchten com a condição de Mualem (van Genuchten, 1980).

$$m = 1 - \frac{1}{n} \quad (40)$$

Essa conversão da condição de Burdine (1953) para a condição de Mualem (1976) foi realizada através do *software* RETC (Retention Curve), desenvolvido pela EPA (*United States Enviromental Protection Agency*) para analisar a retenção de água no solo e a condutividade hidráulica de solos não saturados.

O procedimento realizado no *software* foi à seleção do tipo de análise, que neste caso foi à curva de retenção; seleção das unidades de comprimento e tempo, mm e s; escolha do tipo de modelo para obtenção da curva de retenção ajustada, nesta etapa foi adotado o modelo de van Genuchten e Mualem; e por fim foram inseridos os valores de  $\theta_0$ ,  $\theta_s$ ,  $K_s$  e quarenta pontos da curva de retenção,  $\theta(\psi)$ , obtida inicialmente da metodologia Beerkan, adotando peso 1 para ponderação de todos os pontos da curva. Como dados de saída, o modelo fornece os parâmetros  $\alpha$  ( $\text{mm}^{-1}$ ) e  $n$ , que possibilitam determinar novos  $h_g$  e  $m$ .

### **7.5 Análise de sensibilidade do software HYDRUS-1D**

A análise de sensibilidade do HYDRUS empregado na trincheira de infiltração foi realizada de forma que várias simulações foram feitas modificando um único parâmetro hidráulico. Os outros parâmetros analisados permaneciam constantes. Assim, foram realizadas simulações para variação de cada parâmetro analisado. Os parâmetros hidráulicos em análise foram  $\alpha$ ,  $K_s$ ,  $n$  e  $\theta_s$ .

Quanto aos critérios de convergência, foi determinado o número máximo de 10 interações para a resolução da equação não linear de Richards, com o valor de 0,01 para a tolerância do conteúdo de água na região não saturada dos nós. Sendo o modelo hidráulico adotado de van Genuchten - Mualem (van GENUCHTEN, 1980).

Sobre a geometria do modelo, foi considerado um perfil com profundidade de 300 cm composto por uma única camada de controle com uma malha compacta de 201 nós. Foi utilizado como condição de contorno na fronteira superior o fluxo variável de eventos diários de precipitação e evapotranspiração potencial. Na condição de fronteira inferior considerou-se a drenagem livre.

Os parâmetros hidráulicos foram variados de um intervalo de  $\pm 50\%$ ,  $\pm 40\%$ ,  $\pm 30\%$ ,  $\pm 20\%$  e  $\pm 10\%$ , conforme demonstrado na Tabela 3.

Tabela 3 – Dados de entrada inseridos no HYDRUS-1D para análise de sensibilidade.

| Parâmetros      | Referência | Ref. -<br>50% | Ref. -<br>40% | Ref. -<br>30% | Ref. -<br>20% | Ref. -<br>10% | Ref.<br>10% | Ref.<br>20% | Ref.<br>30% | Ref.<br>40% | Ref.<br>50% |
|-----------------|------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
| $\alpha$ (mm-1) | 0,141      | 0,071         | 0,085         | 0,099         | 0,113         | 0,127         | 0,155       | -           | -           | -           | -           |
| $K_s$ (cm/dia)  | 178        | 89            | 106,8         | 124,6         | 142,4         | 160,2         | 195,8       | 213,6       | 231,4       | 249,2       | 267         |
| $\theta_s$      | 0,39       | 0,195         | 0,234         | 0,273         | 0,312         | 0,351         | 0,429       | 0,468       | 0,507       | 0,546       | 0,585       |
| $n$             | 1,27       | -             | -             | -             | 1,016         | 1,143         | 1,397       | 1,524       | 1,651       | 1,778       | 1,905       |

Fonte: Autor.

O parâmetro hidráulico  $n$  da equação de van Genuchten-Mualen não pode ser inferior a 1, com isso, não foi possível a utilização de todas as variações para esse parâmetro. As simulações para o parâmetro hidráulico  $\alpha$ , não convergiram para as variações de 20%, 30%, 40% e 50%.

## 7.6 Modelo de Bouwer

A vazão de infiltração foi realizada em função do nível de água no interior da trincheira de infiltração, de acordo com a Equação 27, que fornece a vazão por unidade de área do dispositivo.

Como a base do dispositivo colmata mais rápido do que as paredes, muitos trabalhos não consideram o fundo da estrutura de infiltração para o dimensionamento (Graciosa 2008b). Bouwer (1969) não considera essa diferença de colmatação da base e as paredes, conforme Equação 27, que demonstra a resistência hidráulica do dispositivo. Souza (2002) observou a necessidade de realizar a separação da resistência da parede e do fundo colmatado em seus estudos sobre trincheira de infiltração. Melo (2015) e Proton (2008) também realizaram a separação das resistências de colmatação da base e da parede da estrutura.

Este trabalho realizou os cálculos de vazão de infiltração seguindo os modelos de Souza (2002), Proton (2008) e Melo (2015), no qual considera a diferença entre a resistência de colmatação do fundo e das paredes da trincheira de infiltração.

O cálculo da vazão de infiltração do fundo da trincheira foi realizado praticamente da mesma forma que a Equação 27. A diferença é que ocorreu a separação das resistências hidráulicas devido à colmatação da parede e do fundo.

$$Q_{infb}(h) = \frac{S_b(h-P_{cr})}{R_{cb}} \quad (41)$$

Sendo:  $Q_{infb}(h)$  é a vazão de infiltração pelo fundo da trincheira de infiltração em função do nível de água;  $S_b$  é a área do fundo da trincheira de infiltração;  $h$  é o nível de água no interior da trincheira de infiltração;  $P_{cr}$  é a pressão crítica; e  $R_{cb}$  é a resistência hidráulica devido a colmatação da base da trincheira de infiltração.

A resistência hidráulica das paredes da trincheira de infiltração aumenta em função da profundidade, pois as camadas mais profundas trabalham com maior frequência e com isso essa parte recebe mais sedimentos para formação da camada colmatada. Com isso, é necessário a realizações de simplificações facilitando os cálculos (Souza, 2002).

$$Q_{infp}(h) = \frac{per}{R_{cp}} \left( \frac{h^2}{2} - P_{cr}h \right) \quad (42)$$

Em que:  $Q_{infp}(h)$  é a vazão de infiltração pela parede da trincheira de infiltração em função do nível de água;  $per$  é o perímetro da trincheira de infiltração;  $R_{cp}$  é a resistência hidráulica devido à colmatação da parede da trincheira de infiltração;  $h$  é o nível de água no interior da trincheira de infiltração; e  $P_{cr}$  é a pressão crítica.

A vazão total de infiltração da trincheira foi obtida pela soma das Equações 41 e 42.

$$Q_{inf} = \frac{per}{2R_{cp}} h^2 + \left( \frac{S_b}{R_{cb}} - \frac{P_{cr}}{R_{cp}} \right) h - \frac{P_{cr}S_b}{R_{cb}} \quad (43)$$

Com o objetivo de facilitar a calibração foi utilizada uma função objetivo para minimização do erro padrão.

$$FO = \text{Mínimo}[\sum(Q_{obs} - Q_{calc})^2] \quad (44)$$

Onde: FO é a função objetivo;  $Q_{obs}$  é a vazão observada de infiltração da trincheira de infiltração em função do nível de água;  $Q_{calc}$  é a vazão calculada pela Equação 44.

A Equação 43 pode ser resolvida por auxílio de programas computacionais como Excel, Matlab e Scilab. Neste trabalho foi utilizado a ferramenta solver do Excel para realização da modelagem.

De acordo com Bouwer (1969), os valores de  $P_{cr}$  para os diferentes tipos de solo são: Entorno de -20 cm de coluna de água para areias grossas e médias; -50 cm a -100 cm de colunas

de água para areias finas e solos argilo-arenosos; e inferior a -150 cm de coluna de água para siltes e argilas não estruturadas. Para esse estudo o valor da  $P_{cr}$  utilizada foi de 0 e -20 cm.

Para a modelagem no programa computacional foram definidas algumas restrições, onde as resistências hidráulicas de colmatção da base e da parede teriam de ser maiores que zero. As variáveis seriam para uma simulação as resistências hidráulicas da base e parede, para outra simulação as variáveis seriam as resistências hidráulicas da base e parede, e também a pressão crítica.

## 8 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Este tópico apresenta os resultados obtidos das características do solo, do monitoramento hidráulico da trincheira, da análise do *software* HYDRUS – 1D e do modelo Bouwer.

### 8.1 Propriedades físicas e hidrodinâmicas do solo

Na Tabela 4 são apresentadas a massa específica do solo, a massa específica das partículas, percentuais de argila, silte, areia e as respectivas classificações texturais. Observa-se que a camada de 60 cm foi a que apresentou a menor massa específica, com um valor de 1,42 g/cm<sup>3</sup>. A maior massa específica observada foi de 1,78 g/cm<sup>3</sup> na profundidade de 20 cm. O perfil de solo obteve uma massa específica média de 1,59 g/cm<sup>3</sup>.

Tabela 4 – Massa específica do solo, massa específica das partículas do solo, porcentagem de argila, silte e areia e a classificação textural do perfil de solo da trincheira de infiltração

| Camadas (cm)           |       | $\rho_s$<br>(g/cm <sup>3</sup> ) | $\rho_p$<br>(g/cm <sup>3</sup> ) | Argila<br>(%) | Silte<br>(%) | Areia<br>(%) | Classificação<br>textural |
|------------------------|-------|----------------------------------|----------------------------------|---------------|--------------|--------------|---------------------------|
| 0                      | Média | 1,7609                           | 2,6535                           | 6,48          | 24,64        | 68,88        | Franco –<br>arenosa       |
| 20                     | Média | 1,7788                           | 2,6307                           | 6,48          | 23,67        | 69,86        | Franco –<br>arenosa       |
| 40                     | Média | 1,6812                           | 2,6056                           | 1,69          | 20,69        | 77,62        | Areia franca              |
| 60                     | Média | 1,4195                           | 2,6704                           | 6,38          | 28,22        | 65,40        | Franco –<br>arenosa       |
| 80                     | Média | 1,4991                           | 2,5538                           | 13,41         | 48,12        | 38,47        | Franca                    |
| 100                    | Média | 1,5195                           | 2,5978                           | 18,10         | 50,23        | 31,67        | Franco –<br>siltosa       |
| 120                    | Média | 1,5604                           | 2,6703                           | 25,13         | 47,84        | 27,03        | Franca                    |
| 140                    | Média | 1,5973                           | 2,6017                           | 27,48         | 49,47        | 23,05        | Franca                    |
| 160                    | Média | 1,5347                           | 2,6450                           | 25,13         | 53,17        | 21,70        | Franco –<br>siltosa       |
| <b>Média<br/>Total</b> |       | 1,5945                           | 2,6263                           |               |              |              |                           |

Fonte: Autor.

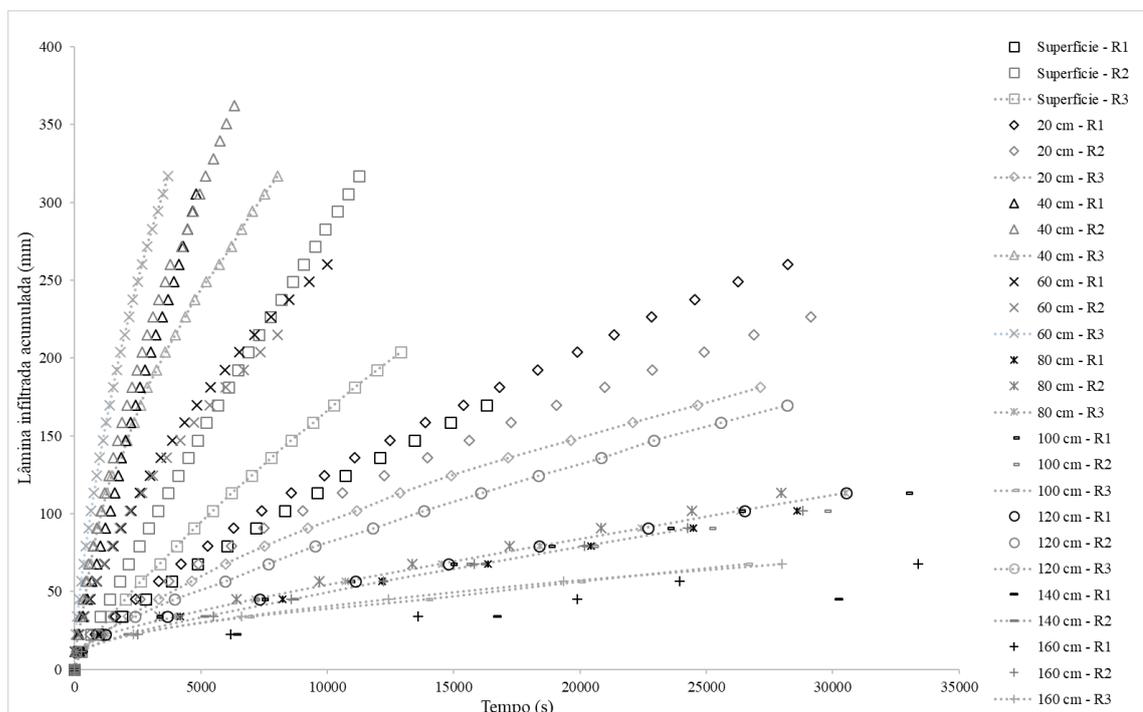
No tocante a massa específica das partículas, o menor valor foi encontrado na camada de 80 cm com 2,55 g/cm<sup>3</sup>, já a maior foi de 2,67 g/cm<sup>3</sup> na camada de 60 cm de profundidade e

obteve uma média total de  $2,63 \text{ g/cm}^3$ . Os valores encontrados da massa específica das partículas encontram-se próximos de  $2,65 \text{ g/cm}^3$ , valor médio adotado pela literatura especializada.

O solo da camada superficial e nas camadas de 20 e 60 cm de profundidade apresentaram classificação textural do tipo franco arenosa. Nas camadas de 80, 120 e 140 cm foram encontrados solos com classificação textural do tipo franco, onde o maior percentual de silte encontrado foi na camada de 140 cm, de 49,47%. Nas camadas de 100 e 160 cm, foram encontrados solos franco-siltosos e a maior parcela de silte encontrado foi na camada de 160 cm, com 53,17%. Na camada de 40 cm foi encontrado solo do tipo areia franca, conforme a Tabela 4.

Na Figura 11 são apresentadas as curvas de infiltração acumulada (mm) em função do tempo dos ensaios realizados no solo da trincheira de infiltração da camada superficial até 160 cm de profundidade.

Figura 11 – Curvas de infiltração acumulada em função do tempo da trincheira de infiltração.



Fonte: Autor.

Na camada da superfície, 20 cm e 60 cm de classificação textural franco-arenosa, a duração do ensaio de infiltração variou entre 3707 a 29120 s e a lâmina infiltrada acumulada variou entre 170 a 317 mm. Já nas camadas de 80, 120 e 140 cm de classificação textural franca,

a duração do ensaio de infiltração variou entre 24405 a 30530 s e a lâmina infiltrada acumulada variou entre 45 a 170 mm. Nas camadas de 100 e 160 cm de classificação textural franco-siltosa, a duração do ensaio de infiltração variou entre 26595 a 33372 s e a lâmina infiltrada acumulada variando entre 68 a 113 mm. Na camada de 40 cm, de classificação textural areia franca, a duração do ensaio de infiltração variou entre 4819 a 8025 s e a lâmina infiltrada acumulada variando de 306 a 362 mm.

Nos ensaios de infiltração observou-se que as camadas que obtiveram um tempo de duração maior foram as camadas com profundidades mais elevadas. Sendo as camadas franco-siltosas com duração de ensaios mais longos, cerca de 10% acima do tempo das camadas cuja classificação textural foi franca. Já a camada que teve maior lâmina infiltrada acumulada foi da classificação textural areia franca sendo 14% mais que as camadas franca-arenosa.

Na Tabela 5, observam-se os valores dos parâmetros de forma ( $m$ ,  $n$  e  $\eta$ ) das camadas do solo da trincheira de infiltração. Nas camadas com classificação textural franco-arenoso os valores de  $m$ ,  $n$  e  $\eta$  variaram respectivamente 0,11 a 0,12; 2,25 a 2,27; e 10,36 a 10,97. Já nas camadas com classificação textural franca os valores de  $m$ ,  $n$  e  $\eta$  variaram respectivamente de 0,07 a 0,11; 2,15 a 2,26; e 10,80 a 16,24. Nas camadas com classificação textural franco-siltosa, os valores de  $m$ ,  $n$  e  $\eta$  variaram respectivamente de 0,07 a 0,11; 2,15 a 2,26; e 10,74 a 16,42.

Tabela 5 – Parâmetros de forma das relações  $h(\theta)$  e  $K(\theta)$ .

| <b>Camadas</b>     |       | <b>m</b> | <b>n</b> | <b><math>\eta</math></b> |
|--------------------|-------|----------|----------|--------------------------|
| <b>0</b>           | Média | 0,1197   | 2,2719   | 10,3648                  |
| <b>20</b>          | Média | 0,1115   | 2,2509   | 10,9737                  |
| <b>40</b>          | Média | 0,0721   | 2,1553   | 15,8781                  |
| <b>60</b>          | Média | 0,1138   | 2,2569   | 10,7962                  |
| <b>80</b>          | Média | 0,1137   | 2,2565   | 10,7970                  |
| <b>100</b>         | Média | 0,0693   | 2,1490   | 16,4254                  |
| <b>120</b>         | Média | 0,0714   | 2,1537   | 16,0145                  |
| <b>140</b>         | Média | 0,0702   | 2,1511   | 16,2383                  |
| <b>160</b>         | Média | 0,1144   | 2,2584   | 10,7413                  |
| <b>Media Total</b> |       | 0,0961   | 2,2139   | 13,0173                  |

Fonte: Autor.

Ursulino (2017) utilizou a metodologia Beerkan e obteve valores próximos aos encontrados neste trabalho para solos com a mesma classificação textural (franco-arenoso). Os valores médios de  $m$ ,  $n$  e  $\eta$  foram de 0,10; 2,22 e 11,48 para uma estação de monitoramento e

para a outra estação de monitoramento foram 0,09; 2,20 e 12,68. Souza et al. (2008), obtiveram valores dos parâmetros de forma  $m$ ,  $n$  e  $\eta$  para uma areia franca de 0,13; 2,31 e 9,54 em um solo do Estado da Paraíba.

Apresentam-se na Tabela 6 os valores de  $\theta_r$ ,  $\theta_s$ ,  $hg$ ,  $K_s$  e  $S$  para as camadas de solo da trincheira de infiltração. Observam-se os valores da condutividade hidráulica ( $K_s$ ) a partir da camada de 40 cm diminuído com a profundidade, esse fato não foi verificado nas duas primeiras camadas. Porém, segundo Santos (2014), essas tendências nos valores da condutividade hidráulica foram observadas em seus estudos, mesmo com valores distintos. A sorvidade ( $S$ ) obteve um comportamento um pouco diferente da condutividade hidráulica, os menores valores foram encontrados nas maiores profundidades. Esses parâmetros mostram a capacidade do solo em infiltrar a água.

Tabela 6: Valores de  $\theta_r$ ,  $\theta_s$ ,  $hg$ ,  $K_s$  e  $S$  obtidos através da metodologia Beerkan para diferentes camadas da trincheira de infiltração.

| Camadas            |       | $\theta_r(\text{cm}^3/\text{cm}^3)$ | $\theta_s(\text{cm}^3/\text{cm}^3)$ | $hg$ (mm)  | $K_s$ (mm/h) | $S$ (mm/s <sup>0,5</sup> ) |
|--------------------|-------|-------------------------------------|-------------------------------------|------------|--------------|----------------------------|
| <b>0</b>           | Média | 0,0283                              | 0,3361                              | -82,7430   | 13,1749      | 0,4244                     |
| <b>20</b>          | Média | 0,0974                              | 0,3238                              | -229,9507  | 2,3644       | 0,2725                     |
| <b>40</b>          | Média | 0,0736                              | 0,3548                              | -204,8795  | 32,2672      | 0,7763                     |
| <b>60</b>          | Média | 0,0528                              | 0,4675                              | -174,5220  | 17,3676      | 0,8553                     |
| <b>80</b>          | Média | 0,1039                              | 0,4130                              | -57,2310   | 3,4160       | 0,1918                     |
| <b>100</b>         | Média | 0,1099                              | 0,4149                              | -60,7410   | 2,4707       | 0,1764                     |
| <b>120</b>         | Média | 0,1525                              | 0,4155                              | -90,6807   | 2,8694       | 0,2140                     |
| <b>140</b>         | Média | 0,0918                              | 0,3857                              | -44,2538   | 2,4206       | 0,1449                     |
| <b>160</b>         | Média | 0,1283                              | 0,4196                              | -55,9975   | 2,3752       | 0,1539                     |
| <b>Média Total</b> |       | 0,0932                              | 0,3926                              | - 113,7978 | 8,9907       | 0,3647                     |

Fonte: Autor.

Ainda na Tabela 6, as camadas da superfície de 20 cm e 60 cm que apresentaram a classe textural de franco-arenosa, obtiveram valores bem diferentes, variando entre 2,36 mm/h a 17,37 mm/h para  $K_s$  e 0,27 mm/s<sup>0,5</sup> a 0,85 mm/s<sup>0,5</sup> para  $S$ . Nas camadas de 80, 120 e 140 cm que apresentaram classe textural franca, os valores variaram entre 3,41 a 2,42 para  $K_s$  e 0,14 a 0,21

para S. Nas camadas de 100 e 160 cm que apresentaram classe textural franco-siltoso, os valores variaram entre 2,47 a 2,37 para  $K_s$  e 0,15 a 0,18 para S. Já na camada de 40 cm onde a classe textural é areia franca, o valor de  $K_s$  é 32,27 e de S é 0,78. A camada que contém o maior percentual de areia é a camada de 40 cm e obteve os maiores valores de  $K_s$ . S. Souza et al. (2008), observaram que os valores da condutividade hidráulica e da sorvidade ampliaram com o aumento do teor de areia para solos franco-arenoso e franco-argiloso.

Coutinho et al. (2016) observou que para condutividade hidráulica há um aumento no seu valor com o aumento do teor de área, havendo uma exceção para solo tipo areia, onde este apresentou valores inferiores ao solo siltoso. Foram observados neste trabalho valores maiores para solos com maiores teores de areia.

Na Tabela 7 são apresentados os valores das escalas características, escala de comprimento capilar ( $\lambda_c$ ), o raio característico de poros hidraulicamente ativos ( $\lambda_m$ ) e a concentração de raio característico de poros ( $C\lambda_m$ ).

Tabela 7: Escalas características  $\lambda_c$ ,  $\lambda_m$  e (quantidade de poros por metro quadrado ( $C\lambda_m$ )) do solo da trincheira de infiltração.

| Camadas (cm)       |       | $\lambda_c$ (mm) | $\lambda_m$ (mm) | $C\lambda_m$ *(Nº de poros por m <sup>2</sup> ) |
|--------------------|-------|------------------|------------------|---|
| <b>0</b>           | Média | 99,9982          | 0,0742           | 2,61E+04  |
| <b>20</b>          | Média | 279,7891         | 0,0271           | 3,59E+05  |
| <b>40</b>          | Média | 274,9580         | 0,0555           | 3,53E+06  |
| <b>60</b>          | Média | 212,2158         | 0,0346           | 8,09E+05  |
| <b>80</b>          | Média | 69,4721          | 0,1066           | 1,83E+03  |
| <b>100</b>         | Média | 82,2009          | 0,0923           | 2,94E+03  |
| <b>120</b>         | Média | 122,2034         | 0,0642           | 1,93E+04  |
| <b>140</b>         | Média | 59,8942          | 0,1289           | 1,10E+03  |
| <b>160</b>         | Média | 67,7591          | 0,1102           | 1,25E+03  |
| <b>Média Total</b> |       | 144,0607         | 0,0771           | 5,49E+05  |

\*Quantidade de poros hidraulicamente ativos por unidade de área (Nº de poros m<sup>-2</sup>).

Fonte: Autor.

Os menores valores encontrados para o raio característico de poros hidraulicamente ativos foram nas camadas de 20 e 60 cm de profundidade de classificação textural franco-arenosa, com valor aproximado de 0,03. A superfície com a mesma classificação textural não obteve o mesmo comportamento, apresentando valor de 0,07. Já os maiores valores de  $\lambda_m$  0,11 e 0,13 foram encontrados nas camadas de 80 e 140 cm respectivamente, suas classificações texturais foram de franca.

Nos trabalhos realizados por Coutinho (2011), observou-se que  $\lambda_m$  possuem valores que acompanham o crescimento da densidade dos solos, uma vez que as camadas apresentaram densidades de 1,1; 1,39 e 1,58 g/cm<sup>3</sup>, os valores do raio característicos de poros hidraulicamente funcionais tiveram valores de 0,04; 0,12 e 0,20 mm, respectivamente. Essas tendências também foram encontradas no trabalho de Ursulino (2017). Já no trabalho de Souza et al. (2008), foi confirmado o aumento de  $\lambda_m$  com  $K_s$  e  $S$ , porém os valores das massas específicas diminuiram. Neste trabalho foi verificado que as camadas que obtiveram valores maiores de  $\lambda_m$  foram as camadas mais profundas, onde as porcentagens de areia foram menores.

Com relação ao  $C\lambda_m$ , os autores Coutinho (2011) e Ursulino (2017), constataram que valores menores de  $\lambda_m$  foram compensados pelo maior número de poros hidraulicamente ativos ( $C\lambda_m$ ). Fato ocorrido também neste estudo, onde os maiores valores de  $C\lambda_m$  foram encontrados nas camadas superiores, onde existe uma maior porcentagem de areia.

Os valores ajustados pelo programa RETC para obtenção dos parâmetros da curva de retenção, utilizado no programa HYDRUS, são apresentados na Tabela 8.

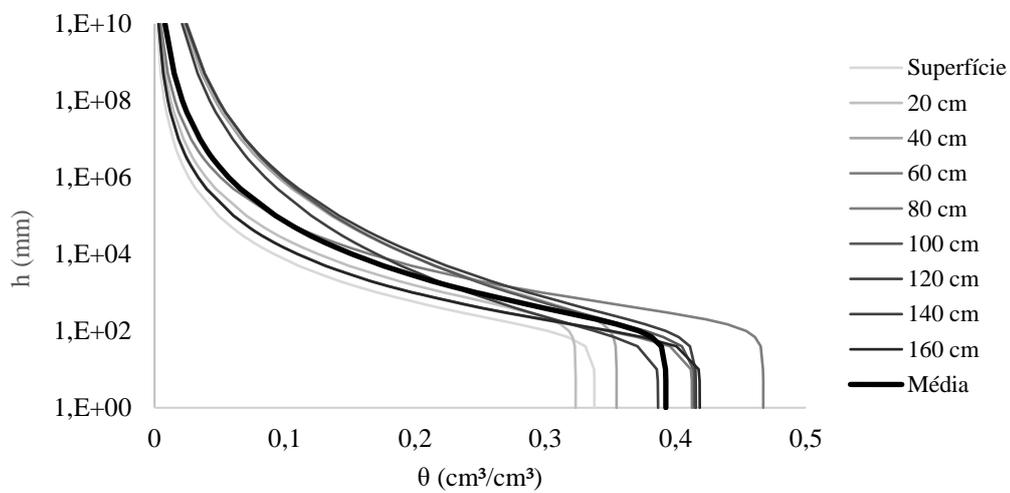
Tabela 8 – Parâmetros hidráulicos ajustados para a hipótese de Mualen (1976) pelo RETC.

| <b>Camadas</b>     | <b><math>\alpha</math>(mm<sup>-1</sup>)</b> | <b>n</b> |
|--------------------|---|----------|
| <b>0</b> Média     | 0,0108                                      | 1,167    |
| <b>20</b> Média    | 0,0032                                      | 1,298    |
| <b>40</b> Média    | 0,0082                                      | 1,1605   |
| <b>60</b> Média    | 0,0043                                      | 1,2602   |
| <b>80</b> Média    | 0,0129                                      | 1,248    |
| <b>100</b> Média   | 0,0138                                      | 1,1514   |
| <b>120</b> Média   | 0,008                                       | 1,2821   |
| <b>140</b> Média   | 0,0196                                      | 1,1551   |
| <b>160</b> Média   | 0,0141                                      | 1,2722   |
| <b>Média Total</b> | 0,010544                                    | 1,221611 |

Fonte: Autor.

As curvas de retenção média para as camadas dos solos estudadas na trincheira de infiltração são apresentadas na Figura 12. Nela, é possível perceber uma uniformidade grande nas camadas analisadas. Percebe-se também pela Figura 12, que as camadas com profundidade de 100, 120 e 140 cm apresentaram maiores capacidade de retenção à medida que o potencial matricial aumenta após o ponto de inflexão a partir de  $h \approx 1$  m. Essas camadas possuem uma grande porcentagem de silte em sua composição.

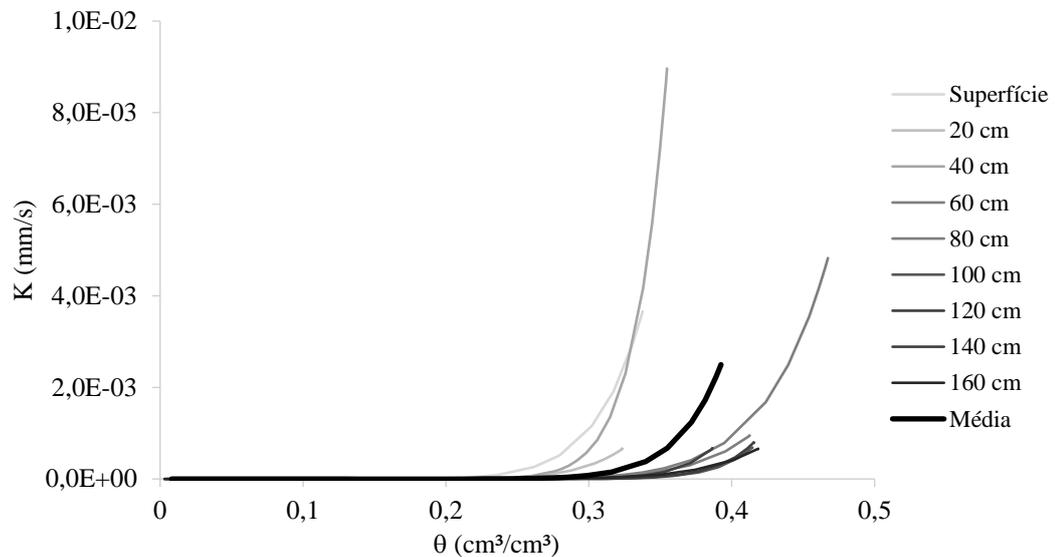
Figura 12 – Curva de retenção média para as camadas do solo da trincheira de infiltração ajustadas.



Fonte: Autor.

As curvas de condutividade hidráulica média para as camadas dos solos estudados da trincheira de infiltração são apresentadas na Figura 13. Nela, pode-se perceber que a camada de 40 cm de profundidade apresenta uma elevada condutividade hidráulica. Outro destaque para observação são as camadas de superfície e 60 cm que também apresentam altas condutividades hidráulicas. De modo geral, observa-se um elevado contraste na capacidade de condução de água no solo suporte da trincheira de infiltração.

Figura 13 – Curva de condutividade hidráulica média para as camadas do solo da trincheira de infiltração ajustadas.

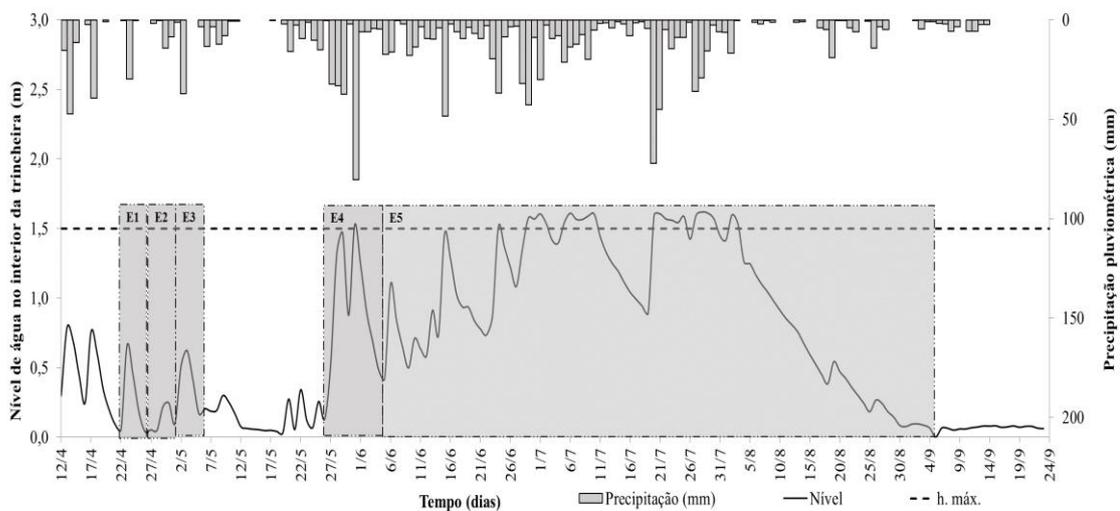


Fonte: Autor.

## 8.2 Monitoramento dos processos de armazenamento da Trincheira de Infiltração

A análise da trincheira de infiltração como técnica compensatória para o manejo das águas pluviais foi realizada nos meses de abril a setembro do ano de 2017. Na Figura 14 são apresentados os dados de precipitação e nível no interior da trincheira de infiltração.

Figura 14 – Monitoramento contínuo da precipitação, vazão de entrada e nível de água no interior da trincheira de infiltração para o período de estudo analisado.



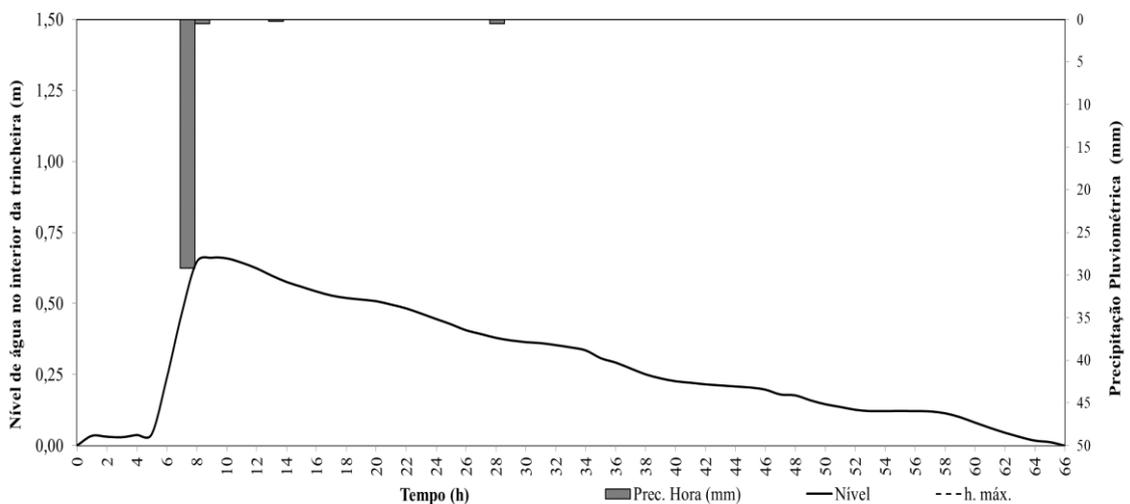
Fonte: Autor.

A linha contínua representa o nível de água no interior da trincheira e a tracejada representa a profundidade máxima da trincheira de infiltração (1,5 m). Níveis de água superiores a esse valor representam extravasamento do sistema de infiltração.

Para análise da trincheira de infiltração foram destacados cinco eventos para estudos; em cada evento foi verificado o tempo de resposta do sistema de infiltração, a precipitação antecedente para definir as condições iniciais do solo (I, II ou III), precipitação acumulada, altura máxima, tempo de ascensão e tempo de recessão.

O comportamento da trincheira no evento (E1) para o período chuvoso dos dias 23 de abril a 25 de abril, é demonstrado na Figura 15. A precipitação acumulada nos últimos cinco dias antecedentes do momento destacado foi 1,27 mm, caracterizando uma condição inicial de solo seco (I).

Figura 15 – Evento E1 da trincheira de infiltração.



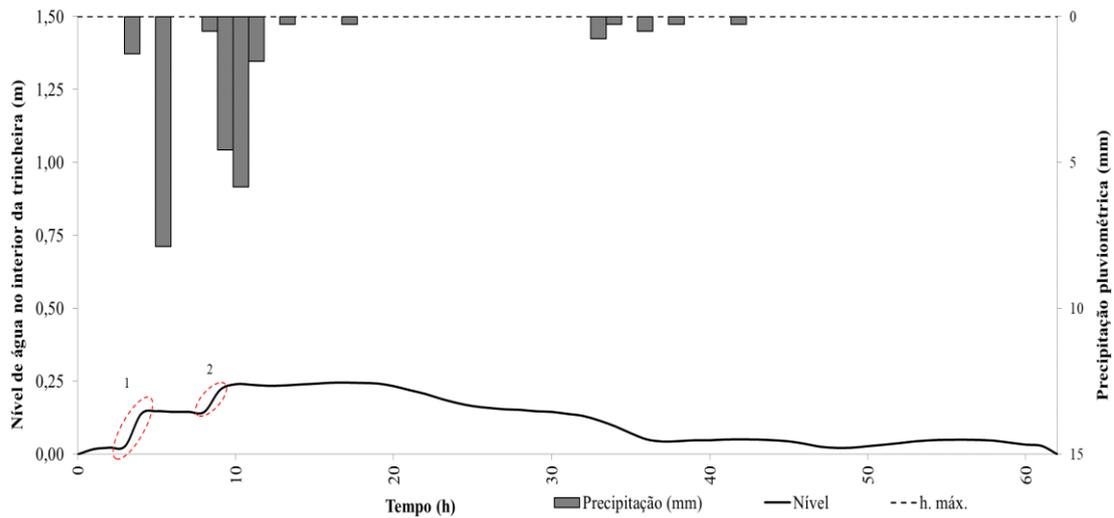
Fonte: Autor.

A precipitação máxima do evento em destaque foi 30,48 mm. O nível de água ascendeu 0,66 m em 5 horas e foram necessárias 57 horas para diminuir o volume captado. A trincheira de infiltração recebeu um volume de 1250,82 L. Não ocorreu extravasamento do sistema nesse evento e todo volume captado foi infiltrado. A vazão máxima de infiltração do sistema foi 18,95 L/h.

O comportamento da trincheira de infiltração no evento 2 (E2) para os períodos chuvosos dos dias 29 de abril a 02 de maio é demonstrado na Figura 16. Percebe-se que ocorrem

vários blocos de precipitação, acarretando várias oscilações no nível do sistema. O somatório das precipitações dos últimos cinco dias foi 2,79 mm, caracterizando uma condição inicial de solo seco (I).

Figura 16 – Evento E2 da trincheira de infiltração.

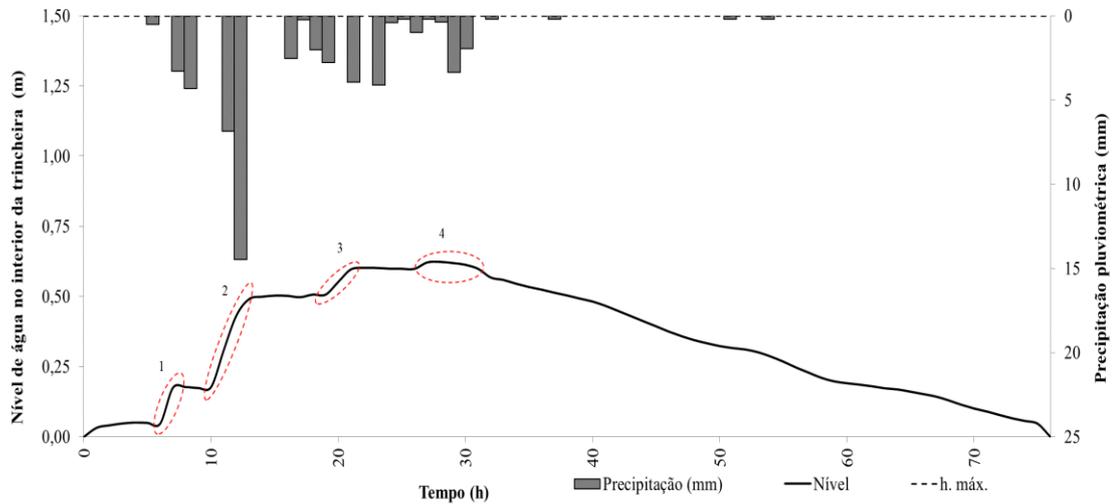


Fonte: Autor.

O momento 1 do segundo evento analisado mostra uma ascensão no nível da trincheira de infiltração 0,15 m em 4 horas, devido ao primeiro bloco de precipitação de 9,15 mm altura. Após 2 horas, outro bloco de precipitação com 12,45 mm de altura fez o nível da trincheira de infiltração subir para 0,24 m em 5 horas, como mostra o momento 2 da Figura 16. O momento de recessão que ocorre após é afetado por pequenos períodos de precipitações no decorrer do processo, ocasionando pequenas oscilações. O volume captado pelo sistema de 426,49 L foi totalmente infiltrado em 46 h, o que representa uma vazão média de drenagem de 6,88 L/h.

O comportamento da trincheira de infiltração no evento 3 (E3) para os períodos chuvosos do dia 02 de maio a 05 de maio é demonstrado na Figura 17. Nesse momento ocorreram vários blocos de precipitação, favorecendo a entrada de água na trincheira de infiltração. O somatório das precipitações dos últimos cinco dias foi de 26,42 mm, caracterizando uma condição inicial de solo média (II).

Figura 17 – Evento E3 da trincheira de infiltração.



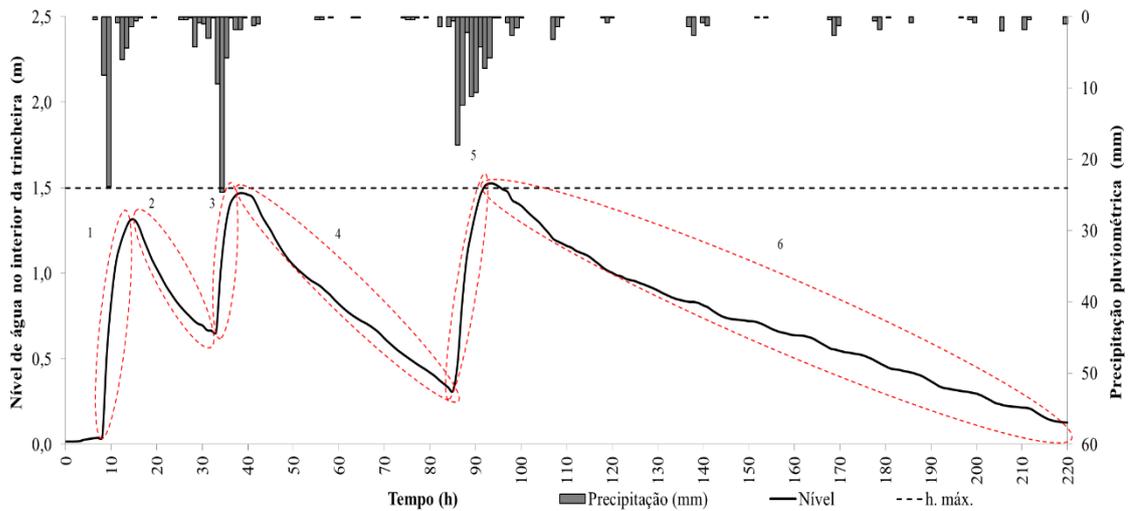
Fonte: Autor.

Esse evento foi caracterizado por vários momentos de ascensão do nível da trincheira de infiltração devido a alguns blocos de precipitação. No primeiro momento o nível da trincheira de infiltração subiu para 0,20 m em 5 horas, devido a uma precipitação acumulada de 8,13 mm. Após 2 horas sem registros de chuva, foi registrado outro bloco de precipitação de 21,35 mm, onde o nível de água subiu para 0,50 m em 3 horas. O terceiro momento ocorreu devido a um bloco de precipitação de 15,68 mm, que fez o nível de água subir para 0,60 m em 8 horas. No quarto momento analisado, o nível da trincheira subiu para 0,62 m em 5 horas devido a um bloco de precipitação que ocorreu, com altura de 7,48 mm.

No evento destacado a recessão ocorreu em 49 horas, dentro do período recomendado para a recessão (72h) e obteve oscilações devido às precipitações que ocorreram durante o processo. A trincheira de infiltração armazenou um volume de 950,55 L que foram totalmente infiltrados a uma vazão de 12,51 L/h.

O comportamento da trincheira de infiltração no evento 4 (E4) para os períodos chuvosos do dia 27 de maio a 05 de junho é demonstrado na Figura 18. Nesse evento ocorreram vários blocos de precipitação, ocasionando entrada de água na trincheira de infiltração. O somatório das precipitações dos últimos cinco dias foi de 36,6 mm, caracterizando uma condição inicial de solo úmido (III).

Figura 18 – Evento E4 da trincheira de infiltração.



Fonte: Autor.

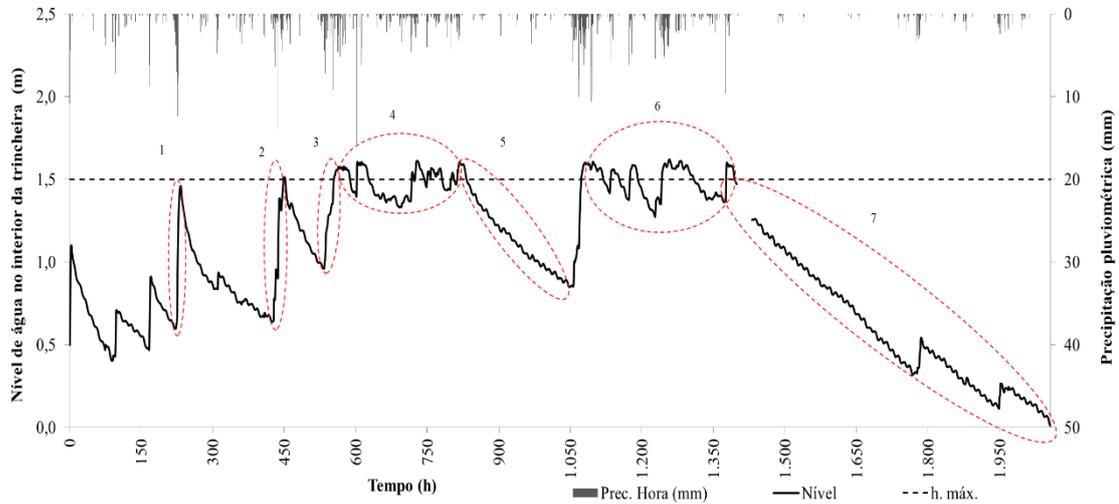
No primeiro momento deste evento, devido a uma precipitação acumulada de 45,60 mm que ocorreu em 10 horas, o nível da trincheira de infiltração subiu para 1,32 m. No segundo momento o nível desceu para 0,65 m em 19 horas, mesmo ocorrendo 20,60 mm de precipitação acumulada. O movimento de recessão do sistema foi interrompido por outro bloco de precipitação de 34,40 mm em 6 horas, fazendo o nível subir novamente para 1,47 m. Durando um intervalo de 47 horas com pouca precipitação, cerca de 8,60 mm, o nível de água no interior da trincheira voltou a descer para 0,30 m. Em curto espaço de tempo (9 h), choveu 72,20 mm, interrompendo o processo de recessão do sistema e elevando o nível de água para 1,53 m, acarretando o extravasamento do sistema, observado no momento 5. A partir deste momento, o nível de água no interior da trincheira de infiltração diminuiu para 0,10 m em 127 horas.

Neste momento percebe-se que devido às condições iniciais do solo, o nível é mais sensível a variações, onde a velocidade de infiltração é inferior em condições de solo úmido. Emerson et al. (2010), observaram que em uma trincheira de infiltração de 5,7 m<sup>3</sup>, o tempo máximo de esvaziamento foi de oito dias, ou 192 horas aproximadamente, para um período de três anos de monitoramento.

O comportamento da trincheira de infiltração no evento 5 para os períodos chuvosos do dia 06 de junho a 03 de setembro, é demonstrado na Figura 19. Esse foi o evento mais longo analisado, onde ocorreram vários blocos de precipitação, ocasionando entrada de água na trincheira de infiltração e extravasamento do sistema em vários momentos. O somatório das

precipitações dos últimos cinco dias foi de 38,80 mm, caracterizando uma condição inicial de solo úmido (III).

Figura 19 – Evento E5 da trincheira de infiltração.



Fonte: Autor.

O primeiro momento analisado ocorreu entre o tempo de 222 a 233 horas, onde a precipitação acumulada foi 45,20 mm e o nível de água subiu de 0,60 para 1,46 m. O decaimento do nível deste momento ocorreu em 192 horas e indo para 0,60 m, sendo que ocorreu precipitação durante o processo de 46 mm distribuído ao longo do período. Essa precipitação que ocorreu atrapalha o processo de infiltração do sistema.

O segundo momento analisado ocorreu entre o tempo de 424 a 451 horas, onde o nível de água subiu de 0,64 m para 1,51 m. Neste momento ocorre o primeiro extravasamento do sistema para este evento, devido a uma precipitação de 50,80 mm. O nível de água desce para 0,96 m em 82 horas e durante esse processo a precipitação foi 21,40 mm.

No terceiro momento estudado, o nível da trincheira subiu de 0,96 m para 1,58 m em 32 horas, devido a uma precipitação de 57,00 mm, aconteceu o segundo extravasamento do sistema para o evento analisado.

No quarto momento analisado, ocorreram vários extravasamentos no sistema e poucos momentos de descida de nível. A precipitação total deste momento foi de 154,60 mm e o nível da trincheira de infiltração chegou em 1,61 m em 254 horas. Neste período o solo estava saturado, diminuindo o movimento de infiltração de água na técnica compensatória e uma

intensa precipitação pluviométrica em períodos relativamente curtos, sendo a causa dos diversos extravasamentos da estrutura de infiltração.

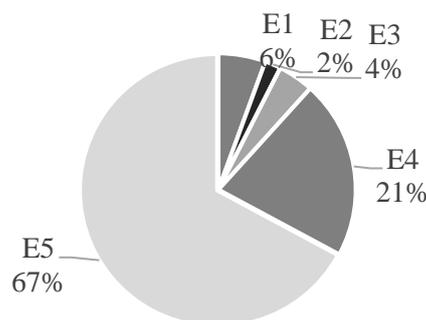
No quinto momento analisado a precipitação acumulada foi 29,20 mm em 239 horas e o nível de água desceu para 0,85 m. O momento foi interrompido por outro bloco de precipitação de 117,80 mm, que fez o nível de água da trincheira subir para 1,60 m em 43 horas, fazendo o sistema extravasar.

O sexto momento comportou-se parecido com o quarto, com muitas oscilações no nível de água e vários momentos onde ocorreram extravasamentos. A precipitação acumulada para este momento foi 146,20 mm em 281 horas. Com isso, o nível de água variou de 1,27 a 1,62 m.

O sétimo período analisado demonstrou uma falha em um trecho na leitura do nível de água, porém sem prejuízo para análise do mesmo. O momento apresentou uma recessão que durou 670 horas, com precipitação acumulada durante o processo de 70 mm. Essa precipitação elevou o nível de água da trincheira algumas vezes, ocasionando um maior tempo para infiltração da água no solo.

O evento 5 armazenou 15120,86 L, correspondendo a 67% do volume de água infiltrada em todos os eventos analisados, conforme Figura 20. Esse volume foi infiltrado a uma vazão média de 7,35 L/h.

Figura 20 – Porcentagem do volume infiltrado por evento analisado.



Fonte: Autor.

Os dados dos eventos analisados para a trincheira de infiltração são apresentados na Tabela 9. Nela pode-se observar o período, a precipitação antecedente, as condições do solo, a precipitação do evento, a vazão, a altura, o tempo de ascensão e de recessão para os eventos.

Em Melo et al. (2016.a), os eventos analisados apresentaram um comportamento mais distribuídos em relação ao deste estudo, onde obteve uma vazão média de infiltração para os cinco eventos de 12,80 L/h. A vazão média para este estudo apresentou praticamente o mesmo valor da vazão de infiltração do estudo anterior.

Na Tabela 9 observa-se que nos períodos mais chuvosos o nível da trincheira extravasou, devido à saturação do solo, dificultando a infiltração da lâmina de água no interior da trincheira. Além disso, nos eventos E4 e E5 o nível da trincheira oscilou bastante. Não foi possível o sistema infiltrar toda a água armazenada para as próximas precipitações devido ao tempo, dificultando a medição de recessão do sistema. Mesmo problema encontrado no trabalho de Melo (2015).

Tabela 9 – Monitoramento dos eventos analisados.

| <b>Períodos</b>            | <b>Precipitação<br/>anterior<br/>(mm)</b> | <b>Padrão de<br/>condição<br/>inicial do<br/>solo (-)</b> | <b>Precipitação<br/>do momento<br/>(mm)</b> | <b>Vazão<br/>máxima<br/>de entrada<br/>(m<sup>3</sup>/min)</b> | <b>Altura<br/>máxima<br/>da coluna<br/>d'água<br/>(m)</b> | <b>1. Tempo<br/>de<br/>ascensão<br/>(h)</b> | <b>2. Tempo<br/>de<br/>recessão<br/>(h)</b> |
|----------------------------|---|---|---|--|---|---|---|
| <b>E1</b> 23/04 a<br>25/04 | 1,27                                      | I   | 30,48                                       | 0  | 0,66  | 5   | 57  |
| <b>E2</b> 29/04 a<br>02/05 | 2,79                                      | I   | 24,13                                       | 0  | 0,24  | 15  | 46  |
| <b>E3</b> 02/05 a<br>05/05 | 26,42                                     | II  | 37,09                                       | 0  | 0,62  | 24  | 49  |
| <b>E4</b> 27/05 a<br>05/06 | 36,6                                      | III   | 212,2                                       | 7,01   | 1,53  | -   | 127   |
| <b>E5</b> 06/06 a<br>03/09 | 38,8                                      | III   | 816,6                                       | 5,38   | 1,62  | -   | 670   |

Fonte: Autor.

Ocorrências de extravasamentos das técnicas compensatórias também foram encontrados em Warnars et al. (1999), onde houveram extravasamentos médio anual para tempos de retornos inferiores aos adotados para o projeto da trincheira de infiltração, que foram de 2 anos.

Ocorreram oscilações nos momentos de recessões dos eventos analisados mesmo sem leitura de precipitações no aparelho. Notam-se claramente essas oscilações nos eventos E1, E2 e E3. Griffiths e Clausen (1997) também observaram este fato. Essas oscilações são atribuídas as águas remanescentes nos poros do solo natural ou do próprio sistema de infiltração.

O tempo de esvaziamento médio da trincheira para este estudo foi de 20 dias, superior ao observado por Melo (2015) para esta mesma estrutura de 6 dias. Esse fato pode ter acontecido devido ao processo de colmatção que esses sistemas estão sujeitos. Assim como, pelo fato da estrutura ter recebido uma alta carga de material argiloso, devido à lavagem de um reservatório local, também relatado por Melo (2015).

Os valores das taxas de infiltração em alguns momentos dos eventos analisados nesse estudo, como o valor médio dessa taxa em cm/h, são apresentados na Tabela 10.

Tabela 10 – Taxas de infiltração em cada momento de recessão de cada evento e a média geral do estudo. Taxa em cm/h.

| <b>E1</b> | <b>E2</b> | <b>E3</b> | <b>E4.2</b> | <b>E4.4</b> | <b>E4.6</b> | <b>E5.1</b> | <b>E5.5</b> | <b>E5.7</b> | <b>Média</b> |
|-----------|-----------|-----------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|--------------|
| 1,14      | 0,52      | 1,27      | 3,53        | 2,47        | 1,10        | 0,86        | 0,32        | 0,25        | 1,27         |

Fonte: Autor.

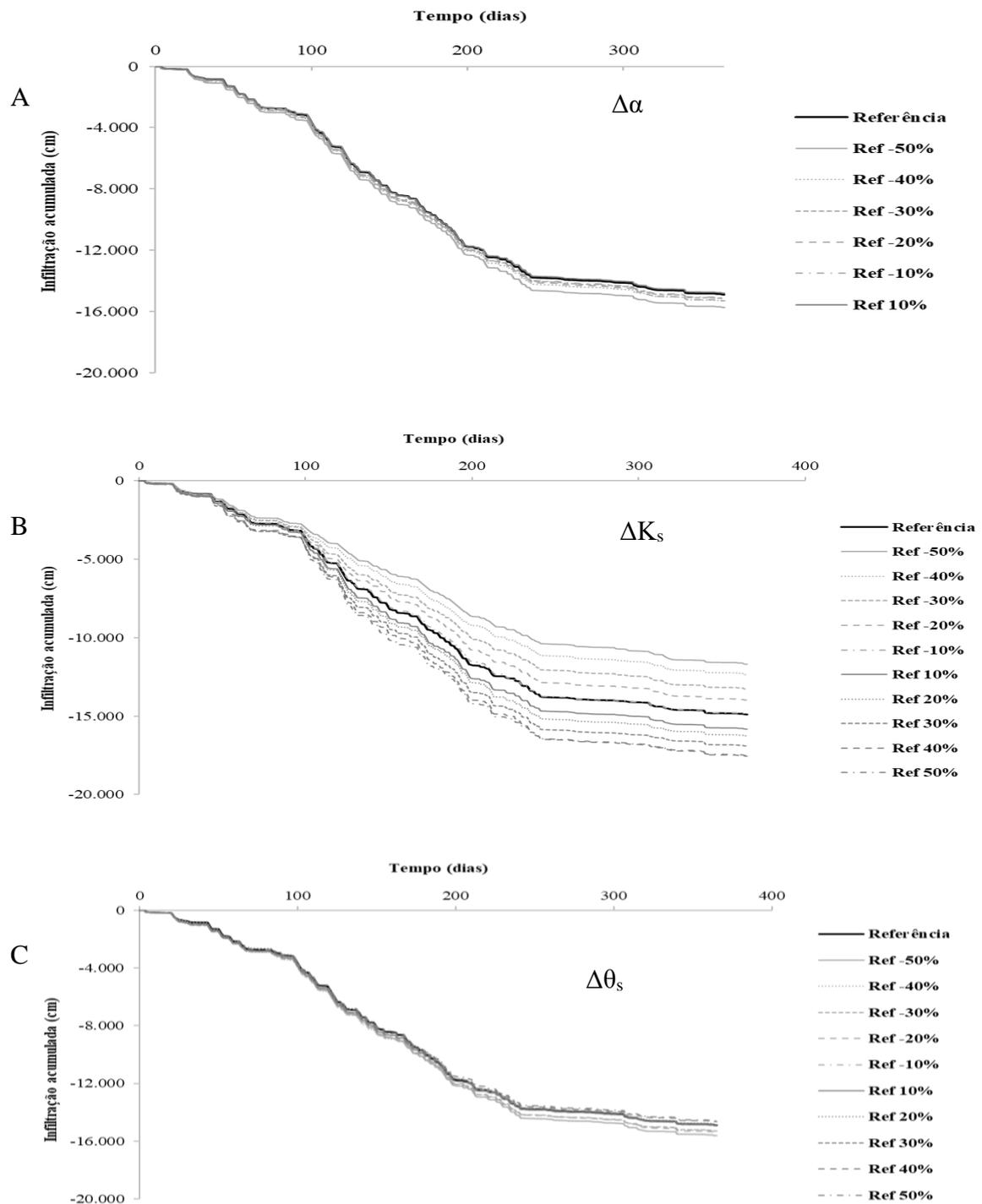
Emerson et al. (2010), em seus estudos verificaram uma queda na taxa de infiltração para o sistema de 10 cm/h para 0,10 cm/h em três anos. Onde a base da estrutura sofreu maior influência da colmatção. Melo (2015) em seus estudos nessa mesma estrutura, apresentou valor médio para taxa de infiltração de 0,83 cm/h, inferior ao encontrado nesse estudo que foi de 1,27 cm/h.

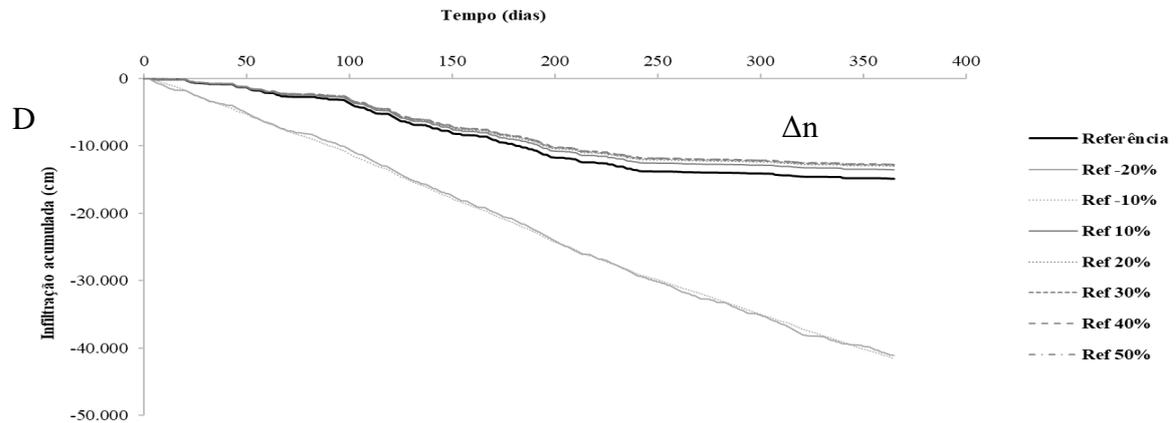
Na Tabela 10, nota-se que as maiores taxas de infiltração ocorreram nos eventos onde os volumes precipitados ocorreram em pouco espaço de tempo. A chuva bem distribuída no tempo atrapalha o processo de recessão diminuindo as taxas de infiltração.

### 8.3 Análise de sensibilidade

O comportamento de infiltração no interior da trincheira alterou conforme foi variando os parâmetros hidráulicos  $\alpha$ ,  $K_s$ ,  $\theta_s$  e  $n$ , demonstrado na Figura 21.

Figura 21 – Evolução da infiltração no interior da trincheira de infiltração simulados pelo software HYDRUS 1D. Parâmetros:  $\alpha$  (A),  $K_s$  (B),  $\theta_s$  (C) e  $n$  (D).





Fonte: Autor.

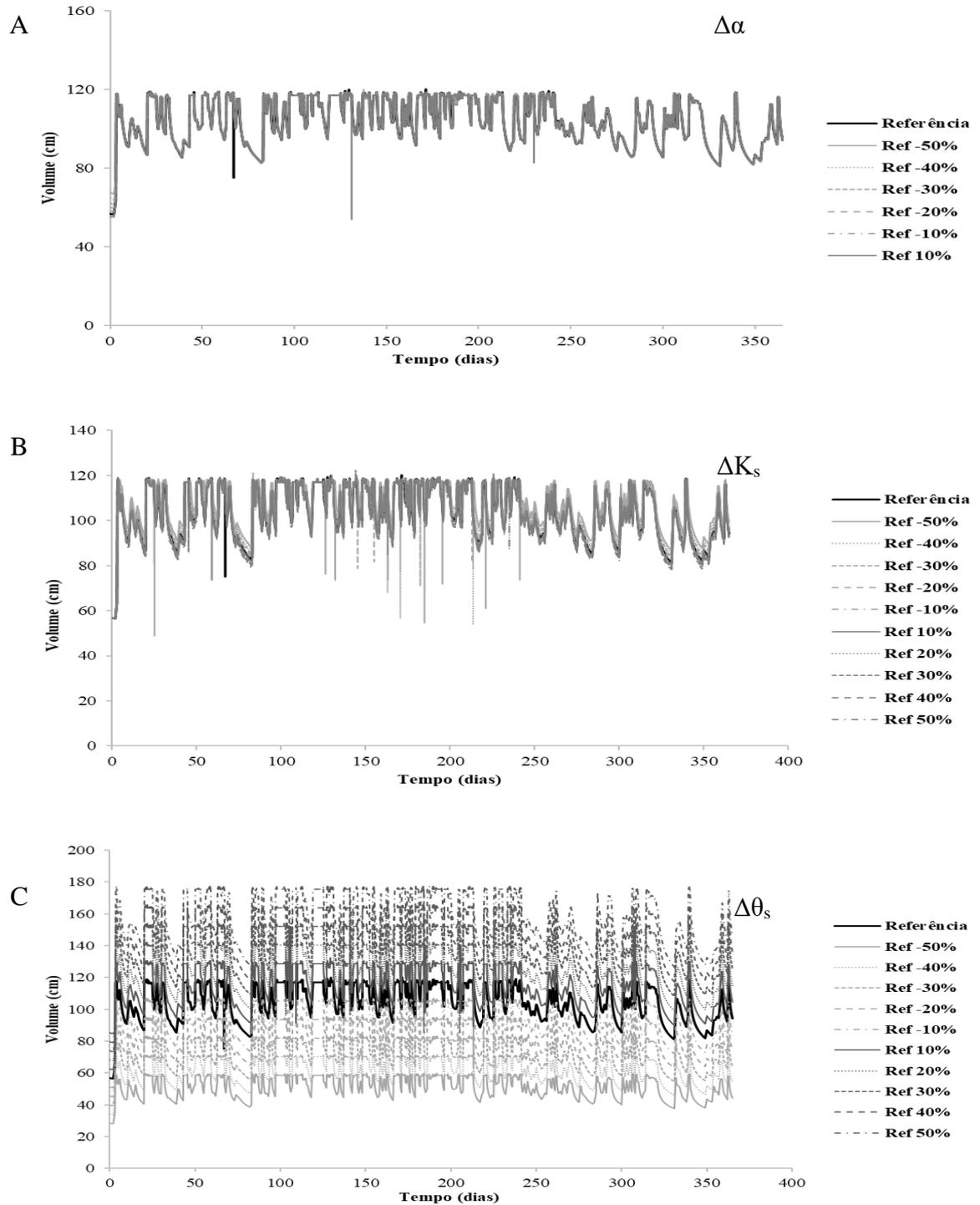
As variações nos parâmetros  $\alpha$  e  $\theta_s$  provocaram modificações insignificantes em relação aos valores de referência, simulado no HYDRUS-1D. O *software* HYDRUS-1D não convergiu, portanto, não encontrou soluções quando o valor de  $\alpha$  fosse maior que 10% do valor de referência, Figura 21A. O HYDRUS-1D convergiu todas as simulações do parâmetro  $\theta_s$ , observa-se que não apresentou nenhuma alteração significativa em relação ao valor de referência, demonstrado na Figura 21C.

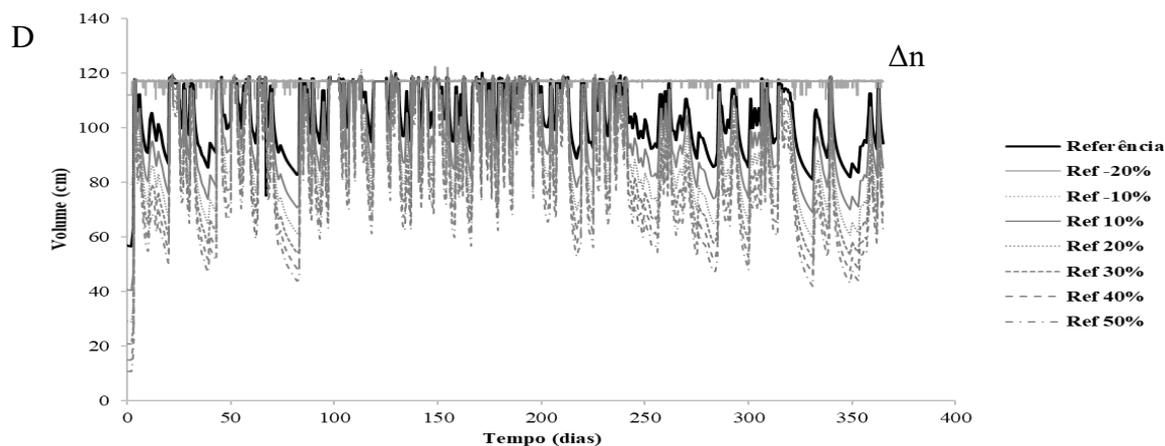
As variações no parâmetro  $K_s$  obtiveram modificações significativas para o comportamento da trincheira, indicando que o modelo se mostrou sensível a este parâmetro. As variações positivas em relação ao valor de referência, fez o solo da trincheira infiltrar mais lâminas de água. Contudo, o comportamento ao longo do tempo seguiu uma tendência para todas as simulações. O HYDRUS 1-D simulou todos os valores de  $K_s$ , conforme demonstrado na Figura 21B.

Em relação às variações no parâmetro  $n$ , verifica-se que o comportamento de infiltração do solo da trincheira obteve um comportamento totalmente diferente. Quando o valor variava abaixo do valor de referência, o comportamento não seguia a mesma dinâmica. Com alterações acima deste valor, o comportamento permanecia igual ao valor de referência, apenas com modificações pequenas, conforme demonstrado na Figura 21D.

O comportamento da trincheira de infiltração para as diferentes variações dos parâmetros hidráulicos simulados no HYDRUS-1D é demonstrado na Figura 22.

Figura 22 – Volume da trincheira de infiltração simulado pelo HYDRUS 1D. Parâmetros:  $\alpha$  (A),  $K_s$  (B),  $\theta_s$  (C) e  $n$  (D).





Fonte: Autor.

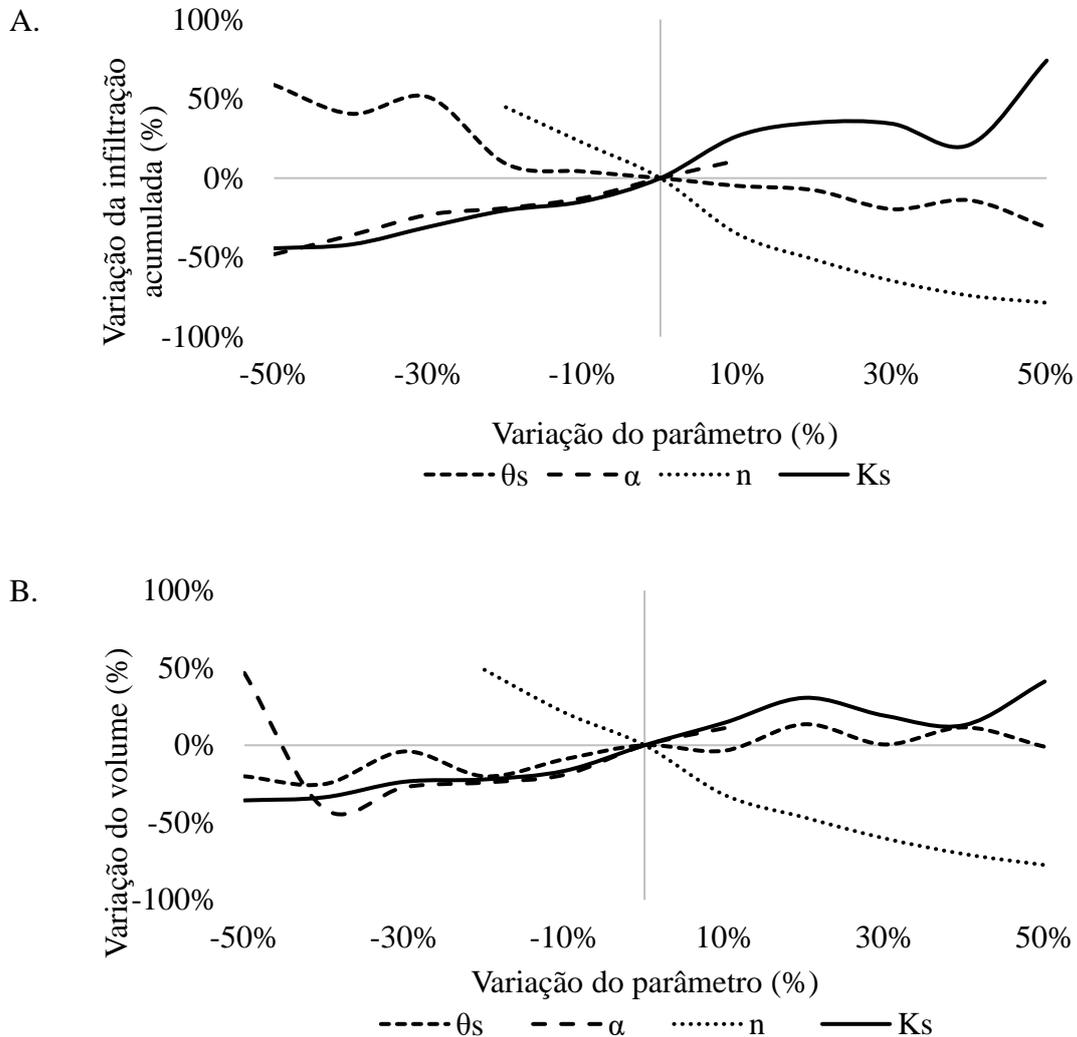
Os valores de volume simulados pelo *software* HYDRUS-1D para os diferentes parâmetros hidráulicos obtiveram resultados diferentes. As variações dos parâmetros  $\alpha$  e  $K_s$  provocaram modificações insignificantes em relação aos valores de referência, demonstrado na Figura 22A e 22B.

O parâmetro hidráulico  $\theta_s$  variou bastante com as alterações nos valores de referência, indicando que o modelo simulado é sensível a esse parâmetro. A simulação convergiu em todos os valores. A diferença da lâmina de -50% para o valor de referência foi aproximadamente 60 cm e do valor de referência para +50% foi aproximadamente de 60 cm. Isso mostra o comportamento semelhante do volume, mesmo modificando o valor de referência, demonstrado na Figura 22C.

Como comentado na Figura 21D, verifica-se que o comportamento do volume da trincheira obteve um comportamento totalmente diferente ao valor de referência quando o parâmetro variava abaixo do valor de referência. Variações acima deste valor, o comportamento permanecia igual ao valor de referência, apenas com pequenas modificações, conforme demonstrado na Figura 22D.

As variações dos parâmetros da infiltração acumuladas e volume da trincheira de infiltração são demonstradas na Figura 23.

Figura 23 - Variação dos parâmetros.



Fonte: Autor.

O gráfico resumo da Figura 23A apresenta claramente uma variação maior nos parâmetros da condutividade hidráulica saturada para a lâmina de água infiltrada acumulada na trincheira de infiltração. Os parâmetros  $\theta_s$  e  $\alpha$  também variaram, porém menos que  $K_s$ . A grande variação do parâmetro  $n$  neste gráfico resumo pode ser explicada pelo seu comportamento quando o *software* HYDRUS simulou para os dados abaixo do valor de referência, conforme explicado na Figura 21D.

O gráfico resumo da Figura 23B mostra uma variação dos parâmetros mais homogênea na variação do volume simulado no *software* HYDRUS. Porém, o parâmetro  $n$  obteve uma

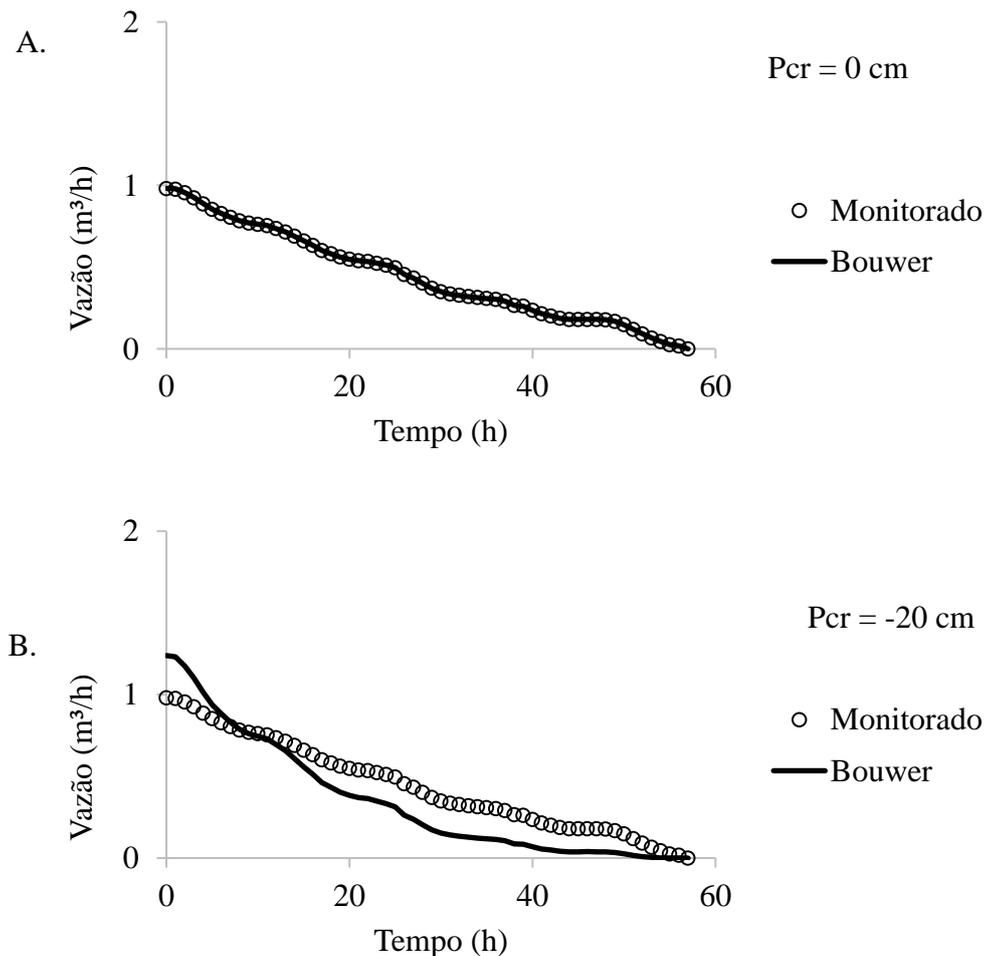
variação mais abrupta, onde o comportamento simulado para valores abaixo do de referência obtiveram comportamentos totalmente diferentes das demais simulações.

#### 8.4 Análise do modelo de Bouwer

Foi analisado a curva de recessão dos eventos do inverno de 2017 e com os dados gerados foi utilizado a modelagem de Bouwer (1969) e a calibração do modelo com as pressões intersticiais de 0 cm e -20 cm.

O evento de infiltração analisado ocorreu no mês de abril de 2017 e o nível de água máximo foi de 0,66 m. A curva de recessão para o evento analisado para as diferentes pressões críticas podem ser vista na Figura 24.

Figura 24 – Curva de recessão do evento 1.



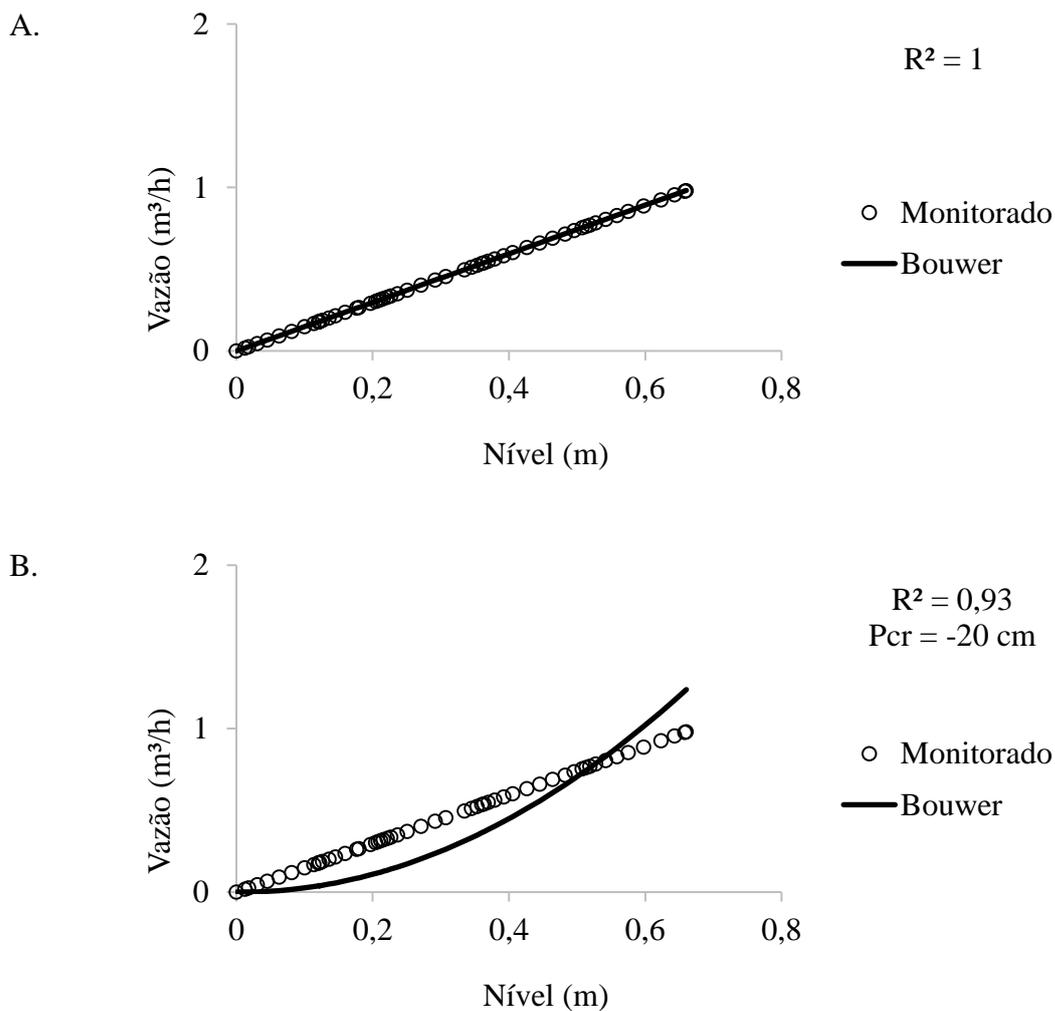
Fonte: Autor.

Pode ser observada na Figura 24 a correlação entre os dados observados com os calculados pelo modelo analítico de Bouwer (1969). A Figura 24A mostra que os dados calculados pelo modelo com a pressão crítica 0 cm obtém a melhor correlação, comparado a correlação da pressão crítica -20cm, conforme Figura 24B.

De acordo com a Figura 24, o modelo apresenta uma boa correlação no momento de saturação do solo. Segundo Melo (2015), o valor da pressão intersticial igual a zero é o momento de saturação do solo.

Os ajustes do modelo de Bouwer, de acordo com Souza (2002), Proton (2008) e Melo (2015), são apresentados na Figura 25 com os dados observados para o evento de recessão do estudo.

Figura 25 – Ajuste do modelo de Bouwer para os dados observados.



Fonte: Autor.

Para o ajuste da Figura 25A, os valores variáveis no Excel pelo solver foram as resistências hidráulicas de colmatção da base e parede da estrutura, assim como a pressão intersticial. Conforme resultado mostrado na Figura 25A, esse foi o melhor ajuste, onde  $R^2$  teve valor 1, a pressão crítica foi ao valor zero e as resistências da base e parede obtiveram valores de 1 e 0,01 horas, respectivamente. A resistência da base apresenta maior colmatção em relação à parede da estrutura.

Para o ajuste da Figura 25B, os valores variáveis no Excel pelo solver foram as resistências hidráulicas de colmatção da base e da parede. A pressão crítica foi fixada em -20 cm. O ajuste do modelo de Bouwer apresentou um valor de  $R^2$  de 0,93 e os valores das resistências da base e da parede da trincheira de infiltração foram respectivamente de 1173228613 e 1,94 horas. O valor da resistência hidráulica devido à colmatção da base apresentou um valor extremamente alto em relação ao da parede, logo nesse ajuste a infiltração da trincheira para esse estado se deve exclusivamente pela parede da estrutura. Conforme Graciosa (2008b), em alguns projetos para dimensionamento da trincheira de infiltração, a base é considerada colmatada e só é considerada a infiltração da parede.

Os valores do ajuste das Figuras 25B apresentaram concavidades voltadas para cima, isso reflete em um melhor ajuste do modelo. Pois, de acordo com Souza (2002) e Melo (2016), na concavidade voltada para baixo o ajuste não é representativo.

## 9 CONCLUSÕES

O contínuo monitoramento da trincheira de infiltração é importante para entender e aprimorar o comportamento desse sistema em solo urbano, de modo que se tenha um uso mais amplo dessa técnica compensatória de retenção e infiltração. São necessárias análises do seu desempenho em outras épocas, com isso, é possível uma comparação do funcionamento ao longo do tempo.

A trincheira de infiltração apresentou resultados satisfatórios, com elevadas taxas de infiltração de água no solo ao longo de seu período de monitoramento, mesmo ocorrendo extravasamentos do sistema em alguns momentos do monitoramento. Isso é devido ao alto índice pluviométricos da região de estudo, em especial no ano do monitoramento, com elevados eventos de precipitação em períodos curtos de tempo.

Durante o monitoramento deste trabalho, foi observada a necessidade de manutenção nesse tipo de estrutura. A cada final de evento, a caixa de passagem do fluxo de água apresentou acúmulo de sedimentos de solo carregado devido à precipitação. Nessa trincheira de infiltração ocorreram incidentes antes do monitoramento deste trabalho que podem ter colmatado e afetado a eficiência da trincheira de infiltração. Neste trabalho não houve estudos para determinar a taxa de colmatação da trincheira de infiltração.

A trincheira de infiltração tem um volume de armazenamento de 2.227,50 L de água em seu interior. Observando ao longo deste estudo, verificou-se que a capacidade de armazenamento foi solicitada diversas vezes, principalmente nos meses de maiores precipitações pluviométricas. A trincheira de infiltração cumpriu seu objetivo de amortizar uma parcela do volume de águas superficiais.

A caracterização do solo da área da trincheira de infiltração permitiu a identificação do solo e sua taxa de infiltração. Na classificação do solo, notou-se a predominância de solo franco e franco-arenoso. Os resultados obtidos através da metodologia Beerkan possibilitaram melhor detalhamento dos parâmetros hidrodinâmicos do solo.

As simulações utilizando o modelo HYDRUS-1D foram possíveis devido aos parâmetros obtidos pela metodologia Beerkan. Foi realizada uma análise de sensibilidade para se obter uma calibração que deve melhorar as simulações do nível de água no reservatório da trincheira de infiltração.

A modelagem através do modelo Bouwer (1969) apresentou bons resultados, onde os melhores valores ajustados foram obtidos através da pressão intersticial sendo zero. Todos os ajustes obtiveram valores altos de correlação e resultados coerentes em relação a resistências hidráulicas de colmatção da base e das paredes da estrutura de infiltração.

## 10 RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

É necessário continuar os trabalhos de monitoramento dos processos hidráulicos da trincheira de infiltração, a fim de avaliar a eficiência dessas técnicas ao longo do tempo, aprimorando os estudos sobre esses sistemas de infiltração em solos urbanos.

A estrutura de estudo pode ser melhorada, adicionando equipamentos para medição de outras variáveis como medições de umidade do solo, registrando o avanço físico da água infiltrada. Também é importante a instalação de aparelhos necessários para medição da evapotranspiração local, melhorando desta forma, as modelagens em *softwares* de simulações.

É importante realizar a análise e o controle de qualidade da água, com o intuito de verificar e manter a segurança das águas infiltradas nos solos urbanos, contra qualquer tipo de contaminação vindas das vazões de escoamento superficial.

Com a finalidade de verificar o estado de colmatção real do sistema, futuramente pode ser realizado um ensaio destrutivo da estrutura e assim como uma análise química do material encontrado na manta geotêxtil.

Realizar simulações no HYDRUS-2D da trincheira de infiltração em diferentes tipos de situações, verificando o comportamento de infiltração da estrutura em simulações bidimensionais.

## REFERÊNCIAS

- ACIOLI, L.A. **Estudo experimental de Pavimentos Permeáveis para Controle do Escoamento Superficial na Fonte**. Dissertação de Mestrado, IPH, 2005.
- AHIABLAME, L. M.; ENGEL, B. A.; CHAUBEY, I. Effectiveness of low impact development practices in two urbanized watersheds: retrofitting with rain barrel/cistern and porous pavement. **Journal of Environmental Management** 119, pp.151–161, 2013.
- ALFAKIH, E.; BARRAUD, S.; MARTINELLI, I. A study of stormwater infiltration system feasibility and design. **Water Science and Technology**, vol. 39, n. ° 2, p. 225-231., 1999.
- ALVES, E. M. **Aplicação do programa HYDRUS1D em solo cultivado com feijão Caupi**. Dissertação (Mestrado em Tecnologias Energéticas e Nucleares). Universidade Federal de Pernambuco, UFPE, Recife, 83p., 2009.
- ARRAES, F. D. D. **Modelagem bidimensional do movimento da água em condições de solos não saturado**. Tese (Doutorado em Física do Ambiente Agrícola). Universidade de São Paulo, USP, Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Piracicaba, 86p., 2014.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Solo: análise granulométrica**. NBR 7181: método de ensaio. Rio de Janeiro: ABNT, 1984.
- AZZOUT, Y.; BARRAUD, S.; CRES, F.N.; ALFAKIH, E. **Techniques alternatives en assainissement pluvial: choix, conception,realization et entretien**. Paris: Lavoisier.372p., 1994.
- BAGARELLO, V., CASTELLINI, M., DRI PRIMA, S., GIORDANO, G., IOVINO, M. Testing a simplified approach to determine field saturated soil hydraulic conductivity. **Procedia Environmental Sciences**19, 599-608, 2013.
- BAPTISTA, M. B; NASCIMENTO, N. O; BARRAUD S. **Técnicas Compensatórias em Drenagem Urbana**. Porto Alegre: ABRH, 266 p., 2005.
- BETTES, R. **Infiltration Drainage: manual of good practice**. Longon: CIRIA.107p. (Construction Industry Research and Information Association.Report 156). 1996.

BILHANÇA, M.F. **Bacias de retenção em zonas urbanas como contributo para a resolução de situações extremas: cheias e secas.** Universidade de Porto, Faculdade de Engenharia. Dez. 2006.

BOUWER, H. Theory of seepage from open channels. **Advances in Hydroscience**, [s.l.], v.5, p.121–170, 1969.

BROOKS, R. H.; COREY, A. T. Hydraulic properties of porous media. **Hydrology Paper**, n.3, Fort Collins: Colorado State University, 27p., 1964.

BURDINE, N. T. Relative permeability calculations from pore-size distribution data. **American Institute Mining and Metallurgy Engineering**, v.198, p.71-77, 1953.

CAMPANA, N.A; EID.N.J. **Avaliação do desempenho de coberturas permeáveis no controle do escoamento superficial em áreas urbanas.** In: XV Simpósio brasileiro de recursos hídricos, Curitiba. **Anais...** Porto Alegre: ABRH, 2003.

CARVALHO, J. C.; LUIZ, G. C.; GONÇALVES, T. D. **A infiltração no contexto do plano urbanístico e dos projetos paisagístico e arquitetônico.** [s.l.]: In: CARVALHO, J. C.; LUIZ, G. C. GONÇALVES, T. D. Tópicos sobre infiltração: teoria e prática aplicadas a solos tropicais. Brasília: Faculdade de Tecnologia, 2012. p.25–47. (Série Geotecnia, v.4).

CHAHAR, B. R.; GRAILLOT, D.; GAUR, S. Storm-water management through infiltration trenches. **Journal of Irrigation and Drainage Engineering**, [s.l.], v.138, n.3, p.274–281, 2012.

COUTINHO, A. P., LASSABATERE, L., MONTENEGRO, S., ANTONINO, A. C. D., ANGULO-JARAMILLO, R., & CABRAL, J. J. Hydraulic characterization and hydrological behaviour of a pilot permeable pavement in an urban centre, Brazil. **Hydrological Processes**, 30(23), 4242-4254, 2016.

COUTINHO, A.P., LASSABATERE, L., WINIARSKI, T., DA SILVA PEREIRA CABRAL, J.J., ANTONINO, A.C.D. AND ANGULO-JARAMILLO, R. Vadose Zone Heterogeneity Effect on Unsaturated Water Flow Modeling at Meso-Scale. **Journal of Water Resource and Protection**, 7, 353-368, 2015.

COUTINHO, A. P. **Pavimento permeável como técnica compensatória na drenagem urbana da cidade do Recife. Dissertação (Mestrado em Tecnologia Ambiental e Recursos Hídricos).** Universidade Federal de Pernambuco, UFPE, Recife, 152p., 2011.

DE JONG VAN LIER, Q.; DOURADO NETO, D.; METSELAAR, K. Modeling of transpiration reduction in van Genuchten-Mualem type soils. **Water Resources Research, Washington**, v.45, n.2, p.1-9, 2009.

DE SMEDT F.; WIERENGA, P. J. Solute transfer through columns of glass beads. **Water Resources Research**, v.53, p187-204, 1984.

DUCHENE, M.; MCBEAN, E. A.; THOMSON, N. R. Modeling of Infiltration From Trenches for Storm Water Control. **Journal of Water Resources Planning and Management**, v. 120, n. 3, pp. 276-293, 1994.

EMBRAPA – **Empresa Brasileira de Agropecuária. Sistema brasileiro de classificação de solos.** 2. ed. Rio de Janeiro: Embrapa, 2006.

EMBRAPA - **Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. Manual de métodos de análises de solo.** 2. ed. Rio de Janeiro: Ministério da Agricultura e do Abastecimento, 212p., 1997.

EMERSON, C. H.; WADZUK, B. M.; TRAVER, R. G. Hydraulic evolution and total suspended solids capture of an infiltration trench. **Hydrological Processes**, [s.l.], v.24, p.1008–1014, 2010.

ENGELHARDT, I.; STTING, S.; SIMUNEK, J.; GROENEWEG, J.; PÜTZ, T.; VEREECKEN, H. Fate of the antibiotic sulfadiazine in natural soils: Experimental and numerical investigations. **Journal of contaminant hydrology**, v. 177, p. 30-42, 2015.

FUENTES, C.; VAUCLIN, M.; PARLANGE, J. Y.; HAVERKAMP, R. Soil water conductivity of a fractal soil. **Fractals in soil science**. n.142, p.325-335, 1998.

GRACIOSA, M. C. P.; MENDIONDO, E. M.; CHAUDHRY, F. H. Simulação hidráulica de trincheira de infiltração de águas pluviais. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**. v. 13, n. 2, abr – jun, p.89-99, 2008.a.

GRACIOSA, M. C. P.; MENDIONDO, E. M.; CHAUDHRY, F. H. Metodologia para o dimensionamento de trincheira de infiltração para controle do escoamento superficial na origem. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**. v. 13, n. 2, abr – jun, p.207-214, 2008.b.

GRIFFITHS, G. A.; CLAUSEN, B. Streamflow recession in basins with multiple water storages. **Journal of Hydrology**, [s.l.], v.190, p.60–74, 1997.

HAVERKAMP, R.; PARLANGE, J. Y. Predicting the water retention curve from particle size distribution: I Sandy soils without organic matter. **Soil Science**, v.142, p.325-335, 1986.

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

HAVERKAMP, R.; VAUCLIN, M. A note on estimating finite difference interblock hydraulic conductivity values for transiente unsaturated flow problems. **Water Resources Research**, Washington, v.5, n.1, p.181-187, 1979.

HILLEL, D. (1998). **Environmental Soil Physics**. New York, Academic Press,757 p.

HORTON, R. E. An approach toward a physical interpretation of infiltration-capacity. **Proceedings Soil Science Society of America**, Madison, V.5, p. 399-417, 1940.

INMET – **INSTITUTO NACIONAL DE METEOROLOGIA** (2016). Banco de Dados Meteorológicos para Ensino e Pesquisa. Disponível em <<http://www.inmet.gov.br/portal/index.php?r=bdmep/bdmep>>. Acesso em 20 jul 2017.

JABUR, A. S.; DORNELLES, F.; SILVEIRA, A. L. L.; GOLDENFUM, J. A.; OKAWA, C. M. P.; GASPARINI, R. R. Determinação da capacidade de infiltração de pavimentos permeáveis. **RBRH** vol. 20 no.4 out. /dez. 2015 p. 937 – 945 Porto Alegre, 2015.

JÚNIOR, A. A. O.; DA SILVA, L. P.; MENDIONDO, E. M. Vazões afluentes em trincheira de infiltração domiciliar. **Ciência & Engenharia**, v. 24, n. 1, p. 89-98, 2015.

JURY, W. A. ; HORTON, R. **Soil physics**. 6<sup>th</sup>ed. New Jersey. John Wiley, 2004. 368p.

KLAR, A. E. **A água no sistema solo-planta-atmosfera**.São Paulo: Nobel, 1988.

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.

LEMOS, R. C.; SANTOS, R. D. **Manual de descrição e coleta de solo no campo**. 3.ed. [s.l.]: Campinas: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 1996.

LIBARDI, P. L. **Dinâmica da água no solo**. São Paulo: EDUSP, 2005. 329 - 335p.

LUCAS, A. H.; SOBRINHA, L. A.; MORUZZI, R. B.; BARBASSA, A. P. Avaliação da construção e operação de técnicas compensatórias de drenagem urbana: o transporte de finos, a capacidade de infiltração, a taxa de infiltração real do solo e a permeabilidade da manta geotêxtil. **Engenharia Sanitária Ambiental**. v.20 n.1, p.17-28, 2015.

MAYS, L. W. **Historical Perspectives of Storm Drainage**. In: Mays, L. W. Storm Collection Systems Design Handbook, Mcgraw-Hill, EUA, 2001.

MCCUEN, R. H. **Hydrologic Analysis and Design**. 2.ed. Prentice Hall, 1998.

MELO, T. A. T.; COUTINHO, A. P. ; SANTOS, J. B. F. ; CABRAL, J. J. S. P. ; ANTONINO, A. C. D. ; LASSABATERE, L. Trincheira de infiltração como técnica compensatória no manejo das águas pluviais urbanas. **Ambiente Construído** (Online), v. 16, p. 53-72, 2016.a.

MELO, T. A. T.; COUTINHO, A. P. ; CABRAL, J. J. S. P. Desempenho hidráulico de uma técnica compensatória na cidade de Recife, Pernambuco. In: XIII **Simpósio de Recursos Hídricos do Nordeste**, 2016, Aracaju / SE. XIII **Simpósio de Recursos Hídricos do Nordeste**, 2016.b.

MELO, T. A. T. M. **Avaliação hidrodinâmica de trincheira de infiltração no manejo das águas pluviais urbanas**. Tese (Doutorado em Tecnologia Ambiental e Recursos Hídricos). Universidade Federal de Pernambuco, UFPE, Recife, 136p., 2015.

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, out. /dez. 2014.

MUALEM, Y. A new model for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated porous media. **Water Resources Research**, Washington ,v.12, p.513-522, 1976.

MUJOVO, M. J. M. **Simulação de fluxo vertical em trincheira de infiltração urbana.** Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental). Universidade Federal de Santa Catarina, UFSC, Florianópolis, 115p., 2014.

NASCIMENTO, N. O.; BAPTISTA, M. B. **Técnicas compensatórias em águas pluviais.** In: RIGHETTO, A. M. (coord.). Manejo de águas pluviais urbanas. Rio de Janeiro: ABES, pp. 396, 2009.

NASCIMENTO, N. O.; BAPTISTA, M. B.; SOUZA, V. C. B. Sistema Hidrourb para o pré-dimensionamento de soluções alternativas de drenagem urbana – parte 1: conceitos. In: **Simpósio Nacional de Recursos Hídricos**, 12. Vitória. **Anais do XII Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos.** São Paulo: ABRH, v.3.p.669-676, 1997.

NASCIMENTO, N. O. **Tecnologias Alternativas em Drenagem Urbana:** curso. Belo Horizonte: Escola de Engenharia/UFMG, 1996.

NETO, D., C.; CHANG, H., K.; VAN GENUCHTEN, M. A mathematical view of water table fluctuations in a shallow aquifer in Brazil. **Groundwater**, v. 54, n. 1, p. 82-91, 2016.

PAULETTO, E.A.; LIBARDI, P.L.; MANFRON, P.A.; MORAES, S.O. Determinação da condutividade hidráulica de solos a partir da curva de retenção de água. **Revista Brasileira de Ciência de Solo.** Campinas, SP. v. 12, p. 189-195, 1988.

PEITER, T. V.; POLETO, C. Estudos dos efeitos de trincheiras de infiltração sobre o escoamento superficial. **Revista de Estudos Ambientais.** v. 14, n. 2esp, p. 57-67, 2012.

PHILIP, J. R. The quasi-linear analysis, the scattering analog, and other aspects of infiltration and seepage. **Water Resources Research** Center, p.1-27, 1987.

PHILIP, J. R. The theory of infiltration: 4. Sortivity and algebraic infiltration equations. **Soil Science**, Baltimore, V.84, p.257-264, 1957.

PREVEDELLO, C.R. (1996). **Física do solo com problemas resolvidos.** Curitiba, 446 p.

PROTON, A. **Etude hydraulique des tranchées de rétention/infiltration.** Tese de Doutorado. Thèse de Docteur de L'INSA de Lyon, France, 2008.

REIS, R. P. A.; ILHA, M. S. O.; TEIXEIRA, P. C. Sistemas prediais de infiltração de água de chuva: aplicações, limitações e perspectivas. **Revista Eletrônica de Engenharia Civil**, 7 (3), pp.55 – 67, 2013.

RICHARDS, L. A. Capillary conduction of liquids through porous media. **Physics**, n.1, p.318-333, 1931.

SANTOS, J. B. F. **Construção, monitoramento e simulação hidráulica de uma trincheira de infiltração**. Dissertação (Mestrado em Tecnologia Ambiental e Recursos Hídricos). Universidade Federal de Pernambuco, UFPE, Recife, 96p., 2014.

SANTOS, P. T. da S.; SANTOS, S. M.; MONTENEGRO, S. M. G. L.; COUTINHO, A. P.; MOURA, G. S. S.; 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.

SILVA, G. B. LIMA da. **Avaliação experimental sobre a eficiência de superfícies permeáveis com vistas ao controle do escoamento superficial em áreas urbanas**. Tese (Doutorado em Tecnologia Ambiental e Recursos Hídricos). Universidade de Brasília, UnB, Brasília, 180p., 2006.

SILVA, J. P. **Estudos Preliminares para a implantação de Trincheiras de Infiltração**. Dissertação de Mestrado, Publicação G.DM-154-07, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 155p., 2007.

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

SILVEIRA, A. L. L. **Hidrologia Urbana no Brasil**. In: Braga, B.; Tucci, C. E. M.; Tozzi, M. Drenagem Urbana: gerenciamento, simulação, controle, Editora da Universidade/UFRGS, Porto Alegre, 1998.

ŠIMŮNEK, J.; VAN GENUCHTEN, M.; ŠEJNA, M. Recent developments and applications of the HYDRUS computer software packages, **Vadose Zone Journal**, 15(7), pp. 25, doi: 10.2136/vzj2016.04.0033, 2016.

ŠIMŮNEK, J.; ŠEJNA, M.; VAN GENUCHTEN, M. The HYDRUS-1D software package for simulating the one-dimensional movement of water, heat, and multiple solutes in variably-saturated media, user's manual, versão 4.0, **Department of Environmental Sciences**, University of California Riverside, U.S. Salinity Lab., Agric. Res, California, 2008.

**SMMWW - STORMWATER MANAGEMENT MANUAL FOR WESTERN WASHINGTON (2014)**. Washington State Department of Ecology. Manual. Disponível em: <<http://www.ecy.wa.gov/programs/wq/stormwater/manual/2014SWMMWWinteractive/Content/Resources/DocsForDownload/2014SWMMWW.pdf>>. Acesso em 08 jun. 2017.

SOUZA, E. S.; ANTONINO, A. C. D.; ANGULO-JARAMILLO, R.; NETTO, A. M. Caracterização hidrodinâmica de solos: aplicação do método Beerkan. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v.12, n.2, p.128-135, 2008.

SOUZA, V. C. B. **Estudo experimental de trincheiras de infiltração no controle da geração do escoamento superficial**. Tese (Doutorado em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental). Universidade Federal do Rio Grande do Sul, UFRS, Porto Alegre, 150p., 2002.

SOUZA, E. S.; ANTONINO, A. C. D.; LIMA, J. R. S.; GOUVEIA NETO, G. C.; SILVA, J. M.; SILVA, I. F. Efeito do encrostamento superficial nas propriedades hidráulicas de um solo cultivado. **Revista Brasileira de Ciências Agrárias** (Recife. Online), v.2, p.69-74, 2007.

TUCCI, C. E. M. **Drenagem urbana**. **Ciência e cultura**, v. 55, n. 4, p. 36-37, 2003.

TURKELTAUB, T.; DAHAN, O.; KURTZMAN, D. Investigation of groundwater recharge under agricultural fields using transient deep vadose zone data. **Vadose Zone Journal**, v. 13, n. 4, 2014.

UNOLD, M.; SIMUNEL, J.; KASTEEL, R.; GROENEWEG, J; VERRECKEN, H. Transport of manure-based applied sulfadiazine and its main transformation products in soil columns. **Vadose Zone Journal**, v. 8, n. 3, p. 677-689, 2009.

URSULINO, B. S. **Dinâmica da umidade do solo em bacia representativa no nordeste brasileiro: experimento e modelagem**. Dissertação (Mestrado em Tecnologia Ambiental e Recursos Hídricos). Universidade Federal de Pernambuco, UFPE, Recife, 102p., 2017.

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

WARNAARS, E. et al., Hydrologic behaviour of stormwater infiltration trenches in a central urban area during  $2\frac{3}{4}$  years of operation. **Water Science Technology**, [s.l.], v.39, n.2, p.217–224, 1999.

WHITE, I.; SULLY, M. J. Macroscopic and microscopic capillary length and times scales from field infiltration. **Water Resources Research**, v.23, n.8, p.1514-1522, 1987.

WRIGHT, L. T.; HEANEY, J. P. **Design of Distributed Stormwater Control and Reuse Systems**. In: Mays, L. W. Storm Collection Systems Design Handbook. McGraw-Hill, EUA, 2001.

ZATARÁIN, F.; FUENTES, C.; HAVERKAMP, R.; ANTONIO, A. C. D. Predicción de la forma de la característica de humedad del suelo a partir de la curva granulométrica. **In: Congreso Nacional de Irrigación – Zacatecas: ANEI**. Desarrollo y transferencia de tecnología de riego y drenaje, v.2, p.212-219, 2003.