

UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO
CENTRO DE TECNOLOGIA E GEOCIÊNCIAS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL

VICTOR GABRIEL ALVES DE SOUZA

IMPLANTAÇÃO, MONITORAMENTO E SIMULAÇÃO DE UMA TRINCHEIRA DE
INFILTRAÇÃO EM UMA BACIA URBANA NA CIDADE DO RECIFE

RECIFE

2018

VICTOR GABRIEL ALVES DE SOUZA

IMPLANTAÇÃO, MONITORAMENTO E SIMULAÇÃO DE UMA TRINCHEIRA DE
INFILTRAÇÃO LOCALIZADA EM UMA BACIA URBANA NA CIDADE DO RECIFE

Dissertação submetida ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil do Centro de Tecnologia e Geociências da Universidade Federal de Pernambuco, como parte dos requisitos para obtenção do grau de Mestre em Engenharia Civil.

Área de concentração: Recursos Hídricos e Tecnologia Ambiental com ênfase em Recursos Hídricos.

Orientador: Prof. Dr. Jaime Joaquim da Silva Pereira Cabral

RECIFE

2018

Catálogo na fonte
Bibliotecária: Rosineide Mesquita Gonçalves Luz / CRB4-1361 (BCTG)

- S729i Souza, Victor Gabriel Alves de.
Implantação, monitoramento e simulação de uma trincheira de infiltração em uma bacia urbana na cidade do Recife / Victor Gabriel Alves de Souza. – Recife, 2018.
117 folhas, il., fig., gráfs e tabs.
- Orientador: Prof. Dr. Jaime Joaquim da Silva Pereira Cabral.
- Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Pernambuco. CTG. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, 2018.
Inclui Referências e Anexo.
1. Engenharia Civil. 2. Técnicas compensatórias. 3. Drenagem urbana. 4. Metodologia Beerkan. 5. Simulação. 6. Hydrus. 7. Análise de sensibilidade. I. Cabral, Jaime Joaquim da Silva Pereira (Orientador). II. Título.



UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL

A comissão examinadora da Defesa de Dissertação de Mestrado

**IMPLEMENTAÇÃO, MONITORAMENTO E SIMULAÇÃO DE UMA TRINCHEIRA
DE INFILTRAÇÃO EM UMA BACIA URBANA NA CIDADE DO RECIFE**

defendida por

Victor Gabriel Alves de Souza

Considera o candidato APROVADO

Recife, 01 de agosto de 2018

Banca Examinadora:

Prof. Dr. Jaime Joaquim da Silva Pereira Cabral – UFPE
(orientador)

Prof. Dr. Marllus Gustavo Ferreira Passos das Neves – UFAL
(examinador externo)

Prof. Dr. Artur Paiva Coutinho – UFPE
(examinador externo)

AGRADECIMENTOS

Agradeço, primeiramente, à Deus, por ter me dado a oportunidade de estar aqui nesse momento, concluindo a pós-graduação em Engenharia Civil. À minha mãe, por sempre ter me incentivado a estudar e ser, para mim, o meu maior exemplo. Ao meu pai, que mesmo não estando aqui há algum tempo, contribuiu muito para minha formação e, sem ele, nada disso teria acontecido. Aos meus irmãos, Gabriela e Vinicius, pelo amor, incentivo e pela convivência. À Paula e sua família, por ter me ajudado bastante nesses últimos anos. À minha família e aos meus amigos, mesmo os distantes, mas que sempre estiveram presentes. Aos estudantes, amigos, técnicos, companheiros de sala e professores do Laboratório de Hidráulica, pelo conhecimento e ajuda de sempre. Aos estudantes, técnicos e professores do Laboratório de Física de Solo do Departamento de Energia Nuclear da UFPE, em especial ao Prof. Dr. Antônio Celso Dantas Antonino e ao Prof. Dr. Artur Coutinho, pelo essencial apoio e pelo conhecimento transmitido. À Times Engenharia, na pessoa de Fernando Lucena pelo apoio e ajuda. Aos professores pelos conhecimentos e, em especial, ao Prof. Dr. Jaime Cabral pela paciência, ajuda, compreensão e orientação do referido trabalho. A todos, minha sincera gratidão.

RESUMO

As técnicas compensatórias são baseadas na retenção/detenção e na infiltração das águas pluviais, a fim de reduzir os picos de vazões, minimizar os volumes escoados e diminuir a probabilidade de inundações. Este trabalho apresenta um estudo de uma trincheira de infiltração de tamanho real, instalada em uma bacia urbana no campus da UFPE, em Recife – PE, para estudar a efetividade pluviométrica e caracterizar o perfil do solo quanto a infiltração, escoamento e armazenamento do sistema. A metodologia Beerkan foi utilizada para avaliar a capacidade de infiltração do solo, bem como foram realizados ensaios de granulometria e caracterização do solo, a fim de compor o perfil geotécnico do terreno. Além disso, durante o período de chuvas, realizou-se um monitoramento piezométrico de níveis do dispositivo e dos lençóis freáticos adjacentes para avaliar o comportamento de armazenamento, infiltração e respostas relativas a variação dos níveis freáticos devido às águas pluviais. O software Hydrus 1D, foi utilizado para análise de sensibilidade dos parâmetros e para realizar uma simulação numérica com os dados obtidos em campo. O trabalho apresentou um solo com boa capacidade de infiltração e adequado a implantação do sistema, com um perfil geotécnico do solo predominantemente silte - arenoso. A recarga do aquífero apresentou um desempenho satisfatório, bem como sensibilidade aos parâmetros analisados pelos dados de entrada do modelo Hydrus 1D, conforme metodologia proposta por Mccuen e Snyder (1986), a condutividade hidráulica saturada do solo (K_s), ao parâmetro de forma (n) e ao parâmetro inverso do comprimento capilar (α), nas 3 camadas de solo utilizadas. Por fim, o trabalho obteve um desempenho satisfatório do dispositivo quanto aos resultados de escoamento, lâmina média armazenada e a lâmina de infiltração do sistema.

Palavras-chave: Técnicas compensatórias. Drenagem urbana. Metodologia Beerkan. Simulação. Hydrus 1D. Análise de sensibilidade.

ABSTRACT

Compensatory techniques are based on the retention / detention and infiltration of rainwater in order to reduce spillages, minimize drainage volumes and reduce the likelihood of flooding. This work presents a study of a real - size infiltration trench installed in an urban basin on the UFPE campus in Recife, PE, to study the hydrodynamic effectiveness and to characterize the soil profile in terms of infiltration, flow and storage of the system. The Beerkan methodology was used to evaluate the soil infiltration capacity, which presented a soil with good infiltration capacity and adequate the system implantation. Granulometry and soil characterization tests were performed in order to compose the geotechnical profile of the land, which presented a predominantly silt - sandy soil. In addition, during the rainy season, a piezometric monitoring of levels of the device and adjacent water tables was carried out to evaluate the storage behavior, infiltration and responses concerning the variation of the groundwater levels due to the rainwater, presenting aquifer recharge with satisfactory performance. Hydrus 1D software was used for parameter sensitivity analysis, which resulted in the sensitivity of the parameters, according to the methodology proposed by Mccuen and Snyder (1986), the infiltration coefficient (K_s), the shape parameter (n) and the parameter of normalization (α), in the 3 soil layers used. Finally, a numerical simulation was performed with field data that resulted in a satisfactory performance of the device in terms of flow, stored mean blade and infiltration depth of the system.

Keywords: Compensatory Techniques. Urban Drainage. Beerkan Methodology. Simulation. Hydrus 1D..Sensitivity Analysis.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1- Exemplo de Trincheira de Infiltração e seus componentes	20
Figura 2 – Trincheira de Infiltração piloto no sitio experimental do grupo de física do solo da UFPE	24
Figura 3 – Perfil longitudinal das fases do solo	26
Figura 4 – Curva de retenção da água no solo.....	29
Figura 5 – Triângulo de classificação do solo	31
Figura 6 – Localização da cidade do Recife.....	35
Figura 7 - Mapa isométrico com a precipitação pluviométrica média anual do estado de Pernambuco	36
Figura 8 - Área de contribuição da trincheira de infiltração em contorno azul.....	37
Figura 9 – Vista em planta longitudinal da trincheira de infiltração	37
Figura 10 - Seção transversal com vista isométrica da trincheira de infiltração	38
Figura 11 – Ensaio de porosidade para brita de tamanho desconhecido	39
Figura 12 – Representação de cavadeira articulada e trado concha	40
Figura 13 – Coleta das amostras para análise granulométrica por meio de trado concha	40
Figura 14 – Secagem ao ar livre das amostras de solo	42
Figura 15 – Adição de 70 gramas de solo ao erlenmeyer.....	42
Figura 16 – Processo de leitura de densidade e temperatura do solo, referente à sedimentação	43
Figura 17 – Exemplo do densímetro, à esquerda e do termômetro, à direita, utilizados no ensaio da sedimentação dos solos.....	43
Figura 18 – Processo de vibração das peneiras,	44
Figura 19 – Realização do ensaio de infiltração de campo	45
Figura 20 - Detalhe dos piezômetros em PVC	49
Figura 21 – Monitoramento piezométrico da trincheira de infiltração.....	49
Figura 22 – Posicionamento relativo dos piezômetros na trincheira de infiltração.....	50
Figura 23 – Escavação do terreno e verificação da cota de fundo da trincheira via equipamento topográfico.....	51
Figura 24 – Posicionamento do Geotêxtil na área de superfície do dispositivo.....	51
Figura 25 – Preenchimento da trincheira com material granular	52
Figura 26 – Execução de geotêxtil superior e reaterro da trincheira	52
Figura 27 – Template do software Hydrus 1D	53
Figura 28 – Perfil transversal do modelo da trincheira utilizado para simulação	54
Figura 29 – Curvas granulométricas do solo na cota de fundo	57

Figura 30 – Representação dos pontos da Tabela 3 no triângulo textural de classificação do solo	58
Figura 31 - Curvas granulométricas do solo na posição x=150m	59
Figura 32- Representação dos pontos da Tabela 4 no triângulo textural de classificação do solo	59
Figura 33 – Perfil longitudinal do solo no qual o SP01 corresponde ao limite do Núcleo de educação física e o lado esquerdo corresponde ao limite com a rodovia BR 101(PE)	61
Figura 34 – Gráfico correspondente a lâmina acumulada de água e o tempo necessário a realização dos ensaios.....	62
Figura 35 - Gráfico referente ao fluxo de água em mm/s e o tempo relacionado dos ensaios de infiltração.....	62
Figura 36 - Precipitação pluviométrica diária em milímetros da estação da várzea, Recife - PE	64
Figura 37 - Precipitação x Cota Piezométrica do evento pluviométrico 1	65
Figura 38 - Precipitação x Cota Piezométrica do evento pluviométrico 2	66
Figura 39 - Precipitação x Cota Piezométrica do evento pluviométrico 3	68
Figura 40 – Precipitação e evapotranspiração média diária da estação do curado no Recife, de código 82900 – Fonte: LAMEPE/INMET, 2011	69
Figura 41 – Variação percentual da infiltração acumulada da camada 1	72
Figura 42 - Variação percentual da lâmina de escoamento acumulada da camada 1.....	72
Figura 43 – Variação percentual da lâmina média acumulada da camada 1	72
Figura 44 – Variação da lâmina de escoamento acumulada (cm) em função da variação do parâmetro α da camada 1.....	74
Figura 45 - Variação da lâmina média armazenada (cm) em função da variação do parâmetro α da camada 1	75
Figura 46 - Variação da lâmina de infiltração acumulada (cm) em função da variação do parâmetro α da camada 1.....	75
Figura 47 - Variação da lâmina média armazenada (cm) em função da variação do parâmetro K_s da camada 1.....	76
Figura 48 - Variação da lâmina de escoamento acumulada (cm) em função da variação do parâmetro K_s da camada 1.....	76
Figura 49 - Variação da lâmina de infiltração acumulada (cm) em função da variação do parâmetro K_s da camada 1.....	76
Figura 50 - Variação da lâmina média armazenada (cm) em função da variação do parâmetro N da camada 1	77

Figura 51 - Variação da lâmina de escoamento acumulada (cm) em função da variação do parâmetro N da camada 1	77
Figura 52 - Variação da lâmina de infiltração acumulada (cm) em função da variação do parâmetro N da camada 1	77
Figura 53 - Variação da lâmina de escoamento acumulada (cm) em função da variação do parâmetro Θ_r da camada 1	78
Figura 54 - Variação da lâmina média armazenada (cm) em função da variação do parâmetro Θ_r da camada 1	78
Figura 55 - Variação da lâmina de infiltração acumulada (cm) em função da variação do parâmetro Θ_r da camada 1	79
Figura 56 - Variação da lâmina de escoamento acumulada (cm) em função da variação do parâmetro Θ_s da camada 1	79
Figura 57 - Variação da lâmina média armazenada (cm) em função da variação do parâmetro Θ_s da camada 1	80
Figura 58 - Variação da lâmina de infiltração acumulada (cm) em função da variação do parâmetro Θ_r da camada 1	80
Figura 59 - Variação percentual da infiltração acumulada da camada 2	81
Figura 60 - Variação percentual da lâmina de escoamento acumulada da camada 2	81
Figura 61 - Variação percentual da lâmina média armazenada da camada 2	81
Figura 62 - Variação da lâmina de escoamento acumulada (cm) em função da variação do parâmetro α da camada 2	83
Figura 63 - Variação da lâmina média armazenada (cm) em função da variação do parâmetro α da camada 2	84
Figura 64 - Variação da lâmina de infiltração acumulada (cm) em função da variação do parâmetro α da camada 2	84
Figura 65 - Variação da lâmina de escoamento acumulada (cm) em função da variação do parâmetro Ks da camada 2	85
Figura 66 - Variação da lâmina média armazenada (cm) em função da variação do parâmetro Ks da camada 2	85
Figura 67 - Variação da lâmina de infiltração acumulada (cm) em função da variação do parâmetro Ks da camada 2	85
Figura 68 - Variação da lâmina de escoamento acumulada (cm) em função da variação do parâmetro N da camada 2	86
Figura 69 - Variação da lâmina média armazenada (cm) em função da variação do parâmetro N da camada 2	86

Figura 70 - Variação da lâmina de infiltração acumulada (cm) em função da variação do parâmetro N da camada 2	87
Figura 71 - Variação da lâmina de escoamento acumulada (cm) em função da variação do parâmetro Θ_r da camada 2	87
Figura 72 - Variação da lâmina média armazenada (cm) em função da variação do parâmetro Θ_r da camada 2	88
Figura 73 - Variação da lâmina de infiltração acumulada (cm) em função da variação do parâmetro Θ_r da camada 2	88
Figura 74 - Variação da lâmina de escoamento acumulada (cm) em função da variação do parâmetro Θ_s da camada 2	89
Figura 75 - Variação da lâmina média armazenada (cm) em função da variação do parâmetro Θ_s da camada 2	89
Figura 76 - Variação da lâmina de infiltração acumulada (cm) em função da variação do parâmetro Θ_s da camada 2	89
Figura 77 - Variação percentual da infiltração acumulada da camada 3	90
Figura 78 - Variação percentual da lâmina de escoamento acumulada da camada 3	90
Figura 79 - Variação percentual da lâmina média armazenada da camada 3	91
Figura 80- Variação da lâmina de escoamento acumulada (cm) em função da variação do parâmetro α da camada 3	92
Figura 81 - Variação da lâmina média armazenada (cm) em função da variação do parâmetro α da camada 3	93
Figura 82 - Variação da lâmina de infiltração acumulada (cm) em função da variação do parâmetro α da camada 3	93
Figura 83 - Variação da lâmina de escoamento acumulada (cm) em função da variação do parâmetro Ks da camada 3	94
Figura 84 - Variação da lâmina média armazenada (cm) em função da variação do parâmetro Ks da camada 3	94
Figura 85 - Variação da lâmina de infiltração acumulada (cm) em função da variação do parâmetro Ks da camada 3	94
Figura 86 - Variação da lâmina de escoamento acumulada (cm) em função da variação do parâmetro Ks da camada 3	95
Figura 87 - Variação da lâmina média armazenada (cm) em função da variação do parâmetro N da camada 3	95
Figura 88 - Variação da lâmina de infiltração acumulada (cm) em função da variação do parâmetro N da camada 3	96

Figura 89 - Variação da lâmina de escoamento acumulada (cm) em função da variação do parâmetro Θ_r da camada 3.....	96
Figura 90 - Variação da lâmina média armazenada (cm) em função da variação do parâmetro Θ_r da camada 3	97
Figura 91 - Variação da lâmina de infiltração acumulada (cm) em função da variação do parâmetro Θ_r da camada 3.....	97
Figura 92 - Variação da lâmina de escoamento acumulada (cm) em função da variação do parâmetro Θ_s da camada 3.....	98
Figura 93 - Variação da lâmina média armazenada (cm) em função da variação do parâmetro Θ_s da camada 3.....	98
Figura 94 - Variação da lâmina de infiltração acumulada (cm) em função da variação do parâmetro Θ_s da camada 3.....	98
Figura 95 - Variação da lâmina de escoamento acumulada (cm) de acordo com a variação da quantidade de nós da malha.....	99
Figura 96 - Variação da lâmina média armazeanda (cm) de acordo com a variação da quantidade de nós da malha	99
Figura 97 - Variação da lâmina de infiltração acumulada (cm) de acordo com a variação da quantidade de nós da malha.....	100
Figura 98 - Variação da lâmina de escoamento acumulada (cm) do dispositivo compensatório em função do tempo	101
Figura 99 - Variação da lâmina média armazenada (cm) do dispositivo compensatório em função do tempo	101
Figura 100 - Variação da lâmina de infiltração acumulada (cm) do dispositivo compensatório em função do tempo	101

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Classificação Granulométrica.....	30
Tabela 2 – Classificação hidrológica do solo em função da condutividade hidráulica (RAWLS et al., 1992).....	48
Tabela 3 - Parâmetros das camadas utilizadas na simulação numérica.....	55
Tabela 4 – Classificação granulométrica do solo na cota de fundo.....	57
Tabela 5 – Tabela de classificação do solo por amostra.....	60
Tabela 6 – Características hidráulicas obtidas pela metodologia Beerkan (Haverkamp et al., 1998; Braud et al., 2005) com o auxílio do BEST (Lassabatéreet et al., 2006)) para a hipótese de Burdine e para hipótese de Mualem	63
Tabela 7 - Descrição dos eventos pluviométricos escolhidos	64
Tabela 8 – Variação dos parâmetros da camada de solo 1 para análise de sensibilidade	70
Tabela 9 - Variação dos parâmetros da camada de solo 2 para análise de sensibilidade	70
Tabela 10 - Variação dos parâmetros da camada de solo 3 para análise de sensibilidade	71
Tabela 11 – Sensibilidade relativa dos parâmetros para a lâmina de infiltração acumulada da camada 1	73
Tabela 12 - Sensibilidade relativa dos parâmetros para a lâmina de escoamento acumulada da camada 1	73
Tabela 13 - Sensibilidade relativa dos parâmetros para a lâmina média armazenada da camada 1	74
Tabela 14 - Sensibilidade relativa dos parâmetros para a lâmina de infiltração acumulada da camada 2	82
Tabela 15 - Sensibilidade relativa dos parâmetros para a lâmina de escoamento acumulada da camada 2	82
Tabela 16 - Sensibilidade relativa dos parâmetros para a lâmina média armazenada da camada 2	83
Tabela 17 - Sensibilidade relativa dos parâmetros para a lâmina de infiltração acumulada da camada 3.....	91
Tabela 18 - Sensibilidade relativa dos parâmetros para a lâmina de escoamento acumulada da camada 3.....	91
Tabela 19 - Sensibilidade relativa dos parâmetros para a lâmina média armazenada da camada 3.....	92

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	15
1.1	OBJETIVO GERAL	17
1.2	OBJETIVOS ESPECÍFICOS	17
2	REFERENCIAL TEÓRICO	18
2.1	INTRODUÇÃO	18
2.2	TÉCNICAS COMPENSATÓRIAS	18
2.3	TRINCHEIRAS DE INFILTRAÇÃO	20
2.3.1	Aspectos Gerais	20
2.3.2	Aspectos Estruturais	24
2.3.3	Método de Dimensionamento	24
2.4	CARACTERÍSTICAS DOS SOLOS	25
2.4.1	Propriedades Físicas	26
2.4.2	Estado saturado e não saturado	28
2.4.3	Classificação Granulométrica	30
2.4.4	Propriedades Hidrodinâmicas do Solo	31
2.5	MODELAGEM NUMÉRICA - HYDRUS	32
2.5.1	Aplicações do Hydrus 1D	33
3	MATERIAIS E MÉTODOS	35
3.1	LOCALIZAÇÃO DA TRINCHEIRA DE INFILTRAÇÃO	35
3.2	PROJETO DA TRINCHEIRA DE INFILTRAÇÃO	37
3.3	DETERMINAÇÃO DA POROSIDADE DO MATERIAL GRANULAR	38
3.4	ENSAIO GRANULOMÉTRICO DO SOLO	39
3.4.1	Determinação da Umidade do Solos	41
3.4.2	Sedimentação do Solo	41
3.4.3	Peneiramento do Solo	43
3.5	DETERMINAÇÃO DA CAPACIDADE DE INFILTRAÇÃO DO SOLO	44
3.6	MONITORAMENTO PLUVIOMÉTRICO	48
3.7	MONITORAMENTO PIEZOMÉTRICO	48
3.8	EXECUÇÃO DA TRINCHEIRA DE INFILTRAÇÃO	50
3.9	MODELAGEM NUMÉRICA – HYDRUS 1D	53
3.9.1	Hipóteses adotadas nas Simulações do Hydrus - 1D	55
3.9.2	Análise de sensibilidade do modelo	55
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO	57
4.1	ANÁLISE GRANULOMÉTRICA DO SOLO	57

4.2	PERFIL LONGITUDINAL DO TERRENO	60
4.3	ENSAIO DE INFILTRAÇÃO DO SOLO	61
4.3.1	Análise e Seleção dos Eventos Hidrológicos	63
4.3.2	Evento Pluviométrico 1	64
4.3.3	Evento Pluviométrico 2	66
4.3.4	Evento Pluviométrico 3	67
4.4	SIMULAÇÃO NUMÉRICA UTILIZANDO O SOFTWARE HYDRUS .	68
4.4.1	Análise de Sensibilidade	70
4.4.1.1	Camada 1	71
4.4.1.1.1	<i>Parâmetro do inverso do comprimento capilar - α</i>	74
4.4.1.1.2	<i>Condutividade hidráulica saturada do solo - K_s</i>	75
4.4.1.1.3	<i>Parâmetro de forma - N</i>	77
4.4.1.1.4	<i>Umidade volumétrica residual - Θ_r</i>	78
4.4.1.1.5	<i>Umidade volumétrica saturada - Θ_s</i>	79
4.4.1.2	Camada 2	80
4.4.1.2.1	<i>Parâmetro inverso do comprimento capilar - α</i>	83
4.4.1.2.2	<i>Condutividade hidráulica saturada do solo - K_s</i>	84
4.4.1.2.3	<i>Parâmetro de forma - N</i>	86
4.4.1.2.4	<i>Umidade volumétrica residual - Θ_r</i>	87
4.4.1.2.5	<i>Umidade volumétrica saturada - Θ_s</i>	88
4.4.1.3	Camada 3	90
4.4.1.3.1	<i>Parâmetro inverso do comprimento capilar - α</i>	92
4.4.1.3.2	<i>Condutividade hidráulica saturada do solo - K_s</i>	93
4.4.1.3.3	<i>Parâmetro de forma - N</i>	95
4.4.1.3.4	<i>Umidade volumétrica residual - Θ_r</i>	96
4.4.1.3.5	<i>Umidade volumétrica saturada - Θ_s</i>	97
4.4.2	Análise da malha	99
4.4.3	Análise numérica da trincheira	100
4.4.4	Síntese final dos resultados	102
5	CONSIDERAÇÕES FINAIS	103
	REFERÊNCIAS	105
	ANEXO A – LOCAÇÃO E Furos de Sondagem	111

1 INTRODUÇÃO

Com o crescimento urbano populacional e a formação dos aglomerados urbanos, a taxa de impermeabilização das áreas residenciais aumentou consideravelmente e de forma desordenada, diminuindo a área coberta por solo natural e a infiltração das águas, causando um aumento nos picos de vazões dos hidrogramas das localidades e no escoamento das águas provenientes das chuvas, resultando, assim, em um desequilíbrio no balanço hídrico e provocando alagamentos nas grandes cidades.

A cidade do Recife, local de implantação do referido estudo, que concentra boa parte da população da região metropolitana do Recife, servindo como polo de trabalho diário para a maioria da população da RMR, está localizada na zona litoral-mata atlântica, com clima predominantemente quente e úmido, com média pluviométrica anual de 2.450,7 mm, tem população estimada no ano de 2017 de 1.633.697 habitantes (IBGE, 2017). Fatores como o crescimento populacional não planejado, a geomorfologia, a impermeabilização do solo e os aterros contribuíram de forma negativa para os alagamentos na planície da cidade. (CABRAL e ALENCAR, 2005)

A bacia urbana da cidade do Recife é uma planície que apresenta como características principais um solo de aterro, principalmente por ser uma cidade formada por um solo derivado do ecossistema manguezal e por apresentar um nível freático elevado, principalmente quando combinado com a influência da maré alta.

Dessa forma, o sistema de microdrenagem que já não se mostrava muito eficiente na cidade, passa a sofrer cada vez mais devido ao acúmulo de lixo em locais indevidos e também a falta de manutenção dos sistemas de drenagem. Além disso, a alta taxa de impermeabilização de ruas e calçadas, gera impactos na qualidade de água, de maneira que a água escoada lixivia a superfície impermeabilizada, carregando consigo materiais não dissolvidos pela água e consequente poluentes, como óleos, graxas, produtos derivados do petróleo, entre outros.

Assim, o sistema convencional, caracterizado pelo escoamento rápido em tubulações, que apenas transfere o líquido de um ponto a outro, não tem conseguido resolver os problemas de alagamentos nas cidades, passando a ter necessidade de implantar as técnicas compensatórias, visando preservar os mecanismos naturais de escoamento, diminuindo as vazões a jusante e maximizando o controle de escoamento na fonte. (SANTOS *et al.*, 2013; MELO *et al.*, 2014).

Além das técnicas compensatórias, outra forma de utilizar as técnicas de infiltração natural das águas pluviométricas é por meio da utilização do sistema misto, que alia o sistema

convencional ao sistema compensatório, de modo que haverá a retenção/detenção da água e apenas o excedente será escoado via sistema comum de drenagem.

Desse modo, o presente trabalho apresenta uma trincheira de infiltração, localizada na cidade do Recife, Pernambuco, no campus da Universidade Federal de Pernambuco, mais precisamente no núcleo de educação física e desportos, caracterizada como modelo de infiltração em um dispositivo linear, no qual foi realizada o monitoramento dos seus níveis internos e dos níveis piezométricos do lençol freático a fim de verificar seu comportamento.

A trincheira de infiltração foi construída em uma parceria com a UFPE, devido a alagamentos que ocorriam na área da pista de atletismo do Núcleo de Educação Física e Desportos (NEFD), após a área adjacente ser doada ao Centro Regional de Ciências Nucleares do Nordeste (CRCN).

Para a construção do CRCN, foi realizado um aterro de cerca de 60 cm de altura, que resultou na impossibilidade do devido escoamento das águas provenientes do escoamento da bacia de contribuição. Com isso, os alagamentos na área passaram a ser constantes e a solução prevista foi a trincheira de infiltração.

A construção da trincheira foi realizada no mês de abril de 2017, durante o período do inverno, o que dificultou a realização dos trabalhos, resultando em um tempo de construção de 12 dias.

O diferencial do presente trabalho é que o objeto do estudo foi implantado com tamanho em escala que saiu do nível de lotes, com comprimento de 200 metros, visto que os outros estudos realizados para aplicação de técnicas compensatórias na cidade do Recife, conforme continuidade da linha de pesquisa, pelo grupo de recursos hídricos da UFPE juntamente com o grupo de Física dos solos, apresentavam dimensões experimentais como projetos piloto.

Outro diferencial do trabalho é que o dispositivo foi implantado em uma cidade predominantemente com solo de aterro e com nível de água elevado, elementos estes que fogem das características ideais utilizadas para a implantação de dispositivos compensatórios.

Além disso, a dificuldade do trabalho se deu pelo dispositivo ter sido implantado em uma área urbana, com clima tropical que apresenta elevada frequência pluviométrica e com características de solo urbano de aterro. É muito comum na bacia urbana da cidade do Recife, encontrar solos com grandes bolsões de argila, o qual é ineficiente para a adequada infiltração das águas pluviométricas.

Neste trabalho foram realizados ensaios característicos do solo, por meio de ensaios de granulometria e sondagens a percussão do terreno, com a finalidade de compor a caracterização do perfil do terreno e qualificá-lo hidraulicamente realizando ensaios de infiltração seguindo a metodologia Beerkan.

A simulação numérica é importante para prever o comportamento e efetividade em absorver, armazenar e infiltrar as águas pluviométricas da trincheira, mediante dados reais obtidos por meio de dados de campo. Assim, para as simulações foram utilizadas o Hydrus 1D.

O software Hydrus 1D, que é utilizado para resolver numericamente a equação de Richards, foi utilizado para realizar a análise de sensibilidade dos parâmetros, a fim de verificar a flexibilidade e confiabilidade dos resultados obtidos, introduzidos na simulação para caracterização das camadas dos solos e para a realização de simulação hidrodinâmica do dispositivo utilizando o software, com a finalidade de classificar o seu desempenho como dispositivo compensatório no sistema de drenagem urbana.

Assim, foi possível avaliar a eficiência do sistema implantado, fato este que depende das condições de contorno e características do terreno do local de implantação, sendo bastante peculiar e intrínseco a cada sistema compensatório escolhido.

Por fim, em continuidade a referida linha de pesquisa, foram estabelecidos os seguintes objetivos:

1.1 OBJETIVO GERAL

- Implantação e caracterização de uma trincheira de infiltração de longo comprimento para avaliação da sua efetividade na redução precipitação efetiva por ocasião de chuvas intensas.

1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Caracterizar a capacidade de infiltração, armazenamento e escoamento de águas pluviais em uma trincheira de infiltração;
- Monitorar o funcionamento de trincheira de infiltração para diferentes eventos de precipitação pluviométrica;
- Realizar a simulação computacional e análise de sensibilidade dos parâmetros da infiltração das águas pluviais no solo por meio do software Hydrus;

2 REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 INTRODUÇÃO

As alterações causadas pelo homem no meio ambiente produzem diversos impactos. A urbanização e o crescimento demográfico implicam em alterações significativas no escoamento das águas pluviais em decorrência do desmatamento e impermeabilização do solo, que reflete em alterações no ciclo hidrológico e no balanço hídrico, com o aumento da produção do escoamento superficial direto e ampliação dos picos de vazão, que por sua vez, demandam o redimensionamento de estruturas hidráulicas. (LUCAS *et al.*, 2010)

As estruturas de detenção e/ou retenção, por meio das trincheiras, valas, poços de infiltração, pavimentos permeáveis e microrreservatórios em lotes são comumente aplicados em países da Europa e na América do Norte desde 1970 e tem ganhado atenção especial no Brasil nos últimos anos. Suas principais vantagens sobre as medidas convencionais (rede de microdrenagem composta por condutos) são regularizar o escoamento superficial, reduzir as vazões das redes de drenagem, preservar o tempo de concentração das águas nas bacias hidrográficas e remover poluentes (URBONAS; STAHR, 1993; BAPTISTA; NASCIMENTO; BARRAUD, 2011; CANHOLI, 2005).

2.2 TÉCNICAS COMPENSATÓRIAS

As técnicas compensatórias são alternativas ao sistema convencional de drenagem urbana, que se baseiam essencialmente no aumento do tempo de retenção/detenção e na infiltração das águas precipitadas, amortecendo, assim os picos das vazões, diminuindo os volumes escoados, reduzindo a probabilidade de inundações, melhorando a qualidade da água, reduzindo os custos com as tubulações do sistema convencional e infiltrando maior quantidade de água, obtendo uma recarga maior do aquífero. As principais técnicas compensatórias são as bacias de detenção, as trincheiras de infiltração/detenção, as valas de detenção/infiltração, o pavimento permeável e o telhado verde (BAPTISTA; NASCIMENTO; BARRAUD, 2011).

Uma das técnicas compensatórias são os reservatórios de detenção/retenção, em que as águas são armazenadas durante a chuva e depois são liberadas lentamente. Em Recife, alguns estudos têm sido realizados, dentre eles foi realizado um estudo comparativo de reservatórios de detenção de lote por Silva e Cabral (2014), a fim de simular técnicas compensatórias com detenção em lotes, ruas e calçadas, além de uma análise de custo dos sistemas. Obteve-se como resultado uma redução de 40% nos picos das vazões afluentes, quando implantado em lotes, 60% de redução, quando implantado nas ruas e 80%, quando implantado na bacia de estudo.

Outra técnica é o telhado verde, que consiste na aplicação de um sistema de drenagem e impermeabilização sobreposto por uma cobertura vegetal, nas coberturas das edificações, a fim de minimizar o escoamento e aumentar a evapotranspiração. (MAPLU, 2009)

Segundo Santos *et al.* (2013), os fatores que mais influenciam no funcionamento do telhado verde são os tipos de vegetação e solo utilizados, assim como a espessura dessas camadas.

Paiva *et al.* (2017) monitoraram em Caruaru, o armazenamento das águas pluviais teóricas distribuídas por aspersores, provenientes dos telhados verdes com vegetação convencional e com duas vegetações nativas do semi-árido nordestino, a Babosa (*Aloe vera*) e a Coroa-de-Frade (*Melocactus zehntneri*). Com reservatórios de armazenamento e por meio do balanço hídrico do sistema, foi possível verificar que em relação a um telhado convencional, houve um atraso no pico de vazão de 10 minutos para a Babosa e de 16 minutos para a Coroa-de-Frade.

No mesmo raciocínio, o jardim de chuva é um dispositivo de controle na fonte, baseado no sistema de biorretenção e na desconexão das áreas impermeáveis, que possui como principais funções a retenção, a infiltração e a filtração das águas advindas do escoamento urbano. (MELO, 2011)

Melo (2011) utilizou um jardim de chuva como técnica compensatória para manejo de águas pluviais urbanas. Foi instalado um sistema de biorretenção piloto, na cidade do Recife, para avaliação do seu desempenho quanto a retenção, infiltração e ao armazenamento, por meio do seu monitoramento para chuvas diretas e outro para as chuvas diretas somadas à contribuição de uma área impermeável. Os resultados obtidos para a retenção foram eficientes para as chuvas diretas, para a infiltração e excelente para o armazenamento das águas pluviais.

Outro dispositivo de captação e infiltração natural é o pavimento permeável, o qual é utilizado como técnica compensatória por meio de blocos de concreto assentados com uma camada de areia e espaços vazios com material granular ou grama e normalmente é utilizado em estacionamentos de veículos leves. (MAPLU, 2009)

Coutinho (2011) implantou e dimensionou um pavimento permeável com tempo de retorno de 2 anos, em um estacionamento na cidade do Recife, para monitoramento e caracterização do solo por meio da metodologia Beerkan e simulações numéricas utilizando o

Hydrus 1D. Os resultados obtidos foram satisfatórios, com a técnica apresentando capacidade de drenar, em menos de 24h, os volumes gerados pelas precipitações.

2.3 TRINCHEIRAS DE INFILTRAÇÃO

2.3.1 Aspectos Gerais

As trincheiras de infiltração são técnicas compensatórias de infiltração, que apresentam uma dimensão longitudinal significativa em relação à sua largura e profundidade. Ela recolhe as águas pluviais que escoam perpendicularmente ao seu comprimento, potencializando a infiltração e/ou armazenamento temporário. Tais dispositivos podem ser aplicados ao longo de estacionamentos, terrenos esportivos, passeios e áreas verdes em geral. (BAPTISTA; NASCIMENTO; BARRAUD, 2011).

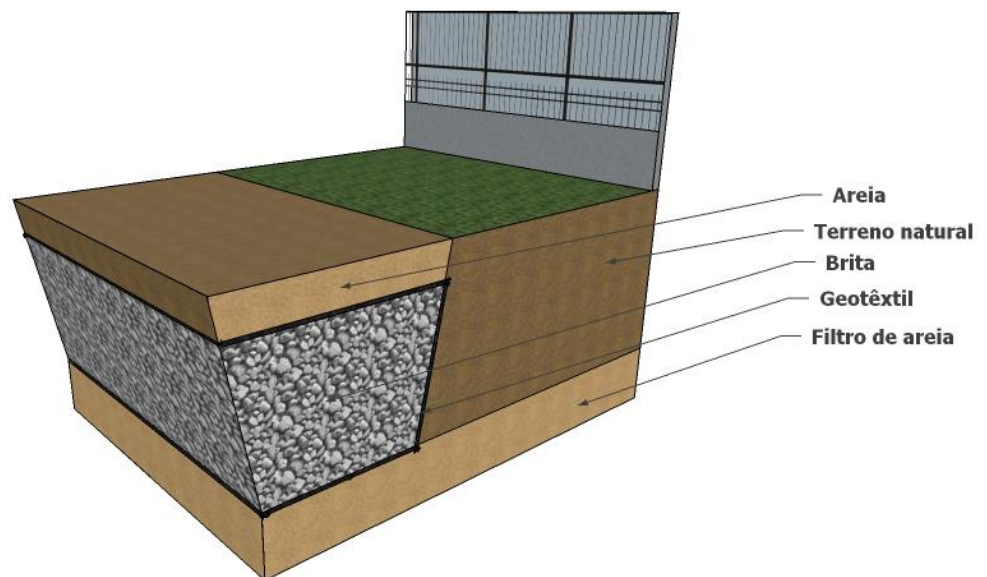


Figura 1- Exemplo de Trincheira de Infiltração e seus componentes

Fonte: Elaborado pelo autor

Assim, as trincheiras de infiltração são dispositivos de controle do escoamento superficial, que têm a função de coletar, armazenar e infiltrar as águas de chuva (MIKKELSEN e JACOBSEN, 1993).

No ciclo da água, as águas provenientes da precipitação pluviométrica são interceptadas pelas folhas e galhos de árvores, infiltradas e escoadas superficialmente, quando o solo já não suporta mais absorver a água. Assim, as águas que não são infiltradas podem ser destinadas as

estruturas de retenção/detenção, pela área superficial do dispositivo, por uma de malha de tubulações de drenagem ou por uma associação das duas maneiras anteriores.

Já a saída das águas captadas pode ser realizada por três formas distintas: a primeira acontece por meio da infiltração no solo, através da base e das paredes laterais; a segunda, por meio de uma descarga, à jusante, por meio de um dispositivo de desague, com controle de vazão; ou ainda, por um sistema misto formado pelas duas formas anteriores (BAPTISTA; NASCIMENTO; BARRAUD, 2011).

A adoção da infiltração, nos dispositivos compensatórios, proporciona uma melhora significativa na qualidade das águas e na recarga dos aquíferos, aspecto, este, de grande interesse para regiões que utilizam águas subterrâneas para abastecimento. Além disso, tais dispositivos possibilitam que o volume de escoamento superficial, seja reduzido, não sobrecarregando, assim, o sistema de drenagem da localidade, uma vez que apenas o excedente será redirecionado para as tubulações. De maneira análoga, ainda são obtidos benefícios como: ganho financeiro, com a redução das dimensões do sistema de drenagem e ganho paisagísticos/ambientais, com a valorização de espaços urbanos e verdes (BAPTISTA; NASCIMENTO; BARRAUD, 2011).

Na implantação de uma trincheira de infiltração é necessário também tomar precauções, verificando a viabilidade técnica, quanto aos aspectos físicos, urbanísticos/infraestrutura, sanitários/ambiental e socioeconômicos. Assim, quanto aos aspectos físicos é necessário avaliar integralmente a topografia do local, a existência de exutório permanente, a capacidade hidráulica de infiltração do solo e o nível do lençol freático. Quanto aos aspectos urbanísticos e de infraestrutura é necessário avaliar a disponibilidade do espaço e as redes hidráulicas existentes. Já em relação aos aspectos sanitários é primordial verificar o risco de susceptibilidade da poluição das águas e dos solos. E, finalmente, é de suma importância verificar os aspectos relativos a custos de operação, manutenção e implantação, além das características culturais da sociedade local (BAPTISTA; NASCIMENTO; BARRAUD, 2011).

No entanto, apesar da facilidade de construção dos dispositivos, é necessário tomar alguns cuidados no local de implantação evitando locais aterrados, locais com lençol freático elevado e solos com baixa capacidade de infiltração (URBONAS; STAHR, 1993).

Apesar das vantagens já citadas anteriormente, também é necessário avaliar algumas dificuldades que podem ser identificadas (BAPTISTA; NASCIMENTO; BARRAUD, 2011):

-
- Necessidade de constante manutenção, a fim de evitar a colmatção do fundo da trincheira;
 - Baixa eficiência em locais com grande declividade ($> 5\%$), porque quanto maior a declividade, maior a velocidade de escoamento da água e menor seria a captação de água por infiltração (MELO, 2015);
 - Risco de poluição das águas subterrâneas.

Muitos trabalhos vêm sendo desenvolvidos ao longo dos anos sobre trincheiras de infiltração, abaixo segue alguns exemplos:

A ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY (EPA) (1999) realizou pesquisas sobre a qualidade da água, proveniente do escoamento superficial, através de trincheiras de infiltração. O trabalho apresentou resultado positivo na remoção de poluentes e no tratamento de esgoto, com remoção de até 90% de bactérias coliformes, sedimentos e matéria orgânica, e remoção de até 60% de fósforo (P) e nitrogênio (N), principais poluentes, juntos com o potássio, no escoamento superficial, com consequente diminuição da Demanda Bioquímica de Oxigênio (DBO), com eficiência entre 70 e 80%.

IMBE *et al.* (2002) simularam um hidrograma de descarga e verificaram a durabilidade de um sistema de infiltração, no controle de inundação por uma trincheira de infiltração, através do Modelo *Similar Hydrological Element Response (SHER)*, o qual demonstrou desempenho satisfatório para o sistema de infiltração durante o período de análise.

GRACIOSA (2005) apresentou um trabalho com o objetivo de avaliar o comportamento hidráulico, por meio da avaliação da infiltração da água em uma trincheira de infiltração com dois tipos de solos: um predominantemente arenoso e outro argiloso. Os dispositivos foram alimentados com água em solos, com diferentes condutividades hidráulicas, sendo realizados ensaios de campo, com controle de umidade do solo, por meio de sonda de nêutrons e os resultados foram comparados com uma modelagem matemática bidimensional de infiltração. Concluiu-se que os resultados obtidos pelos ensaios de campos obtiveram uma pequena diferença entre o volume infiltrado e a umidade do solo nos processos de infiltração da água, relativamente a simulação, provavelmente pela simplificação das equações de Van Genuchten e Richards, utilizadas no modelo.

BERTONI e CATALINI (2007) estudaram, por meio do software *Storm Water Management Model (SWMM)*, a introdução de um algoritmo para caracterização da trincheira de infiltração. Com isso foi avaliada a performance hidráulica de cinco trincheiras, sendo duas em Porto Alegre – RS, Brasil e três em Montreal, no Canadá para alteração no algoritmo

numérico do software. O trabalho mostrou um bom desempenho referente a representação das características gerais dos dispositivos, porém não houve elo entre os dados e os aspectos físicos do experimento. Contudo, o experimento serviu como aplicação inicial de simulação numérica nos processos referentes a trincheira de infiltração.

LIMA (2009) examinou a atuação hidráulica de uma trincheira de infiltração experimental, alimentada por chuvas naturais e simuladas, por meio de um estudo do solo, através das curvas de retenção da água no terreno e com tomografia computadorizada, analisando o tamanho e o comportamento dos poros intersticiais do solo e obteve como resultado desempenho satisfatório da trincheira, em relação ao controle do escoamento superficial das águas, retendo os volumes provenientes de eventos de chuvas de intensidade acima da intensidade da chuva projetada.

LUCAS *et al.* (2010) realizaram por meio da Linguagem Especial para Geoprocessamento Algébrico (LEGAL) e do Modelo Numérico do Terreno (MNT), técnica de cartografia digital para eleger localidades adequadas a implantação de trincheiras de infiltração, no campus da Universidade de Federal de São Carlos, obtendo como resultado eficiência, tanto para a viabilidade de implantação de trincheiras, quanto para a elaboração de planos de manejos de águas pluviais.

ALMEIDA (2014) analisou sob a ótica dos usuários de espaços urbanos públicos e privado, a aplicação de técnicas compensatórias na drenagem urbana, aplicando questionário junto aos usuários dos espaços em duas localidades no município de São Carlos, tendo como resultado boa aceitação, por parte da população, em relação a legislação vigente e que a falta de informação é o principal empecilho para ampliação das técnicas compensatórias.

SANTOS (2014) implantou uma trincheira de infiltração em um lote isolado, localizado no Departamento de Energia Nuclear (DEN), em Recife – PE, realizando várias simulações de infiltração, armazenamento e nível do lençol freático no período de chuva, resultando em resultados satisfatórios para o fluxo de recarga do lençol freático e redução da carga hidráulica positiva na superfície, mostrando-se eficiente e adequada no controle das águas pluviais urbanas.

MELO *et al.* (2016) realizaram um estudo experimental de uma trincheira de infiltração instalada na cidade de Recife/PE, para avaliação das funções de armazenamento de águas pluviais urbanas no interior do sistema e a função de infiltração. No experimento, foi realizado uma análise de custo para diferentes desempenhos, construções e durações de chuvas, A pesquisa apresentou resultados satisfatórios para a localidade, sendo capaz de armazenar 63,57% dos volumes de entrada.

2.3.2 Aspectos Estruturais

As trincheiras são áreas escavadas preenchidas por material granular do tipo brita ou seixo rolado, com o topo geralmente preenchido com gramíneas, segundo perfil esquemático presente na Figura 2. Assim, são sistemas especialmente construídos para proporcionar uma infiltração direcionada das águas superficiais no solo (AKAN, 2002; BOUWER, 2002).

Elas podem ser superficiais ou enterradas, dependendo da disponibilidade espacial do local, assim como também podem ter formatos diferenciados, como trapezoidais ou retangulares (MELO *et al.*, 2016).

São comumente protegidas e separadas do solo natural por um geotêxtil, material têxtil composto por malhas minúsculas, capaz de permitir o direcionamento do fluxo de água, retendo os sólidos, a fim de evitar a entrada de partículas finas e de elementos poluentes, evitando assim a colmatção do dispositivo. (MELO *et al.*, 2016) (Figura 2).



Figura 2 – Trincheira de Infiltração piloto no sitio experimental do grupo de física do solo da UFPE

Fonte: MELO (2016)

2.3.3 Método de Dimensionamento

Uma vez verificado a viabilidade e determinado o período de retorno a ser atendido pelo sistema, o próximo passo é o dimensionamento, normalmente baseado no balanço hídrico no

interior da trincheira. Assim, o volume de armazenamento é obtido subtraindo-se o volume de saída do volume de entrada (GRACIOSA; MENDIONDO; CHAUDHRY, 2008).

Para o dimensionamento da trincheira, foram realizados ensaios de infiltração para caracterização da condutividade hidráulica do terreno e foi utilizado o método *rain – envelope - method* de Urbonas e Stahre (1993), com curva IDF (intensidade – duração – frequência) da cidade do Recife.

O método é baseado nos volumes de entrada e saída do dispositivo. Assim, o volume do dispositivo deverá ser suficiente para armazenar a máxima diferença entre os volumes acumulados de saída e entrada (levando-se em consideração a porosidade do material de preenchimento (SOUZA, 2002).

Dessa maneira, conforme Souza (2002), o volume de entrada é baseado na curva IDF da localidade e o volume de saída é baseado nos ensaios de infiltração/percolação do solo do local da implantação.

Inicialmente, o dimensionamento apresentou uma trincheira de 240,00 m, com seção transversal retangular de 2,00 m de largura por 2,35 m de profundidade. Porém para maior agilidade na execução, sua seção transversal foi realizada com seção trapezoidal variando de 2,00 m no fundo da trincheira e 3,00 m na superfície, mantendo a profundidade de 2,35 metros, a fim de ser executada sem escoramento lateral das paredes. Assim, seu comprimento total foi reduzido para 200 metros de comprimento linear para manter as devidas proporções volumétricas.

2.4 CARACTERÍSTICAS DOS SOLOS

Para a implantação de um sistema de técnicas compensatórias é necessário o estudo do solo local, a fim de observar os parâmetros hidrogeológicos inerentes a cada camada do solo, já que em um perfil longitudinal de solo, há diversos tipos de solos com litologia e características hidrodinâmicas diferentes.

Assim, o solo pode ser definido como material poroso formado através de processos físicos, químicos e biológicos resultantes da interação entre o material formador (rocha), o tempo, o clima, a topografia e os organismos vivos. Dessa maneira, o solo possui características peculiares, devido às variáveis que compõem sua formação (REICHARDT; TIMM, 2004).

O solo é um material constituído por um conjunto de partículas sólidas, deixando entre si vazios, que poderão estar preenchidos parcial ou totalmente pela água. Portanto, uma massa de solo pode ser constituída por três fases: sólida, líquida e gasosa (CAPUTO, 1996). (Figura 3)

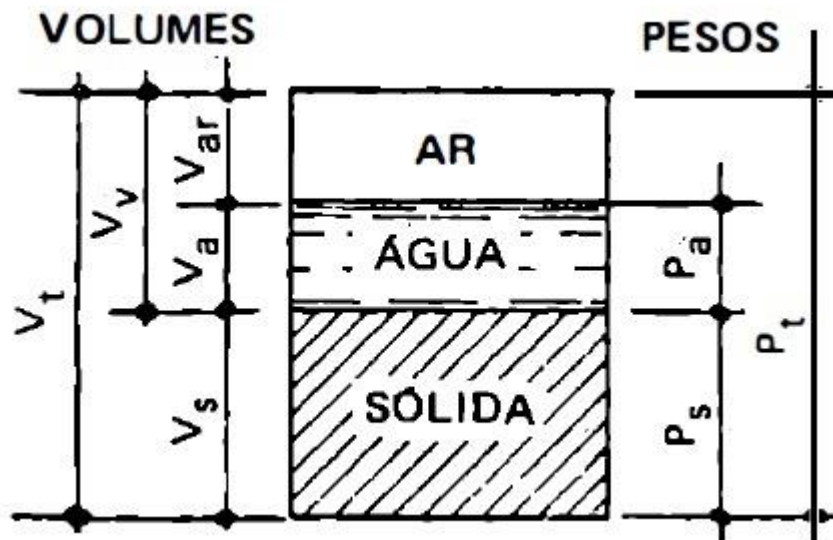


Figura 3 – Perfil longitudinal das fases do solo

Fonte: CAPUTO, 1996

No qual os volumes correspondentes são:

- V_t - Volume total
- V_s - Volume de sólidos
- V_v - Volume de vazios
- V_a - Volume de água
- V_{ar} - Volume de ar

Já em relação aos pesos das frações, temos as seguintes relações:

- M_t – Massa total
- M_a – Massa da água
- M_s – Massa do sólido

2.4.1 Propriedades Físicas

Segundo Caputo (2006), o solo é constituído por grãos minerais, podendo conter também, matéria orgânica. A fração granular ou grossa é composta basicamente por grãos de sílica, ao passo que a fração argilosa é composta, principalmente, por caolinita, montmorilonita e ilita.

O peso específico das partículas de um solo é, por definição, o peso da substância sólida (P_s) por unidade de volume (V_s). (CAPUTO, 1996). (Equação 1)

$$\gamma_g = \frac{P_s}{V_s} \quad (\text{Equação 1})$$

A forma das partículas pode ser subdividida em arredondadas e lamelares: as arredondadas, são as que predominam nos pedregulhos, areias e siltes, as quais possuem perdas dos vértices pelo atrito entre elas; e as lamelares, semelhantes a lamelas ou escamas, encontradas nas argilas, característica responsável pela compressibilidade e a plasticidade das partículas argilosas (CAPUTO, 1996).

A porosidade do solo é a razão entre o volume de vazios e o volume total de uma amostra de solo, segundo a equação 2.

$$n = \frac{V_v}{V_t} \quad (\text{Equação 2})$$

A porosidade depende do tamanho dos grãos, de tal forma que quanto maior a variação do tamanho ou quanto mais denso for o solo, menor será sua porosidade, uma vez que os grãos menores ocupam os espaços vazios entre os maiores. Existe também a porosidade efetiva, que é a razão entre o volume efetivamente liberado de uma amostra pelo volume total, e a retenção específica ou capacidade de campo, que é a quantidade de água retida por unidade de volume do material, de tal modo que a soma da porosidade efetiva com a retenção específica, totaliza a porosidade total. (FEITOSA; FILHO, 2000)

A umidade gravimétrica, baseado na massa das amostras, é representada pela razão entre a massa de água presente na amostra e a massa de solo dessa mesma amostra, segundo equação 3.

$$u = \frac{M_a}{M_s} \quad (\text{Equação 3})$$

A umidade volumétrica é definida como a razão entre o volume de água e o volume total de uma amostra de solo e representa o conteúdo de água presente na amostra, conforme equação abaixo 4.

$$\theta = \frac{V_a}{V_t} \quad (\text{Equação 4})$$

O grau de saturação é a porcentagem de água contida nos seus vazios, segundo equação 5 (CAPUTO, 1996).

$$S\% = \frac{V_a}{V_v} * 100 \quad (\text{Equação 5})$$

O grau de saturação de um solo é importante para a determinação da capacidade de armazenamento de água do solo, uma vez que quanto maior o grau de saturação de um solo, maior a quantidade de água contida nos seus vazios e menor será a quantidade absorvida por ele, sendo estudado no estado saturado e não saturado (MELO, 2011).

2.4.2 Estado saturado e não saturado

O estado saturado é aquele em que seus poros estão totalmente preenchidos por água, ou seja, seu grau de saturação é 100%. No estado saturado, Henry Darcy, em 1856, foi o pioneiro a caracterizar o fluxo de água no meio poroso saturado sob condições isotérmicas do solo, considerando o movimento unidirecional e representada pela equação 6 (MELO, 2011):

$$q = -K * \frac{\partial H}{\partial L} \text{ (Equação 6)}$$

No qual:

- K – Condutividade hidráulica
- ∂H – Taxa de variação do potencial total de água, representado pela soma dos potenciais matricial e gravitacional
- ∂L – Comprimento da coluna de solo

Assim, segundo a equação de Darcy, por isso o sinal negativo, o fluxo de água só ocorre com diferença de potencial, indo do maior para o menor, referindo a direção do potencial decrescente.

Conforme Feitosa & Filho (2000), a lei de Darcy, segundo o desenvolvimento inicial, pode ser generalizada, a fim de ser utilizada em mais de uma direção (escoamento tridimensional), o que ocorre na realidade sendo representada pela seguinte equação:

$$q = -K \text{ grad } h \text{ (Equação 7)}$$

No qual:

- K é o tensor de condutividade hidráulica;
- $\text{grad } h$ é o gradiente da carga hidráulica ao longo de cada direção.

Segundo Feitosa & Filho (2000), o gradiente é um operador que indica a taxa de variação de uma grandeza escalar ao longo de um dos eixos e o tensor é um vetor mais complexo.

O estado não saturado de um solo é caracterizado pelo preenchimento dos seus poros tanto por água, quanto por ar, fato esse que representa melhor a realidade dos processos de infiltração do solo, proveniente das precipitações. A equação de Darcy - Buckingham,

caracteriza o fluxo da água no estado não-saturado. Sendo assim, o direcionamento do fluxo de água é uma grandeza vetorial, uma vez que possui as três direções representada pela equação 8, no qual $K(\theta)$ é a condutividade hidráulica, H é o potencial matricial da água no solo e o x , y , z são as direções do fluxo de acordo com a dimensão (direção) (MELO, 2011).

$$q_{x,y,z} = -K(\theta)_{x,y,z} * \frac{\partial H}{\partial x,y,z} \text{ (Equação 8)}$$

Desse modo, quando os vazios do solo estão preenchidos com água, à medida que ocorre a drenagem da água contida nesse solo, os espaços, agora, vazios são preenchidos por ar, passando ao estado não saturado, possibilitando a interface água – solo - ar. Assim, de acordo com a granulometria do solo em função da sua quantidade de argila, silte e areia, e do arranjo de suas partículas, para ocorrer a drenagem da água totalmente, o solo é submetido a uma energia de sucção, chamada de potencial matricial (ψ), que pode ocorrer com uma energia maior para partículas de pequenos diâmetros, a exemplo das argilas, sendo drenados mais dificilmente ou com uma menor energia para solos de diâmetros maiores, a exemplo das areias, ocorrendo uma drenagem com esforço menor que o das argilas.

Dessa maneira, a retenção da água é explicada através dos fenômenos da capilaridade, afinidade entre as partículas solidas e a água e da adsorção, fenômeno que ocorre quando o solo passa do estado saturado para o não saturado, com a água aderindo a superfície dos grãos de solo.

Por meio do gráfico do potencial matricial do solo com a umidade volumétrica, é possível determinar a curva de retenção do solo, conforme Figura 4.

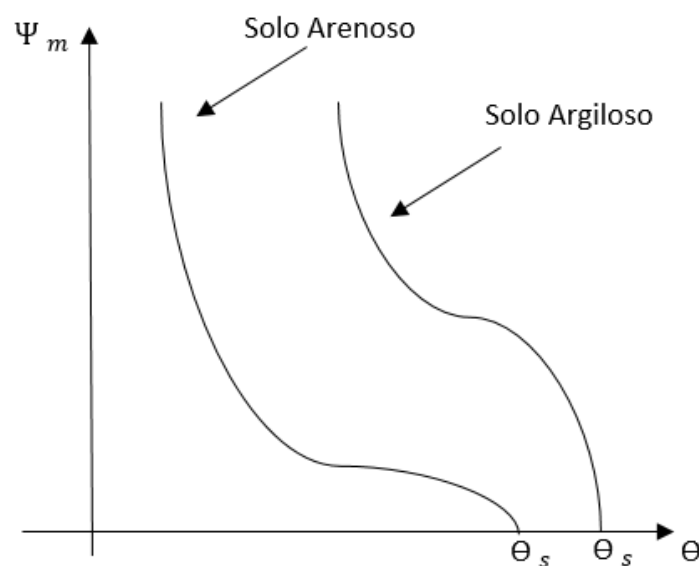


Figura 4 – Curva de retenção da água no solo

Fonte: Adaptado de REICHARDT; TIMM (2004)

2.4.3 Classificação Granulométrica

A análise granulométrica é a determinação das dimensões das partículas do solo e das proporções relativas em que elas se encontram, representadas pela curva granulométrica (CAPUTO, 1996). A Tabela 1 apresenta a classificação granulométrica da Internacional *Society of Soil Science* (ISSC).

Tabela 1 – Classificação Granulométrica

Fonte: ISSC, 1993

Classificação	Tamanho dos grãos (diâmetro médio, mm)
Areia muito grossa	2,0 – 1,0
Areia grossa	1,0 – 0,5
Areia média	0,5 – 0,25
Areia fina	0,25 – 0,10
Areia muito fina	0,10 – 0,05
Silte	0,05 – 0,002
Argila	< 0,002

Quanto a determinação da classe do solo, utiliza-se o triângulo de texturas, apresentado pelo *United States Department of Agriculture* (USDA) e utilizado pela Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, conforme Figura 5.

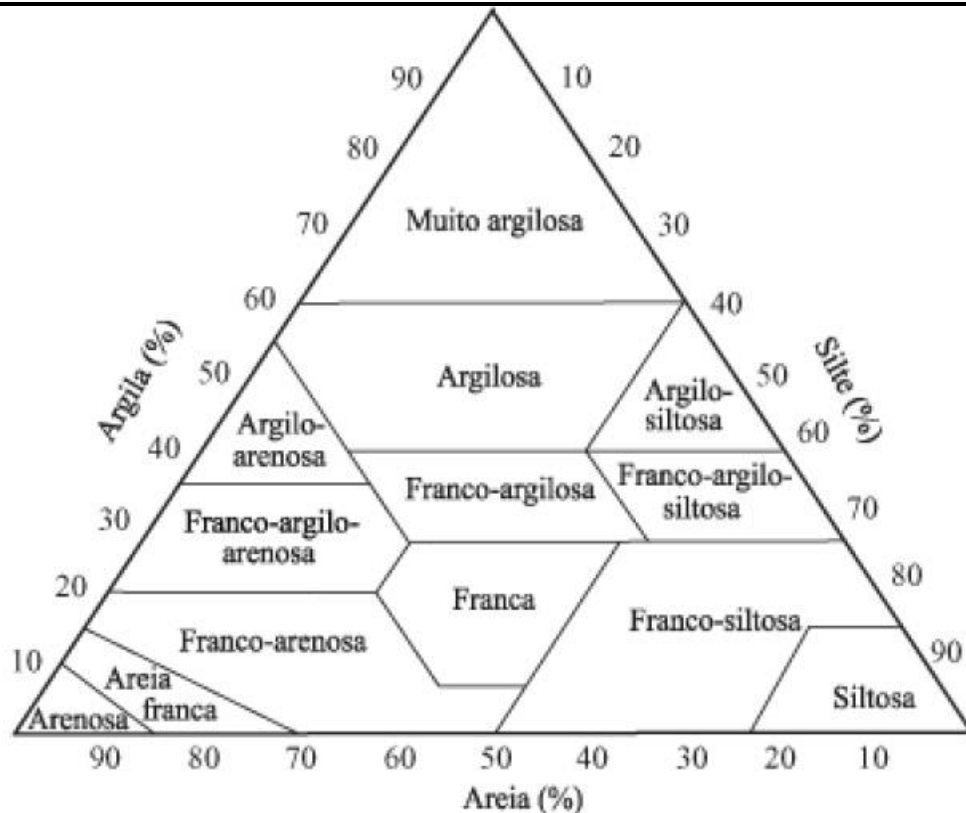


Figura 5 – Triângulo de classificação do solo

Fonte: USDA, 1993

2.4.4 Propriedades Hidrodinâmicas do Solo

A condutividade hidráulica de um líquido é a facilidade que um fluido possui de penetrar nos poros do solo, dependendo tanto das características do meio poroso (porosidade, tamanho, distribuição, forma e arranjo das partículas), quanto das propriedades do fluido (viscosidade e massa específica), de tal forma que um fluido viscoso, comparado com um não viscoso, terá condutividade diferente (FEITOSA; FILHO, 2000).

Dessa forma, segundo Feitosa e Filho (2000), a condutividade hidráulica pode ser expressa em função dos parâmetros do meio e do fluido conforme equação 9:

$$K = \frac{k\rho g}{\mu} = \frac{kg}{v} \quad (\text{Equação 9})$$

No qual:

- K = condutividade hidráulica [L/T]
- k = permeabilidade intrínseca ou específica, é função do tipo do material poroso, sua granulometria e sua disposição estrutural, do meio poroso [L^2]

-
- ρ e μ = representam as características do fluido, respectivamente massa específica e viscosidade absoluta. Também pode ser a viscosidade cinemática

$$\nu = \frac{\mu}{\rho} [L^2/T]$$

- g = aceleração da gravidade [LT^{-2}]

De acordo com Souza (2005), conforme citado por Coutinho (2011), sorvidade do solo é a capacidade de o solo absorver água por capilaridade, o qual a água se eleva pelos interstícios das partículas sólidas, além do lençol freático (CAPUTO, 1996), e depende, principalmente, da variação do teor volumétrico da água inicial e final da infiltração.

2.5 MODELAGEM NUMÉRICA - HYDRUS

O Hydrus é um programa computacional, que soluciona através dos métodos dos elementos finitos, a equação de Richards modificada (Equação 10), para simular o fluxo de água, o transporte de calor e poluentes, com uma pequena variação, não considerando as características inerentes a fase gasosa do solo e nem o gradiente térmico da camada de solo, com fluxo unidimensional, bidimensional ou tridimensional, para solos em condições saturadas e não saturadas (SIMUNEK; VAN GENUCHTEN; SEJNA, 2011; MELO, 2015).

Além disso, o programa possui como parâmetros de entrada: as características e profundidades do solo, a quantidade de nós da malha, o passo de tempo inicial, a quantidade de número de iterações, entre outros. O programa possui também vários resultados de saída, sendo escolhidos como parâmetros para o presente trabalho a lâmina média armazenada, a lâmina de infiltração acumulada e a lâmina de escoamento acumulada, uma vez que com tais resultados, há a possibilidade de prever a efetividade pluviométrica do dispositivo.

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left[K \left(\frac{\partial h}{\partial x} + \cos \alpha \right) \right] - S \quad (\text{Equação 10})$$

No qual:

- θ é o potencial matricial de água no solo [L];
- t é o tempo [T];
- x é a coordenada espacial [L];
- S é a sorvidade do solo [$LT^{-0,5}$];
- α é o ângulo entre a direção de fluxo e a coordenada vertical (0° , para fluxo vertical, 90° para fluxo horizontal e de 0° a 90° para fluxo inclinado)

-
- K é a condutividade hidráulica [L/T]

As propriedades hidráulicas de um solo não saturado, $\theta(h)$ e $K(h)$, são de maneira geral funções não lineares do potencial mátrico ou da umidade volumétrica. O programa Hydrus - 1D permite o uso de 5 modelos analíticos para as propriedades hídricas: Brooks e Corey (1964); van Genuchten (1980); Vogel e Cislerová (1988), Kosuki (1996); e Durner (1994) (COUTINHO, 2011).

2.5.1 Aplicações do Hydrus 1D

O Hydrus 1D vem sendo utilizado em diversos trabalhos para monitoramento e avaliação hidrodinâmica da água no solo.

Feltrin, Paiva e Paiva (2013) utilizaram o Hydrus 1D para simular a dinâmica da água no solo para as condições climáticas da região sul do Brasil, na cidade de Santa Maria, região central do Rio Grande do Sul, comparando os resultados obtidos pelo software com os obtidos em campo. Por meio de tensiômetros eletrônicos, os autores monitoraram a pressão da água no solo em três diferentes profundidades, respectivamente, de 10 cm, 30 cm e 70 cm do nível do terreno. Eles observaram que o software atingiu de maneira satisfatória os processos hidrológicos dos solos, já que a variação do armazenamento e do conteúdo da água no solo, para as três profundidades, seguiu uma mesma linha de tendência para os valores reais obtidos em campo, provenientes de uma estação fluviométrica e de um lisímetro instalados na região de estudo.

ALVES *et al.* (2012) utilizaram o software Hydrus 1D para simular a dinâmica da água nas fases do cultivo do feijão caupi, em períodos com condições atmosféricas distintas, no município de Areia, na Paraíba. O modelo simulou satisfatoriamente as diferentes umidades volumétricas do solo nas profundidades de 20, 40, 60 e 80 centímetros, resultando em valores parecidos com os aferidos em campo, para as saídas de evapotranspiração e de lamina media armazenada.

CHAVES (2009) utilizou o software Hydrus para obter análise de sensibilidade aos parâmetros hidráulicos para solos de diferentes texturas, por meio da sensibilidade relativa simulando a percolação da água em uma coluna de 61 cm de solo, na cidade de Brasília – DF, com lâmina de água na superfície de 2 centímetros e drenagem livre no fundo. O modelo apresentou sensibilidade maior, em média, aos parâmetros de forma (n), a umidade volumétrica do solo (θ_s) e uma leve sensibilidade ao parâmetro inverso do comprimento capilar (α). Para

os solos, o modelo foi mais sensível ao solo argiloso, seguido pelo de textura média e finalizando com o solo arenoso.

COUTINHO *et al.* (2016) utilizaram o Hydrus 1D para simulações numéricas de escoamento e hidrodinâmicas no pavimento permeável como técnica compensatória em uma bacia urbana na cidade do Recife – PE, para diferentes tipos de escoamento superficial e diferentes tempos de retorno para chuvas de intensidade constante, apresentando características de infiltrações maiores que as apresentadas pelas características do solo. Realizou também uma análise de sensibilidade dos parâmetros médios com relação ao potencial matricial do solo, que se mostrou sensível a condutividade hidráulica do solo. A simulação numérica apresentou bom potencial com relação as águas infiltradas e escoadas, por meio do software Hydrus 1D.

MELO (2015) na avaliação hidrodinâmica de uma trincheira de infiltração, utilizou o Hydrus 2D para modelar 12 curvas de recessões de diferentes classes textuais, para finalizar o comportamento da trincheira. O estudo apontou para um solo de textura arenosa como sendo de melhor eficiência hidráulica. A pesquisa comparou também a correlação entre os parâmetros obtidos analiticamente e numericamente para as curvas de recessões e mostrou que os dois métodos de obtenção não podem ser comparados.

BEYENE *et al.* (2017) utilizaram o software Hydrus para estimar a transpiração real, a evaporação do solo e a percolação profunda de campos irrigados de solos alagados na várzea do lago Tana, na Etiópia. No período de dezembro de 2015 a maio de 2016, foram realizados ensaios de campo em plantações de milho e cebola para avaliar a qualidade da água subterrânea e os níveis piezométricos do lençol freático proveniente da irrigação, com medidores manuais de nível. Foram coletados também, dados referentes a umidade, granulometria e os parâmetros hidráulicos do solo. Com os dados, realizaram a análise de sensibilidade no software calibrando os parâmetros e resultando em uma sensibilidade considerável em relação a condutividade hidráulica saturada do solo (K_s), a umidade volumétrica saturada (θ_s) e o parâmetro de forma (tamanho dos poros) (n).

3 MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 LOCALIZAÇÃO DA TRINCHEIRA DE INFILTRAÇÃO

A Trincheira de Infiltração, objeto do presente estudo, está localizada na cidade de Recife – PE, Brasil, segundo Figura 6, mais precisamente no Núcleo de Educação Física e Desportos (NEFD), da Universidade Federal de Pernambuco (UFPE). O Recife, capital do estado de Pernambuco, está inserida na Região Metropolitana do Recife (RMR), que possui, segundo dados projetados do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE), no ano de 2017 a população de 1.633.697 pessoas.



Figura 6 – Localização da cidade do Recife

Fonte: MELO, 2015

A cidade está localizada na zona costeira litorânea, limitada pelo oceano atlântico e que possui um clima litorâneo úmido e quente do tipo As, segundo a classificação climática de Köppen, com chuvas predominantemente ocorrendo de abril a agosto, com precipitação média anual variando entre 2200 a 2350 mm, segundo dados conjuntos da Secretaria de Recursos Hídricos do Estado de Pernambuco (SRH) e a Associação Instituto de Tecnologia de Pernambuco (ITEP), vide Figura 7, atualmente representado pela Agência Pernambucana de Águas e Clima (APAC).

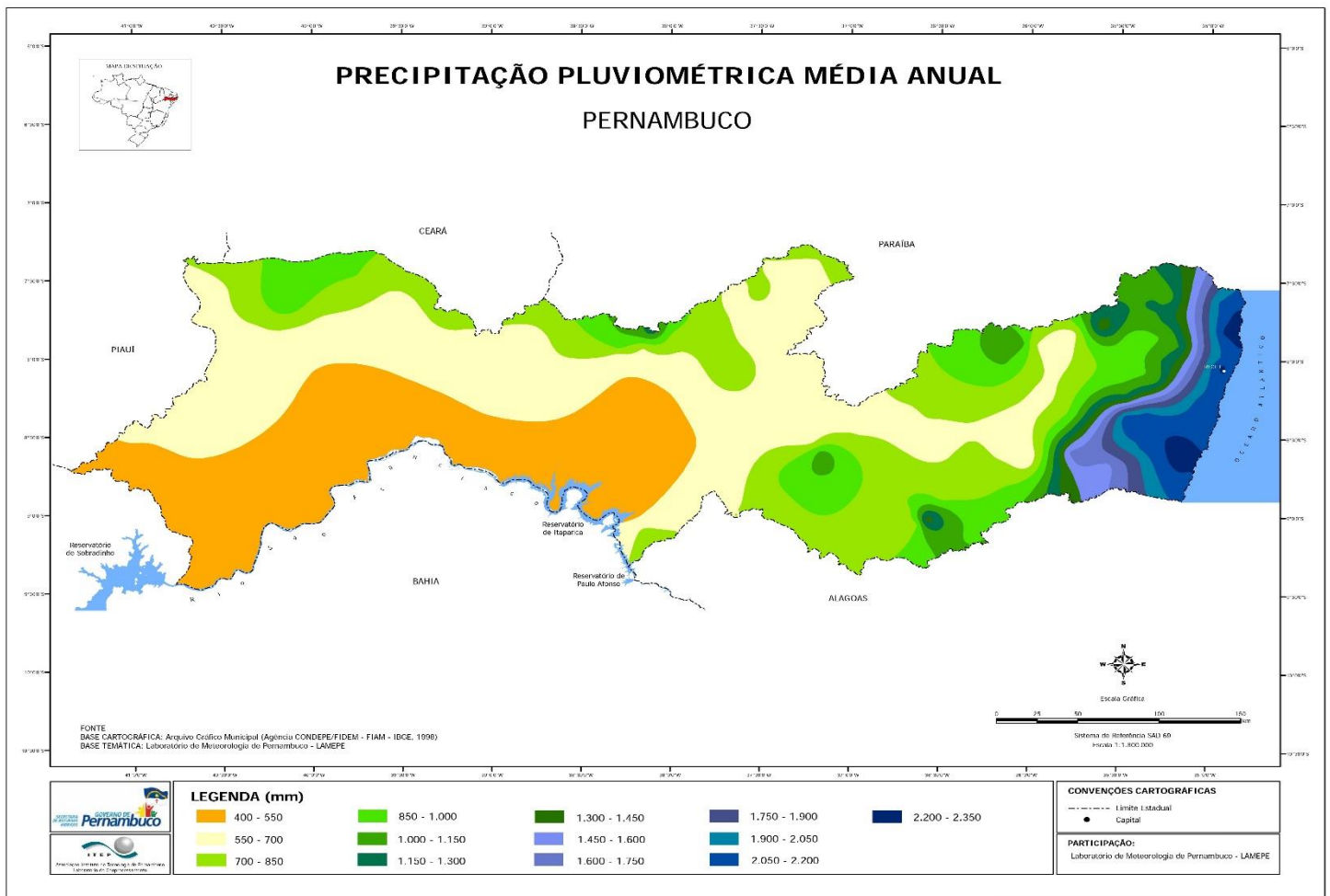


Figura 7 - Mapa isométrico com a precipitação pluviométrica média anual do estado de Pernambuco

Fonte: Antiga Secretaria de Recursos Hídricos, atualmente com dados pertencentes à APAC

O NEFD está limitado ao Norte pela Casa do estudante da Universidade, ao leste pela rodovia federal BR-101, ao sul pelo Centro Regional de Ciências Nucleares do Nordeste (CRCN-NE) e ao oeste pelo Clube Universitário da UFPE e possui uma área de contribuição de cerca de 4,8 hectares, segundo Figura 8, com terreno predominantemente preenchido por gramíneas. O local é composto por uma pista de atletismo e dois campos de futebol, utilizados para atividades práticas esportivas dos estudantes de Educação Física.



Figura 8 - Área de contribuição da trincheira de infiltração em contorno azul

Fonte: Google Earth Pro, 2018

O dispositivo foi dimensionado de modo que conseguisse captar a água escoada da planície de contribuição, funcionando como um reservatório de amortecimento e que apenas, o volume excedente fosse direcionado para o sistema de drenagem pluvial, uma vez que já existia tal sistema, porém não supria a necessidade de forma eficiente, devido às chuvas do rigoroso inverno da cidade.

3.2 PROJETO DA TRINCHEIRA DE INFILTRAÇÃO

A trincheira possui uma dimensão longitudinal de 200 metros de comprimento, com uma seção transversal de forma trapezoidal, variando de 3 metros na superfície do terreno até 2 metros na cota de fundo, com uma profundidade constante de 2,35 metros, segundo Figuras 9 e 10.

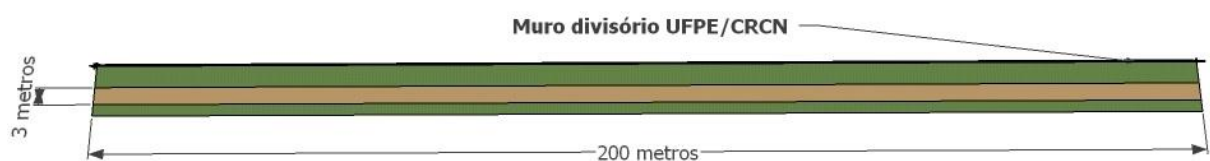


Figura 9 – Vista em planta longitudinal da trincheira de infiltração

Fonte: O próprio autor

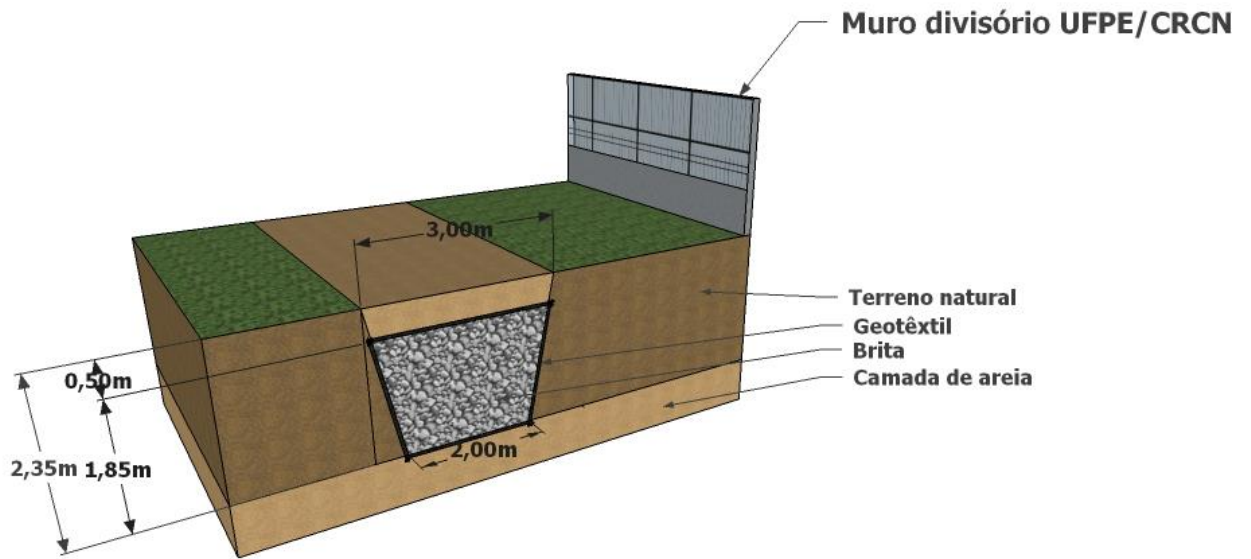


Figura 10 - Seção transversal com vista isométrica da trincheira de infiltração

Fonte: O próprio autor

A estrutura do dispositivo é composta por geotêxtil não tecido de poliéster de gramatura de 200g/m^2 , o qual envolve toda a estrutura transversal da trincheira, para evitar que os vazios das pedras britadas sejam preenchidos pelas partículas finas do solo.

3.3 DETERMINAÇÃO DA POROSIDADE DO MATERIAL GRANULAR

O material granular utilizado para preencher o dispositivo foi brita, com uma porosidade de 44,4%, valor este, determinado com ensaio feito em laboratório, conforme Figura 11, utilizando um recipiente, uma proveta e o agregado graúdo. Com o auxílio de uma proveta graduada, introduziu-se água no recipiente, primeiramente sem o material granular e foi aferido seu volume. Em um segundo momento, o recipiente foi preenchido pelo material e foi determinado o volume de água que o mesmo suportava até a marca determinada pelo volume sem o material. Tal procedimento foi realizado duas vezes: a primeira, com a brita seca; e a segunda, com a brita previamente molhada. Dividiu-se então o volume armazenado pelo recipiente com o material seco pelo volume total do recipiente aferido pela proveta, repetindo-se a divisão com o volume armazenado pelo recipiente com o material molhado e extraindo uma média das duas porosidades, o que resultou na porosidade acima mencionada, conforme equação 14.

$$\eta_b(\%) = \frac{V_a}{V_t} * 100 \text{ (Equação 11)}$$

Em que:

- η_b é a porosidade da brita;
- V_a – Volume de água ocupada pelos poros;
- V_t – Volume total do recipiente



Figura 11 – Ensaio de porosidade para brita de tamanho desconhecido

*Recipiente ilustrativo

Fonte: O próprio autor

3.4 ENSAIO GRANULOMÉTRICO DO SOLO

Para o ensaio de granulometria do solo, foram coletadas 10 amostras de solo de 15 em 15 centímetros até a profundidade de 1,5 metros. Foi utilizada uma cavadeira articulada, conforme Figura 12, a partir da profundidade de 1,5 metros até a profundidade de 2,35 metros, foram coletadas 8 amostras de 10 em 10 centímetros, com o uso do trado concha (Figura 12).

Também foram realizados ensaios de granulometria em 2 pontos na cota de fundo da vala nas posições 0 metros e 100 metros e um na superfície na posição 100m, para a avaliação dos solos. Os 18 ensaios de granulometria foram utilizados juntamente com os 6 ensaios à

percussão/penetração do solo ou Standard Penetration Test (SPT), segundo NBR 6484:2001 – “Solo – Sondagens de simples reconhecimento com SPT – Método de ensaio”, vide Anexo A, para a caracterização do perfil do solo do terreno, na direção Leste-Oeste geográfico.



Figura 12 – Representação de cavadeira articulada e trado concha

Fonte: O próprio autor

Após a coleta das mostras, segundo Figura 13, as amostras foram analisadas, conforme procedimento de peneiramento e sedimentação regulamentado na NBR 7181:2016 – “Solo – Análise Granulométrica”, no laboratório de física dos solos II do Departamento de Energia Nuclear (DEN), pertencente à UFPE. Antes de iniciar o processo de peneiramento e sedimentação, os solos foram colocados para secar ao ar livre, de modo que o excesso de água da amostra fosse vaporizado, uma vez que o lençol freático do terreno do local é elevado.



Figura 13 – Coleta das amostras para análise granulométrica por meio de trado concha

Fonte: O próprio autor.

3.4.1 Determinação da Umidade do Solos

Para a análise de granulometria e caracterização do solo foi necessário determinar a umidade dos solos, da seguinte forma:

1. Por meio de balança de precisão até centigrama, pesam-se três latas (tara) que conterão 30 gramas de solo cada, por amostra;
2. Com o auxílio da mesma balança, insere 30 gramas de solo por lata em cada uma delas;
3. Colocam-se as latas em uma estufa por um período de 24 horas a temperatura de 115° C;
4. Retiram-se as amostras da estufa e as inserem em um dessecador, equipamento que permite o resfriamento do material, sem absorver a umidade do ar;
5. Após o resfriamento, pesam-se as amostras e calcula-se a umidade do solo por meio da equação 15, lembrando que a umidade da amostra é igual a média das 3 latas de solo.

$$U(\%) = \left(\frac{Mu - Ms}{Ms} \right) * 100 \quad (Equação 12)$$

No qual:

- Mu é a massa úmida do solo;
- Ms é a massa seca do solo

3.4.2 Sedimentação do Solo

O processo de sedimentação, foi realizado seguindo as seguintes etapas:

1. Depois da secagem ao ar natural, vide Figura 14, e após destorroar os solos argilosos, peneirou-se o solo com a peneira de abertura de malha igual a 0,075mm;



Figura 14 – Secagem ao ar livre das amostras de solo

Fonte: o próprio autor

2. Cada amostra foi pesada em um balão de Erlenmeyer com 70 gramas de solo, segundo Figura 15 e misturado com 125ml de hexametáfosfato de sódio;



Figura 15 – Adição de 70 gramas de solo ao erlenmeyer

Fonte: o próprio autor

3. Após 12 horas foram misturadas e colocadas em uma proveta e completado com água destilada até o volume de 1 litro (Figura 16);



Figura 16 – Processo de leitura de densidade e temperatura do solo, referente à sedimentação

Fonte: O próprio autor

4. Então, foram coletadas e anotadas as medidas de temperatura, com um auxílio de um termômetro e densidade, com o auxílio de um densímetro, segundo Figura 16, nos tempos de 30'', 1', 2', 4', 8', 15', 30', 1h, 2h, 4h, 8h e 24h, para a elaboração da curva granulométrica, segundo Figura 17.

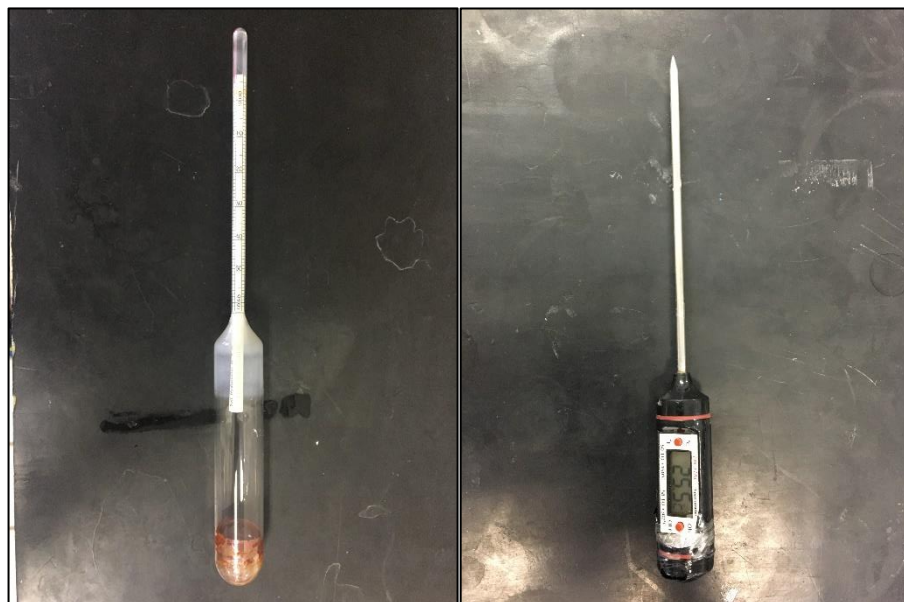


Figura 17 – Exemplo do densímetro, à esquerda e do termômetro, à direita, utilizados no ensaio da sedimentação dos solos

3.4.3 Peneiramento do Solo

Para o peneiramento do solo, foi realizado o seguinte procedimento:

1. Após o término da sedimentação do solo, é necessário “lavar” a proveta e coletar as partículas maiores que 0,075mm e colocar na estufa para secar;
2. Após a secagem do solo, é preciso colocar o solo em 6 peneiras com diferentes malhas (1 mm; 0,5mm; 0,25 mm; 0,106 mm; 0,053 mm) e 1 aparato de fundo como coletor dos solos menores que 0,053 mm e agitá-los durante 15 minutos (Figura 18).



Figura 18 – Processo de vibração das peneiras,

Fonte: o próprio autor

3. Após isso, foi realizado a pesagem das frações retidas em cada peneira para a confecção da curva granulométrica.

3.5 DETERMINAÇÃO DA CAPACIDADE DE INFILTRAÇÃO DO SOLO

Foram realizados três ensaios de infiltração do solo, localizados na superfície do terreno e no eixo geométrico da trincheira, ou seja, na posição $x = 100$ metros, de modo que os três ficassem diametralmente opostos afastados de 1 metro cada, formando um triângulo equilátero.

O método utilizado para a realização dos ensaios foi a metodologia Beerkan (Haverkamp *et al.*, 1998; Braud *et al.*, 2005; Lassabatère *et al.*, 2006), para determinar o coeficiente de infiltração, e o ensaio em campo com anel simples, segundo Figura 19, no qual equivale a adicionar um volume conhecido de água, neste caso particular de 50 ml, em um anel simples de material metálico de diâmetro de 7 centímetros e observar o tempo que o líquido

leva para infiltrar no solo, tomando nota de cada tempo, de modo que ao fim do ensaio, a taxa de infiltração esteja praticamente constante.



Figura 19 – Realização do ensaio de infiltração de campo

Fonte: O próprio autor

A sequência de procedimentos utilizados para o ensaio, foi:

1. Coletar amostras iniciais para a determinação da umidade inicial do solo e da granulometria do terreno;
2. Posicionar o anel no solo, de modo que estivesse penetrado 3 cm no terreno e com o auxílio de um nível, nivelá-lo;
3. Com o auxílio de um Becker graduado, medir os volumes e posicionar vários volumes conhecidos, de modo que ao fim de cada infiltração do volume, o próximo já estivesse preparado;
4. Iniciar o ensaio, marcando o tempo com o auxílio de um cronômetro e anotar os tempos de infiltração de cada volume de água, com o critério de parada, quando a taxa de infiltração estiver constante.
5. Ao fim do ensaio, coletar uma amostra indeformada do solo para verificar a umidade final.

Para a avaliação da curva de retenção, foi utilizada a metodologia Beerkan (Haverkamp *et al.*, 1998; Braud *et al.*, 2005; Lassabatère *et al.*, 2006) que consiste na determinação da curva de retenção da água no solo $\theta(h)$, pelo modelo de Van Genuchten (1980) e a curva de condutividade hidráulica $K(\theta)$, pelo método de Brooks e Corey (1964), conforme equações abaixo:

$$\left(\frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r}\right) = \left[1 + \left(\frac{h}{h_g}\right)^n\right]^{-m} \text{ com } m = 1 - \frac{2}{n} \quad (\text{Burdine, 1953}) \quad (\text{Equação 13})$$

$$K(\theta) = K_s * \left(\frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r}\right)^\eta \quad (\text{Equação 14})$$

No qual:

- θ é a umidade volumétrica;
- θ_r é a umidade volumétrica residual;
- θ_s é a umidade volumétrica saturada;
- h é o potencial matricial;
- h_g é o comprimento capilar;
- m e n são parâmetros de forma;
- K_s é a condutividade hidráulica saturada do solo;
- η é o parâmetro de forma da curva de condutividade hidráulica;

As equações apresentadas acima, segundo modelos de Van Genuchten (1980) e Brooks e Corey (1964), apresentam parâmetros de forma e parâmetros de normalização. Os de forma são m/n e η , o qual derivam da textura (HAVERKAMP *et al.*, 1998), e os de normalização são θ_s , K_s e h_g , que dependem da estrutura do solo (Coutinho, 2013). Para a resolução dos parâmetros foi utilizado o software Beerkan Estimation of Soil Transfer Parameters Through Infiltration Experiments (BEST), segundo Lassabatère *et al.*, 2006.

Assim, para a determinação dos parâmetros de forma, segundo Haverkamp & Parlange (1986), conforme citado por Coutinho (2013), é assumida uma similaridade de forma entre a distribuição do tamanho das partículas $F(D)$ e $\theta(h)$, expressando-a da seguinte maneira:

$$F(D) = \left[1 + \left(\frac{D_g}{D}\right)^n\right]^{-m} \text{ com } m = 1 - \frac{2}{n} \quad (\text{Equação 15})$$

No qual:

- D é o diâmetro da partícula;

-
- D_g é o critério da dimensão das partículas;
 - m e n são os critérios de forma da curva granulométrica do tamanho das partículas;

Ainda segundo Zatarain *et al.*, 2003, conforme Coutinho (2013), o índice de forma do meio (ρ_m) pode ser solucionado por meio de m e n usando a seguinte equação:

$$\rho_m = \frac{mn}{1+m} (1 + K)^{-1} \text{ (Equação 16)}$$

No qual K é (FUENTES *et al.*, 1998):

$$K = \frac{2s-1}{2s(1-s)} \text{ (Equação 17), onde } s \text{ é a dimensão fractal.}$$

Em relação a solução dos parâmetros de normalização, são obtidos por intermédio da minimização de $I(S, Ks)$, ou seja, dos quadrados das diferenças entre as lâminas de água infiltrada por observação e pela lâmina calculada, sendo a lâmina de água infiltrada (I) solucionada pela equação de Haverkamp *et al.* (1994), pertinente a tempos curtos e médios, vide equação 18 (COUTINHO, 2013).

$$I(S, Ks) = \sum_{i=1}^{N_{obs}} [I_i - (S * \sqrt{t_i} - a * S^2 * t_i + b_2 * Ks * t_i)]^2 \text{ (Equação 18)}$$

Na qual:

$$a = \frac{\gamma}{r * \Delta\theta}$$

$$b_2 = \left(\frac{\theta_0}{\theta_s}\right)^\eta + \frac{2-\beta}{3} * \left(1 - \left(\frac{\theta_0}{\theta_s}\right)^\eta\right) \text{ (Equação 19)}$$

- I é a lâmina de água infiltrada;
- S é a sorvidade;
- R é o raio do cilindro;
- $\gamma = 0,75$;
- $\beta = 0.6$;

Após a determinação da condutividade hidráulica do solo, pode-se, então, caracterizar o solo hidrologicamente, por meio da condutividade hidráulica saturada, segundo RAWLS *et al.*, 1992., na tabela 2.

Tabela 2 – Classificação hidrológica do solo em função da condutividade hidráulica (RAWLS et al., 1992)

Classificação Hidrológica do Solo	Condutividade Hidráulica do Solo (Ks) [mm/h]
Grupo A	Ks > 7,6 mm/h
Grupo B	3,8 mm/h < Ks < 7,6 mm/h
Grupo C	1,3 mm/h < Ks < 3,8 mm/h
Grupo D	Ks < 1,3 mm/h

3.6 MONITORAMENTO PLUVIOMÉTRICO

O monitoramento da precipitação pluviométrica foi coletado por meio do site da Agência Pernambucana de Águas e Clima (APAC, 2017), através da estação pluviométrica da Várzea (código 30) durante o período do inverno de 2017.

3.7 MONITORAMENTO PIEZOMÉTRICO

Para o monitoramento dos níveis piezométricos, foram instalados 6 piezômetros, confeccionados com tubo de PVC de diâmetro 50 milímetros, com uma altura de 2,80 metros, no mínimo, de modo que conseguisse abranger todo o perfil vertical do dispositivo, sendo os primeiros 50 centímetros, serrados perpendicularmente ao eixo da tubulação com o auxílio de um arco de serra e englobados por geotêxtil, de gramatura de 200g/m², de modo que os piezômetros não fossem entupidos com a entrada de finos, segundo Figura 20.

A instalação dos dois piezômetros internos a trincheira foi realizada durante a escavação do dispositivo e os quatro que estão externos foram instalados com o auxílio de um trado até a profundidade da cota de fundo (2,35 metros).

Para o monitoramento do nível do lençol foi demarcado em cada piezômetro um nível zero (referência de nível) com o auxílio de equipamento topográfico e para as medições, a partir do nível zero, foi utilizado o equipamento Water Level Meter – Model 102, da Solinst, segundo Figura 21, o qual é composto por um fio inextensível, com graduação milimétrica e apresenta sensores na sua extremidade, de modo que ao tocar na água, gera um sonar e, assim, é possível verificar a medida precisa.

O levantamento dos dados foi realizado no período de 01/06/2017 a 03/07/2017, no mesmo horário, às 13h. Aos finais de semana e feriados não foi possível obter monitoramento devido à realização de uma obra no local e pelo canteiro da mesma permanecer fechado e sem acesso, portanto, aos piezômetros instalados.



Figura 20 - Detalhe dos piezômetros em PVC

Fonte: O próprio autor



Figura 21 – Monitoramento piezométrico da trincheira de infiltração

Fonte: O próprio autor

O posicionamento dos piezômetros foi elaborado de forma que abrangesse o nível interno da trincheira e os dois níveis da água do terreno adjacente, afastados 2 metros do eixo do dispositivo, conforme Figura 22.

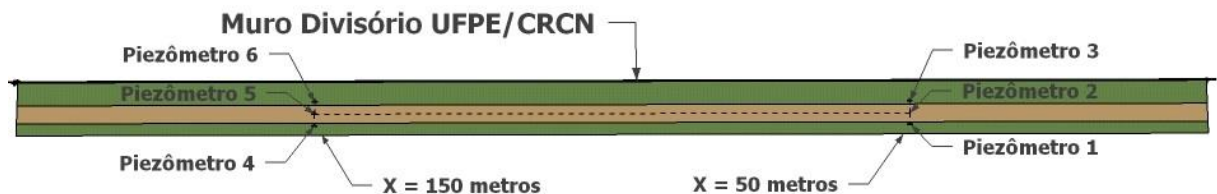


Figura 22 – Posicionamento relativo dos piezômetros na trincheira de infiltração

Fonte: O próprio autor

Através do perfil longitudinal do terreno, juntamente com a porosidade da brita foi possível obter o volume máximo a ser armazenado. Sendo assim, o volume líquido a ser armazenado na parte composta pelo material granular é de 392,63 metros cúbicos ou 392.630 litros de água.

3.8 EXECUÇÃO DA TRINCHEIRA DE INFILTRAÇÃO

A execução da trincheira de infiltração foi realizada do dia 10 de abril de 2017 ao dia 21 de abril de 2017, como resultado da parceria para a construção com a UFPE. Para tal, foi utilizado uma escavadeira hidráulica e caminhão basculante para realizar os serviços de escavação, que foram realizados sem escoramento. Para a realização dos serviços, foram utilizados 925 m³ de brita e 1624 m² de manta geotêxtil de gramatura 200 g/m. O valor total para a execução foi de R\$ 184.442,62 (Cento e oitenta e quatro mil e quatrocentos e quarenta e dois reais e sessenta e dois centavos).

Para a execução da trincheira de infiltração, foram realizados os seguintes procedimentos:

1. Primeiro, foi realizada a escavação do terreno mecanicamente e posterior verificação da cota de fundo via equipamento topográfico, sendo executada parceladamente, uma vez que foi realizada sem escoramento, porém com a estabilidade do maciço assegurada, segundo Figura 23.



Figura 23 – Escavação do terreno e verificação da cota de fundo da trincheira via equipamento topográfico

Fonte: O próprio autor

2. Após escavada e verificada a cota de assentamento, foi introduzido o geotêxtil de gramatura 200 g/m², abrangendo todo o perímetro da seção transversal, segundo Figura 24.



Figura 24 – Posicionamento do Geotêxtil na área de superfície do dispositivo

Fonte: O próprio autor

-
3. Após o posicionamento do geotêxtil, a trincheira foi preenchida com material granular (brita), com o devido cuidado para não danificar o geotêxtil, segundo Figura 25.



Figura 25 – Preenchimento da trincheira com material granular

Fonte: O próprio autor



Figura 26 – Execução de geotêxtil superior e reaterro da trincheira

Fonte: O próprio autor

-
4. Após o preenchimento do dispositivo, foi colocada uma outra camada de geotêxtil, segundo Figura 26, e realizada a devida recomposição superficial da trincheira.

3.9 MODELAGEM NUMÉRICA – HYDRUS 1D

O programa computacional Hydrus 1D, que soluciona pelo método dos elementos finitos a equação de Richards, apresenta um *template* conforme Figura 27. O programa possui como dados de entrada as seguintes opções: informações da geometria das camadas de solo e unidades utilizadas, critérios de informação de tempo de processamento de dados, critérios quantitativos de dados de saída, critérios de iteração da equação de Richards, características de modelagem hidráulica do solo, os parâmetros dos solos obtidos por meio do Rosetta ou por meio de inserção de dados de campo, a entrada dos dados das condições de contorno e a caracterização gráfica do perfil do terreno de acordo com as camadas de solo adotadas.

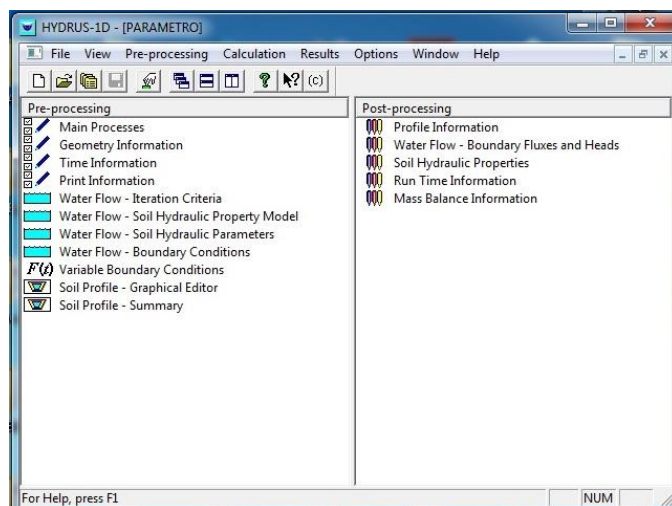


Figura 27 – Template do software Hydrus 1D

O software Roseta que está atrelado ao modelo estima os parâmetros físicos-hidráulicos do solo, por meio da entrada de dados das porcentagens de areia, silte, argila e densidade do solo, função que foi utilizada para a determinação dos parâmetros dos solos utilizados da camada 1 e 3. Para a camada 2 foi utilizado as características de um solo 100% arenoso, previsto pelo software, como camada mais porosa, já que não há propriedades da brita.

Para a modelagem do dispositivo foram consideradas 3 camadas de solo, em um perfil longitudinal com 400 cm de profundidade e com parâmetros obtidos em campo e por meio do auxílio do software Rosetta, o qual faz parte do Hydrus.

Como parâmetros de entrada também foram inseridos os dados pluviométricos e de evapotranspiração, obtidos pelo método de Penman-Monteith, durante o período de 1 ano, para a caracterização das chuvas locais. A quantidade de nós da malha escolhida foi de 200 nós e número de 10 iterações máxima, como requisito para solução numérica da equação. A condição inferior foi considerada como carga piezométrica constante com o mesmo gradiente hidráulico para as 3 camadas

Assim, o perfil do solo da 1ª camada, com profundidade de 50 cm, foi caracterizado com camada superficial de solo natural, com condutividade hidráulica caracterizada pela metodologia Beerkan e parâmetros do solo utilizado, conforme porcentagens de argila, silte e areia e da densidade do solo coletado, do ensaio granulométrico realizado e segundo critérios do Rosetta. A segunda camada com 185 cm de brita, foi caracterizada pelo software Rosetta, porém foi considerado que o material seria um material com 100% de areia, uma vez que ele não prediz parâmetros de agregados graúdos (britas). Para a 3ª camada, foi utilizado a caracterização do solo, também por meio das porcentagens de areia, silte e argila obtidos por meio do ensaio granulométrico realizado na cota de fundo de assentamento da trincheira e determinados por meio do Rosetta, com profundidade de 165 centímetros.

Dessa maneira, para a simulação, foram adotados os seguintes critérios: o perfil do solo foi simulado com 400 centímetros de profundidade, considerando 3 camadas de solo para a trincheira, segundo a Figura 28.

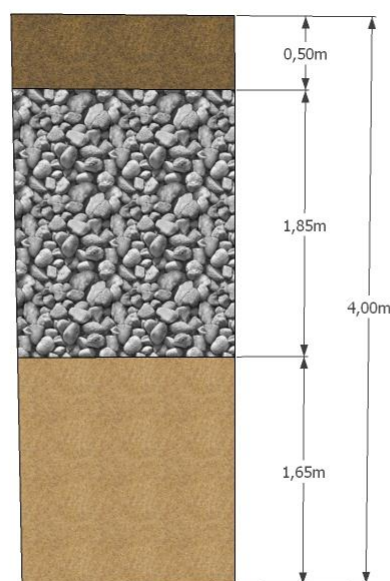


Figura 28 – Perfil transversal do modelo da trincheira utilizado para simulação

Desse modo, a 1ª camada ficou com condutividade hidráulica de 117,78 cm/dia, com dados obtidos por meio do ensaio de infiltração, obtidos como a média dos 3 ensaios realizados. A 2ª camada e a 3ª camada ficaram, respectivamente, com 712,80 cm/dia e 96,16 cm/dia, conforme tabela 3.

Os parâmetros utilizados para caracterização do solo são a umidade volumétrica residual θ_r em [cm³/cm³]; a umidade volumétrica saturada, θ_s em [cm³/cm³]; o parâmetro inverso do comprimento capilar da equação, o qual corresponde ao inverso da capilaridade, α em [1/cm]; o parâmetro de forma da equação, o qual depende da textura do solo, n (adimensional); e a condutividade hidráulica do solo, K_s em [cm/dia].

Tabela 3 - Parâmetros das camadas utilizadas na simulação numérica

	θ_r (cm ³ /cm ³)	θ_s (cm ³ /cm ³)	α (1/cm)	n	K_s (cm/dia)
Camada 1	0,0339	0,3189	0,0440	1,3138	117,78
Camada 2	0,0450	0,4300	0,1450	2,6800	712,80
Camada 3	0,0239	0,4143	0,0389	1,4348	96,16

3.9.1 Hipóteses adotadas nas Simulações do Hydrus - 1D

Após a coleta dos dados necessários a modelagem numérica utilizando o hydrus 1D, foram utilizadas as seguintes condições de contorno:

- Na fronteira superior, utilizou-se as condições atmosféricas com precipitação e evapotranspiração, analisando as possibilidades de escoamento superficial.
- Na fronteira inferior, utilizou-se a condição de drenagem livre;

Com as condições de contorno definidas, foram inseridos os dados anuais referentes a precipitação e evapotranspiração diária. Foi realizado, então, uma análise de sensibilidade, variando todos os parâmetros de – 50% a +50%, para verificar a sensibilidade do sistema à variação dos parâmetros hidráulicos por camada e outra variando a quantidade de nós das malhas do perfil.

3.9.2 Análise de sensibilidade do modelo

Para análise de sensibilidade do modelo os 5 parâmetros de cada camada foram variados de – 50% a +50%, cada um por vez, totalizando 150 simulações, baseado, assim, no método da superfície de resposta.

Desse modo, na análise de sensibilidade do modelo, foi utilizado a sensibilidade relativa do modelo, no qual é possível caracterizá-la a cada parâmetro com relação aos dados originais de referência e aos resultados referentes à variação dos dados originais, conforme equação 20, abaixo, e consoante determinado por McCuen e Snyder (1986).

$$Sr = \frac{\frac{O - O_o}{O_o}}{\frac{F - F_i}{F_i}} \text{ (Equação 20)}$$

No qual:

- O é o resultado de saída do parâmetro modificado;
- O_o é o resultado de saída do parâmetro original;
- F é o valor do parâmetro modificado;
- F_i é o valor do parâmetro original;

Assim, segundo Mccuen e Snyder (1986), se:

- $|Sr| > 1,5$, o modelo possui alta sensibilidade ao parâmetro;
- $0,5 < |Sr| < 1,5$, o modelo possui sensibilidade intermediária ao parâmetro;
- $|Sr| < 0,5$, o modelo possui baixa sensibilidade ao parâmetro;
- o valor for próximo a zero, indica relativa insensibilidade ao parâmetro.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 ANÁLISE GRANULOMÉTRICA DO SOLO

Na cota de fundo (2,35 metros), foram recolhidas duas amostras, uma na posição, em planta, igual a 0 metros e outra, também em planta, na posição 100 metros, obtendo-se o seguinte gráfico:

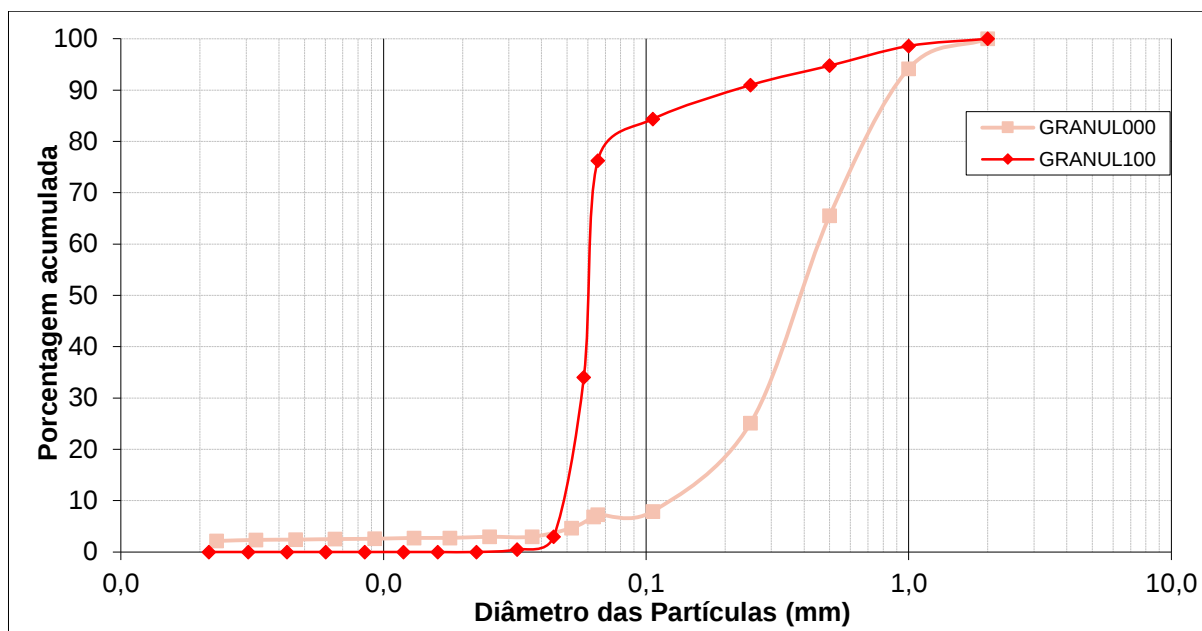


Figura 29 – Curvas granulométricas do solo na cota de fundo

Desse modo, é possível verificar duas curvas com características textuais diferentes, resultando em uma com predominância de 93% de areia, na posição 0 metros e outra com 65% de areia e 34% de silte, na posição 100 metros, segundo a classificação da USDA (1993), de acordo com a Tabela 4.

Tabela 4 – Classificação granulométrica do solo na cota de fundo

Ponto	Cota Horizontal (X) (m)	Argila (%)	Silte (%)	Areia (%)	Classificação (USDA)
GRANUL000	0	2,15	4,71	93,14	Areia
GRANUL100	100	0,00	34,07	65,93	Franco - Arenoso

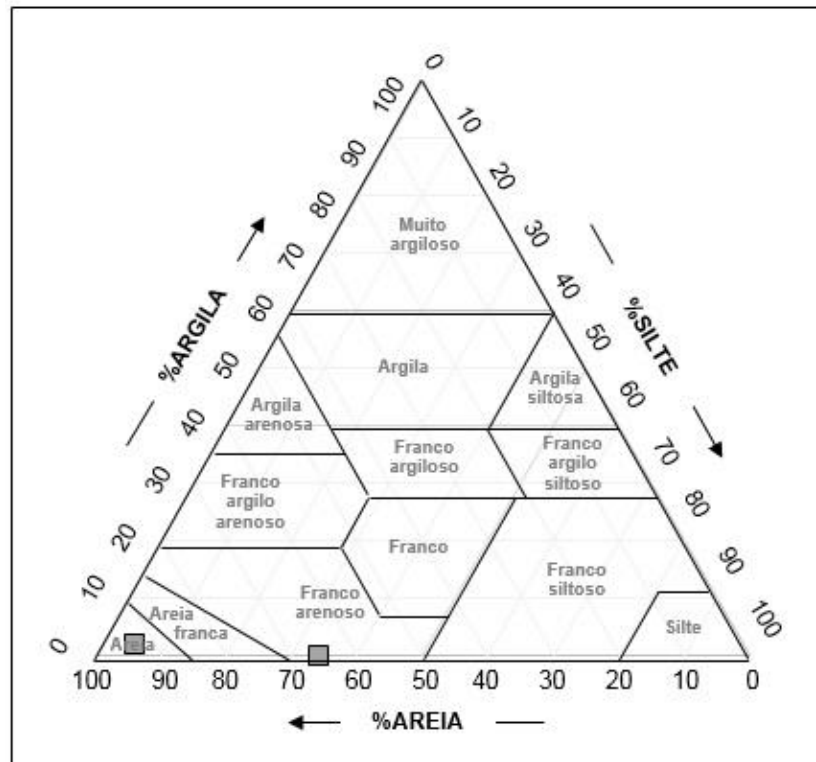


Figura 30 – Representação dos pontos da Tabela 3 no triângulo textural de classificação do solo

A partir dos ensaios granulométricos do solo, de sedimentação e peneiramento, obteve-se as seguintes curvas granulométricas, na Figura 30, da amostra complementar para obtenção do perfil esquemático do solo juntamente com os ensaios de SPT.

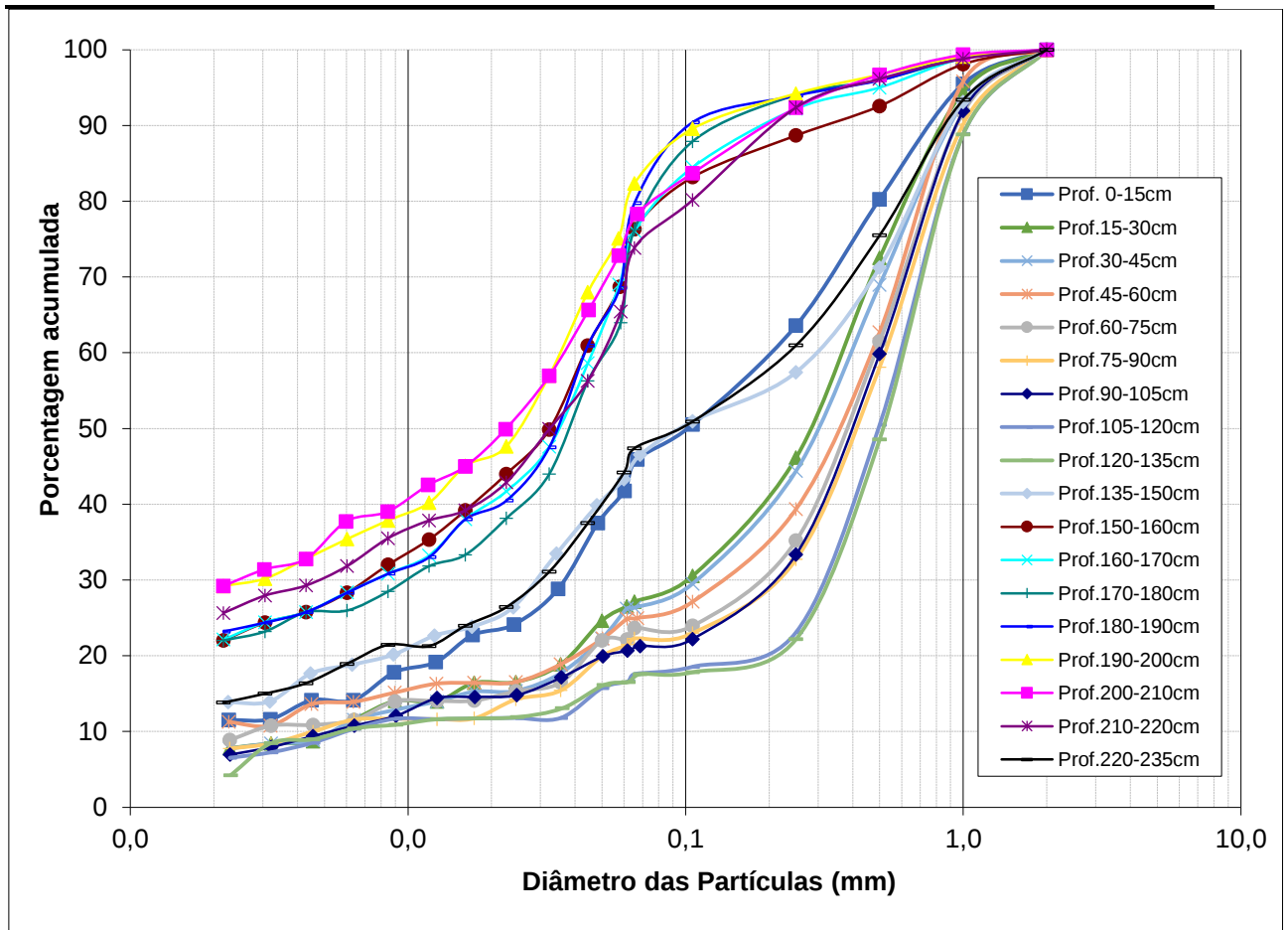


Figura 31 - Curvas granulométricas do solo na posição $x=150m$

Por meio das curvas granulométricas e com as porcentagens de cada tipo de solo (argila, silte e argila), foi possível obter a classificação textural, de acordo com o triângulo de classificação da USDA (1993), resultando em 4 tipos de solos (Franco – Arenoso, Areia – Franca, Franco e Franco - Argiloso), como apresentado na Tabela 5 e Figuras 31 e 32.

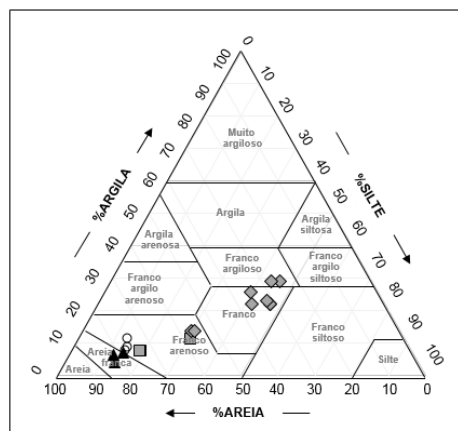


Figura 32- Representação dos pontos da Tabela 4 no triângulo textural de classificação do solo

Tabela 5 – Tabela de classificação do solo por amostra

Amostra	Argila (%)	Silte (%)	Areia (%)	Classificação (USDA)
Prof. 0-15cm	11,52	30,25	58,23	Franco - Arenoso
Prof.15-30cm	7,8	18,72	73,48	Franco - Arenoso
Prof.30-45cm	7,75	18,49	73,76	Franco - Arenoso
Prof.45-60cm	11,26	13,61	75,12	Franco - Arenoso
Prof.60-75cm	8,87	14,79	76,34	Franco - Arenoso
Prof.75-90cm	7,75	14,53	77,72	Franco - Arenoso
Prof.90-105cm	6,94	14,34	78,71	Franco - Arenoso
Prof.105-120cm	6,53	12,02	81,45	Areia - Franca
Prof.120-135cm	4,23	13,59	82,18	Areia - Franca
Prof.135-150cm	13,87	29,45	56,69	Franco - Arenoso
Prof.150-160cm	22,03	46,7	31,27	Franco
Prof.160-170cm	22,132	46,886	30,98	Franco
Prof.170-180cm	22,03	41,96	36,01	Franco
Prof.180-190cm	23,2	45,34	31,46	Franco
Prof.190-200cm	29,222	45,873	24,9	Franco-Argiloso
Prof.200-210cm	29,22	43,61	27,17	Franco-Argiloso
Prof.210-220cm	25,65	39,77	34,58	Franco
Prof.220-235cm	13,82	30,39	55,79	Franco - Arenoso

É possível perceber uma variação do solo, partindo desde um solo Franco - Arenoso na camada superficial, passando por várias texturas de solo até um solo Franco – Arenoso na cota de fundo da trincheira. Na profundidade do solo de 15 cm até 135 cm é possível verificar uma presença de areia com porcentagens acima de 73%. Da profundidade 135 cm até a 235 cm, há uma predominância de um solo mais franco, com a distribuição de argila, silte e areia. A partir da profundidade de 235 cm, não foi possível coletar amostras, uma vez que o material arenoso não aderiu ao trado concha, ficando assim, impossibilitado de coletar amostras para a realização da granulometria do solo.

4.2 PERFIL LONGITUDINAL DO TERRENO

A partir dos ensaios granulométricos apresentados acima, associados aos ensaios SPT, apresentados no Anexo A, foi possível confeccionar o perfil longitudinal do terreno (esquemático e fora de escala) até a profundidade de 3 metros, referente ao solo antes da implantação da trincheira, de acordo com a Figura abaixo:

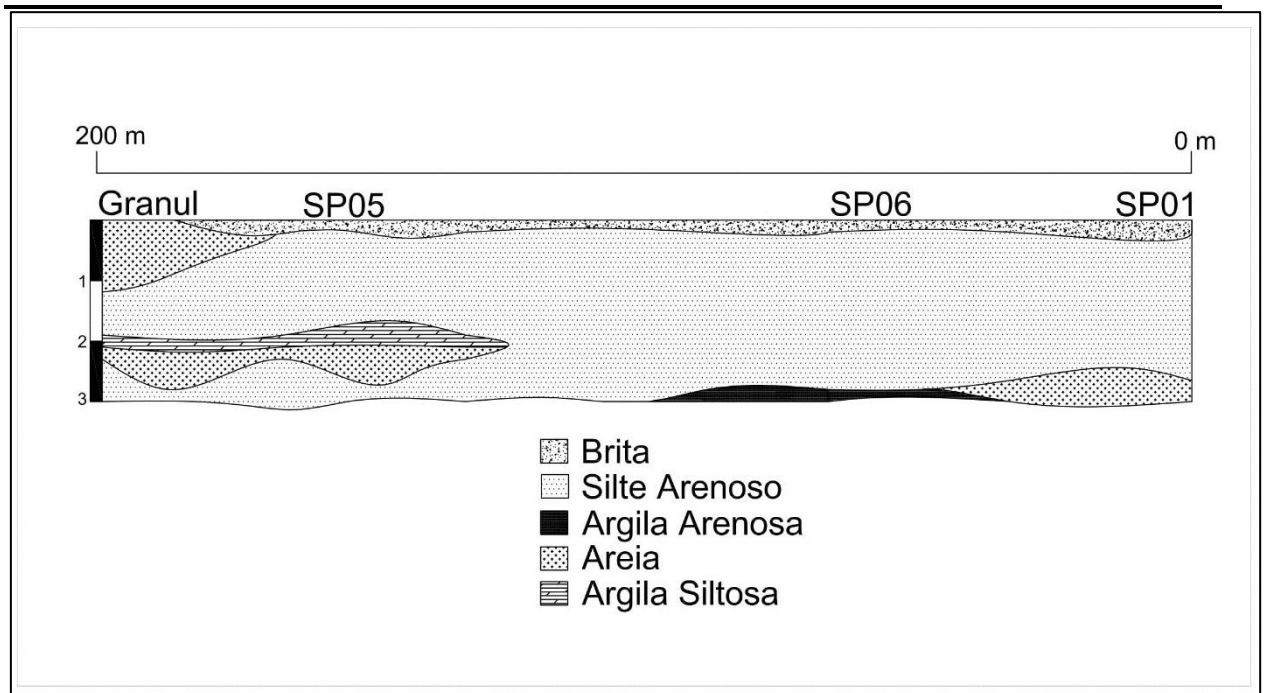


Figura 33 – Perfil longitudinal do solo no qual o SP01 corresponde ao limite do Núcleo de educação física e o lado esquerdo corresponde ao limite com a rodovia BR 101(PE)

Fonte: O próprio autor

4.3 ENSAIO DE INFILTRAÇÃO DO SOLO

Para a qualificação hidrodinâmica do solo, foram realizados três ensaios de infiltração de anel simples e aplicados a metodologia Beerkan (Haverkamp *et al.*, 1998; Braud *et al.*, 2005; Lassabatère *et al.*, 2006), com os dados de campo sintetizados nas Figuras 34 e 35.

Na análise da Figura 32, é possível observar que para um tempo de infiltração de aproximadamente de 4500 segundos a lâmina acumulada no ponto 1 é de 100 milímetros, para o ponto 2 é de 75 milímetros e para o ponto 3 é de 50 milímetros. Na Figura 33, é notório que o ponto 1 inicia-se com um fluxo maior de valor 0,1 mm/s, seguido pelo ponto 2, que inicia com um fluxo de 0,065 mm/s e pelo ponto 3, que começa com um fluxo de 0,033 mm/s. Assim, no tempo de 3700 segundos, é possível verificar a constância do fluxo da água, entre os pontos, mas com valores de fluxo diferentes entre si.

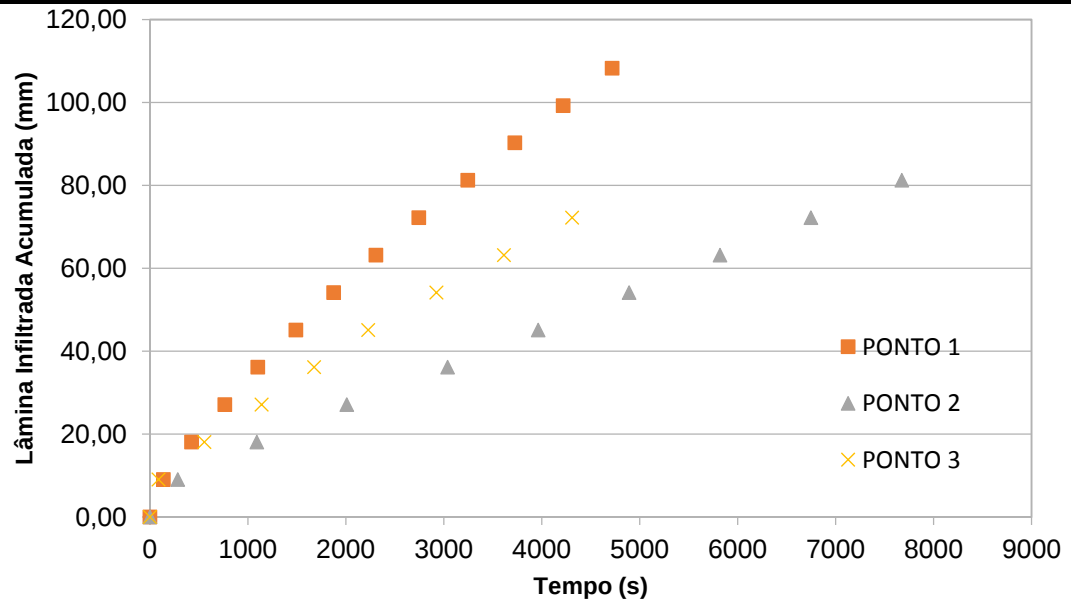


Figura 34 – Gráfico correspondente a lâmina acumulada de água e o tempo necessário a realização dos ensaios

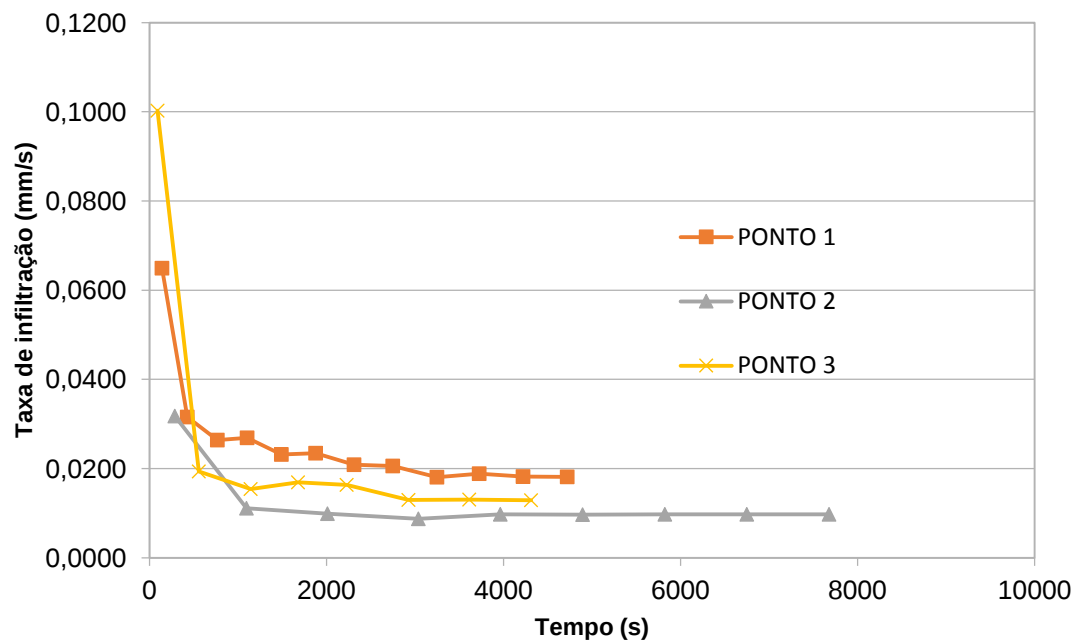


Figura 35 - Gráfico referente ao fluxo de água em mm/s e o tempo relacionado dos ensaios de infiltração

Por meio do algoritmo do BEST (Lassabatère *et al.*, 2006), foi possível obter as características dos solos, inerentes aos ensaios, com importância especial a taxa de infiltração dos solos em [mm/h], conforme hipótese de Burdine, apresentado na Tabela 6. Na mesma Tabela, também foi apresentado os resultados obtidos com a hipótese de Mualem, obtidos com auxílio do software RETC.

Tabela 6 – Características hidráulicas obtidas pela metodologia Beerkan (Haverkamp et al., 1998; Braud et al., 2005) com o auxílio do BEST (Lassabatère et al., 2006)) para a hipótese de Burdine e para hipótese de Mualem

	$\Theta_r(\text{cm}^3/\text{cm}^3)$	$\Theta_s(\text{cm}^3/\text{cm}^3)$	$\alpha(1/\text{mm})$	n	$K_s(\text{mm/h})$
Hipótese de Burdine	0,0000	0,3500	0,0324	2,1958	49,08
Hipótese de Mualem	0,0000	0,3500	0,0265	1,2037	49,08

Assim, as informações relativas ao K_s (condutividade hidráulica) dos 3 pontos analisados são:

- Ponto 1: $K_s = 0,0182 \text{ mm/s}$ ou $65,52 \text{ mm/h}$
- Ponto 2: $K_s = 0,0097 \text{ mm/s}$ ou $34,92 \text{ mm/h}$
- Ponto 3: $K_s = 0,0130 \text{ mm/s}$ ou $46,80 \text{ mm/h}$

Assim, segundo a Tabela 6, os três ensaios realizados pertencem ao grupo A, com condutividade hidráulica maior que $7,6 \text{ mm/h}$, resultando em um bom solo para implantação de dispositivos de infiltração, a exemplo da trincheira.

4.3.1 Análise e Seleção dos Eventos Hidrológicos

A trincheira de infiltração foi monitorada durante 34 dias, mais precisamente do dia 01/06/2017 até o dia 04/07/2017, em dias uteis, excluindo os finais de semana e feriados, uma vez que o canteiro de obras do local estava fechado, e, portanto, sem acesso, aos 6 piezômetros instalados. O monitoramento foi realizado manualmente, com equipamento automático, no qual a profundidade da água é medida manualmente, por meio de um cabo inextensível e graduado milimetricamente, a partir do sonar, de um sensor presente no extremo do cabo, o qual emite um som, para caracterizar que o cabo atingiu o nível de água do lençol freático. Desse modo, é necessário escolher uma seleção de eventos, uma vez que não há um monitoramento contínuo dos eventos.

Os eventos pluviais dos referidos dias foram obtidos por meio da estação da várzea, posto pluviométrico mais perto do local da trincheira, coletados no site www.apac.pe.gov.br, acessado em 02/08/2017, segundo o gráfico a seguir:

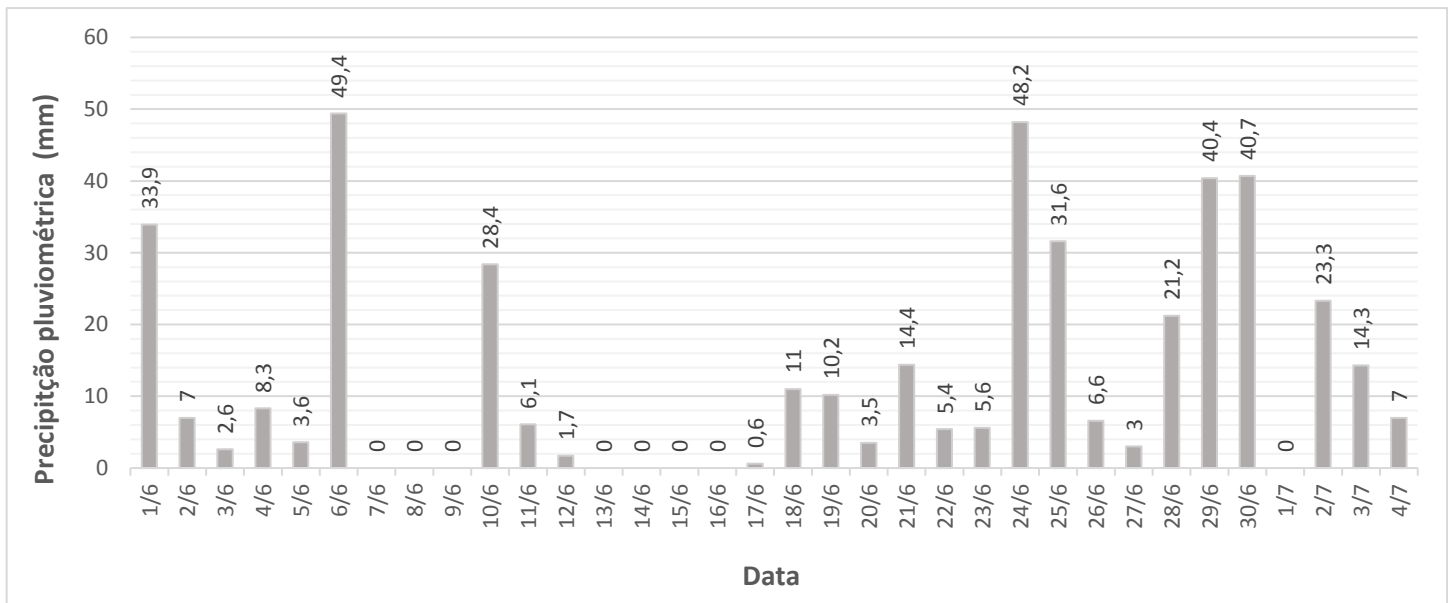


Figura 36 - Precipitação pluviométrica diária em milímetros da estação da várzea, Recife - PE

Assim, os eventos escolhidos estão representados na Tabela 7:

Tabela 7 - Descrição dos eventos pluviométricos escolhidos

Evento	Data do Evento	Precipitação Anterior (mm)	Precipitação Máxima (mm)	Precipitação Acumulada (mm)
Evento 1	05/06/2017 a 09/06/2017	8,3	49,4	53
Evento 2	19/06/2017 a 22/06/2017	11	14,4	33,5
Evento 3	26/06/2017 a 29/06/2017	31,6	40,4	71,2

4.3.2 Evento Pluviométrico 1

Com os dados obtidos do monitoramento através dos piezômetros, juntamente com os dados pluviométricos, foi possível obter o comportamento da trincheira para o evento 1 que ocorreu do dia 05/06/2017 ao dia 09/06/2017, caracterizado por uma precipitação máxima de 49,4 mm e uma precipitação acumulada de 53 mm, representado pela Figura 37.

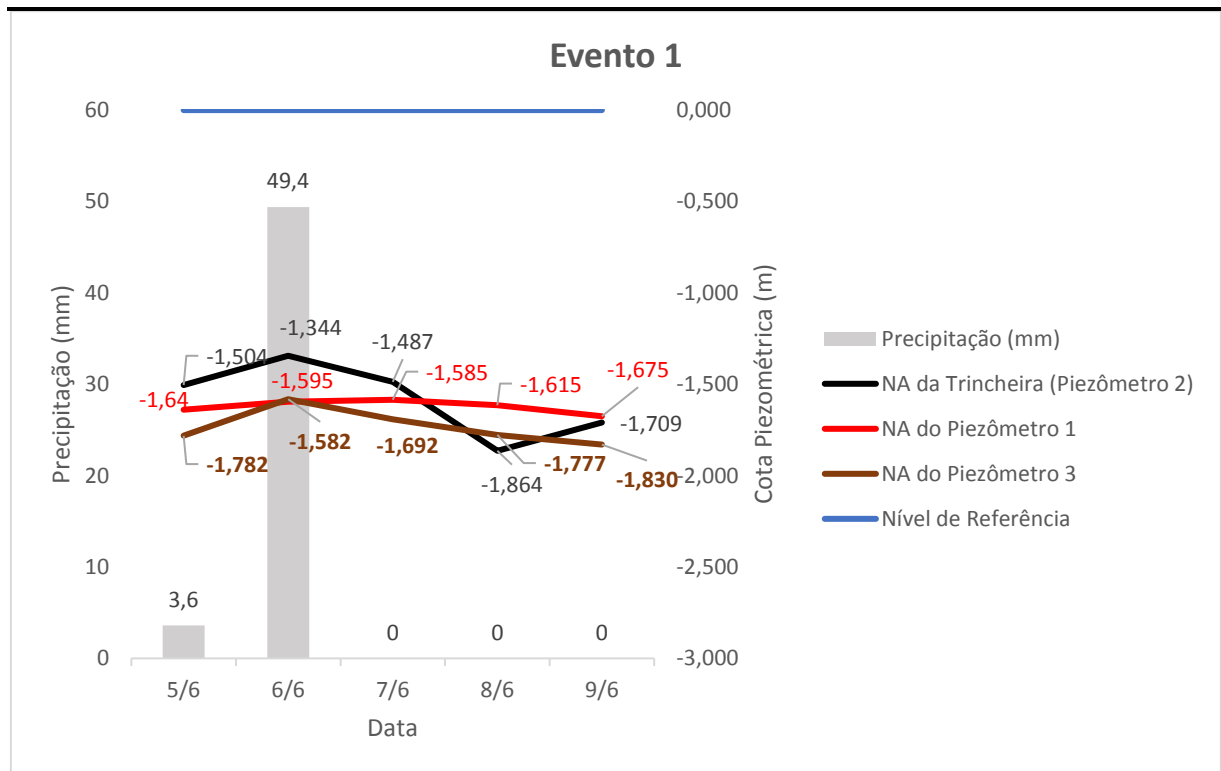


Figura 37 - Precipitação x Cota Piezométrica do evento pluviométrico 1

Dessa maneira, conforme a Figura acima é possível verificar que o nível piezométrico - este, que está referenciado pela cota 0 m, sendo o nível de referência da obra e não correspondente nem ao nível do terreno, nem ao nível do mar – inicia baixo com cota de 1,504 m, devido ao início das chuvas do período de inverno do local, aumentando o nível do lençol freático com a precipitação do dia 06/06/2017, correspondente a uma chuva de 49,4 mm.

O nível da água chega ao seu ápice com valor de 1,344 m e começa a diminuir outra vez, por causa da infiltração da água subterrânea da trincheira pelo fundo e pelas paredes laterais do dispositivo em direção ao solo adjacente e consequente redução do volume de água armazenado na trincheira.

Uma vez que não há precipitações nos dias subsequentes, o dispositivo chega ao seu nível mais baixo com uma diminuição abrupta de 0,377 metros no dia 08/06/2017, devido a um vazamento que houve na trincheira, voltando a subir no dia 09/06/2017, devido a alimentação da água dos terrenos adjacentes para dentro do dispositivo, uma vez que a cota piezométrica dos níveis de água estava maior que o nível interno da trincheira.

Em relação aos níveis adjacentes do terreno é possível analisar que o nível do lado oposto ao do terreno praticamente não varia, provavelmente devido aos serviços de

terraplenagem de aterro e compactação do solo para a construção de uma pista de atletismo, variando com uma amplitude de 0,09 metros entre os valores máximos e mínimos.

Já o nível de água do terreno limitado pelo muro do CRCN, inicia com um valor baixo de 1,782 metros, com uma diferença de 0,278 metros para o nível do dispositivo, subindo o nível no dia que ocorreu a maior precipitação, devido a infiltração da água pelas paredes laterais da trincheira, voltando a diminuir no dia seguinte até o último dia do evento, caracterizado por não haver precipitação.

4.3.3 Evento Pluviométrico 2

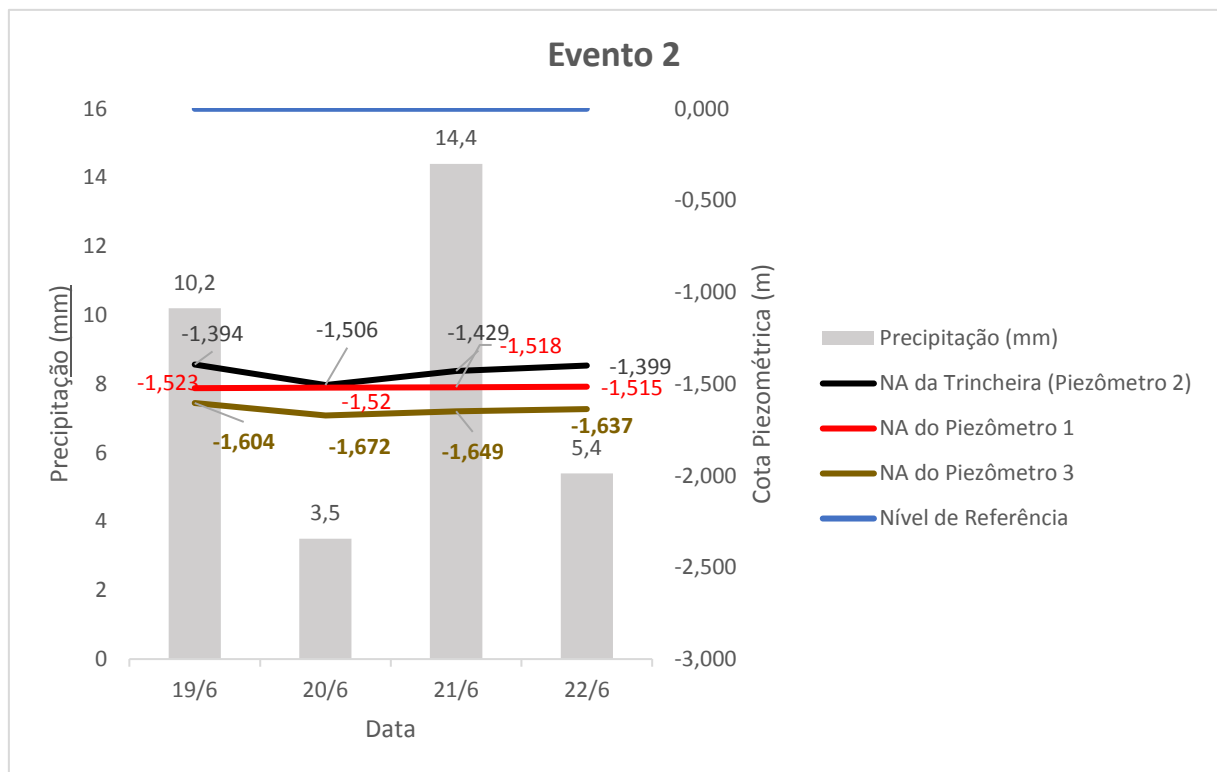


Figura 38 - Precipitação x Cota Piezométrica do evento pluviométrico 2

A dinâmica da trincheira no evento pluviométrico 2, representado pelo gráfico na Figura 38, inicia com a cota elevada, no dia 19/06/2017, devido à chuva do dia anterior de 11 mm e a chuva do dia de 10,2 mm.

No dia seguinte (20/06/2017), houve um pico de redução de 0,112 metros do nível da trincheira e de 0,068 metros do nível de água do terreno do mesmo lado do muro divisório do CRCN, devido ao rebaixamento de lençol freático por sistema de ponteiros, realizado pela empresa executora da pista de atletismo adjacente ao dispositivo, para o assentamento de uma tubulação, o qual retirou água do dispositivo, afetando também o terreno adjacente.

Com a chuva de 14,4 mm do dia 21/06/2017, aliado a chuva de 3,5 mm do dia 20/06/2017 e a chuva de 5,4 mm do dia 22/06/2017, o dispositivo voltou a funcionar em condições naturais, sem o rebaixamento por ponteiros e o nível do terreno limitado pelo muro do CRCN e o nível da trincheira voltaram a subir, devido às chuvas, ao escoamento e infiltração causados por ela.

Outro motivo para o aumento do nível de água do terreno adjacente foi porque seu nível estava, ainda, menor que o do dispositivo, sendo alimentado por ela e aumentando o nível da trincheira de 1,506 m para 1,399 m e aumentando também, o do terreno de 1,672 m para 1,637 m, tanto devido às chuvas, quanto devido a retirada das ponteiros de rebaixamento, desde o dia 20/06/2017 até o fim do evento. Vale salientar que o nível do terreno oposto ao muro do CRCN, praticamente não variou, provavelmente, devido aos serviços de terraplenagem executados no local.

4.3.4 Evento Pluviométrico 3

O evento 3, ocorrido do dia 26/06/2017 e finalizado no dia 29/06/2017, conforme Figura 39, inicia com o nível da trincheira com profundidade de 1,412 m. No dia seguinte, o nível de água já está menor, devido à passagem da água da trincheira para o terreno adjacente por processo de esvaziamento de drenagem.

A partir do dia 27/06/2017 o nível da trincheira volta a subir por causa das chuvas no local, alcançando seu menor valor no dia 29/06/2017, devido as precipitações de 21,2 mm do dia 28/06/2017 e as de 40,4 mm do dia 29/06/2017.

É possível verificar também que o nível de água no terreno adjacente do mesmo lado do muro do CRCN acompanha a oscilação do nível interno da trincheira, mostrando que o volume de água que entra no dispositivo está sendo transferida ao subsolo.

É possível notar também, que a inclinação da reta do nível da trincheira é maior que a do nível do terreno adjacente, sendo assim, é notório que a quantidade elevada das chuvas provoca uma maior infiltração no dispositivo devido a presença do material granular de alta porosidade em seu interior.

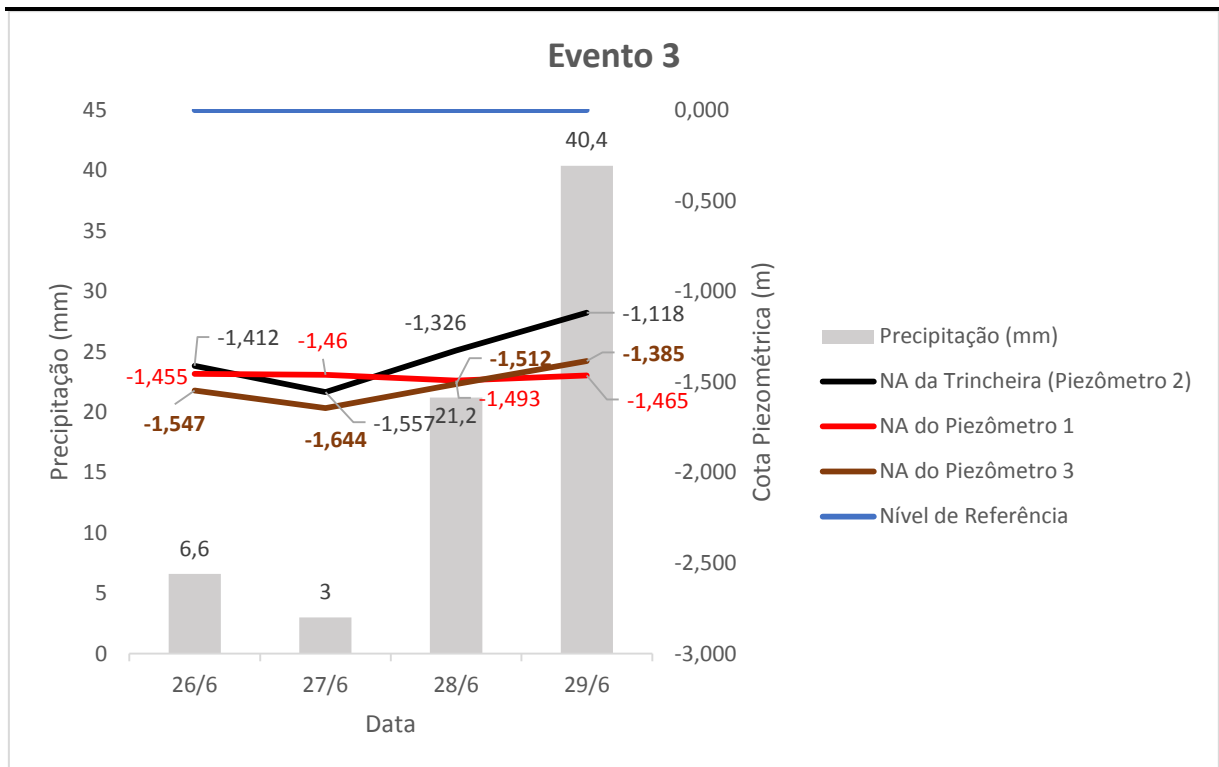


Figura 39 - Precipitação x Cota Piezométrica do evento pluviométrico 3

4.4 SIMULAÇÃO NUMÉRICA UTILIZANDO O SOFTWARE HYDRUS

Com os dados de granulometria e infiltração coletados em campo, foi possível obter um perfil do solo de modo que foi realizado a simulação numérica com o auxílio do Hydrus. A condição de contorno superior foi considerada como sendo as condições atmosféricas de precipitação com escoamento superficial e evapotranspiração e a condição inferior foi considerada como carga piezométrica constante com o mesmo gradiente hidráulico para as 3 camadas.

Os dados pluviométricos e de evapotranspiração considerado para a simulação foram obtidos os dados diários médios da estação meteorológica do Curado de código 82900, próximo ao local da implantação da trincheira, adquirido por meio da LAMEPE/INMET, 2011, conforme figura 40.

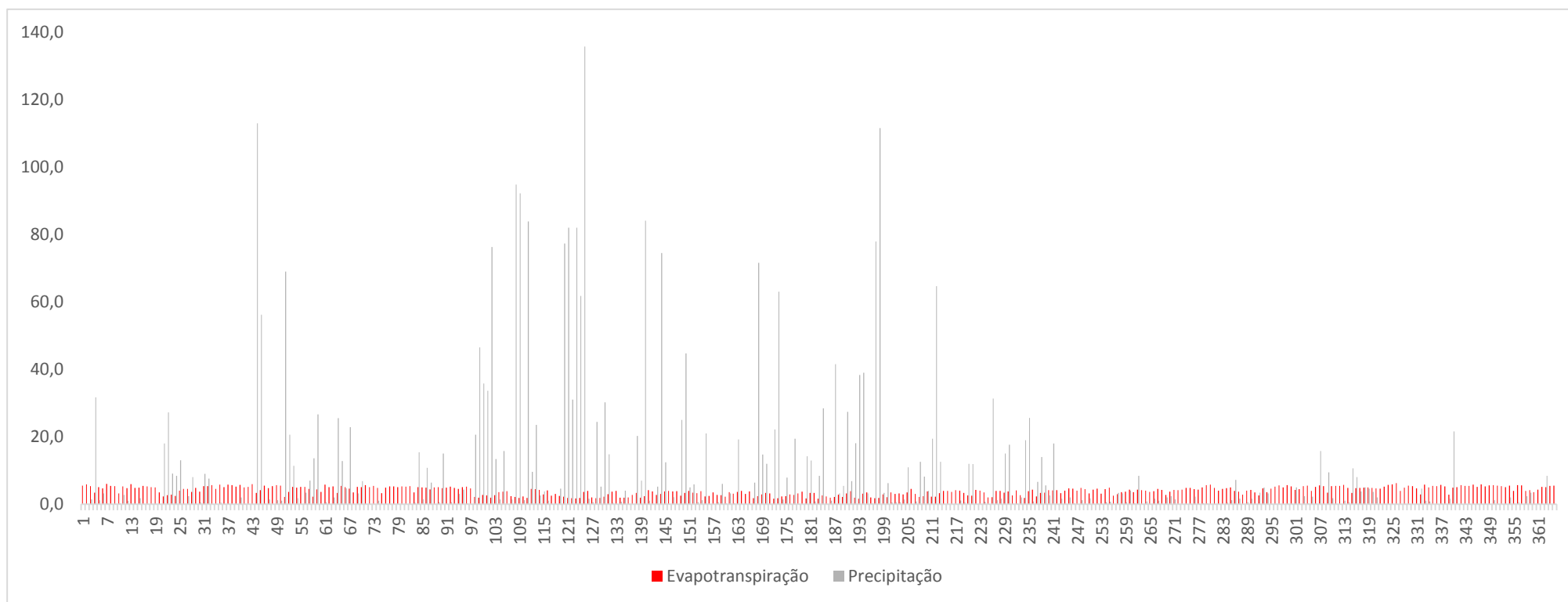


Figura 40 – Precipitação e evapotranspiração média diária da estação do curado no Recife, de código 82900 – Fonte: LAMEPE/INMET, 2011

4.4.1 Análise de Sensibilidade

Os parâmetros de referência das camadas dos solos, juntamente com a variação dos parâmetros de -50% a + 50%, estão representados nas tabelas 8, 9 e 10. Vale salientar que os dados que estão em vermelho, referente ao parâmetro N, não obtiveram sucesso na modelagem, e, portanto, não foram simulados.

Tabela 8 – Variação dos parâmetros da camada de solo 1 para análise de sensibilidade

Variação	θ_r (cm³/cm³)	θ_s (cm³/cm³)	α (1/cm)	n	Ks (cm/dia)
-50%	0,0170	0,1595	0,0220	0,6569	58,890
-40%	0,0203	0,1913	0,0264	0,7883	70,668
-30%	0,0237	0,2232	0,0308	0,9197	82,446
-20%	0,0271	0,2551	0,0352	1,0510	94,224
-10%	0,0305	0,2870	0,0396	1,1824	106,002
Parâmetro	0,0339	0,3189	0,0440	1,3138	117,780
10%	0,0373	0,3508	0,0484	1,4452	129,558
20%	0,0407	0,3827	0,0528	1,5766	141,336
30%	0,0441	0,4146	0,0572	1,7079	153,114
40%	0,0475	0,4465	0,0616	1,8393	164,892
50%	0,0509	0,4784	0,0660	1,9707	176,670

Tabela 9 - Variação dos parâmetros da camada de solo 2 para análise de sensibilidade

Variação	θ_r (cm³/cm³)	θ_s (cm³/cm³)	α (1/cm)	n	Ks (cm/dia)
-50%	0,0225	0,2150	0,0725	1,3400	356,400
-40%	0,0270	0,2580	0,0870	1,6080	427,680
-30%	0,0315	0,3010	0,1015	1,8760	498,960
-20%	0,0360	0,3440	0,1160	2,1440	570,240
-10%	0,0405	0,3870	0,1305	2,4120	641,520
Parâmetro	0,0450	0,4300	0,1450	2,6800	712,800
10%	0,0495	0,4730	0,1595	2,9480	784,080
20%	0,0540	0,5160	0,1740	3,2160	855,360
30%	0,0585	0,5590	0,1885	3,4840	926,640
40%	0,0630	0,6020	0,2030	3,7520	997,920
50%	0,0675	0,6450	0,2175	4,0200	1069,200

Tabela 10 - Variação dos parâmetros da camada de solo 3 para análise de sensibilidade

Variação	θ_r (cm ³ /cm ³)	θ_s (cm ³ /cm ³)	α (1/cm)	n	Ks (cm/dia)
-50%	0,0120	0,2072	0,0195	0,7174	48,080
-40%	0,0143	0,2486	0,0233	0,8609	57,696
-30%	0,0167	0,2900	0,0272	1,0044	67,312
-20%	0,0191	0,3314	0,0311	1,1478	76,928
-10%	0,0215	0,3729	0,0350	1,2913	86,544
Parâmetro	0,0239	0,4143	0,0389	1,4348	96,160
10%	0,0263	0,4557	0,0428	1,5783	105,776
20%	0,0287	0,4972	0,0467	1,7218	115,392
30%	0,0311	0,5386	0,0506	1,8652	125,008
40%	0,0335	0,5800	0,0545	2,0087	134,624
50%	0,0359	0,6215	0,0584	2,1522	144,240

A análise de sensibilidade da simulação foi dividida por camada e por parâmetro variado, de acordo com o que segue abaixo, analisando os resultados da lâmina de escoamento acumulada, da lâmina de água média armazenada e da lâmina de infiltração acumulada. Desse modo, foi possível avaliar a variabilidade dos parâmetros.

4.4.1.1 Camada 1

Após a análise de sensibilidade foi verificado que os parâmetros referentes a camada 1, estão explicitados, conforme Figuras 41, 42 e 43, abaixo, referentes à variação percentual dos resultados com os parâmetros, implicando na maior variação da condutividade hidráulica saturada do solo (Ks), na variação dos resultados obtidos na lâmina de infiltração acumulada e na lâmina de escoamento acumulada e no parâmetro de forma (n), na variação percentual da lâmina de escoamento acumulada. Vale salientar que a variação da lâmina média acumulada com relação ao parâmetro da umidade volumétrica saturada (θ_s), foi relativamente baixa variando em torno de 6% em relação ao parâmetro principal. Este método leva em consideração, apenas a variação percentual dos resultados, não abrangendo a variação dos parâmetros na discretização do cálculo.

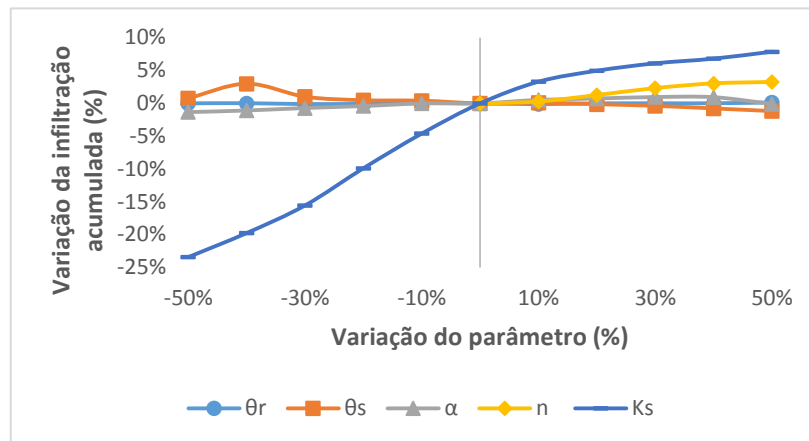


Figura 41 – Variação percentual da infiltração acumulada da camada 1

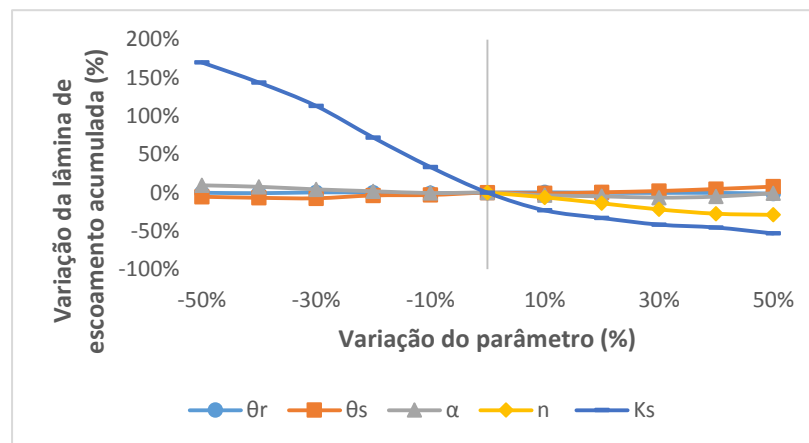


Figura 42 - Variação percentual da lâmina de escoamento acumulada da camada 1

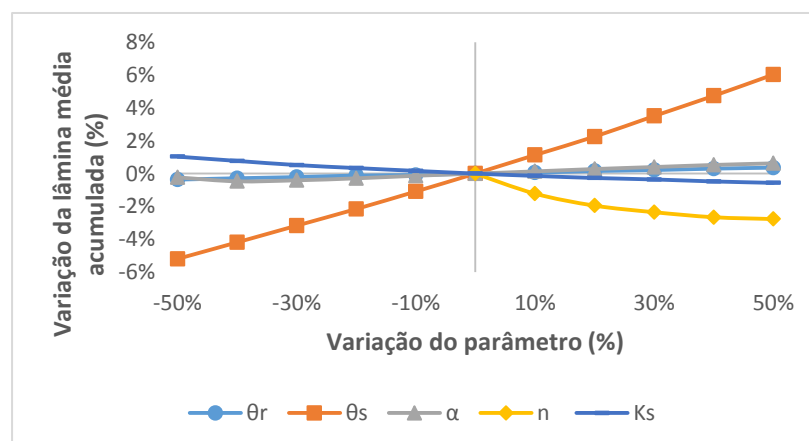


Figura 43 – Variação percentual da lâmina média acumulada da camada 1

Segundo as médias e coeficientes da sensibilidade relativa, metodologia mais específica para caracterização da sensibilidade, uma vez que leva em conta a variação dos resultados e dos parâmetros, proposta por McCuen e Snyder (1986), segundo Tabelas 11, 12 e 13, os parâmetros

que obtiveram maior sensibilidade intermediária foram o parâmetro de forma (n), conforme conclusões obtidas por Chaves (2009) e por Beyene *et al.* (2017), quando utilizaram o software Hydrus, respectivamente, para análise de sensibilidade do modelo em solos de diferentes texturas na cidade de Brasília – DF e para estimar a transpiração real, a evaporação do solo e a percolação profunda de campos irrigados de solos alagados nas várzeas do lago Tana, na Etiópia; e sensibilidade de intermediária a alta na condutividade hidráulica saturada do solo (K_s), para o escoamento acumulado da trincheira, conforme resultados obtidos por Coutinho (2011), quando utilizou o Hydrus para simulações numéricas e hidrodinâmicas no pavimento permeável com chuvas constante para diferentes tipos de retorno, na cidade do Recife.

Alta sensibilidade	
Intermediária sensibilidade	
Baixa sensibilidade	

Legenda

Tabela 11 – Sensibilidade relativa dos parâmetros para a lâmina de infiltração acumulada da camada 1

Lâmina de infiltração acumulada	θ_r (cm ³ /cm ³)	θ_s (cm ³ /cm ³)	α (1/cm)	n	K_s (cm/dia)
Ref - 50%	0,0000	0,0156	0,0266		0,469
Ref - 40%	0,0007	0,0749	0,0272		0,494
Ref - 30%	0,0038	0,0338	0,0236		0,518
Ref - 20%	0,0038	0,0241	0,0204		0,494
Ref - 10%	0,0043	0,0408	0,0014		0,460
Referência					
Ref + 10%	0,0115	0,0096	0,0521	0,0285	0,330
Ref + 20%	0,0002	0,0061	0,0368	0,0633	0,249
Ref + 30%	0,0004	0,0126	0,0321	0,0777	0,203
Ref + 40%	0,0003	0,0193	0,0235	0,0762	0,170
Ref + 50%	0,0030	0,0235	0,0017	0,0653	0,158

Tabela 12 - Sensibilidade relativa dos parâmetros para a lâmina de escoamento acumulada da camada 1

Lâmina de escoamento acumulada	θ_r (cm ³ /cm ³)	θ_s (cm ³ /cm ³)	α (1/cm)	n	K_s (cm/dia)
Ref - 50%	0,0019	0,1067	0,1923		3,402
Ref - 40%	0,0180	0,1678	0,1926		3,600
Ref - 30%	0,0138	0,2437	0,1437		3,777
Ref - 20%	0,0070	0,1811	0,0930		3,600
Ref - 10%	0,0760	0,3015	0,0496		3,348
Referência					
Ref + 10%	0,0404	0,1009	0,3455	0,6066	2,310
Ref + 20%	0,0074	0,0257	0,2378	0,6942	1,656
Ref + 30%	0,0104	0,0719	0,2164	0,7299	1,391
Ref + 40%	0,0063	0,1197	0,1286	0,6863	1,138
Ref + 50%	0,0272	0,1576	0,0144	0,5801	1,065

Tabela 13 - Sensibilidade relativa dos parâmetros para a lâmina média armazenada da camada 1

Lâmina média armazenada	θ_r (cm³/cm³)	θ_s (cm³/cm³)	α (1/cm)	n	Ks (cm/dia)
Ref - 50%	0,0073	0,1040	0,0047		0,021
Ref - 40%	0,0071	0,1048	0,0118		0,019
Ref - 30%	0,0071	0,1058	0,0136		0,017
Ref - 20%	0,0060	0,1079	0,0145		0,017
Ref - 10%	0,0086	0,1091	0,0131		0,017
Referência					
Ref + 10%	0,0060	0,1132	0,0133	0,1221	0,014
Ref + 20%	0,0078	0,1126	0,0139	0,0976	0,013
Ref + 30%	0,0071	0,1170	0,0133	0,0784	0,012
Ref + 40%	0,0076	0,1185	0,0132	0,0665	0,012
Ref + 50%	0,0072	0,1207	0,0125	0,0554	0,011

4.4.1.1.1 Parâmetro do inverso do comprimento capilar - α

O trecho ascendente do gráfico correspondente a lâmina de escoamento acumulada, em relação a sensibilidade do inverso do comprimento capilar praticamente não variou até o dia 120, fato esse representado pelo início das chuvas na região, segundo gráfico da Figura 44. A amplitude da variação do resultado foi de 107,92 cm, sendo o máximo escoamento da referência – 50%, com o valor de 734,39 cm e o menor valor de 626,47 cm, para a referência + 30%. Os outros 2 parâmetros, correspondentes aos gráficos da Figura 45 e 46, se mantêm sobrepostos, indicando a mínima variação entre seus resultados.

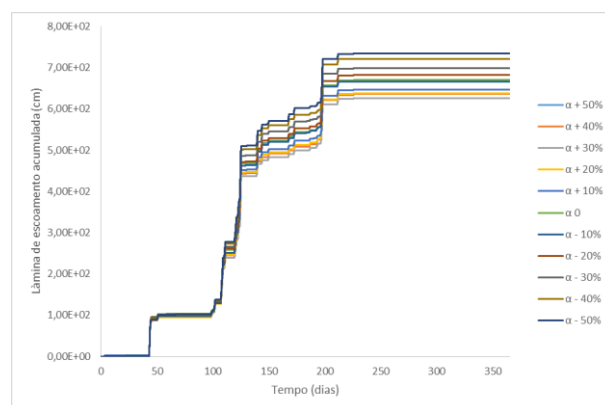


Figura 44 – Variação da lâmina de escoamento acumulada (cm) em função da variação do parâmetro α da camada 1

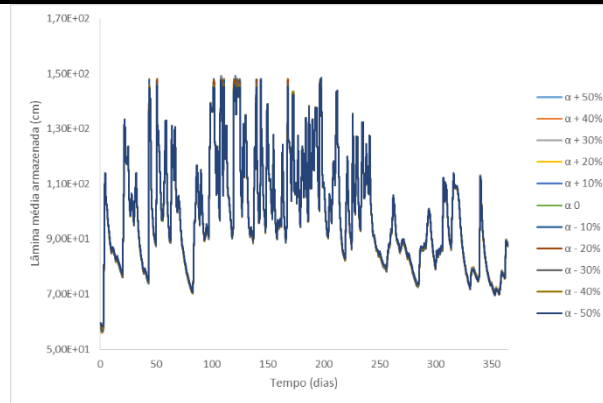


Figura 45 - Variação da lâmina média armazenada (cm) em função da variação do parâmetro α da camada 1

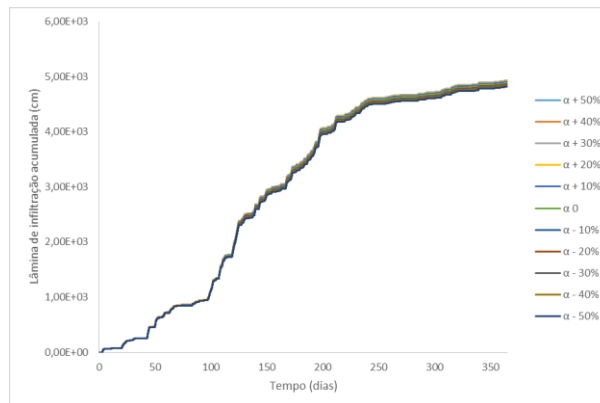


Figura 46 - Variação da lâmina de infiltração acumulada (cm) em função da variação do parâmetro α da camada 1

4.4.1.1.2 Condutividade hidráulica saturada do solo - K_s

Com relação a análise da sensibilidade realizada para o coeficiente de infiltração, foi verificado que os resultados da lâmina de escoamento acumulada variaram bastante a partir do início das chuvas da região, apresentando um escoamento bem maior para o $K_s = 58,89$ cm/dia, segundo a Figura 48, apresentando um pico de valor 1809,5 centímetros acumulados ao longo do ano, e maior lâmina de infiltração acumulada para o mesmo coeficiente de infiltração, conforme gráfico da Figura 49, apresentando uma lâmina de valor 3736,5 centímetros ao longo do ano. Sendo assim, os gráficos se comportam de maneira inversamente proporcional, uma vez que quanto maior o escoamento da superfície, menor será a lâmina de infiltração acumulada. No gráfico da Figura 49, foi observado uma amplitude de 1527,5 cm entre a menor e a maior lâmina de infiltração acumulada e uma amplitude de 1496,37 cm entre a maior e a menor lâmina de escoamento acumulada. O gráfico da Figura 47, referente a lâmina média armazenada, praticamente não variou.

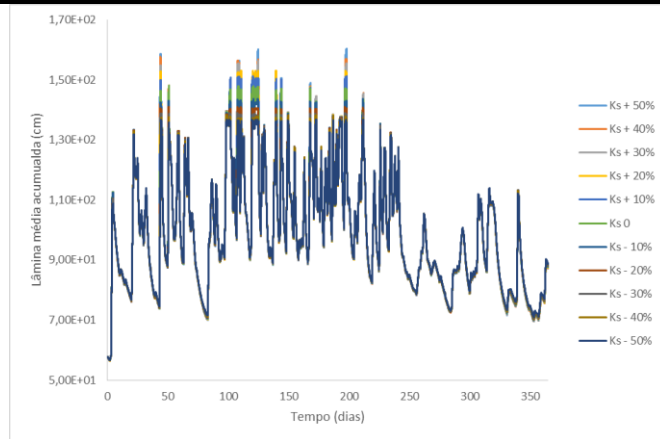


Figura 47 - Variação da lâmina média armazenada (cm) em função da variação do parâmetro K_s da camada 1

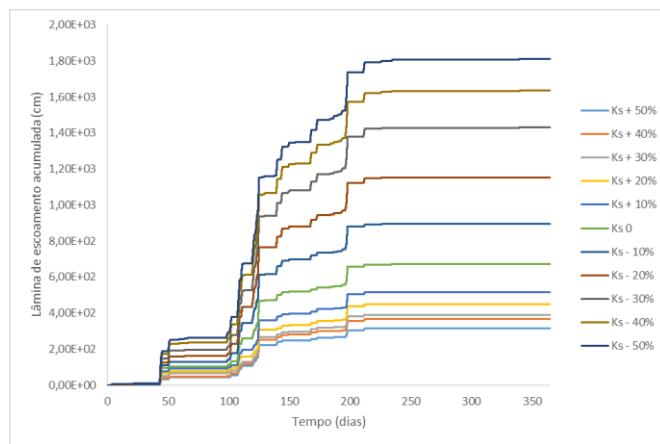


Figura 48 - Variação da lâmina de escoamento acumulada (cm) em função da variação do parâmetro K_s da camada 1

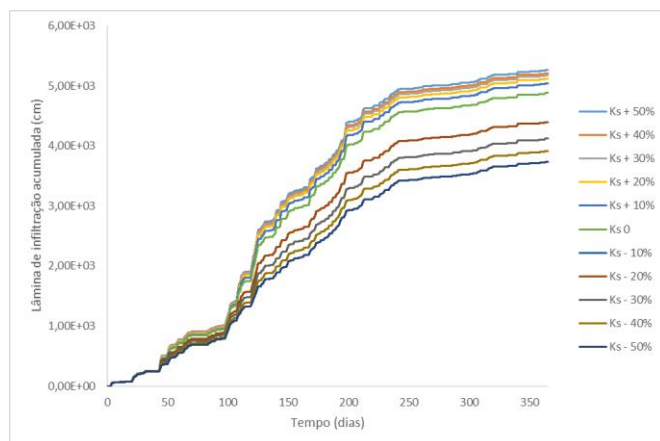


Figura 49 - Variação da lâmina de infiltração acumulada (cm) em função da variação do parâmetro K_s da camada 1

4.4.1.1.3 Parâmetro de forma - N

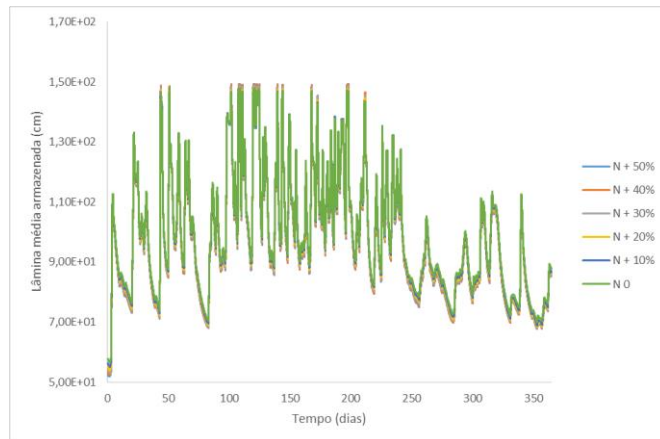


Figura 50 - Variação da lâmina média armazenada (cm) em função da variação do parâmetro N da camada 1

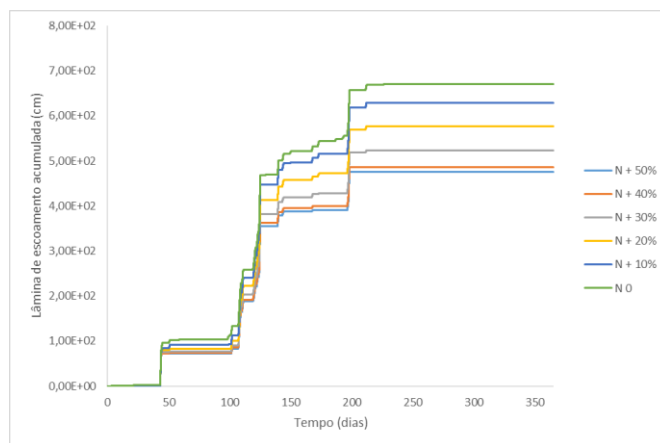


Figura 51 - Variação da lâmina de escoamento acumulada (cm) em função da variação do parâmetro N da camada 1

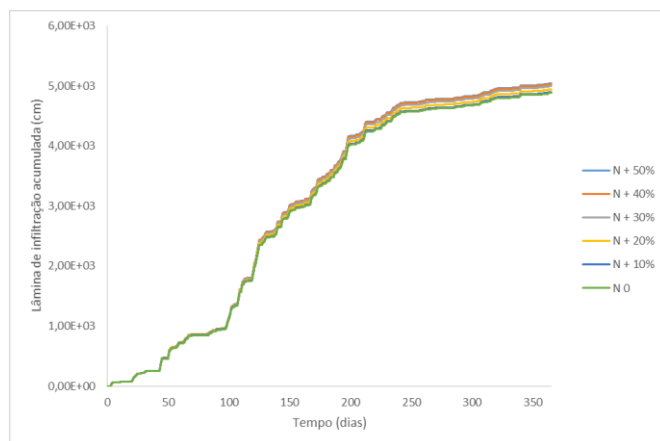


Figura 52 - Variação da lâmina de infiltração acumulada (cm) em função da variação do parâmetro N da camada 1

Os resultados da análise, decorrentes da variação do parâmetro de forma, apresentaram variação significativa para a lâmina de escoamento acumulada, variando inversamente a variação do parâmetro de forma, ou seja, apresentando uma lâmina de escoamento acumulada menor para o acréscimo de 50% ao valor do parâmetro, conforme Figura 51, acima, com uma amplitude de variação entre o menor e o maior de 194,32 cm, consoante conclusões obtidas por Chaves (2009) e por Beyene *et al.* (2017). Praticamente não houve variação dos gráficos das Figuras 50 e 52.

4.4.1.1.4 Umidade volumétrica residual - Θ_r

Com relação a variação da umidade volumétrica residual do solo, não houve variações significativas, conforme os gráficos das Figuras 53, 54 e 55, de maneira que eles se mantêm praticamente invariáveis.

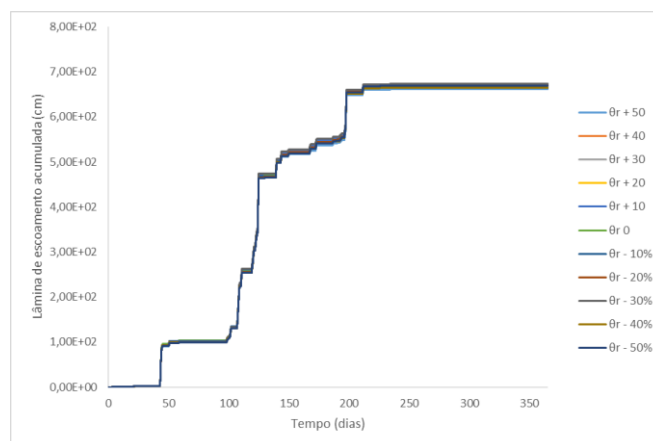


Figura 53 - Variação da lâmina de escoamento acumulada (cm) em função da variação do parâmetro Θ_r da camada 1

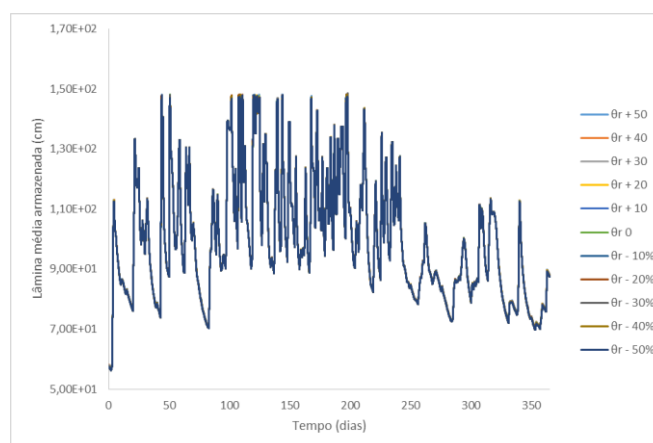


Figura 54 - Variação da lâmina média armazenada (cm) em função da variação do parâmetro Θ_r da camada 1

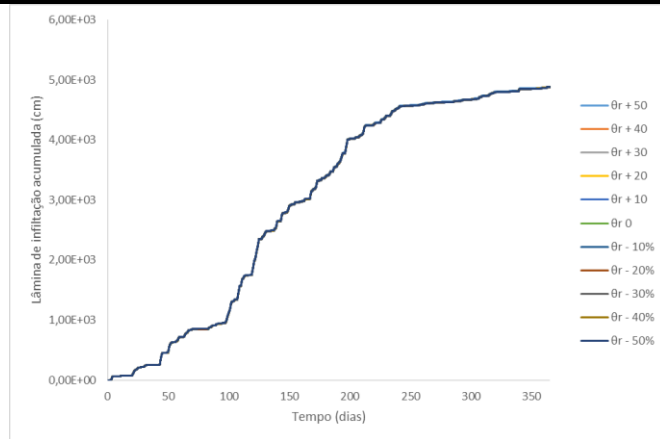


Figura 55 - Variação da lâmina de infiltração acumulada (cm) em função da variação do parâmetro Θ_r da camada 1

4.4.1.1.5 Umidade volumétrica saturada - Θ_s

Os resultados da análise, referentes a variação da umidade volumétrica saturada, obtiveram leve sensibilidade, conforme BEYENE *et al.* (2017) e CHAVES (2009) na lâmina de escoamento acumulada, segundo o gráfico da Figura 56 e da lâmina média armazenada, segundo a Figura 57. No primeiro gráfico, após o 120º dia, os resultados variaram proporcionalmente ao incremento no valor do parâmetro, obtendo uma amplitude entre o menor e o maior valor de 98,56 centímetros de escoamento acumulada, durante o período anual. Não houve variação da lâmina de infiltração acumulada, no gráfico da Figura 58.

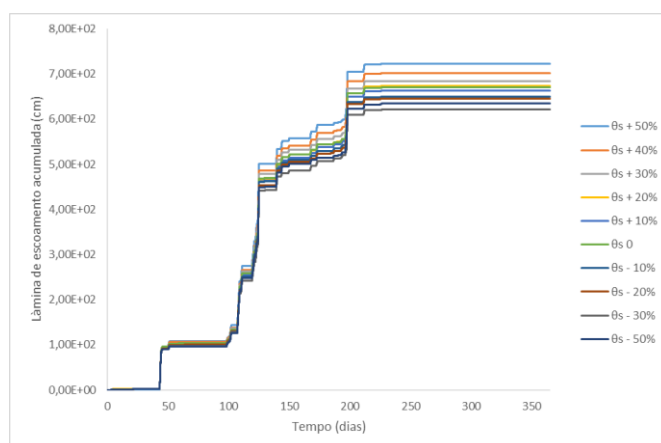


Figura 56 - Variação da lâmina de escoamento acumulada (cm) em função da variação do parâmetro Θ_s da camada 1

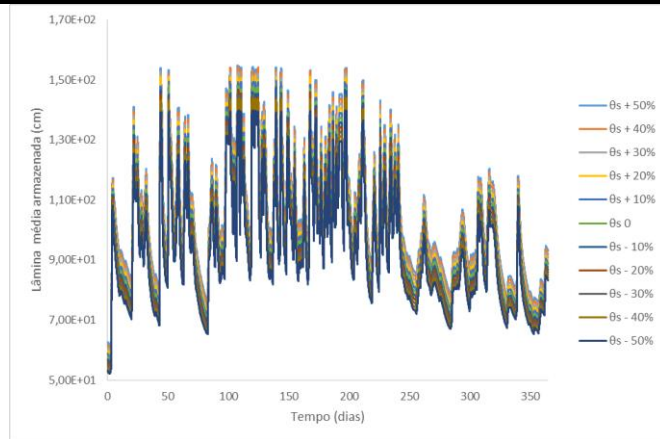


Figura 57 - Variação da lâmina média armazenada (cm) em função da variação do parâmetro Θ_s da camada 1

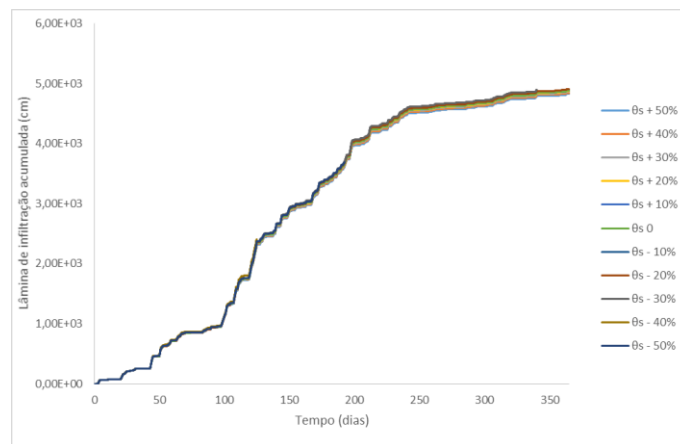


Figura 58 - Variação da lâmina de infiltração acumulada (cm) em função da variação do parâmetro Θ_r da camada 1

4.4.1.2 Camada 2

Após a análise de sensibilidade percentual e considerando apenas os resultados obtidos, sem considerar a variação dos parâmetros, foi verificado que o parâmetro de forma (n), referente a camada 2, obteve maior sensibilidade. Porém, esta variação percentual leva em consideração apenas os resultados, não apresentando assim, um resultado falso verdadeiro.

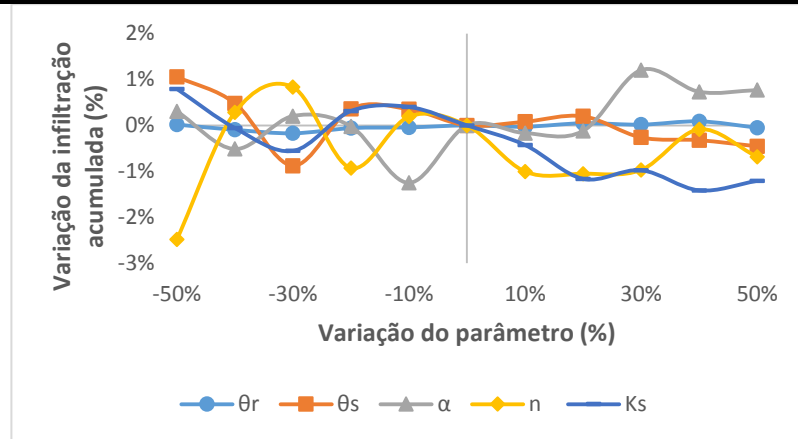


Figura 59 - Variação percentual da infiltração acumulada da camada 2

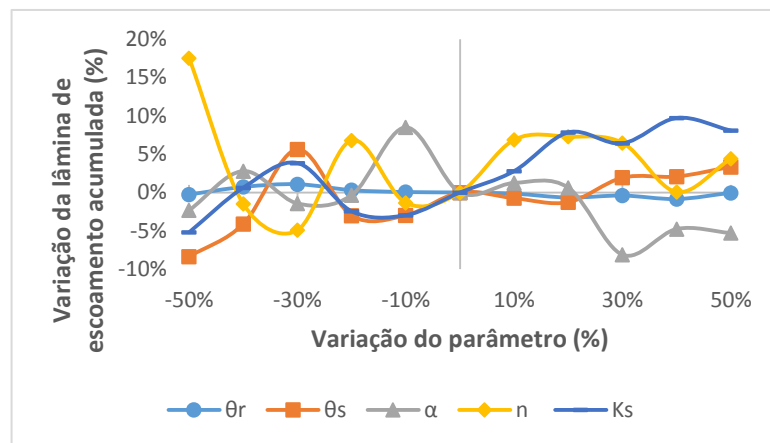


Figura 60 - Variação percentual da lâmina de escoamento acumulada da camada 2

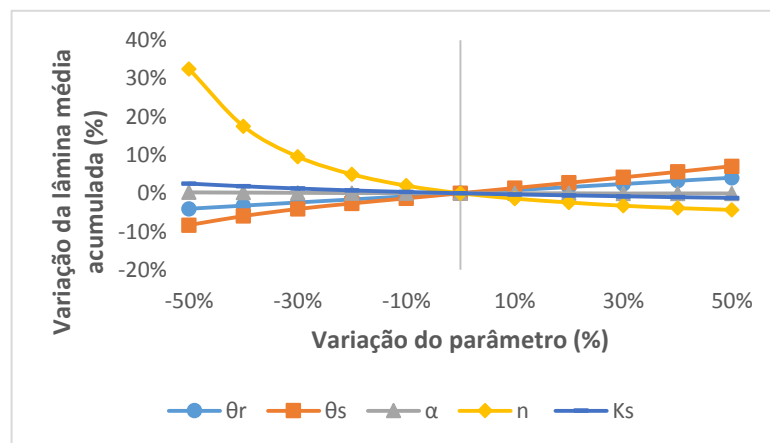


Figura 61 - Variação percentual da lâmina média armazenada da camada 2

Dessa maneira, segundo metodologia, proposta por McCuen e Snyder (1986), com a variação relativa aos valores dos parâmetros e dos resultados, metodologia específica para caracterização da sensibilidade, o parâmetro que obteve sensibilidade intermediária foi o parâmetro de forma (n), consoante trabalho realizado por Chaves (2009) e por Beyene *et al.*

(2017); o parâmetro inverso do comprimento capilar (α), que também obteve sensibilidade intermediária, segundo Tabelas abaixo e conforme conclusões obtidas por Chaves (2009), no qual comparou a sensibilidade do modelo Hydrus em solos de diferentes texturas.

Alta sensibilidade	
Intermediária sensibilidade	
Baixa sensibilidade	

Legenda

Tabela 14 - Sensibilidade relativa dos parâmetros para a lâmina de infiltração acumulada da camada 2

Lâmina de infiltração acumulada	θ_r (cm ³ /cm ³)	θ_s (cm ³ /cm ³)	α (1/cm)	n	Ks (cm/dia)
Ref - 50%	0,0004	0,0212	0,0061	0,0497	0,016
Ref - 40%	0,0024	0,0120	0,0129	0,0070	0,001
Ref - 30%	0,0057	0,0292	0,0068	0,0277	0,019
Ref - 20%	0,0030	0,0179	0,0010	0,0464	0,016
Ref - 10%	0,0043	0,0352	0,1250	0,0193	0,040
Referência					
Ref + 10%	0,0029	0,0080	0,0168	0,1004	0,043
Ref + 20%	0,0024	0,0099	0,0060	0,0526	0,058
Ref + 30%	0,0005	0,0087	0,0402	0,0323	0,033
Ref + 40%	0,0022	0,0080	0,0183	0,0022	0,035
Ref + 50%	0,0010	0,0091	0,0154	0,0136	0,024

Tabela 15 - Sensibilidade relativa dos parâmetros para a lâmina de escoamento acumulada da camada 2

Lâmina de escoamento acumulado	θ_r (cm ³ /cm ³)	θ_s (cm ³ /cm ³)	α (1/cm)	n	Ks (cm/dia)
Ref - 50%	0,0054	0,1677	0,0467	0,3510	0,104
Ref - 40%	0,0181	0,1028	0,0698	0,0373	0,016
Ref - 30%	0,0359	0,1877	0,0479	0,1643	0,128
Ref - 20%	0,0149	0,1506	0,0174	0,3407	0,123
Ref - 10%	0,0052	0,2982	0,8505	0,1360	0,297
Referência					
Ref + 10%	0,0161	0,0748	0,1248	0,6878	0,280
Ref + 20%	0,0332	0,0636	0,0309	0,3643	0,393
Ref + 30%	0,0135	0,0643	0,2712	0,2158	0,214
Ref + 40%	0,0215	0,0520	0,1193	0,0014	0,243
Ref + 50%	0,0008	0,0669	0,1059	0,0882	0,162

Tabela 16 - Sensibilidade relativa dos parâmetros para a lâmina média armazenada da camada 2

Lâmina média armazenada	θ_r (cm ³ /cm ³)	θ_s (cm ³ /cm ³)	α (1/cm)	n	Ks (cm/dia)
Ref - 50%	0,0809	0,1662	0,0049	0,6494	0,050
Ref - 40%	0,0809	0,1491	0,0044	0,4380	0,046
Ref - 30%	0,0804	0,1371	0,0041	0,3187	0,041
Ref - 20%	0,0805	0,1327	0,0019	0,2474	0,037
Ref - 10%	0,0807	0,1334	0,0049	0,1989	0,034
Referência					
Ref + 10%	0,0803	0,1367	0,0015	0,1400	0,031
Ref + 20%	0,0808	0,1369	0,0001	0,1207	0,027
Ref + 30%	0,0808	0,1386	0,0021	0,1088	0,027
Ref + 40%	0,0810	0,1400	0,0010	0,0968	0,026
Ref + 50%	0,0812	0,1413	0,0009	0,0870	0,024

4.4.1.2.1 Parâmetro inverso do comprimento capilar - α

Com relação ao parâmetro inverso do comprimento capilar, os resultados, conforme o gráfico da Figura 62 mostraram que apenas a lâmina de escoamento acumulada apresentou sensibilidade a análise, com o máximo valor anual sendo 726,95 centímetros acumulados para o valor de referência – 10% e o valor mínimo de 615,46 centímetros de escoamento acumulado no ano, para o valor de referência + 30%, apresentando assim uma amplitude de 111,49 cm. Os resultados dos gráficos das Figuras 63 e 64, praticamente não variaram.

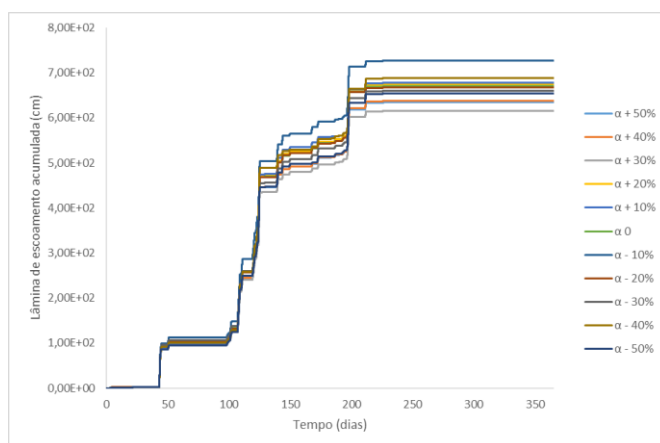


Figura 62 - Variação da lâmina de escoamento acumulada (cm) em função da variação do parâmetro α da camada 2

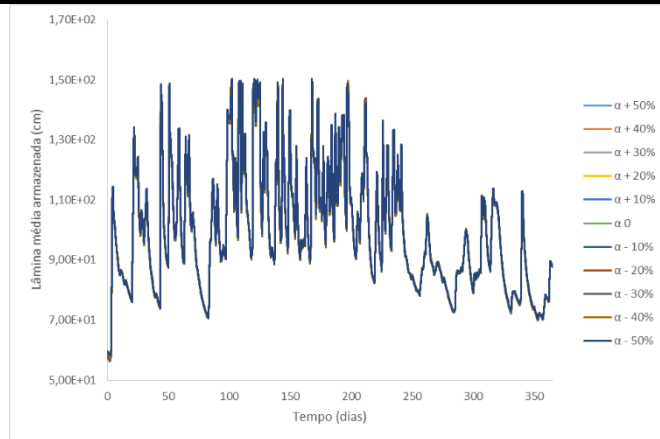


Figura 63 - Variação da lâmina média armazenada (cm) em função da variação do parâmetro α da camada 2

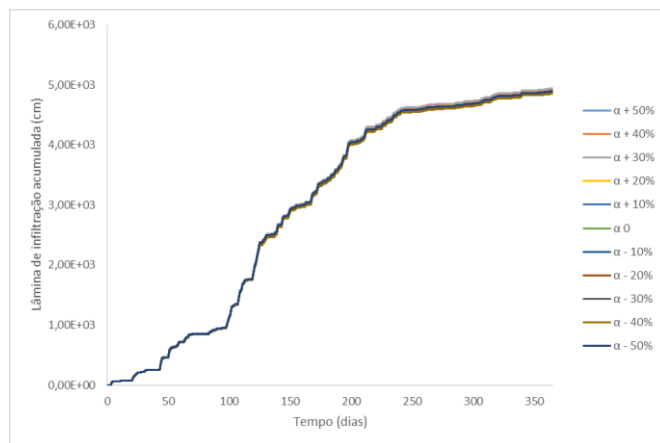


Figura 64 - Variação da lâmina de infiltração acumulada (cm) em função da variação do parâmetro α da camada 2

4.4.1.2.2 Condutividade hidráulica saturada do solo - K_s

O coeficiente de infiltração, quando sujeito a sensibilidade do sistema, obteve discretização para a lâmina de escoamento acumulada, a partir do 120º dia, período este, representado pelo início do período de chuvas da região, variando de 635,08 centímetros com uma redução de 50% do valor da taxa de infiltração para 724,12 centímetros aproximadamente, quando acrescentou 50% ao valor da condutividade hidráulica saturada do solo da segunda camada, segundo gráfico da Figura 65. Os outros parâmetros dos gráficos das Figuras 66 e 67, praticamente não variaram.

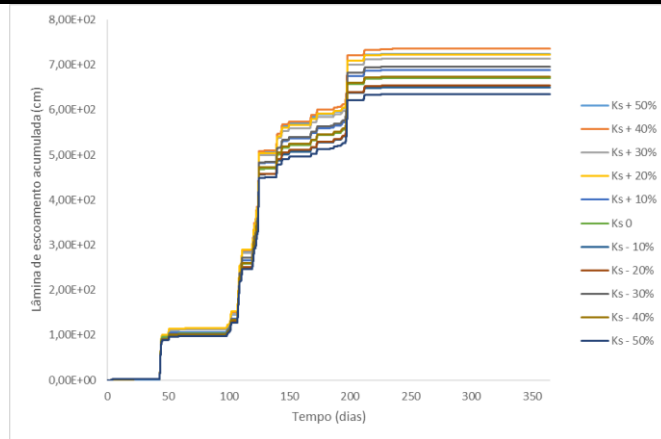


Figura 65 - Variação da lâmina de escoamento acumulada (cm) em função da variação do parâmetro K_s da camada 2

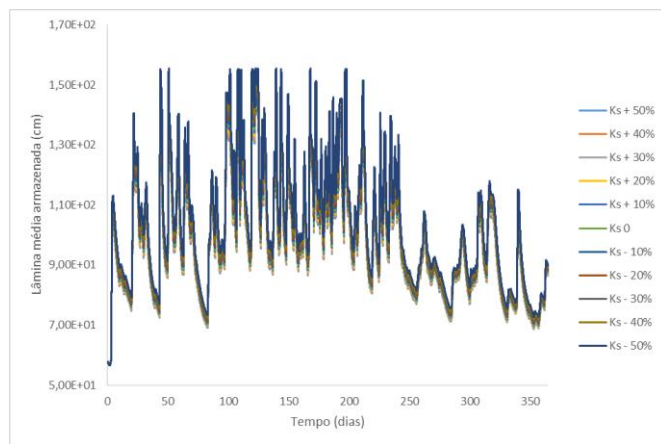


Figura 66 - Variação da lâmina média armazenada (cm) em função da variação do parâmetro K_s da camada 2

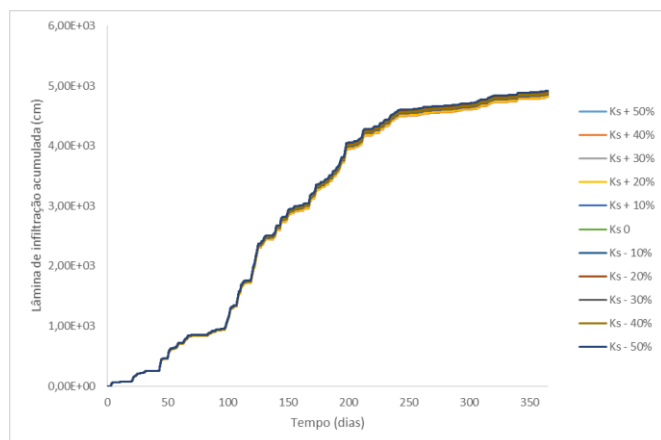


Figura 67 - Variação da lâmina de infiltração acumulada (cm) em função da variação do parâmetro K_s da camada 2

4.4.1.2.3 Parâmetro de forma - N

Com a variação do parâmetro de forma para a sensibilidade, verificou-se que a análise foi sensível aos resultados da lâmina de escoamento acumulada e a lâmina média armazenada, conforme gráficos das Figuras 68, 69 e 70. O primeiro resultado apresentou uma maior lâmina escoada com valor anual de 787,85 centímetros, quando suprimiu 50% do seu valor de referência, com uma amplitude de 126,69 cm entre o maior e o menor resultado. Com relação a lâmina média, foi obtido maiores valores, quando suprimido em 50% o valor de referência do parâmetro e obtidos resultados menores quando se acrescentou 50% do seu valor original, variando de maneira inversamente proporcional, com uma amplitude de 12,20 cm entre os valores dos seus resultados.

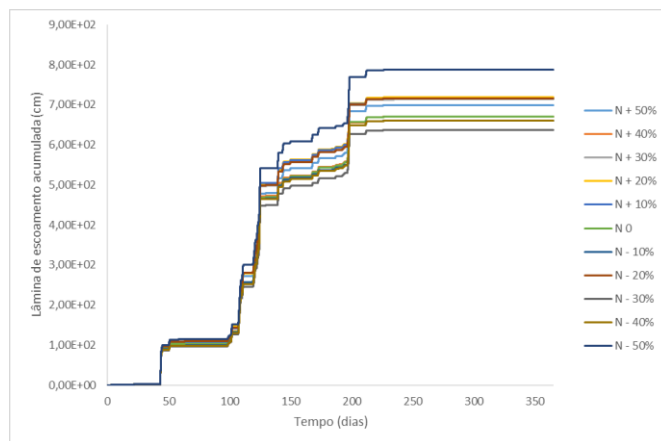


Figura 68 - Variação da lâmina de escoamento acumulada (cm) em função da variação do parâmetro N da camada 2

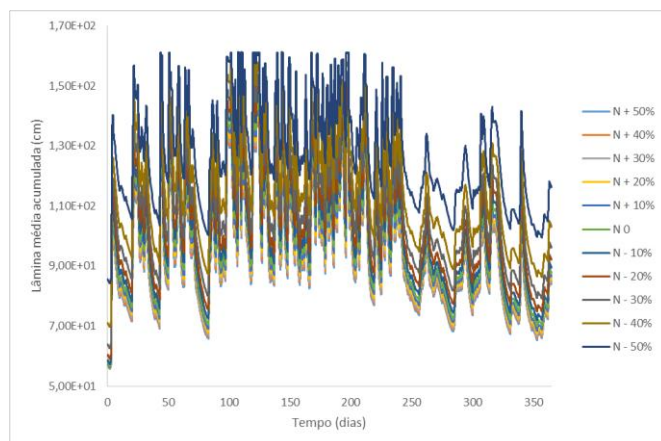


Figura 69 - Variação da lâmina média armazenada (cm) em função da variação do parâmetro N da camada 2

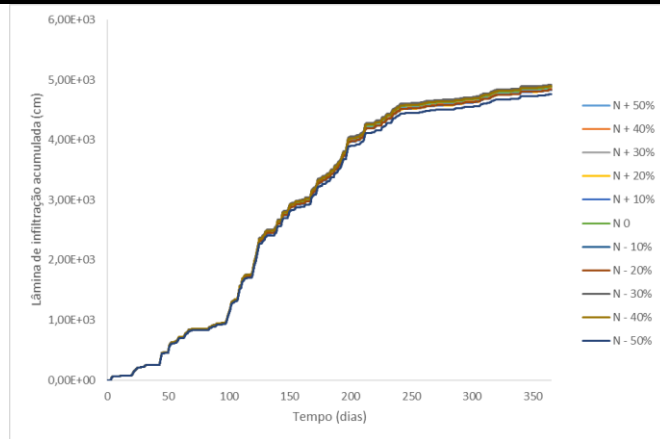


Figura 70 - Variação da lâmina de infiltração acumulada (cm) em função da variação do parâmetro N da camada 2

4.4.1.2.4 Umidade volumétrica residual - Θ_r

Os resultados referentes a variação da umidade volumétrica residual apresentaram pouca sensibilidade à análise, de modo que estão representados nos gráficos das Figuras 71, 72 e 73, nos quais as curvas dos pontos obtidos estão praticamente sobrepostas.

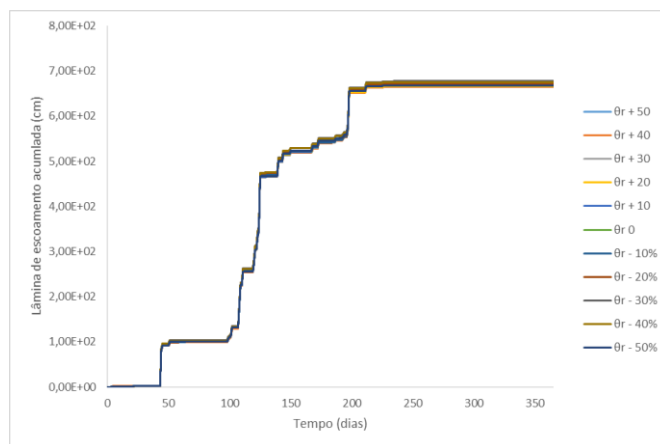


Figura 71 - Variação da lâmina de escoamento acumulada (cm) em função da variação do parâmetro Θ_r da camada 2

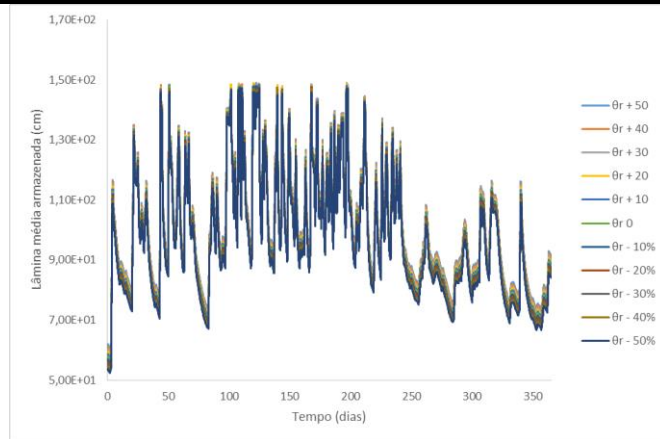


Figura 72 - Variação da lâmina média armazenada (cm) em função da variação do parâmetro Θ_r da camada 2

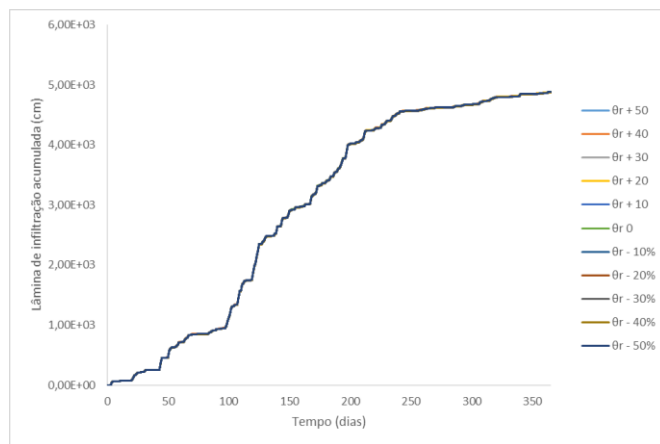


Figura 73 - Variação da lâmina de infiltração acumulada (cm) em função da variação do parâmetro Θ_r da camada 2

4.4.1.2.5 Umidade volumétrica saturada - Θ_s

Os resultados dos gráficos das Figuras 74, 75 e 76, mostram a análise de sensibilidade quanto a variação da umidade volumétrica saturada do solo da segunda camada. Neles, é possível observar que a lâmina de escoamento acumulada obteve uma amplitude de 93,9 centímetros entre a supressão de 10% do valor de referência e a supressão de 30% do valor referência, sendo os maiores e menores valores obtidos. Quanto a lâmina média armazenada, o gráfico variou diretamente a variação do parâmetro, sendo assim, os gráficos se encontram deslocados entre si, com os maiores valores representando o maior acréscimo, de 50% ao valor original e os menores valores com a maior supressão de 50% do valor original do parâmetro da camada 2, resultando em uma amplitude entre eles de 13,50 cm.

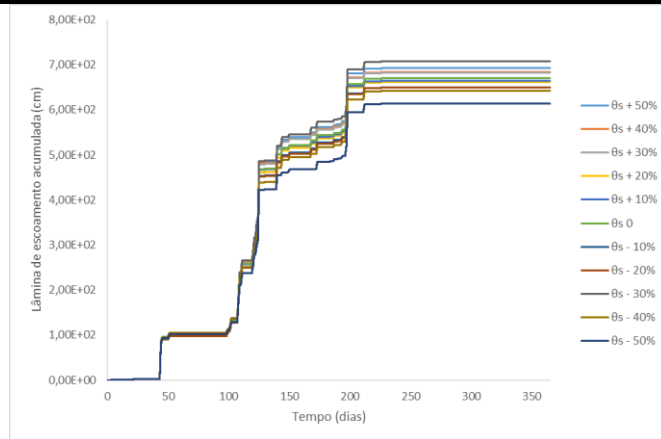


Figura 74 - Variação da lâmina de escoamento acumulada (cm) em função da variação do parâmetro Θ_s da camada 2

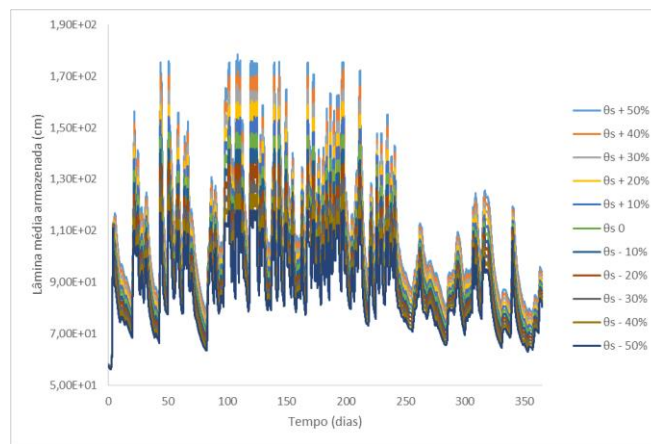


Figura 75 - Variação da lâmina média armazenada (cm) em função da variação do parâmetro Θ_s da camada 2

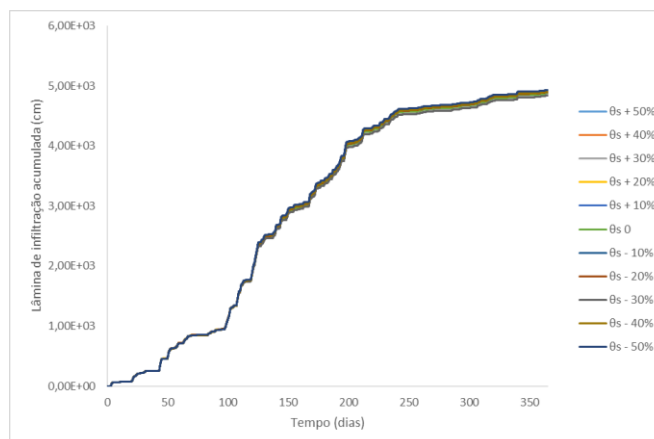


Figura 76 - Variação da lâmina de infiltração acumulada (cm) em função da variação do parâmetro Θ_s da camada 2

4.4.1.3 Camada 3

Após a análise de sensibilidade de maneira percentual e baseada nos resultados obtidos, foi verificado, que os parâmetros de forma (n), a umidade volumétrica saturada (Θ_s) e a condutividade hidráulica saturada do solo (K_s), referentes a camada 3, foram os que obtiveram sensibilidade, conforme as tabelas 17, 18 e 19 e considerando a variação dos parâmetros originais e modificados conforme metodologia de Mccuen e Snyder (1986). Nas figuras 77, 78 e 79 são apresentados a sensibilidade percentual, levando em consideração apenas os valores dos resultados.

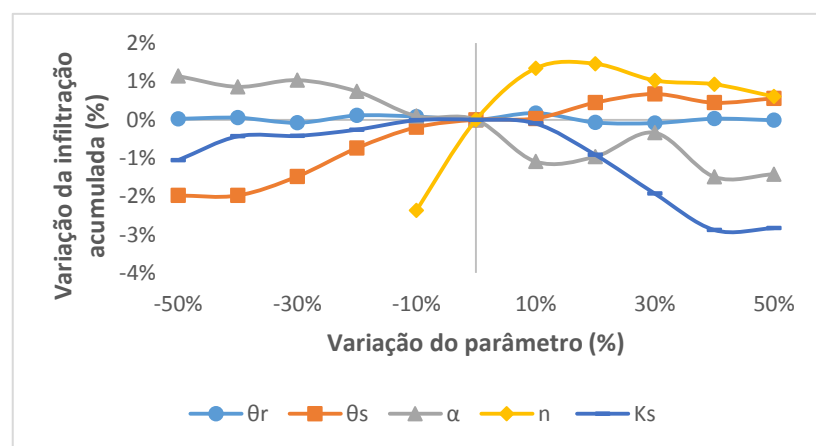


Figura 77 - Variação percentual da infiltração acumulada da camada 3

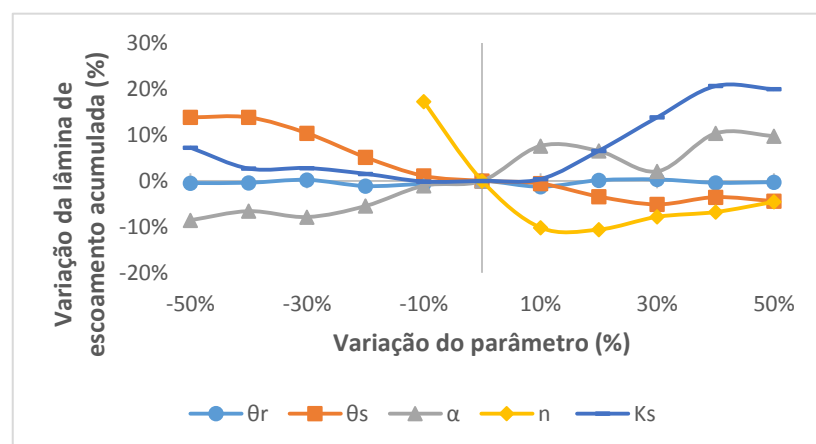


Figura 78 - Variação percentual da lâmina de escoamento acumulada da camada 3

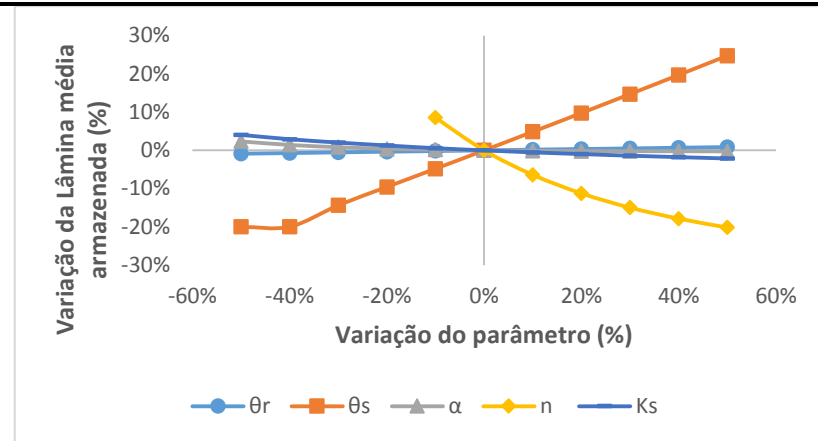


Figura 79 - Variação percentual da lâmina média armazenada da camada 3

Alta sensibilidade	
Intermediária sensibilidade	
Baixa sensibilidade	

Legenda

Tabela 17 - Sensibilidade relativa dos parâmetros para a lâmina de infiltração acumulada da camada 3

Lâmina de infiltração acumulada	θ_r (cm ³ /cm ³)	θ_s (cm ³ /cm ³)	α (1/cm)	n	Ks (cm/dia)
Ref - 50%	0,0005	0,0396	0,0228		0,021
Ref - 40%	0,0013	0,0494	0,0215		0,011
Ref - 30%	0,0026	0,0494	0,0345		0,014
Ref - 20%	0,0055	0,0370	0,0370		0,013
Ref - 10%	0,0084	0,0197	0,0094	0,2371	0,001
Referência					
Ref + 10%	0,0174	0,0035	0,1092	0,1344	0,010
Ref + 20%	0,0035	0,0223	0,0483	0,0732	0,046
Ref + 30%	0,0029	0,0224	0,0113	0,0342	0,064
Ref + 40%	0,0007	0,0111	0,0373	0,0232	0,072
Ref + 50%	0,0002	0,0112	0,0284	0,0121	0,057

Tabela 18 - Sensibilidade relativa dos parâmetros para a lâmina de escoamento acumulada da camada 3

Lâmina de escoamento acumulada	θ_r (cm ³ /cm ³)	θ_s (cm ³ /cm ³)	α (1/cm)	n	Ks (cm/dia)
Ref - 50%	0,0097	0,2763	0,1715		0,145
Ref - 40%	0,0103	0,3453	0,1652		0,067
Ref - 30%	0,0071	0,3452	0,2625		0,093
Ref - 20%	0,0564	0,2572	0,2746		0,077
Ref - 10%	0,0636	0,1076	0,1069	1,7262	0,015
Referência					
Ref + 10%	0,1267	0,0582	0,7597	1,0174	0,037
Ref + 20%	0,0062	0,1711	0,3246	0,5305	0,327
Ref + 30%	0,0099	0,1709	0,0685	0,2612	0,461
Ref + 40%	0,0104	0,0888	0,2583	0,1697	0,516
Ref + 50%	0,0056	0,0885	0,1950	0,0914	0,399

Tabela 19 - Sensibilidade relativa dos parâmetros para a lâmina média armazenada da camada 3

Lâmina média armazenada	θ_r (cm³/cm³)	θ_s (cm³/cm³)	α (1/cm)	n	Ks (cm/dia)
Ref - 50%	0,0174	0,3991	0,0470		0,081
Ref - 40%	0,0176	0,4988	0,0354		0,073
Ref - 30%	0,0173	0,4787	0,0277		0,068
Ref - 20%	0,0176	0,4778	0,0202		0,064
Ref - 10%	0,0171	0,4798	0,0176	0,8544	0,058
Referência					
Ref + 10%	0,0184	0,4851	0,0101	0,6383	0,052
Ref + 20%	0,0173	0,4878	0,0090	0,5617	0,049
Ref + 30%	0,0168	0,4901	0,0070	0,4985	0,046
Ref + 40%	0,0172	0,4924	0,0058	0,4458	0,044
Ref + 50%	0,0173	0,4945	0,0053	0,4031	0,042

4.4.1.3.1 Parâmetro inverso do comprimento capilar - α

A variação do parâmetro inverso do comprimento capilar da terceira camada, segundo gráficos das Figuras 80, 81 e 82, apresentou variação apenas no gráfico relativo a lâmina de escoamento acumulada, variando de maneira diretamente proporcional entre o valor de referência – 50%, com valor de 612,53 cm e o valor de referência + 50%, com valor de 735,29 cm, resultando em uma amplitude de 122,76 centímetros de diferença entre o maior e o menor valor.

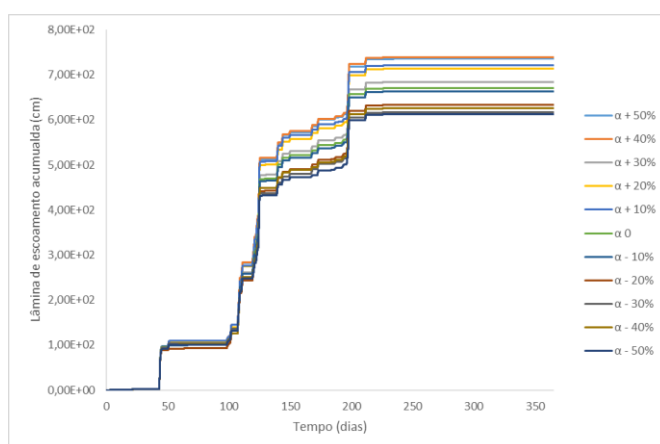


Figura 80- Variação da lâmina de escoamento acumulada (cm) em função da variação do parâmetro α da camada 3

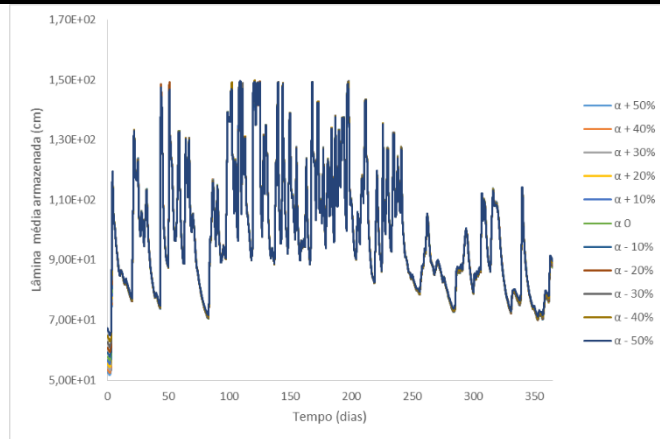


Figura 81 - Variação da lâmina média armazenada (cm) em função da variação do parâmetro α da camada 3

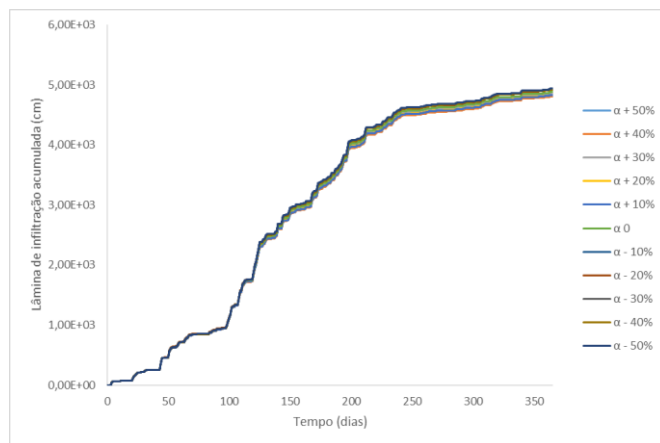


Figura 82 - Variação da lâmina de infiltração acumulada (cm) em função da variação do parâmetro α da camada 3

4.4.1.3.2 Condutividade hidráulica saturada do solo - K_s

Com relação a taxa de infiltração do solo da terceira camada, apenas no gráfico referente a lâmina de escoamento acumulada, segundo gráfico da Figura 83, houve variação considerável em relação a sensibilidade da variação dos parâmetros. Dessa maneira, quando o parâmetro foi acrescido de 40% do seu valor de referência, o resultado acumulado final de escoamento foi de 808,19 centímetros. Na supressão de 50% do valor do parâmetro, o resultado acumulado final foi de 718,43 centímetros, apresentando uma amplitude de 89,76 centímetros. Com relação aos gráficos das Figuras 84 e 85 não variaram com a análise do parâmetro.

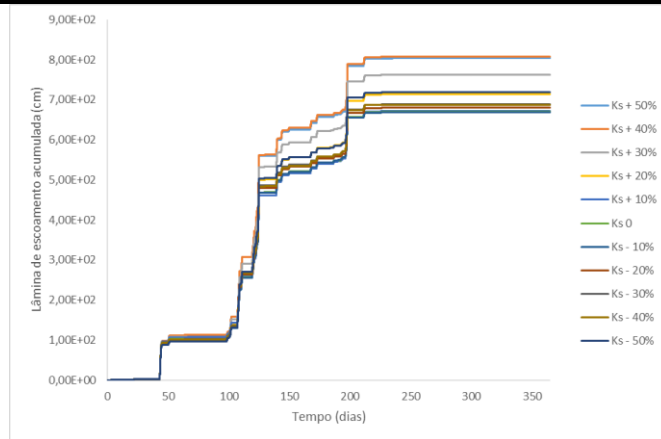


Figura 83 - Variação da lâmina de escoamento acumulada (cm) em função da variação do parâmetro K_s da camada 3

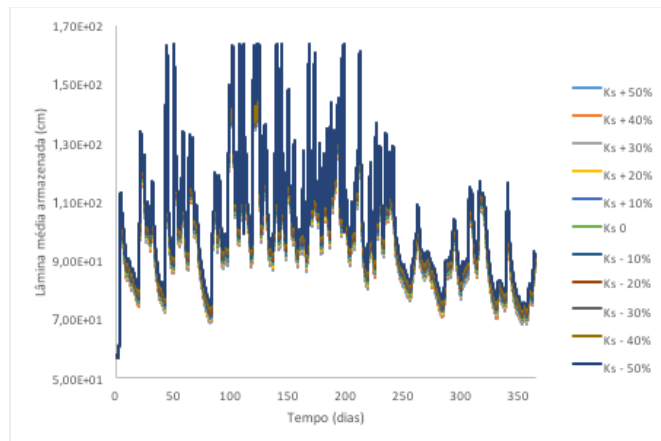


Figura 84 - Variação da lâmina média armazenada (cm) em função da variação do parâmetro K_s da camada 3

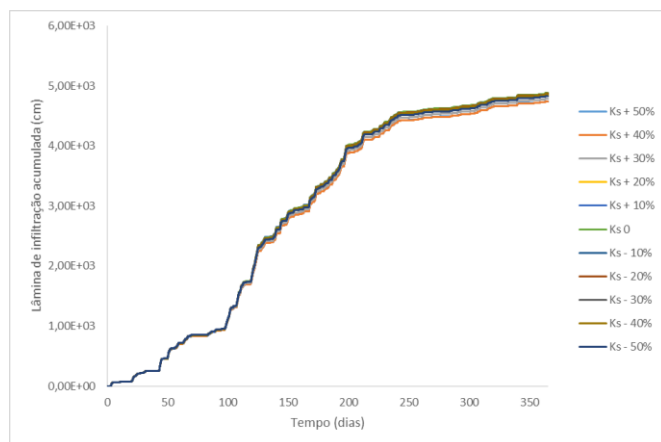


Figura 85 - Variação da lâmina de infiltração acumulada (cm) em função da variação do parâmetro K_s da camada 3

4.4.1.3.3 Parâmetro de forma - N

Com relação ao parâmetro de forma do solo da camada 3, observou-se sensibilidade à lâmina de escoamento anual acumulada, segundo Figura 86, a qual apresentou um valor de 669,97 centímetros acumulados para o valor de referência da camada do solo e um valor mínimo de 601,81 centímetros acumulados e escoados durante o ano, com uma amplitude entre eles de 68,16 centímetros. O gráfico da Figura 87 apresentou uma pequena variação em relação a lâmina média armazenada. A análise da lâmina de infiltração não apresentou variação (Figura 88).

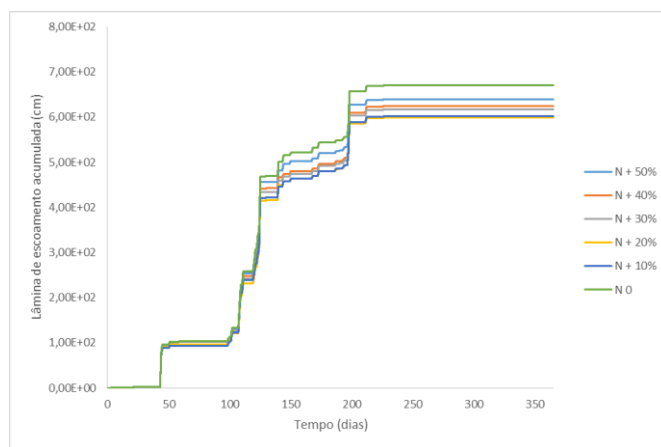


Figura 86 - Variação da lâmina de escoamento acumulada (cm) em função da variação do parâmetro K_s da camada 3

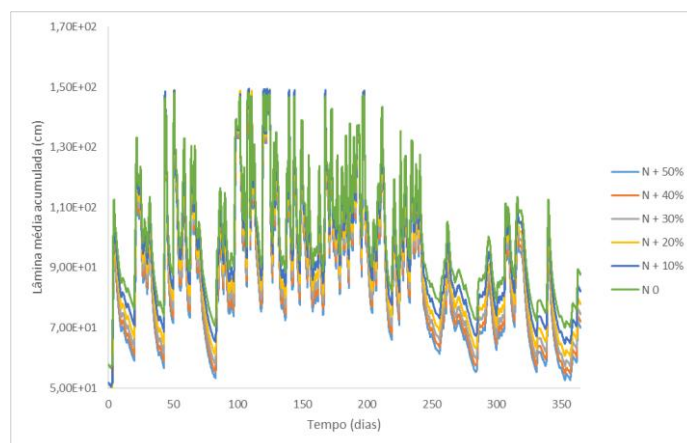


Figura 87 - Variação da lâmina média armazenada (cm) em função da variação do parâmetro N da camada 3

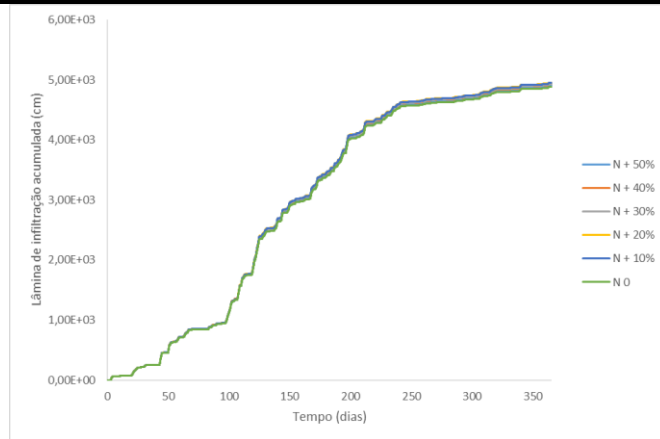


Figura 88 - Variação da lâmina de infiltração acumulada (cm) em função da variação do parâmetro N da camada 3

4.4.1.3.4 Umidade volumétrica residual - Θ_r

Com relação a umidade volumétrica residual, o parâmetro não apresentou sensibilidade à variação, de modo que as curvas dos seus gráficos, ao ser submetido a variação, mantêm-se praticamente sobrepostas entre si, segundo os gráficos das Figuras 89, 90 e 91.

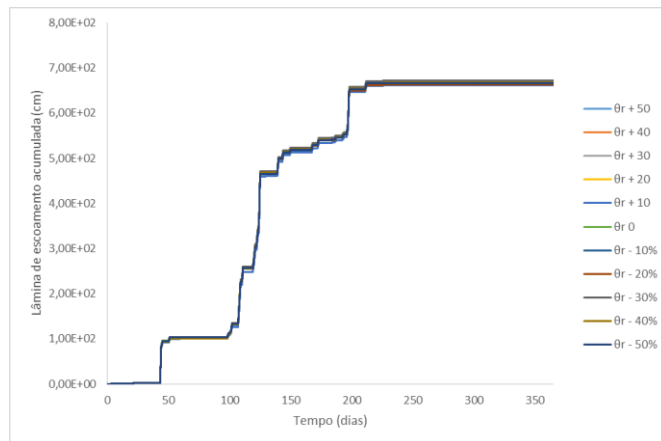


Figura 89 - Variação da lâmina de escoamento acumulada (cm) em função da variação do parâmetro Θ_r da camada 3

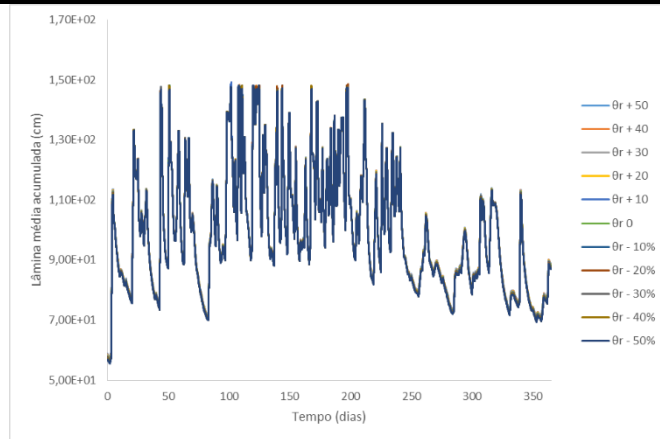


Figura 90 - Variação da lâmina média armazenada (cm) em função da variação do parâmetro Θ_r da camada 3

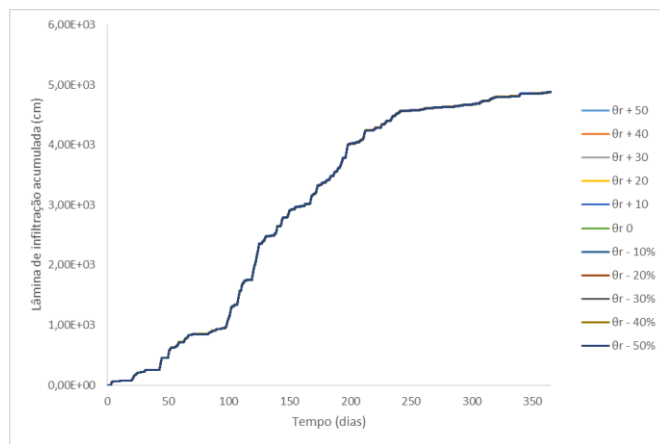


Figura 91 - Variação da lâmina de infiltração acumulada (cm) em função da variação do parâmetro Θ_r da camada 3

4.4.1.3.5 Umidade volumétrica saturada - Θ_s

Ao variar a umidade volumétrica saturada do solo da camada 3, observou-se que a lâmina de escoamento anual acumulada, na Figura 92, variou inversamente proporcional a variação do parâmetro, de modo que a maior supressão do parâmetro (50%) obteve maior valor de lâmina acumulada, com valor de 762,51 cm e para o valor de referência do parâmetro + 50%, obteve um valor de 640,34 cm, com amplitude de 122,17 cm entre eles. Já em relação a lâmina média armazenada, na Figura 93, o parâmetro se mostrou variar de maneira diretamente proporcional, uma vez que o maior resultado foi obtido pelo acréscimo de 50% ao valor original da umidade saturada do solo, com valor de 109,37 cm e o menor com valor de 70,20 cm, com amplitude entre eles de 39,17 cm, sendo plausível os resultados, uma vez que a água que não foi armazenada, foi escoada superficialmente pelo solo. O resultado da Figura 94, praticamente não variou com a análise de sensibilidade.

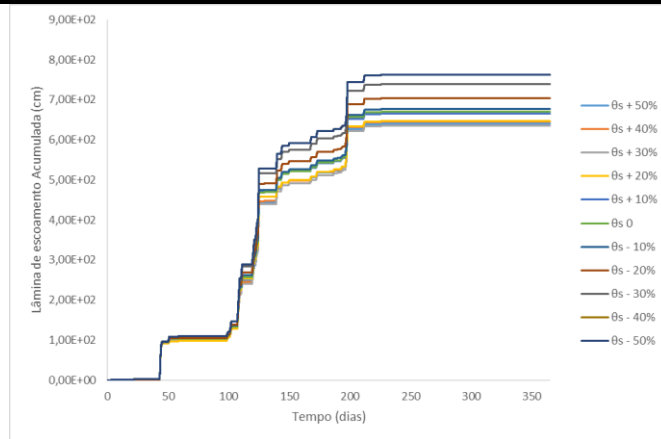


Figura 92 - Variação da lâmina de escoamento acumulada (cm) em função da variação do parâmetro Θ_s da camada 3

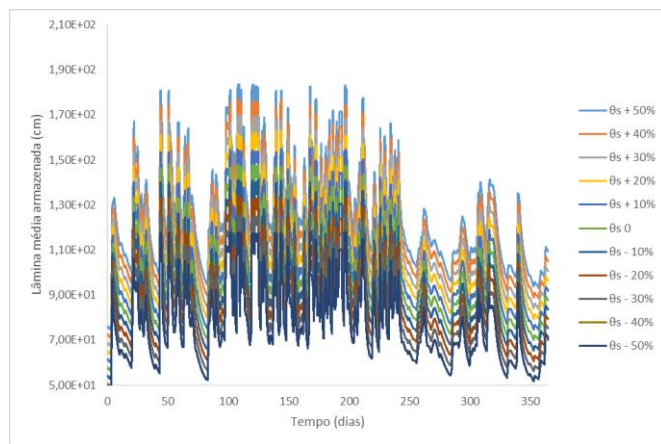


Figura 93 - Variação da lâmina média armazenada (cm) em função da variação do parâmetro Θ_s da camada 3

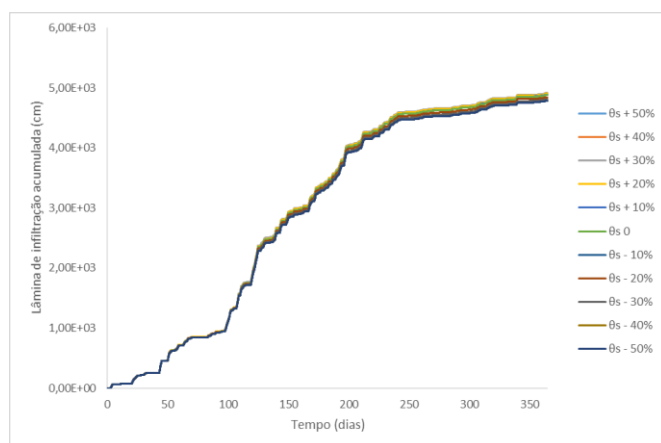


Figura 94 - Variação da lâmina de infiltração acumulada (cm) em função da variação do parâmetro Θ_s da camada 3

4.4.2 Análise da malha

A análise de sensibilidade da simulação foi realizada com uma malha de 200 nós. Para verificar a sensibilidade à malha, foi realizada também, uma análise com variação da malha com 100 nós e com 300 nós, resultando nos gráficos das Figuras 95, 96 e 97. Com isso, foi verificado que apenas o gráfico da lâmina de escoamento acumulada, conforme Figura 95, foi o que obteve variação, sendo o parâmetro sensível à malha. Observa-se, no gráfico, que o trecho ascendente é praticamente constante, com uma leve variação da malha de 300 nós a partir do 50º dia e aumentando a variação a partir do 120º dia. A variação entre a malha de 100 nós e a de 200 nós, praticamente não varia.

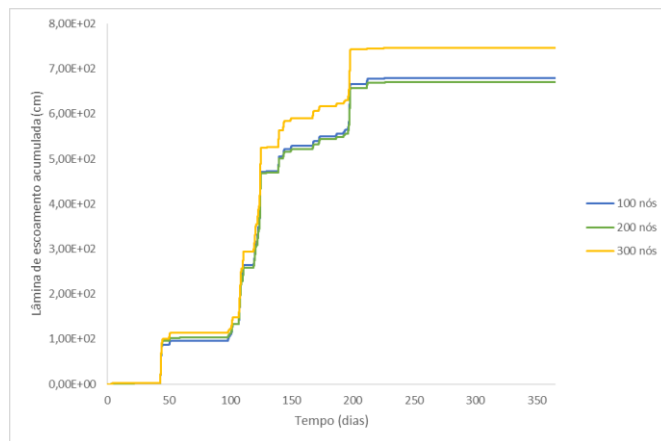


Figura 95 - Variação da lâmina de escoamento acumulada (cm) de acordo com a variação da quantidade de nós da malha

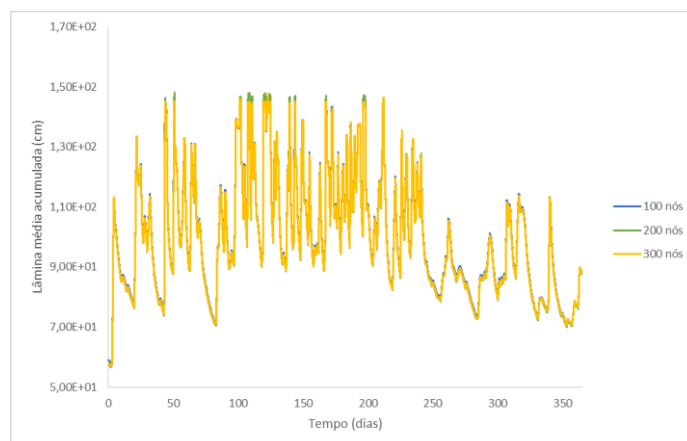


Figura 96 - Variação da lâmina média armazenada (cm) de acordo com a variação da quantidade de nós da malha

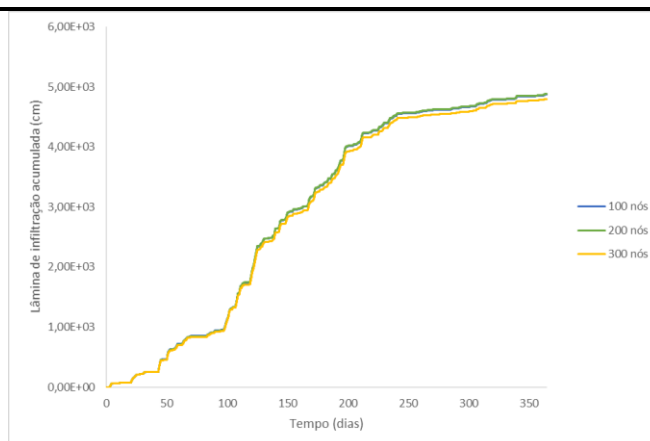


Figura 97 - Variação da lâmina de infiltração acumulada (cm) de acordo com a variação da quantidade de nós da malha

4.4.3 Análise numérica da trincheira

Assim, a simulação numérica foi realizada com uma malha de 200 nós, resultando nos gráficos das Figuras 98, 99 e 100. Ao final da modelagem a lâmina de escoamento acumulada foi de 669,7 centímetros. Outro resultado importante foi que a lâmina de infiltração acumulada resultou em 4879,7 centímetros de água acumulada no dispositivo.

O maior valor da lâmina média armazenada foi de 148 centímetros no dia 51 e a menor foi de 56,52 centímetros no segundo dia da simulação, assim, pelo máximo valor da lâmina média armazenada, percebe-se que pela simulação, não houve extravasamento da trincheira, mostrando que seu volume é suficiente para drenagem das águas pluviais.

Percebe-se que nos gráficos das Figuras 98 e 100, a inclinação da tangente da reta possui uma maior angulação entre os dias 100 e 220, uma vez que é o período de chuvas da região, resultando em uma contribuição significativa das águas pluviométricas ao modelo. É possível observar também que no gráfico da Figura 99, o volume médio armazenado é maior para o mesmo período entre os dias 100 e 220, uma vez que corresponde ao período de alta contribuição pluviométrica para a localidade do dispositivo.

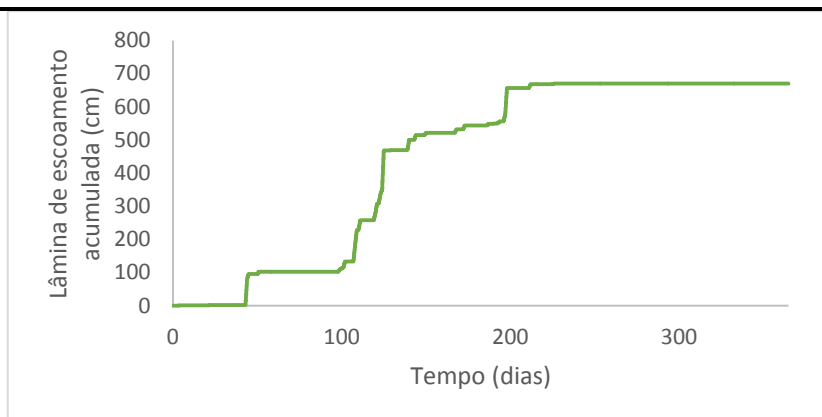


Figura 98 - Variação da lâmina de escoamento acumulada (cm) do dispositivo compensatório em função do tempo

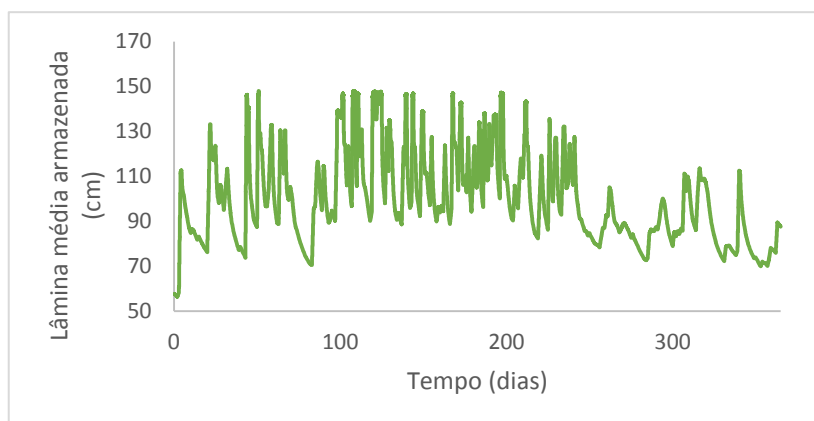


Figura 99 - Variação da lâmina média armazenada (cm) do dispositivo compensatório em função do tempo

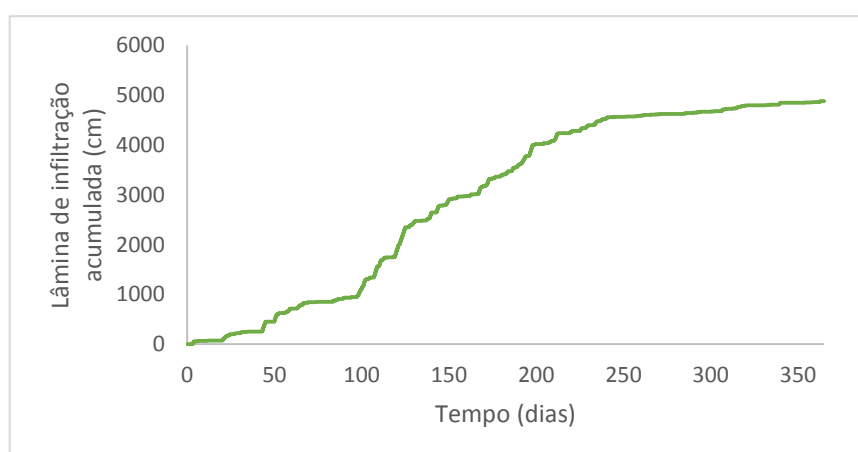


Figura 100 - Variação da lâmina de infiltração acumulada (cm) do dispositivo compensatório em função do tempo

Desse modo, a trincheira de infiltração apresenta dimensões suficientes para armazenar e infiltrar as águas provenientes das chuvas da bacia de contribuição da localidade.

4.4.4 Síntese final dos resultados

Assim, o perfil do solo do terreno, respaldados pelos ensaios granulométricos e pelos ensaios de sondagem à percussão, apresentou uma composição granulométrica variando desde um bolsão de argila, variando por brita, argila e areia, até uma camada principal composta predominantemente de Silte Arenoso, o qual resulta em uma taxa de infiltração superficial (Condutividade hidráulica do solo) adequada, segundo RAWLS *et al.* (1992), apresentando infiltração maior que 7,6 mm/hora (referente ao grupo A, mais favorável a infiltração do solo), nos três pontos que os ensaios foram realizados e caracterizado como um bom solo para implantação da técnica compensatória.

O monitoramento piezométrico-pluviométrico apresentou um desempenho satisfatório para os 3 eventos pluviométricos analisados, com relação ao funcionamento hidrodinâmico do dispositivo implantado, o qual apresentou variações dos níveis freáticos adjacentes, à medida que o nível da trincheira variava inversamente proporcional.

Na análise de sensibilidade realizada pelo software Hydrus, as camadas analisadas apresentaram sensibilidade, conforme metodologia proposta por McCuen e Snyder (1986), ao parâmetro de forma (n), consoante resultados obtidos por Chaves (2009) e por Beyene *et al.* (2017); a condutividade hidráulica saturada do solo (K_s), segundo conclusões obtidas por Coutinho (2011) e por Beyene *et al.* (2017); e ao parâmetro inverso do comprimento capilar (α), conforme desfecho apresentado por Chaves (2009).

Do mesmo modo, na análise de sensibilidade da malha numérica do programa, houve a sensibilidade da malha apenas aos resultados referentes a lâmina de escoamento acumulada, com os outros resultados praticamente não variando com a alteração da malha.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Durante o período de monitoramento da trincheira de infiltração, foi verificado que a capacidade de infiltração se apresentou bastante eficiente, conforme ensaios realizados em campo pela metodologia Beerkan e de granulometria, uma vez que os níveis dos lençóis freáticos adjacentes eram recarregados rapidamente, em resposta às elevadas precipitações que ocorrem na cidade do Recife, mais especificamente na região do local, a qual foi instalada.

Embora se tenha observado acúmulo de lâmina de água em alguns eventos extraordinários, fato maximizado pela grande área de contribuição e relacionados a uma obra que estava sendo realizada no local, o dispositivo apresentou suficiente resiliência para drenar as águas provenientes de eventos sucessivos de precipitação.

Na simulação numérica utilizando o Hydrus – 1D, foi possível obter cenários referentes ao escoamento superficial, a infiltração e ao volume armazenado, aliado a uma análise de sensibilidade do modelo referente aos parâmetros dos solos utilizados na composição das 3 camadas da técnica compensatória implantada.

Assim, com a análise de sensibilidade dos parâmetros para o programa de 1 dimensão, foi constatada a sensibilidade ao parâmetro de forma (n) e a condutividade hidráulica saturada do solo (k_s) na 1ª camada da trincheira; ao parâmetro de forma (n), ao parâmetro inverso do comprimento capilar (α), e a condutividade hidráulica saturada do solo (k_s) referente a 2ª camada da trincheira; e ao parâmetro de forma (n), ao parâmetro inverso do comprimento capilar (α), e a condutividade hidráulica saturada do solo (k_s) relativo a 3ª camada do dispositivo.

Na análise de sensibilidade relativa a variação da malha (quantidade de nós), obteve-se como resultado uma sensibilidade do modelo apenas a lâmina de escoamento acumulada. Ademais, existe a expectativa de que os resultados obtidos sejam mais satisfatórios, caso seja utilizado o software com duas ou três dimensões.

Com a simulação numérica, conclui-se que o dispositivo apresenta adequado comportamento, apresentando características para infiltrar e armazenar as águas pluviométricas de maneira suficiente com lâmina média armazenada não excedendo a camada de material granular (brita), tampouco o nível do terreno, não ocorrendo assim extravasamento.

Além disso, a avaliação da trincheira mostrou a grande dificuldade em implantar sistemas compensatórios em bacias urbanas com áreas de planície e com alta intensidade de chuvas.

Dessa maneira, verifica-se a grande importância econômica, social e ambiental das técnicas compensatórias em relação aos sistemas convencionais de drenagem. Assim, há a expectativa de que com a realização desse trabalho, como sequência da linha de pesquisa já iniciada e implantada pelo Laboratório de Recursos Hídricos e de Física do Solos da UFPE, haja o incremento necessário dessas técnicas em planos diretores urbanos e em sistemas de rede de drenagem, a fim de poder economizar verbas públicas e, ainda, contribuir para a sustentabilidade do meio ambiente.

REFERÊNCIAS

Agência Pernambucana de Águas e Clima (APAC).

AKAN, A. O. Sizing Stormwater Infiltration Structures. *Journal of Hydraulic Engineering*, v. 128, n. 5, p. 534-537, 2002.

ALMEIDA, M. de F. Aplicação de técnicas compensatórias na drenagem urbana, sob a ótica dos usuários do espaço: estudo de caso em São Carlos – SP. Dissertação (Mestrado). Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2014.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 6484: Solo - Sondagens de simples reconhecimento com SPT - Método de ensaio, 2001.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 7181: Solo – Análise Granulométrica, 2016.

ALVES, E. M.; NETTO, A. M.; ANTONINO, A. C. D.; LIMA, J. R. S.; SOUZA, E. S.; MONTENEGRO, S. M. G. L.; CABRAL, J. J. S. P.; GONDIM, M. V. S. Simulação de dinâmica da água em solo cultivado com feijão caupi no brejo Paraibano. *RBRH – Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, vol. 17, n. 3 – Jul/Set 2012, 175-186.

BAPTISTA, M. B; NASCIMENTO N. O; BARRAUD S. Técnicas Compensatórias em Drenagem Urbana. Porto Alegre: ABRH, 206 p, 2011.

BERTONI, J. C.; CATALINI, C. G. (2007) Representation of infiltration and exfiltration processes in two types of infiltration drainage devices using the SWMM model. *Novatech*, p.1007–1014. 2007.

BEYENE, A.; FRANKL, A.; VERHOEST, N.E.C.; TILAHUN, S.; ALAMIREW, T.; ADGO, E.; NYSSSEN, J. Modelling the water balance of irrigated fields in tropical floodplain soils using Hydrus-1D. *Geophysical Research Abstracts*, Vol. 19, EGU2017-6193-1, 2017, Gent, Belgium.

BOUWER, H. Artificial Recharge of Groundwater: hydrogeology and engineering. *Hydrogeology Journal*, v. 10, n. 1, p. 121-142, 2002.

BRAUD, I.; DE CONDAPPA, D.; SORIA, J. M. U.; HAVERKAMP, R.; JARAMILLO, A. R.; GALLE, S.; VAUCLIN, M. Use of scaled forms of the infiltration equation for the estimation of unsaturated soil hydraulic properties (the Beerkan method). *European Journal of Soil Science*, v.56, p.361-374, 2005.

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

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

CABRAL, J.J.S.P.; ALENCAR, A.V. (2005). Recife e a convivência com as águas, in “Gestão do Território e Manejo Integrado das ÁGUAS urbanas”, Ministério das Cidades. Brasília – DF.

CANHOLI, A.P. (2005). *Drenagem Urbana e controle de enchentes*. Editora Oficina de Textos, 302 pag.

CAPUTO, H. P. *Mecânica dos solos e suas aplicações - Fundamentos*. Rio de Janeiro, Editora LTC, 234 p, 1996

CHAVES, H. M. L. Sensibilidade do modelo Hydrus aos parâmetros hidráulicos do solo em diferentes texturas. *RBRH - Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, v. 14, n. 2, p. 33 – 37, 2009.

COUTINHO, A. P. Pavimento permeável como técnica compensatória na drenagem urbana da cidade do Recife. *Dissertação (Mestrado)*. Recife, 2011.

COUTINHO, A. P.; LASSABATERE, L.; MONTENEGRO, S. M. G. L.; ANTONINO, A. C. D.; JARAMILLO, R. A.; CABRAL, J. J. S. P. Hydraulic characterization and hydrological behaviour of a pilot permeable pavement in an urban centre, Brazil. *Hydrological process*, 30, 4242 – 4254, Sep/2016.

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

ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY – EPA. (1991) Storm water technology fact sheet infiltration trench. Southeastern Wisconsin Regional Planning Commission, p. 1–7, 1991.

FEITOSA, F. A. C.; FILHO, J. M. Hidrogeologia – Conceitos e Aplicações. Fortaleza; CPRM/REFO, LABHID-UFPE, 391 p, 2000.

FELTRIN, R. M.; PAIVA, J. B. D. DE; PAIVA, E. M. C. D. DE. (2013) Dinâmica da água no solo simulada pelo modelo hydrus-1d e medida a campo para as condições climáticas do sul do Brasil;

GRACIOSA, M. C. P. (2005) Trincheira de infiltração como tecnologia alternativa em drenagem urbana: modelagem experimental e numérica. Dissertação (Mestrado). Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos. 282p. 2005.

GRACIOSA, M. C. P.; MENDIONDO, E. M.; CHAUDHRY, F. H., (2008) Metodologia para o Dimensionamento de Trincheiras de Infiltração para o Controle do Escoamento Superficial na Origem. Revista Brasileira de Recursos Hídricos, v 13, n.2, Abr/Jun 2008, 207-214

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

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

HAVERKAMP, R.; PARLANGE, J.Y.; CUENCA, R.; ROSS, P.J. (1998). Scaling of the Richards equation and its application to watershed modeling. In: Sposito, G(Ed). Scale dependence and scale invariance in hydrology. Cambridge: Cambridge University Press, 1998. p. 190-223.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA – IBGE.

IMBE, M.; OKUI, H.; HASHIMOTO, C.; MUSIAKE, K. (2002) Monitoring and analysis of implemented infiltration system over past 20 years. Global Solutions for Urban Drainage. p.1–13, 2002.

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

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

LIMA, V. C. G. R. (2009) Análise experimental e numérica de trincheiras de infiltração em meio não saturado. Dissertação (Mestrado). Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos. 177p. 2009.

LUCAS, A. H.; BARBASSA, A. P.; MORUZZ, R. B. (2013). Modelagem de um Sistema Filtro-Vala-Trincheira de Infiltração pelo Método de PULS Adaptado para Calibração de Parâmetros. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, v 18, n.2, Abr/Jun 2013, 225-236.

LUCAS, A. H.; GUTIERREZ, L. A. R.; RHÖM S. A.; LOLLO, J. A. (2010) Proposta para Seleção de Áreas Potenciais para Implantação de Trincheiras de Infiltração: Estudo de Caso - Campus da UFSCar, São Carlos — SP. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, v 15, n.4, Out/Dez 2010, p. 135-141

MAPLU. Manejo de águas pluviais urbanas. Coordenador: Antonio Marozzi Righetto, Rio de Janeiro: ABES, 2009 .396 p, Projeto PROSAB.

MCCUEN, R.R. & SNYDER, W.M. 1986. *Hydrologic modeling: Statistical methods and applications*. Prentice-Hall, NY, 600 p.

MELO, T. DOS A. T. de. Jardim de chuva: sistema de biorretenção como técnica compensatória no manejo de águas pluviais urbanas. Dissertação (Mestrado). Centro de tecnologia e geociência, Universidade Federal de Pernambuco, Recife: 2011.

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 de águas pluviais urbanas. *Ambiente Construído*, Porto Alegre, v. 14, n. 4, p. 147-165, out./dez. 2014.

MELO, T. DOS A. T. de. Avaliação hidrodinâmica de trincheira de infiltração no manejo das águas pluviais urbanas. Tese (Doutorado). Centro de tecnologia e geociência, Universidade Federal de Pernambuco, Recife: 2015.

MELO, T. DOS A. T. de; COUTINHO, A. P.; SANTOS, J. B. F. dos; CABRAL, J. J. da S. P.; ANTONINO, A. C. D.; LASSABATERE, L. Trincheira de infiltração como técnica compensatória no manejo das águas pluviais urbanas. Ambiente Construído, Porto Alegre, v. 16, n. 3, p. 53-72, jul./set. 2016. ISSN 1678-8621 Associação Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído.

MIKKELSEN, P.S.; JACOBSEN, P. (1993). Stormwater infiltration design based on rainfall statistics and soil hydraulics. Proc. ASCE International Symposium on Engineering Hydrology, San Francisco, California, July 25-30, pp. 653-658.

PAIVA, A. L. R.; SANTOS, S. M.; SILVA, T. F.; SANTOS, G. C. Capacidade de retenção de água em um telhado verde: estudo de caso em Caruaru. SILUSB – Simpósio de hidráulica e recursos hídricos dos países de língua portuguesa. 2017

RAWLS, W. J.; AHUJA, L. R.; BRAKENSIEK, D. L.; SHIRMOHAMMADI, A. Infiltration and soil water movement, in Handbook of Hydrology. Ed. David R. Maidment, McGraw-Hill, Inc., USA, p.5.1-5.51. 1993.

REED, B. E.; MATSUMOTO, M. R.; WAKE, A.; TAKEDA, F. Improvements in soil absorption trench design. Journal Environmental Engineering, v. 115, n. 4, p. 853–857. 1989.

REICHARDT, K.; TIMM, L. C. Solo, planta e atmosfera: conceitos, processos e aplicações. Barueri, SP: Manole, 2004.

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

SANTOS, J. B. F. dos; Monitoramento e simulação hidráulica de uma trincheira de infiltração. Dissertação (Mestrado). Recife, 2014, 96 fls.

SILVA, P. O.; CABRAL, J. J. P. S.; Atenuação de Picos de Vazão em Área Problema: Estudo Comparativo de Reservatórios de Detenção em Lote, em Logradouros e em Grande Área da Bacia. RBRH – Revista Brasileira de Recursos Hídricos Volume 19 n.2 –Abr/Jun 2014, 7-18.

SIMUNEK, J.; VAN GENUCHTEN, M. T.; SEJNA, M. The HYDRUS Software Package for Simulating Two and Three-Dimensional Movement of Water, Heat, and Multiple Solutes in Variably-Saturated Media, Technical Manual, Version 2.0, PC Progress, Prague, Czech Republic, pp. 258, 2011.

SOUZA, E.D. (2005). Caracterização Hidrodinâmica na Escala Local e da Parcela Agrícola de dois solos do Estado da Paraíba: Variabilidade Espacial e Temporal, e Meio Homogêneo Equivalente. Tese de Doutorado, Programa de Pós-Graduação em Tecnologia Energéticas e Nucleares, DEN-UFPE, 213 fls.

SOUZA, V. C. B. Estudo experimental de trincheiras de infiltração no controle da geração do escoamento superficial. Tese (Doutorado). Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2002.

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

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

URBONAS, B; STAHR, P. (1993). Stormwater: Best Management Practices and Detention, Prentice Hall, Englewood Cliffs, New Jersey, 450p.

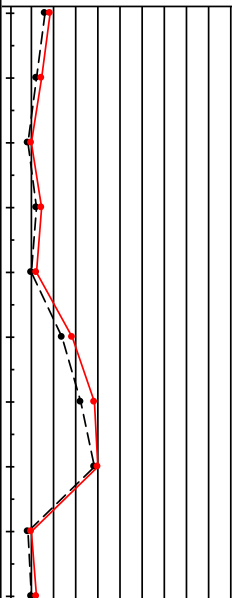
USDA – UNITED STATES DEPARTMENT OF AGRICULTURE. (1993). Soil Survey Manual. Natural Resources Conservation Service, edição revisada.

ZATARÁIN, F.; FUENTES, C.; HAVERKAMP, R.; ANTONIO, A.C.D.(2003). Predicción de la forma de la característica de humedad del suelo a partir de la curva granulométrica. In: Congreso Nacional de Irrigación, 13, Zacatecas. Resumos. Zacatecas: ANEI, 2003. Desarrollo y transferencia de tecnología de riego y drenaje, v.2, p.212-219.

Furo de sondagem SP 01

PERCUSSÃO (SPT)				LAVAGEM POR TEMPO cm/min.	INFILTRAÇÃO ENSAIO		PROFUNDIDADE (m)			DESCRIÇÃO DO MATERIAL	REVESTIMENTO
30cm INICIAIS 30cm FINAIS GOLPES/30cm 10 20 30 40		GOLPES 30 cm			TESTE N°	ABSORÇÃO K= cm/seg	GRÁFICA	MUDANÇA DE CAMADA	CONVENÇÕES GRÁFICAS		
Avanço (m) TC		INICIAIS	FINAIS								

Furo de sondagem SP 02

PERCUSSÃO (SPT)				LAVAGEM POR TEMPO contínua.	INFILTRAÇÃO ENSAIO		PROFUNDIDADE (m)			DESCRIÇÃO DO MATERIAL	REVESTIMENTO
30cm INICIAIS 30cm FINAIS GOLPES/30cm 10 20 30 40		GOLPES 30 cm			TESTE N°	ABSORÇÃO K= cm/seg	GRÁFICA	MUDANÇA DE CAMADA	CONVENÇÕES GRÁFICAS		
INICIAIS	FINAIS										
Avanço (m) TC											
											
8								0,25		Brita Corrida	
6								2,00		Silte arenoso, argiloso, pouco compacto, cinza claro.	
4											
6								4,00			
5								5,00			
12								6,00		Areia média, siltosa, pouco compacta a medianamente compacta, cinza clara.	
16											
19								8,00		Idem, compacta	
4								8,85			
5								10,00		Argila orgânica, mole a média, cinza escura.	
								10,45		Limite da sondagem	
								12,00			
								14,00			
								16,00			
								18,00			
								20,00			

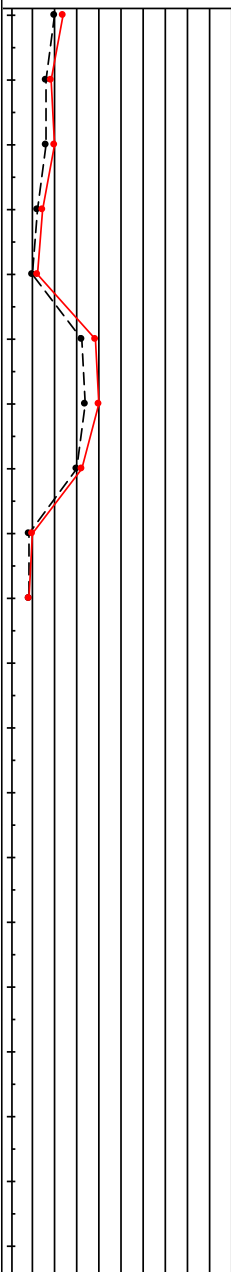
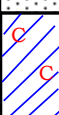
LOCALIZAÇÃO:

RN = 1,00 SAINDO DO LADO DA ARQUIBANCADA PRÓXIMO DO POSTE

RODOVIA:	TRECHO:	SUBTRECHO:		SONDAGEM N.º	
				SP-02	
COORDENADAS:		COTA BOCA	NÍVEL D'ÁGUA	OPERADOR:	DATA:
N=	E=	1,02	2,85	RIBAMAR	21/02/2017

CLIENTE: TIMES ENGENHARIA LTDA		PERFIL DE SONDAAGEM	
OBRA:	PISTA DE ATLETISMO DA UPPE		NORMA: NBR-6484:2001
LOCAL:	CAMPUS UNIVERSITÁRIO DA UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO.		
		AVANÇO (M)	
		DE : 0 A 1,00 (TC)	
		DE: 1,45 EM DIANTE (CA)	

Furo de sondagem SP 03

PERCUSSÃO (SPT)				LAVAGEM POR TEMPO cm/min.	INFILTRAÇÃO ENSAIO		PROFUNDIDADE (m)			DESCRIÇÃO DO MATERIAL	REVESTIMENTO
30cm INICIAIS		GOLPES 30 cm			TESTE N°	ABSORÇÃO K= cm/seg	GRÁFICA	MUDANÇA DE CAMADA	CONVENÇÕES GRÁFICAS		
30cm FINAIS		INICIAIS	FINAIS								
GOLPES/30 cm											
10 20 30 40											
Avanço (m) TC											
											
10				12				0,40		Solo com brita	
8				9			2,00			Silte arenoso, medianamente compacto, cinza claro.	
8				10							
6				7			4,00	3,70		Argila arenosa, siltosa, média cinza clara.	
5				6							
16				19			6,00	5,50		Areia grossa, siltosa, compacta, cinza clara.	
17				20							
15				16			8,00				
4				5				8,60		Argila orgânica, mole, cinza escura.	
4				4			10,00				
								10,45		Limite da sondagem	
								12,00			
								14,00			
								16,00			
								18,00			
								20,00			

LOCALIZAÇÃO:

RN = 1,00 SAINDO DO LADO DA ARQUIBANCADA PRÓXIMO DO POSTE

RODOVIA:	TRECHO:	SUBTRECHO:	SONDAGEM N.º
			SP-03
COORDENADAS:	COTA BOCA	NÍVEL D'ÁGUA	OPERADOR:
N=	E=	0,90	3,15
			RIBAMAR
			DATA:
			22/02/2017

CLIENTE:	TIMES ENGENHARIA LTDA	PERFIL DE SONDAAGEM		
OBRA:	PISTA DE ATLETISMO DA UPPE		AVANÇO (M)	
LOCAL:	CAMPUS UNIVERSITÁRIO DA UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO.		NORMA: NBR-6484:2001	DE : 0 A 1,00 (TC)
				DE: 1,45 EM DIANTE (CA)

Furo de sondagem SP 04

PERCUSSÃO (SPT)			LAVAGEM POR TEMPO contínua.	INFILTRAÇÃO ENSAIO		PROFUNDIDADE (m)			DESCRIÇÃO DO MATERIAL	REVESTIMENTO	
--- 30cm INICIAIS --- 30cm FINAIS GOLPES/30 cm 10 20 30 40	GOLPES 30 cm			TESTE N°	ABSORÇÃO K= cm/seg	GRÁFICA	MUDANÇA DE CAMADA	CONVENÇÕES GRÁFICAS			
INICIAIS			FINAIS								
Avanço (m) TC 			6	7					0,30	Brita corrida	
	4	5						2,00		Silte arenoso, pouco compacto, cinza claro.	
	5	5						4,00			
	6	7						4,60			
	7	9						6,00		Argila siltosa, média a rija, cinza clara.	
	9	11						6,80		Areia grossa, siltosa, medianamente compacta a compacta, cinza clara.	
	16	18						8,00			
	21	23						9,00			
	4	5						10,00		Argila orgânica, mole a média, cinza escura.	
	6	7						10,45		Limite da sondagem	
								12,00			
								14,00			
								16,00			
								18,00			
								20,00			

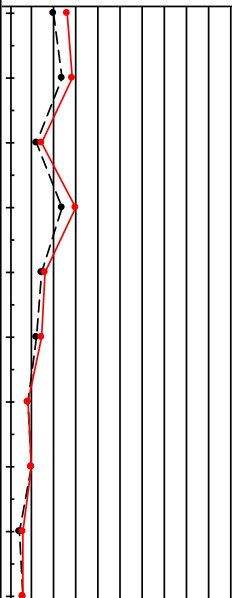
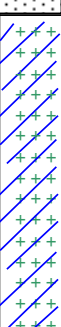
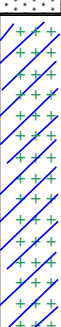
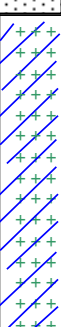
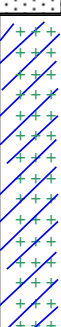
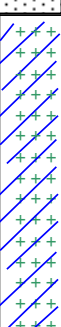
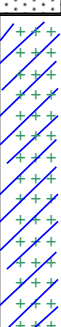
LOCALIZAÇÃO: RN = 1,00 SAINDO DO LADO DA ARQUIBANCADA PRÓXIMO DO POSTE

RODOVIA:	TRECHO:	SUBTRECHO:	SONDAGEM N.º
			SP-04

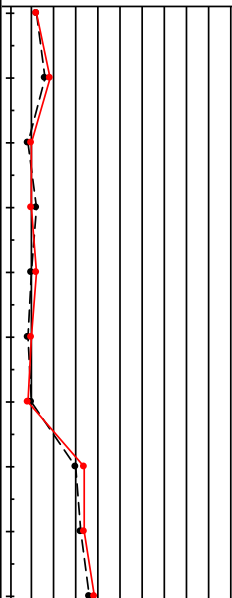
COORDENADAS:	COTA BOCA	NÍVEL D'ÁGUA	OPERADOR:	DATA:
N=	E=	0,85	ASSIS	22/02/2017

CLIENTE:	TIMES ENGENHARIA LTDA	PERFIL DE SONDAAGEM	
OBRA:	PISTA DE ATLETISMO DA UPPE		AVANÇO (M)
LOCAL:	CAMPUS UNIVERSITÁRIO DA UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO.		DE : 0 A 1,00 (TC)
			DE: 1,45 EM DIANTE (CA)

Furo de sondagem SP 05

PERCUSSÃO (SPT)		LAVAGEM POR TEMPO contínuo.	INFILTRAÇÃO ENSAIO		PROFUNDIDADE (m)			DESCRIÇÃO DO MATERIAL	REVESTIMENTO	
30cm INICIAIS 30cm FINAIS GOLPES/30cm 10 20 30 40	GOLPES 30 cm		TESTE Nº	ABSORÇÃO K= cm/seg	GRÁFICA	MUDANÇA DE CAMADA	CONVENÇÕES GRÁFICAS			
	INICIAIS									FINAIS
Avanço (m) TC										
		10	13				0,20 0,35		Brita corrida	
		12	14				2,00		Silte arenoso, vermelho claro.	
		6	7				3,00		Silte arenoso, medianamente compacto, cinza claro.	
		12	15				4,00	3,90 	Areia siltosa, pouco compacta, cinza clara.	
		7	8				6,00		Argila siltosa, média a mole, cinza escura.	
		6	7				8,00			
		4	4				10,00			
		5	5						Idem, mole	
		2	3				10,45			
		3	3						Limite da sondagem	
							12,00			
							14,00			
							16,00			
							18,00			
							20,00			
LOCALIZAÇÃO: RN = 1,00 SAINDO DO LADO DA ARQUIBANCADA PRÓXIMO DO POSTE										
RODOVIA:		TRECHO:				SUBTRECHO:			SONDAGEM N.º SP-05	
COORDENADAS: N=		E=	COTA BOCA 0,87	NÍVEL D'ÁGUA 3,00	OPERADOR: ASSIS		DATA: 22/02/2017 - 23/02/2017			
CLIENTE: TIMES ENGENHARIA LTDA					PERFIL DE SONDAAGEM					
OBRA: PISTA DE ATLETISMO DA UPPE							NORMA: NBR-6484:2001		AVANÇO (M) DE : 0 A 1,00 (TC)	
LOCAL: CAMPUS UNIVERSITÁRIO DA UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO.									DE: 1,45 EM DIANTE (CA)	

Furo de sondagem SP 06

PERCUSSÃO (SPT)				LAVAGEM POR TEMPO contínua.	INFILTRAÇÃO ENSAIO		PROFUNDIDADE (m)			DESCRIÇÃO DO MATERIAL	REVESTIMENTO
30cm INICIAIS 30cm FINAIS GOLPES/30cm 10 20 30 40		GOLPES 30 cm			TESTE N°	ABSORÇÃO K= cm/seg	GRÁFICA	MUDANÇA DE CAMADA	CONVENÇÕES GRÁFICAS		
INICIAIS	FINAIS										
Avanço (m) TC 											
	6	6					0,20		Brita corrida		
	8	9					2,00		Silte arenoso, pouco compacto a medianamente compacto, cinza claro.		
	4	5					2,80		Argila arenosa, siltosa, média, cinza clara.		
	6	5					3,65				
	5	6					4,00		Argila arenosa, siltosa, média, cinza clara.		
	4	5					6,00		Argila siltosa, média, cinza escura.		
	5	4					7,30				
	15	17					8,00		Areia grossa siltosa, medianamente compacta a compacta, cinza clara.		
	16	17					10,00				
	18	19					10,45		Limite da sondagem		
							12,00				
							14,00				
							16,00				
							18,00				
							20,00				

LOCALIZAÇÃO:

RN = 1,00 SAINDO DO LADO DA ARQUIBANCADA PRÓXIMO DO POSTE

RODOVIA:	TRECHO:				SUBTRECHO:				SONDAGEM N.º		
									SP-06		
COORDENADAS:			COTA BOCA	NÍVEL D'ÁGUA	OPERADOR:		DATA:				
N=			E=	0,80	3,00	ASSIS		23/02/2017			

CLIENTE: TIMES ENGENHARIA LTDA					PERFIL DE SONDAAGEM					
OBRA: PISTA DE ATLETISMO DA UPPE LOCAL: CAMPUS UNIVERSITÁRIO DA UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO.							NORMA: NBR-6484:2001		AVANÇO (M)	
									DE : 0 A 1,00 (TC)	
									DE: 1,45 EM DIANTE (CA)	