

DISSERTAÇÃO

Simulação de fluxo vertical em trincheiras de
infiltração urbana

Marla Josefa Nen Mujovo

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
PROGRAMA DE PÓS GRADUAÇÃO EM
ENGENHARIA AMBIENTAL

Dissertação apresentada ao programa de Pós-graduação em Engenharia ambiental, como requisito parcial para obtenção do grau de Mestre em Engenharia ambiental

Orientador: Profa. Dra. Alexandra Rodrigues Finotti.

Coorientador: Prof. Dr. Vladimir Caramori Borges de Souza

Florianópolis

2014

Marla Josefa Nen Mujovo

Simulação de Fluxo Vertical em Trincheiras de Infiltração Urbana

Dissertação submetido ao Programa de Pós graduação em Engenharia Ambiental da Universidade Federal de Santa Catarina para a obtenção do Grau de Mestre em Engenharia Ambiental.

Orientador: Prof.^a Dr.^a Alexandra Rodrigues Finotti.

Coorientador: Prof. Dr. Vladimir Caramori Borges de Souza

Florianópolis
2014

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor,
através do Programa de Geração Automática da Biblioteca Universitária da UFSC.

Mujovo, Marla Josefa Nen
Simulação do Fluxo Vertical em Trincheiras de Infiltração
Urbana / Marla Josefa Nen Mujovo ; orientadora,
Alexandra Rodrigues Finotti ; coorientador, Vladimir
Caramori Borges de Souza. - Florianópolis, SC, 2014.
116 p.

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Santa
Catarina, Centro Tecnológico. Programa de Pós-Graduação em
Engenharia Ambiental.

Inclui referências

1. Engenharia Ambiental.
2. Trincheira de infiltração .
3. Gestão de drenagem urbana .
4. Meio parcialmente saturado e Meio saturado.
5. Modelo computacional . I. Finotti, Alexandra Rodrigues . II. Souza, Vladimir Caramori Borges de . III. Universidade Federal de Santa Catarina. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental. IV. Título.

Marla Josefa Nen Mujovo

Simulação de fluxo vertical em trincheiras de infiltração urbana

Esta Dissertação foi julgada adequada para obtenção do Título de “Mestre em Engenharia Ambiental”, e aprovada em sua forma final pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental.

Florianópolis, 10 de Março de 2014.

Prof. William Gerson Matias, Dr.
Coordenador do Curso

Banca Examinadora:

Prof.^a Alexandra Rodrigues Finotti, Dr.^a
Orientadora
UFSC – ENS / CTC

Prof. Vladimir Caramori Borges de Souza, Dr.
Coorientador
UFAL

Prof. Ademir Parceli Barbassa, Dr.
UFSCAR

Prof.^a Nádia Bernardi Bonumá, Dr.^a
UFSC – ENS/CTC

Prof. Pedro Luiz Borges Chaffe, Dr.
UFSC – ENS/CTC

Este trabalho é dedicado ao meu
Marido e aos Meus queridos Pais.

AGRADECIMENTOS

Aos meus orientadores, Profa. Alexandra Rodrigues Finotti e Prof. Vladimir Caramori Borges de Souza, pela segura assistência acadêmica, todo o conhecimento transmitido, e pela inestimável paciência.

A Márcia Salomoni Batalha e Aline Mota, pela toda ajuda prestada no entendimento do modelo HYDRUS-1D.

Ao meu Marido, meus Pais e os meus irmãos que sempre me apoiaram em tudo.

A toda minha família pelo apoio e motivação.

Aos colegas do projeto, Elisa Pacheco, Jakcemara Marchiore e Tays Bento por toda ajuda prestada e apoio condicional.

As amigas Dámaris Núñez e Marina Machado pelo carinho, afeto e por todo apoio prestado.

Agradeço ainda a todos que contribuíram para o sucesso deste meu trabalho, permitindo a continuidade de minha formação profissional, e ainda pela oportunidade de voltar ao ambiente acadêmico e fazer tão boas amizades.

RESUMO

Estruturas de drenagem compensatórias de infiltração como trincheiras são frequentemente usadas como alternativa para o controle da drenagem urbana. Sua implantação deve ser precedida de uma avaliação do risco que elas representam para o meio subterrâneo em termos qualitativos e quantitativos. A complexidade da circulação de águas no meio subterrâneo é tal que sua avaliação é quase sempre realizada com o auxílio de modelos computacionais que implementam as equações de fluxo e de transporte de contaminantes. Neste estudo é avaliado o desempenho de dois programas computacionais de distribuição livre na modelagem do fluxo de água no meio poroso a partir de trincheiras de infiltração. Os modelos HYDRUS 1D e CHEMFLO foram testados com dados de uma trincheira experimental implantada no Instituto de Pesquisas Hidráulicas. Os modelos depois de calibrados simularam dados dos eventos chuvosos monitorados na trincheira. Os resultados das simulações foram estatisticamente comparados com os dados de fluxo monitorados na trincheira. O modelo CHEMFLO apresentou resultados insatisfatórios para eventos com maior duração da chuva e que apresentam características de chuva variável. O modelo HYDRUS-1D apresentou uma margem de erro muito elevada para alguns eventos simulados. A matriz de avaliação de desempenho sustenta que o modelo HYDRUS-1D é eficiente em representar a trincheira de infiltração urbana o que não aconteceu com o modelo CHEMFLO devido as suas limitações.

Palavras chaves: Tomada de decisão. Trincheiras de infiltração. Drenagem urbana. Meio parcialmente saturado. Modelo computacional. HYDRUS-1D. CHEMFLO. Águas subterrâneas.

ABSTRACT

Infiltration trenches, best management practices in urban drainage, are often used as an alternative for the control of urban drainage. Its implementation should be preceded by an assessment of the risk they pose to the subsurface in qualitative and quantitative terms. The complexity of water movement through unsaturated soils is such that its evaluation is often performed with the aid of computational models that implement the equations of flow and contaminant transport. This study evaluated the performance of two computer programs for free distribution in the modeling of water flow in porous media from infiltration trenches. The HYDRUS 1D and CHEMFLO programs were tested with experimental data from a trench located at the Institute of Hydraulic Research - UFRGS. Programs were calibrated with rainfall data events monitored in the trench. The simulation results were statistically compared with the data flow monitored in the trench. The CHEMFLO program showed unsatisfactory results for events with longer duration of rain and presenting features of variable rainfall. The HYDRUS-1D program showed a very high margin of error for some simulated events. An evaluation matrix was developed to measure the software performance. Its application to programs tested showed that HYDRUS-1D model is efficient in representing urban infiltration trench which did not happen with the CHEMFLO model due to their limitations.

Keywords: Decision making. Infiltration trenches. Urban drainage. Unsaturated Zone. Computational model. HYDRUS-1D. CHEMFLO. Groundwater.

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1: SÍNTESE DO TRABALHO.....	22
FIGURA 2: TRINCHEIRAS DE INFILTRAÇÃO COM ALIMENTAÇÃO DIRETA	29
FIGURA 3: TRINCHEIRA DE INFILTRAÇÃO TÍPICA.....	30
FIGURA 4: DETERMINAÇÃO DO VOLUME DA TRINCHEIRA MÉTODO DAS CHUVAS	33
FIGURA 5: DIAGRAMA TRIFÁSICO SIMPLIFICADO PARA UM SOLO NÃO SATURADO	36
FIGURA 6: PERFIL DE UMEDECIMENTO DO SOLO DURANTE A INFILTRAÇÃO	38
FIGURA 7: CURVAS DE CAPACIDADE E TAXAS DE INFILTRAÇÃO.....	39
FIGURA 8: REPRESENTAÇÃO DO POTENCIAL TOTAL DA ÁGUA NO SOLO.....	40
FIGURA 9: MODELO CONCEITUAL DA TRINCHEIRA DE INFILTRAÇÃO E CARACTERÍSTICAS ORIGINAIS DO PERFIL DO SOLO	62
FIGURA 10: ÁREA DE CONTRIBUIÇÃO PARA A TRINCHEIRA	63
FIGURA 11: PROJETO DA TRINCHEIRA	64
FIGURA 12: CURVA DE RETENÇÃO OBTIDA NO LOCAL DE INSTALAÇÃO DA TRINCHEIRA	65
FIGURA 13: CURVA DE RETENÇÃO DOS SOLOS PRESENTES NO PERFIL DE IMPLANTAÇÃO DA TRINCHEIRA	69
FIGURA 14: APRESENTAÇÃO DO PERFIL DO SOLO SUBMETIDO AO MODELO CHEMFLO.....	70
FIGURA 15: PROTOCOLO PARA AVALIAÇÃO QUANTITATIVA.....	74
FIGURA 16: HIDROGRAMA OBSERVADO E SIMULADO PARA O EVENTO 2- MODELO HYDRUS-1D.....	75
FIGURA 17: CONTEÚDO VOLUMÉTRICO DE ÁGUA NO PERFIL DA TRINCHEIRA	76
FIGURA 18: ESCOAMENTO SUPERFICIAL	76
FIGURA 19: VARIAÇÃO DO PERFIL DA TRINCHEIRA	77
FIGURA 20: REPRESENTAÇÃO DA CHUVA PARA O EVENTO 7.....	78
FIGURA 21: CONTEÚDO VOLUMÉTRICO DE ÁGUA NO PERFIL DA TRINCHEIRA	78
FIGURA 22: VARIAÇÃO DO PERFIL DA TRINCHEIRA	79
FIGURA 23: HIDROGRAMA DOS VALORES OBSERVADOS E SIMULADOS PARA O EVENTO 1	80
FIGURA 24: EVENTO 1B – INÍCIO DA SIMULAÇÃO COINCIDINDO COM FUNCIONAMENTO DA TRINCHEIRA	81

FIGURA 25: CONTEÚDO VOLUMÉTRICO DE ÁGUA NO PERFIL DA TRINCHEIRA (A) E VARIAÇÃO DO PERFIL DA TRINCHEIRA COM O TEMPO (B)....	82
FIGURA 26: HIDROGRAMA DOS VALORES OBSERVADOS E SIMULADO PARA O EVENTO 3-MODELO HYDRUS-1D.....	83
FIGURA 27: CONTEÚDO VOLUMÉTRICO DE ÁGUA NO PERFIL DA TRINCHEIRA (A) E VARIAÇÃO DO PERFIL DA TRINCHEIRA COM O TEMPO (B) ...	83
FIGURA 28: ESCOAMENTO SUPERFICIAL	84
FIGURA 29: HIDROGRAMA OBSERVADO E SIMULADO PARA O EVENTO 4-MODELO HYDRUS-1D.....	85
FIGURA 30: VARIAÇÃO DO CONTEÚDO VOLUMÉTRICO DE ÁGUA (A) E VARIAÇÃO DO CONTEÚDO VOLUMÉTRICO NO PERFIL DA TRINCHEIRA EM RELAÇÃO À PROFUNDIDADE	86
FIGURA 31: ESCOAMENTO SUPERFICIAL NO PERFIL DA TRINCHEIRA AO LONGO DO TEMPO	86
FIGURA 32: VARIAÇÃO DO VOLUME DE SAÍDA ACUMULADO NA TRINCHEIRA EXPERIMENTAL E NA SIMULADA PELO MODELO CHEMFLO.....	88
FIGURA 33: VARIAÇÃO DO PERFIL DA TRINCHEIRA (A) E CONTEÚDO VOLUMÉTRICO DE ÁGUA NO PERFIL DA TRINCHEIRA (B) PARA O EVENTO1-CHEMFLO.....	88
FIGURA 34: VARIAÇÃO DO VOLUME DE SAÍDA ACUMULADO NA TRINCHEIRA EXPERIMENTAL E NA SIMULADA PELO MODELO CHEMFLO.....	89
FIGURA 35: CONTEÚDO VOLUMÉTRICO DE ÁGUA NO PERFIL DA TRINCHEIRA (A) E VARIAÇÃO DO PERFIL DA TRINCHEIRA (B).....	89
FIGURA 36: VARIAÇÃO DO VOLUME DE SAÍDA ACUMULADO NA TRINCHEIRA EXPERIMENTAL E NA SIMULADA PELO MODELO CHEMFLO PARA O EVENTO 3	91
FIGURA 37: CONTEÚDO VOLUMÉTRICO DE ÁGUA NO PERFIL DA TRINCHEIRA (A) E VARIAÇÃO DO PERFIL DA TRINCHEIRA (B).....	91

LISTA DE TABELAS

TABELA 1: CARACTERIZAÇÃO DE ESTRUTURAS DE DRENAGEM COMPENSATÓRIA OU ALTERNATIVA	27
TABELA 2: POROSIDADE EFETIVA DE MATÉRIAS DE ENCHIMENTO	34
TABELA 3: HIPÓTESES DE CÁLCULO ADOTADAS EM DIFERENTES PAÍSES PARA INTEGRAR O EFEITO DA COLMATAÇÃO NAS TRINCHEIRAS	36
TABELA 4: MODELOS MATEMÁTICOS PARA A CURVA DE RETENÇÃO DE ÁGUA NO SOLO	45
TABELA 5: SÍNTESE DOS MODELOS MATEMÁTICOS DE FUNÇÕES CONDUTIVIDADE HIDRÁULICA, SEGUNDO VÁRIOS AUTORES	46
TABELA 6: PERFIL DO SOLO NO LOCAL DE INSTALAÇÃO DA TRINCHEIRA	64
TABELA 7: PESO ESPECÍFICO E POROSIDADE DO SOLO NO LOCAL DE IMPLANTAÇÃO DA TRINCHEIRA	64
TABELA 8: CARACTERÍSTICAS DA CHUVA E DOS EVENTOS OBSERVADOS NA TRINCHEIRA	66
TABELA 9: CARACTERÍSTICAS FÍSICAS DO SOLO DA TRINCHEIRA.....	68
TABELA 10: VALORES DOS PARÂMETROS HIDRÁULICOS DO SOLO PARA A TRINCHEIRA CONCEITUAL-HYDRUS-1D	68
TABELA 11: AJUSTE DOS VALORES DE CONDUTIVIDADE HIDRÁULICA PARA O MODELO HYDRUS-1D.....	71
TABELA 12: CLASSIFICAÇÃO DE DESEMPENHO DE VARIÁVEIS ESTATÍSTICAS ATRAVÉS DE MODELOS DISTRIBUIDORES COM INTERVALOS DE SIMULAÇÃO MENSAL	73
TABELA 13: COMPARAÇÃO DOS RESULTADOS DA ALTURA ACUMULADA DE SAÍDA ENTRE O EVENTO CALIBRADO COM OS VALORES OBSERVADOS NA TRINCHEIRA EXPERIMENTAL.....	79
TABELA 14: AVALIAÇÃO ESTATÍSTICA E DO NÍVEL MÁXIMO NA TRINCHEIRA COM INÍCIO DA SIMULAÇÃO DO EVENTO 1B COINCIDENTE COM FUNCIONAMENTO DA TRINCHEIRA	81
TABELA 15: COMPARAÇÃO ENTRE OS VALORES OBSERVADOS E SIMULADOS PARA O MODELO HYDRUS-1D E CHEMFLO	92
TABELA 16: MATRIZ DE AVALIAÇÃO DE DESEMPENHO DO MODELO HYDRUS-1D	97
TABELA 17: MATRIZ DE AVALIAÇÃO DE DESEMPENHO DO MODELO- CHEMFLO.....	100

LISTA DE SÍMBOLOS

A	Área da secção transversal de uma conduta [L^2].
A_a	Área de drenagem efetiva [L^2].
α_{p50}	Superfície interior do furo até 50% da altura real do ensaio incluindo a base.
β	Constante de ajuste da equação [T^{-1}].
C_d	Coefficiente de descarga para métodos de Puls.
DH_{max}	Altura específica de água a armazenar [L].
$D(\theta)$	Difusividade da água no solo, [$L^2 \cdot T^{-1}$].
D_V	Tempo de esvaziamento da estrutura para dimensionamento de estruturas de drenagem [T^{-1}].
f	Constante relacionada com a contribuição da gravidade para o movimento da água [$L \cdot T^{-1}$].
H	Carga hidráulica atuando na estrutura hidráulica de controle ou precipitação efetiva transformada através de método racional [L].
i	Gradiente hidráulico.
I	Infiltração acumulada [$L^3 \cdot L^{-2}$].
i_f	Taxa de infiltração para um tempo infinito ($t \rightarrow \infty$) [$L^3 \cdot L^{-2} \cdot T^{-1}$].
i_i	Taxa de infiltração inicial ($t=0$) [$L^3 \cdot L^{-2} \cdot T^{-1}$].
k	Condutividade hidráulica [$L \cdot T^{-1}$].
k_s	Coefficiente de Condutividade hidráulica saturada [$L \cdot T^{-1}$].
k_r	Coefficiente de Condutividade hidráulica relativa [$L \cdot T^{-1}$].
L	Dimensão geométrica da estrutura hidráulica de controle [L].
L_{FM}	Distancia entre a superfície e a frente de molhamento [L].
M_W	Massa de água presente no solo [M].
M_S	Massa de sólidos [M].
p_{atm}	Pressão atmosférica [$M \cdot L^{-1} \cdot T^{-2}$].
q_{a_s}	Capacidade de absorção por unidade de superfície infiltrante [$L^3 \cdot L \cdot T^{-1}$].
Q	Vazão circulante [$L^3 \cdot T^{-1}$].
Q_{ent}	Vazão que entra na estrutura de drenagem [$L^3 \cdot T^{-1}$].
Q_s	Vazão que sai da estrutura de drenagem [$L^3 \cdot T^{-1}$].
q	Densidade do fluxo [$L^3 \cdot L^2 \cdot T^{-1}$].
q_r	Fluxo de percolação na Zona não saturada [$L^3 \cdot T^{-1} \cdot L^{-2}$].
R	Raio do domo no aquífero.
S_i	Superfície infiltrante na estrutura de drenagem [L^2].
s	Sortividade do solo, [$L \cdot T^{1/2}$].

S	Sucção total $[F.L^{-1/2}]$.
S_m	Sucção matricial $[FL^{-1/2}]$.
S_{os}	Sucção osmótica $[FL^{-1/2}]$.
S_{max}	Volume a armazenar para métodos de volumes $[L^3]$.
T	Período de retorno, [anos].
t	Duração da chuva, [minutos].
t_{p75-25}	Tempo decorrido entre a passagem do nível de 75% a 25%;
V	Volume total de água acumulado ou perdido no elemento de volume do solo $[L^3]$.
V_{p75-25}	Volume de água entre 75 e 25% do nível da altura de realização do ensaio de estrutura de Drenagem;
V_m	Volume de água presente no solo $[L^3]$.
V_{max}	Volume de água a armazenar para método das chuvas $[L^3]$.
w	Teor de umidade gravimétrico $[M.M^{-1}]$.
α	Parâmetro de ajuste da função condutividade hidráulica.
ρ_d	Massa específica seca do solo $[M.L^{-3}]$.
ρ_w	Massa específica da água $[M.L^{-3}]$.
θ	Teor de umidade volumétrico $[L^3.L^{-3}]$.
θ_f	Umidade na frente de molhamento $[L^3.L^{-3}]$.
θ_0	Umidade inicial $[L^3.L^{-3}]$.
Ψ	Potencial total da água no solo $[LH_2O]$.
ψ_g	Potencial gravitacional $[LH_2O]$.
ψ_{pn}	Potencial de pressão ou pneumático $[LH_2O]$.
ψ_m	Potencial matricial $[LH_2O]$.
ψ_{os}	Potencial osmótico $[LH_2O]$.
ψ_f	Potencial matricial na água no solo na frente de molhamento $[LH_2O]$.
ψ_s	Potencial matricial da água no solo na superfície transversal ao fluxo $[LH_2O]$.
h_a	Pressão no ar $[M.L^{-1}.T^{-2}]$.
h_w	Pressão na água $[M.L^{-1}.T^{-2}]$.
Θ	Saturação efetiva, adimensional.
$\Delta\psi$	Diferença do potencial hidráulico.
Δh	Variação do nível do aquífero $[L]$.
η	Variável de Boltzmann $[L.T^{-1/2}]$.
Z_i	Nó do perfil do solo.

LISTA DE SIGLAS

IPH-UFRGS	Instituto de Pesquisas Hidráulicas - Universidade Federal do Rio grande do sul
EESC/USP	Escola de Engenharia de São Carlos;
ET	Evapotranspiração.
IDF	Intensidade – Duração – Frequência
PBIAS	Porcentagem de erro
NSE	Coefficiente de eficiência de Nash-Sutcliffe
RD	Desvio padrão.

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	19
1.1	OBJETIVOS.....	21
1.1.1	OBJETIVO GERAL	21
1.1.2	OBJETIVOS ESPECÍFICOS	21
1.2	ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO.....	23
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	25
2.1	ESTRUTURA DE DRENAGEM COMPENSATÓRIA.....	25
2.1.1	ESTRUTURAS DE INFILTRAÇÃO.....	26
2.2	DINÂMICA DE ÁGUA EM SOLOS	36
2.3	FLUXOS DE ÁGUA NO SOLO.....	49
2.3.1	FLUXOS EM MEIO SATURADO.....	49
2.3.2	FLUXOS EM MEIOS NÃO SATURADOS	50
2.4	DESCRIÇÕES DOS MODELOS HYDRUS-1D E CHEMFLO.....	54
2.4.1	HYDRUS-1D.....	54
2.4.2	CHEMFLO.....	58
3	MATERIAIS E MÉTODOS	61
3.1	MODELOS CONCEITUAIS DA TRINCHEIRA DE INFILTRAÇÃO .	61
3.2	TRINCHEIRA DE INFILTRAÇÃO	62
3.2.1	CARACTERÍSTICAS HIDRÁULICAS, HIDROLÓGICAS E DE DIMENSIONAMENTO DA TRINCHEIRA EM ESTUDO.....	62
3.3	MODELAGEM DA TRINCHEIRA COM O MODELO HYDRUS- 1.....	66
3.4	MODELAGEM DA TRINCHEIRA COM O MODELO CHEMFLO..	69
3.5	CALIBRAÇÃO DOS MODELOS	71
3.6	COMPARAÇÃO ENTRE OS VALORES SIMULADOS E OBSERVADOS.....	71
3.7	DESENVOLVIMENTO DE MATRIZ DE AVALIAÇÃO DOS PROGRAMAS DESTINADOS A SIMULAR O DESEMPENHO DE ESTRUTURAS DE CONTROLE ALTERNATIVO DA DRENAGEM URBANA.....	73

4	RESULTADOS E DISCUSSÃO	75
4.1	CALIBRAÇÃO DOS PROGRAMAS HYDRUS -1D E CHEMFLO ...	75
4.2	SIMULAÇÕES DA TRINCHEIRA DE INFILTRAÇÃO PELO MODELO HYDRUS-1D.....	80
4.3	SIMULAÇÕES DA TRINCHEIRA DE INFILTRAÇÃO PELO MODELO CHEMFLO.....	87
4.4	DESEMPENHO DOS MODELOS	92
4.5	DESENVOLVIMENTO DE MATRIZ DE AVALIAÇÃO DOS MODELOS DESTINADOS A SIMULAR O DESEMPENHO DE ESTRUTURAS DE CONTROLE ALTERNATIVO DA DRENAGEM URBANA.....	94
5	CONCLUSÕES.....	103
6	SUGESTÕES.....	105
	REFERÊNCIAS	107

1 INTRODUÇÃO

A urbanização implica em alterações significativas no meio ambiente, especificamente no ciclo hidrológico causando a impermeabilização do solo. Algumas das consequências do processo são o aumento da vazão máxima na bacia hidrográfica, a antecipação do pico de cheia e o aumento do volume do escoamento superficial o que pode provocar inundações. Durante as inundações o escoamento de água transporta vários tipos de poluentes agregados aos sedimentos, deteriorando a qualidade das águas pluviais. Metais pesados, hidrocarbonetos, matéria orgânica são alguns dos contaminantes mais comumente encontrados em águas de drenagem. Os metais pesados são considerados os mais problemáticos por não serem degradáveis e se acumularem no solo.

Nas quatro últimas décadas, em diversas metrópoles Brasileiras, iniciou-se o uso das técnicas compensatórias de forma a promover a infiltração ou o armazenamento temporário das águas pluviais, com objetivo de compensar os efeitos da urbanização sobre os processos hidrológicos. O desenvolvimento das técnicas compensatórias simula a restauração do comportamento natural da bacia através do aumento de infiltração da água e redução da parcela que se tornaria escoamento superficial em função da impermeabilização que a urbanização traz consigo. Estas alternativas, apesar de serem eficazes no controle de volume de cheias urbanas podem acarretar outros problemas. Especialmente nos primeiros instantes da precipitação, as águas podem não apresentar boa qualidade, havendo presença de hidrocarbonetos, metais e sólidos em suspensão (Finotti, 2007). Assim, estas estruturas que visam o aumento da infiltração acarretam uma maior entrada de água para o solo e o aquífero, podendo inserir poluentes presentes na drenagem superficial no ambiente subterrâneo. Nisto a infiltração de águas de drenagem urbana deve ser precedida de uma avaliação criteriosa do risco de poluição dos solos e das águas subterrâneas.

A Lei 9433/97 que institui a gestão dos recursos hídricos tem como um de seus pressupostos que a gestão das águas superficiais seja feita em conjunto com as águas subterrâneas (Portal Brasil, 2010), entretanto a compartimentalização que ocorre na hidrologia separando esses dois meios tanto em termos de estudos e pesquisas quanto em termos de formação profissional tem dificultado o desenvolvimento da área de interface. A questão da avaliação do impacto da drenagem

urbana no ambiente subterrâneo é um problema essencialmente de interface entre a gestão das águas superficiais e das águas subterrâneas. Neste contexto, o projeto mais amplo do grupo de pesquisa da professora Alexandra Finotti “*Impacto ambiental de estruturas de controle da drenagem urbana nos solos e nas águas subterrâneas*” busca desenvolver uma ferramenta auxiliar de tomada de decisão para seleção de técnicas alternativas de controle da drenagem urbana considerando os impactos no ambiente subterrâneos dessas técnicas. Para tanto serão desenvolvidos um modelo computacional baseado em um protocolo de avaliação ambiental e de desempenho das técnicas compensatórias em relação aos impactos quantitativos devido ao volume de água infiltrado que pode aumentar o nível freático e os impactos qualitativos que dizem respeito á percolação de compostos poluentes para o aquífero. A expectativa desse projeto é dar uma contribuição prática ao processo de tomada de decisão pelo órgão gestor das águas urbanas na cidade ou aos responsáveis por projetos desta natureza. Especificamente, neste trabalho de mestrado foi estudada a etapa quantitativa no perfil vertical do solo através do uso de modelos computacionais de infiltração de água para simular o desempenho de uma trincheira de infiltração de águas pluviais com vistas ao controle da drenagem urbana. Este estudo será a base para a criação do protocolo de avaliação ambiental que culminará no desenvolvimento da ferramenta computacional de tomada de decisão, permitindo ao gestor fazer uma avaliação ambiental da técnica compensatória antes da sua execução. Para isso, foram selecionados os modelos HYDRUS-1D e o CHEMFLO que permitiram fazer simulações computacionais considerando a física do sistema estrutura-solo-aquífero ou seja, trincheira de infiltração, a zona parcialmente saturada do solo e o aquífero, visando o desenvolvimento de uma matriz de avaliação dos programas de simulação de infiltração para avaliar sua aplicabilidade no processo de tomada de decisão na seleção de técnicas de controle da drenagem urbana.

Avaliação do impacto quantitativo dessas estruturas no solo e nas águas subterrâneas traz benefícios tanto ambiental como social, a redução da vazão do escoamento superficial por meio de estrutura de infiltração previne doenças de veiculação hídrica, em algumas vezes permite a criação de áreas de lazer, facilitando ainda a circulação viária e o desenvolvimento urbano, sem a presença nociva da água na superfície das ruas (Baptista et al., 2005) .

Esse trabalho traz contribuições para o desenvolvimento da hidrologia de interface entre as águas superficiais e subterrâneas no

sentido de que utiliza programas tradicionalmente aplicados no estudo da infiltração para avaliar o impacto da drenagem urbana no meio subterrâneo.

Em termos ambientais, a justificativa é direta visto que o tema principal do trabalho é contribuir para a prevenção da ocorrência de impactos ambientais nos solos e águas subterrâneas quando o controle da drenagem urbana é feito com base em técnicas de infiltração no solo. Em termos sociais, a finalidade do estudo está ligada ao desenvolvimento de uma ferramenta auxiliar de tomada de decisão na gestão da drenagem urbana o que pode trazer benefícios para os órgãos gestores e de forma mais ampla para a sociedade que se beneficia de um processo de gestão ancorado em bases mais científicas.

1.1 OBJETIVOS

1.1.1 Objetivo geral

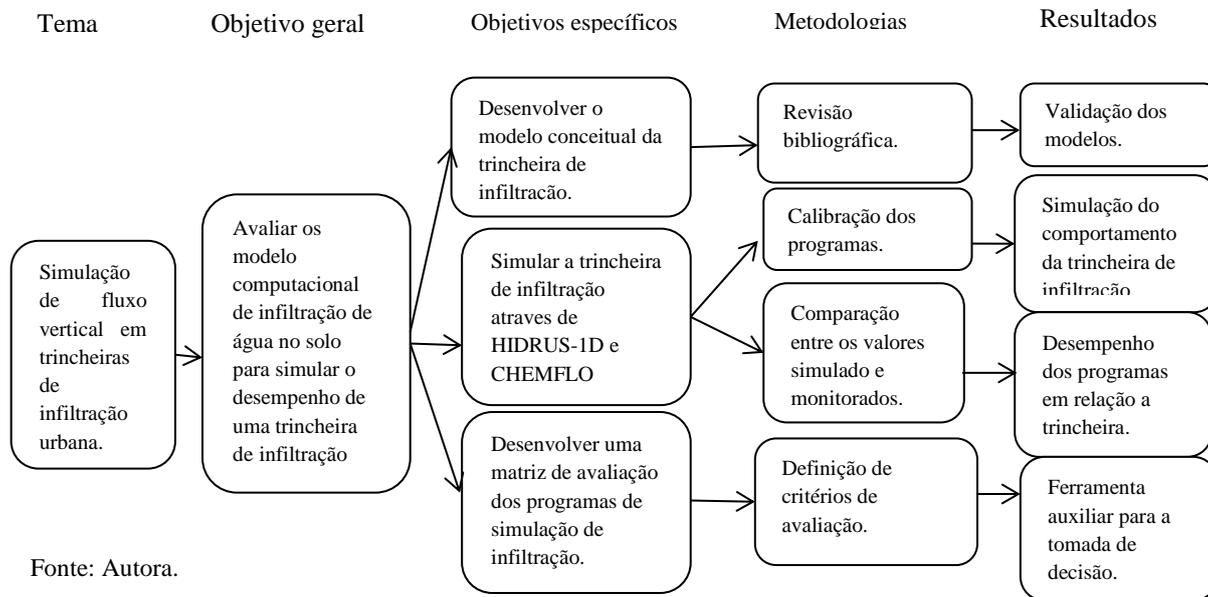
Os objetivos foram desenvolvidos com a finalidade de responder à seguinte pergunta de pesquisa: Programas computacionais gratuitos de transferência de água no perfil parcialmente saturado do solo conseguem simular adequadamente as trincheiras de infiltração utilizadas para controle da drenagem urbana?

1.1.2 Objetivos específicos

- a) Desenvolver o modelo conceitual que represente a trincheira de infiltração de águas de drenagem urbana;
- b) Simular a trincheira de infiltração nos programas HYDRUS-1D e CHEMFLO;
- c) Desenvolver uma matriz de avaliação dos programas de simulação de infiltração para avaliar sua aplicabilidade no processo de tomada de decisão para seleção de técnicas de controle da drenagem urbana

Apresenta-se na figura 1 síntese do trabalho correlacionando o título, os objetivos, a metodologia e os resultados obtidos.

Figura 1: Síntese do trabalho



1.2 ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO

O estudo está organizado em cinco capítulos. No capítulo 1, apresenta-se uma breve introdução com a justificativa da realização do trabalho e uma síntese da relação entre o tema do trabalho com os objetivos, metodologia e os resultados.

No capítulo 2, apresenta-se a revisão bibliográfica, em que são expostos alguns conceitos importantes relacionados e estudos já realizados em relação ao tema que, direta ou indiretamente, auxiliam na compressão dos fenômenos envolvidos com a modelagem da trincheira de infiltração. São apresentados também os conceitos referentes aos programas usados no trabalho.

No capítulo 3, são apresentados os materiais e os métodos utilizados no ensaio de campo realizado por Souza (2002) e faz-se a descrição da metodologia para o emprego do Modelo HYDRUS-1D e do Modelo CHEMFLO.

No capítulo 4, são apresentados os resultados e as discussões alcançadas através das simulações, e é feita uma comparação primeiramente entre os resultados alcançados pelo modelo com os obtidos no campo, em seguida são feitas comparações entre os resultados alcançados com os dois programas e é apresentada a matriz de avaliação dos programas (HYDRUS-1D e CHEMFLO).

No capítulo 5, são apresentadas as conclusões obtidas com este estudo e as recomendações para as futuras pesquisas.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Este capítulo encontra-se dividido em quatro tópicos principais: Apresentação das técnicas compensatórias, seguido pelo fluxo na zona parcialmente saturada e na zona saturada e por fim a apresentação dos programas computacionais utilizados no estudo.

2.1 Estrutura de drenagem compensatória

A evolução para alcançar o conceito de drenagem urbana tendo em conta o meio ambiente é fruto de numerosas pesquisas realizadas desde meados do século XIX e a fase atual corresponde á terceira etapa de uma sequência que pode ser caracterizada como (Silveira, 1998):

1. Higienismo
2. Racionalização e normatização dos cálculos hidrológicos.
3. Abordagem científica e ambiental do ciclo hidrológico urbano.

A primeira etapa surgiu na Europa no século XIX, tinha como recomendação o alcance da melhoria da saúde pública com a eliminação sistemática das águas estagnadas nas cidades, não só como também o efluente doméstico lançados nas vias públicas. No entanto foi adotada a canalização subterrânea das águas para locais distantes dos centros urbanos. Na parte hidrológica foram estabelecidas as primeiras relações quantitativas entre a precipitação e escoamento para o dimensionamento das obras de esgoto.

A segunda etapa continuou com o conceito de evacuação rápida, mas procurou estabelecer melhor o cálculo hidrológico para o dimensionamento das obras hidráulicas. Feita essa parte passou-se a etapa de "racionalização" que consistiu no surgimento do método racional hidrológico e da normatização dos cálculos. Esta etapa foi também acompanhada pela implantação de sistemas clássicos de drenagem, que são constituídos basicamente de dispositivos de micro drenagem (sarjetas), que efetuam o transporte das águas nas ruas, captam quando a capacidade de vazão é superada (bocas de lobo), e de condutos, usualmente enterrados, destinados ao transporte dessas águas ate os sistemas de macro-drenagem (Baptista et al., 2005).

A terceira etapa tinha como fundamentação a consciência ecológica e o avanço tecnológico. Assim, entre outros aspectos, alternativos ao conceito de evacuação rápida puderam ser estabelecidas, a poluição do esgoto pluvial foi reconhecida, e houve uma grande pressão em torno do tratamento do esgoto (Silveira, 1998).

Atualmente os impactos hidrológicos e ambientais decorrentes inseridos no contexto atual de demanda ambiental crescente, tornou a questão da drenagem urbana bastante complexa, nisto surge então o conceito de sistema de “técnicas compensatórias” em drenagem urbana.

O desenvolvimento das técnicas compensatórias tem um significado muito diferente em relação às técnicas clássicas ou convencionais, o seu desenvolvimento é feito no sentido de restaurar, de certa forma, os processos referentes ao comportamento natural da bacia antes da urbanização. Estas opõem ao princípio do “tudo na rede”, o seu uso está ligado aos impactos decorrentes do desenvolvimento histórico das redes convencionais de drenagem, por isso elas são chamadas de alternativas, e quando se trata das condições ambientais a transferência de resultados ou métodos de outros locais pode não apresentar bons resultados em relação às outras etapas (Silveira, 1998).

Baptista et al., (2005) afirmam que as estruturas compensatórias podem ser classificadas, segundo a ação que exercem sobre os processos hidrológicos, atuando sobre a redução dos volumes (estruturas de infiltração) ou das vazões (reservatórios que promovem o armazenamento temporário das águas pluviais).

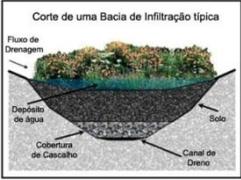
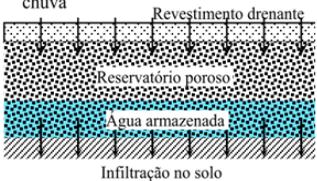
2.1.1 Estruturas de infiltração

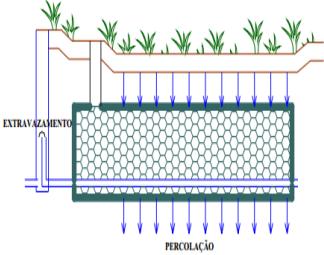
Os dispositivos de infiltração promovem tanto a redução das vazões máximas quanto dos volumes escoados. Estes apresentam como vantagens redução de inundações, recuperação da vazão de base em rios urbanos e servem como um suprimento de água para a vegetação no meio urbano (Cruz et al., 2001). Tem como desvantagens o risco de contaminação do solo e do lençol freático.

No geral os dispositivos compensatórios de infiltração desempenham importante papel na qualidade da água no meio urbano. No caso das bacias de infiltração, por exemplo, permitem a filtragem, de poluentes, através da percolação da água pelo solo. No que se refere à qualidade, em primeiro lugar deve-se considerar que, nos primeiros instantes da precipitação a qualidade da água geralmente apresenta-se em condições mas ou menos favoráveis, havendo presença de hidrocarbonetos, metais e sólidos em suspensão. No entanto estas estruturas que visam o aumento da infiltração acarretam uma maior entrada de água para o solo e para no aquífero, podendo inserir poluentes presentes na drenagem superficial no ambiente subterrâneo (Finotti, 2007). O controle de poluentes pelos dispositivos de infiltração tanto pode ser uma vantagem (filtragem) quanto apresentar um problema (risco de contaminação do solo e do lençol freático),

dependendo da escala de utilização, das características do solo e dos elementos poluentes presentes na água do escoamento pluvial (Souza, 2002). Dentre os dispositivos de infiltração podem ser considerados as bacias de retenção, valas, trincheiras, pavimentos e poços de infiltração. Representa-se na tabela 1 o conceito geral para cada estrutura.

Tabela 1: Caracterização de estruturas de drenagem compensatória ou alternativa

Estrutura compensatória ou alternativa	Conceito geral
<p>Bacia de infiltração</p>  <p>Corte de uma Bacia de Infiltração típica</p> <p>Fluxo de Drenagem</p> <p>Depósito de água</p> <p>Cobertura de Cascalho</p> <p>Solo</p> <p>Canal de Drenagem</p>	<p>Estrutura que tem por objetivo a regularização das vazões precipitadas, permitindo à restituição a jusante de vazões compatíveis com um limite previamente fixado ou imposto pela capacidade de vazão de uma rede ou curso de água existente (Bilhaça, 2006).</p>
<p>Valetas de infiltração</p>  <p>Terra</p> <p>Brita</p> <p>Tubo</p>	<p>São usadas como técnicas compensatórias junto ao sistema viário, cumprindo a função de condução longitudinal, desde os anos de 1970. A entrada de água é feita de forma direta por escoamento superficial, e, eventualmente, por afluyente via tubulação. A saída de água pode ser feita através da infiltração ou por deságue superficial, diretamente pelo corpo receptor (Baptista et al., 2005).</p>
<p>Pavimentos permeáveis</p>  <p>chuva</p> <p>Revestimento drenante</p> <p>Reservatório poroso</p> <p>Água armazenada</p> <p>Infiltração no solo</p>	<p>São geralmente implantadas na área urbana, como no sistema viário e em estacionamentos, que normalmente ocupam 30% da bacia de drenagem. Armazenam a água em reservatórios sob os pavimentos pelo tempo necessário para sua infiltração no solo ou, de forma alternativa, funcionam como reservatório de amortecimento, mediante drenos auxiliares para o excesso de água.</p>

	(Campana, 2003).
<p data-bbox="188 220 461 245">Trincheira de infiltração</p> 	<p data-bbox="576 220 983 539">São geralmente implantadas junto à superfície ou a pequena profundidade, com a finalidade de recolher as águas pluviais de afluência perpendicular ao seu comprimento, favorecendo a infiltração e o armazenamento temporário. São constituídas por valetas preenchidas por material granular.</p>
<p data-bbox="188 561 389 587">Poços de infiltração</p> 	<p data-bbox="576 561 1008 1129">São dispositivos pontuais com pequena ocupação da área superficial, concebidos para evacuar as águas pluviais diretamente no subsolo, por infiltração. Esta técnica tem a vantagem de poder ser utilizada em zonas permeáveis ou zonas onde a camada superficial é pouco permeável, mas que apresentam capacidades significativas de infiltração nas camadas mais profundas. Como todas as técnicas compensatórias fundamentadas em infiltração, os poços permitem reduzir as vazões de pico e diminuir os volumes de água que vão para a rede clássica de drenagem (Baptista et al.,2005).</p>

2.1.1.1 Trincheira de infiltração

Lima (2009) define trincheiras como técnicas compensatórias lineares, implantadas junto à superfície ou a pequena profundidade, com finalidade de recolher as águas pluviais de afluência perpendicular a seu comprimento, favorecendo a infiltração. Apresentam largura e profundidade reduzida, usualmente não ultrapassam um metro, em contraposição às dimensões longitudinais mais significativas. Estas estruturas podem ser utilizadas em canteiros, centrais e passeios, ao longo do sistema viário, ou ainda junto a estacionamentos, jardins e terrenos esportivos (figura 2).

O acesso das águas superficiais à trincheira pode ser feito diretamente através da superfície do dispositivo ou através de um sistema convencional de drenagem, que efetua a coleta e sua introdução na trincheira. Para o caso das trincheiras de infiltração a evacuação das águas é feita por infiltração no solo, através da sua base e das paredes laterais.

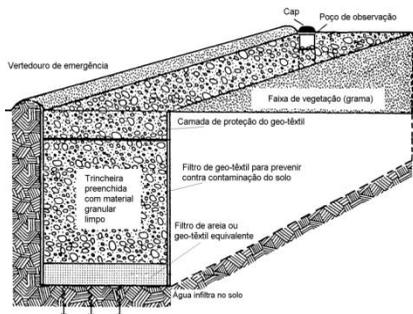
Geralmente as trincheiras são preenchidas de material granular graúdo, pedra de mão, seixos ou brita. Vários autores recomendam o uso da manta geotêxtil de modo a evitar a passagem de finos e a consequente colmatação da estrutura. Um filtro geotêxtil é colocado entre a trincheira e a superfície, recoberto por uma camada de seixos, formando uma superfície drenante. O material deve estar envolto no filtro geotêxtil, de modo que impeça a entrada de material fino na estrutura e de contaminantes (Souza, 2002). A figura 2 apresenta uma trincheira de infiltração típica.

Figura 2: Trincheiras de infiltração com alimentação direta



Fonte: Lima (2009).

Figura 3: Trincheira de infiltração típica



Fonte: Souza (2002).

Baptista et al., (2005) afirmam que a implantação de trincheira de infiltração deve obedecer alguns critérios, em relação à escolha do local da implantação da estrutura, tornando-se necessário verificar:

- A permeabilidade do solo, pois a condutividade hidráulica não pode estar abaixo de 10^{-7} m/s para o caso somente de infiltração para evacuação das águas;

- O nível máximo do lençol freático deve-se situar a mais de 1m de distancia da base da trincheira, esta condição é necessária para não haver redução da capacidade das trincheiras caso as águas venham ocupar uma parte da estrutura, e para proteger o lençol de uma poluição crônica potencial;

- As águas escoadas não devem ser poluídas e não devem carregar matérias finas em excesso, de maneira a não colmatar prematuramente a trincheira comprometendo o seu funcionamento hidráulico;

- Deve ser conhecida a capacidade de absorção do solo, de modo que se possa determinar a capacidade de descarga da trincheira quando do estudo hidráulico.

- a) Estimativa do funcionamento e infiltração de água na trincheira de infiltração através de estudos experimentais ou modelos computacionais

Souza (2002) realizou um estudo com duas trincheiras de infiltração instaladas em uma área do IPH-URRGS. O projeto para as duas trincheiras de infiltração foi feita utilizando o método “rain-envelope-method”, para um tempo de retorno de 5 anos. A primeira

trincheira foi projetada para drenar uma rua pavimentada de 200m^2 , com 0,8m de largura, 1m de profundidade e 10 m de comprimento. A segunda foi projetada para receber a contribuição do volume escoado no estacionamento de 450m^2 , com 0,8m de largura, 1m de profundidade e 3m de comprimento. As duas trincheiras mostraram-se eficientes controlando 100% do volume escoado, mesmo para eventos de período de retorno superiores aos de projeto. Foi verificado que a metodologia de projeto gera superdimensionamento das estruturas e que a condição inicial de umidade do solo e as características dos eventos são fatores determinantes para o seu funcionamento. Os dados observados foram simulados e comparados como o modelo de Bower, no entanto o ajuste dos valores para o modelo não foi bom quanto esperado.

Graciosa (2005) conduziu ensaios de campo com trincheiras de infiltração, em dois solos distintos, um arenoso e outro argiloso, com objetivo de avaliar quantitativamente o comportamento hidráulico das estruturas de infiltração em resposta ao volume de escoamento com dados numéricos e experimentais. As trincheiras foram construídas com 0,5m de largura, 0,7m de profundidade e 4m de comprimento. O estudo experimental serviu para avaliar a simulação computacional do processo de redistribuição em torno de trincheiras de infiltração. A simulação foi realizada através de um modelo, com o nome de BIDISUL. Realizou-se comparações entre os resultados experimentais e simulados pela equação bidimensional de Richards em que obteve-se como resultado uma diferença acentuada na capacidade de infiltração da trincheira entre os dados observados e simulados. Essa diferença nos resultados foi devida a desconsideração da distribuição heterogênea do tamanho dos poros do solo.

Lima (2009) realizou um estudo para avaliar o comportamento hidráulico de uma trincheira de infiltração experimental instalada na EESC/USP, propondo uma nova metodologia de dimensionamento para trincheiras de infiltração. Construiu-se uma trincheira com 0,8m de largura e 1,3m de profundidade. Foram conduzidos ensaios experimentais para determinar o volume infiltrado, este é medido pelo medidor de nível e calculado pela diferença entre o volume de entrada. Em relação à nova metodologia de dimensionamento, foi proposta com base no modelo de Green-Ampt adaptado ao processo de infiltração horizontal. Como resultando constatou-se a eficiência tanto do funcionamento da trincheira de infiltração (100% do volume escoado) como da metodologia proposta que demonstrou ser economicamente eficaz para o dimensionamento de dispositivos de infiltração.

Lucas (2011) monitorou e modelou um sistema filtro-vala-trincheira (FTV), em escala real para retenção do escoamento superficial direto e das inundações, produzido por áreas impermeabilizadas. Os sistema FTV foi construindo em solo caracterizado como areia média argilosa, com capacidade de infiltração entre $2,30 \times 10^{-5} \text{m/s}$ e $6,05 \times 10^{-6} \text{m/s}$, obtidas em ensaio de campo com duplo anel e poço invertido. Foram monitorados 60 eventos de chuva com até 48 anos de período de retorno. O sistema de infiltração foi simulado através de um algoritmo baseado no método de Puls e o modelo SWMM. O modelo SWMM apresentou menores níveis de armazenamento e menores tempo de esvaziamento em relação ao método de Puls.

Lucas et al., (2013) modelaram um Sistema-Filtro-Vala-Trincheira de infiltração pelo método de Puls adaptado para a calibração de parâmetros, O método de Puls foi empregado para a modelagem a partir do monitoramento das precipitações, das vazões afluentes ao sistema FVT e dos níveis de armazenamento na trincheira e vala de infiltração. Quando analisados globalmente, foram observadas variações nos resultados das simulações de evento para evento, decorrentes da simplificação matemática.

Kuo et al., (1989) desenvolveram um modelo bidimensional de elementos finitos para simular o fluxo transiente no meio poroso parcialmente saturado através de parâmetros hidrológicos e hidráulicos. O modelo bidimensional foi testado através de dados experimentais, os resultados demonstraram que o modelo é uma ferramenta útil para o dimensionamento da trincheira de infiltração permitindo calcular o volume de armazenamento de água na trincheira.

Duchene et al., (1994) usaram o modelo bidimensional de modo a testar as características do funcionamento da trincheira de infiltração para o controle de águas pluviais. Tendo concluído que a taxa de infiltração no solo diminui assintoticamente com o tempo e que está diretamente ligada com a condição de umidade inicial.

Acuot et al., (2006) desenvolveram um modelo numérico 2D para prever os efeitos de trincheiras de infiltração nas zonas parcialmente saturadas e saturadas em condições de precipitação intensa. Tendo demonstrado como resultado que a trincheira de infiltração apresenta uma eficiência no processo de infiltração da água sem aumentar a pressão dos poros dependendo diretamente da distancia entre a trincheira e o nível de água.

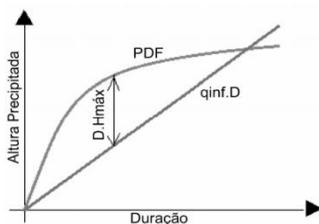
Van Meir et al., (2011) estudaram diferentes parâmetros hidrológicos e hidráulicos na zona parcialmente saturada através de testes realizados com uma trincheira de infiltração na cidade de

Chernobil com objetivo de analisar a infiltração em larga escala para o fluxo lateral. O estudo consistiu em infiltrar 9,5cm de água em uma área de 5,51m² durante 5h, de modo analisar uma vasta gama de variedade dos parâmetros. Estes foram analisados para o modelo HYDRUS1D, 2D e 3D e através do modelo de Van Genuchten. Os resultados mostraram que o modelo 1D mostrou-se suficientemente capaz em representar o conjunto dos valores dos parâmetros estimados para a discretização do modelo e os testes para identificação das camadas de infiltração, mostrando incapacidade em reproduzir corretamente as observações da estabilidade do balanço de água no centro assimétrico. Tendo sido estes demonstrado pelos modelos 2D e 3D.

b) Dimensionamento das trincheiras de infiltração

Baptista et al., (2005) descreveram três métodos de dimensionamento das estruturas de drenagem compensatória, método das chuvas, método dos volumes e método de Puls. O método das chuvas também conhecido por “Rain-envelope-method” baseia-se no volume de armazenamento entre a diferença dos volumes acumulados de entrada e saída da estrutura, tendo em consideração a porosidade do material de preenchimento. Fornece volume máximo de armazenamento, estimativa dos tempos de descarga e de funcionamento, a partir de curvas IDF (Intensidade, Duração e Frequência), para um tempo de retorno pré-estabelecido podem ser traçados em conjunto o gráfico da altura precipitada PDF (Precipitação, Duração e Frequência) a curva que representa as alturas de água infiltradas em função do tempo ($q_s \cdot D$), a diferença máxima entre elas é a estimativa do volume de armazenamento da trincheira, conforme a figura (4).

Figura 4: Determinação do volume da trincheira Método das chuvas



Fonte: Baptista et al., (2005).

Vazão de saída da trincheira

Souza (2002) considera que o volume da estrutura de infiltração é feito de acordo com a porosidade efetiva do material de enchimento. No entanto o volume útil para armazenamento será o volume referente aos vazios da trincheira. Tendo em conta que o fundo de estrutura esta sujeito à colmatagem mais rápida em função da deposição de sedimentos, ele é considerado impermeável por alguns autores. Sendo assim Urbonas & Stahre, (1993) consideram a saída de água da trincheira por infiltração somente pelas paredes verticais.

Tabela 2: Porosidade efetiva de matérias de enchimento

Material	Porosidade efetiva (%)
Brita grossa	30
Cascalho de granulometria uniforme	40
Brita graduada (menores que ¼)	30
Areia	25
Seixo rolado	15-25

Fonte: Urbonas & Stahre (1993).

Através da lei de Darcy pode-se estimar a taxa de água infiltrada. Considerando o tempo de enchimento e esvaziamento da estrutura, pode-se aproximar a taxa média de saída da água como a média entre as vazões de saída para o enchimento e o esvaziamento da estrutura. Tendo em conta a simplificação desta média, pode-se considerar o nível de água constante na altura média da estrutura. Considerando o solo saturado, obtém-se gradiente hidráulico unitário resultando na equação 1 (Urbonas & Stahre, 1993).

$$V_{\text{inf}}(t) = k \nabla \phi \cdot \frac{A_{\text{inf}}}{2} \cdot 3600 \cdot t_p \quad (1)$$

Em que:

V_{inf} : é o volume de água infiltrado no solo [L];

k : condutividade hidráulica do solo [L/T];

A_{inf} : área total dos lados da estrutura de infiltração [L²];

t_p : tempo de infiltração [T];

$\nabla \phi$: gradiente hidráulico que normalmente é igual a 1,0.

Baptista et al., (2005) descrevem que a vazão de saída de uma obra depende especificamente do seu modo de descarga. Podendo ser constante ou variável dependendo da altura do armazenamento. Para o caso de infiltração a vazão pode ser estimada pelo produto da superfície de infiltração e da capacidade de absorção q_{as} . Na fase de pré-dimensionamento, tendo em conta a hipótese de um lençol profundo, é possível aproximar a capacidade de absorção pela condutividade hidráulica saturada, supondo-se implicitamente que o gradiente hidráulico seja igual a 1. Considerando constante a vazão de saída, Q , considerando uma eventual colmatagem e introduzindo um coeficiente de segurança que vai depender do local da obra e do tipo de manutenção chega-se à equação 2 que descreve a expressão da descarga da vazão de saída em uma estrutura de infiltração.

$$Q_s = \alpha \cdot q_{as} \cdot A_i \quad (2)$$

Em que:

Q_s : fluxo de saída da estrutura [$L^3 \cdot s^{-1}$];

α : coeficiente de segurança para considerar a colmatagem ao longo do tempo;

q_{as} : capacidade de absorção por unidade de superfície infiltrante em [$L^3 \cdot T^{-1} \cdot L^2$];

A_i : superfície infiltrante [L^2].

O coeficiente de segurança α considera o efeito inevitável da colmatagem nas trincheiras. Segundo Ishikazi (1996) apud Souza (2002) o processo de colmatagem pode ser definido como modificação da condutividade hidráulica do meio no qual tem lugar a infiltração. Normalmente a colmatagem dos dispositivos de infiltração modifica as características hidráulicas da interface obra e solo, as matérias em suspensão nas águas pluviais se depositam no fundo do dispositivo, mas sob certas condições, podem penetrar no interior da interface, obstruindo assim os poros do material e reduzindo sua condutividade hidráulica (Gautier, 1998 apud Souza, 2002)

Por outro lado, a colmatagem contribui para a retenção dos poluentes. O meio poroso colmatado torna a infiltração mecânica mas eficaz, os vazios apresentam uma dimensão menor no processo de colmatagem. As superfícies e o tempo de contato aumentam, favorecendo a retenção físico-química (Baptista et al., 2005). Mostra-se na tabela 3 hipóteses de cálculo adotadas em diferentes países para integrar a priori os efeitos potenciais da colmatagem.

Tabela 3: Hipóteses de cálculo adotadas em diferentes países para integrar o efeito da colmatação nas trincheiras

País	Coefficiente de redução da permeabilidade	Superfície de infiltração S considerada
Dinamarca e Grã-Bretanha	0,5 a 0,3 conforme tipo de medida de condutividade	Unicamente a metade das superfícies verticais
Suécia		Unicamente a metade das superfícies verticais
Alemanha		Fundo + metade das superfícies verticais
Holanda		Unicamente as superfícies verticais

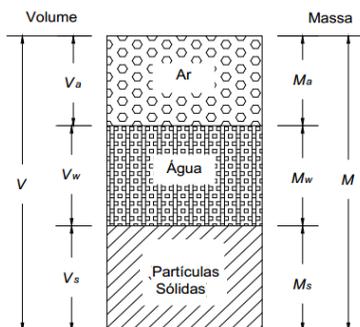
Fonte: Baptista et al., (2005).

2.2 DINÂMICA DE ÁGUA EM SOLOS

2.2.1 Características gerais

Conforme sustenta Silva (2005) o solo não saturado é caracterizado por três fases (sólido, água e ar) estruturadas de forma que os espaços vazios (poros) tenham a capacidade de armazenar líquidos e gases. A figura 5 descreve um diagrama trifásico simplificado.

Figura 5: Diagrama trifásico simplificado para um solo não saturado



Fonte: Peixoto (2011).

A quantidade de água presente no solo é um parâmetro importante a ser conhecido. Geralmente é representado pelo teor de umidade gravimétrico (w), em que é descrita como sendo a relação entre a massa de água presente no solo (M_w) e a massa de sólidos (M_s). Pode ser definido também teor de umidade volumétrico (θ) como a razão entre o volume de água presente no solo (V_m) e o volume total do elemento (V). As unidades para w e θ_w são, g/g e cm^3/cm^3 . Para uma mesma amostra do solo, w é diferente de θ_w (Silva, 2005).

A relação entre os teores de umidades, gravimétrica e volumétrica são representadas pela equação (3).

$$\theta = \frac{V_w}{V} \Rightarrow \theta = \frac{M_w/\rho_w}{V} \Rightarrow \theta = w \cdot \frac{M_w/\rho_w}{V} \Rightarrow \theta = w \cdot \frac{\rho_d}{\rho_w} \quad (3)$$

Em que:

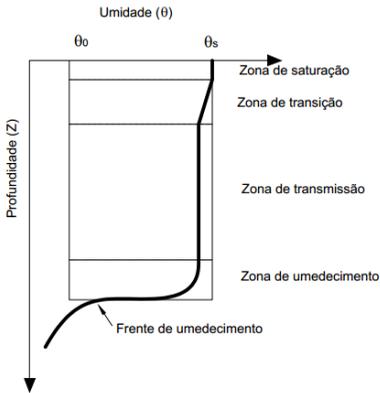
$$\rho_d = \frac{M_s}{V}, \text{ Massa específica seca do solo.}$$

$$\rho_w = \frac{M_w}{V_w}, \text{ Massa específica da água.}$$

2.2.1.1 Infiltração

Infiltração é a passagem de água da superfície para o interior do solo, dependendo fundamentalmente da água disponível para infiltrar, da natureza do solo, do estado da sua superfície e das quantidades de água e ar. Enquanto houver a passagem da água, o perfil de umidade tende a saturar em toda a profundidade, sendo a superfície naturalmente o primeiro nível a saturar. Normalmente, as precipitações naturais não são capazes de saturar, através do processo de infiltração, restringindo-se apenas em saturar a camada superficial do solo, conformando um perfil típico onde o teor de umidade decresce com a profundidade (Silveira et al., 1993). A figura 6 traz um perfil típico de infiltração de água no solo.

Figura 6: Perfil de umedecimento do solo durante a infiltração (θ_0 é a umidade inicial do solo e θ_s a umidade do solo correspondente á saturação)

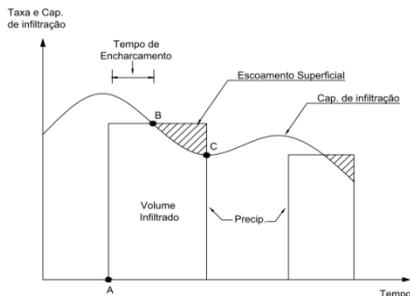


Fonte: Libardi, 2005.

2.2.1.2 Capacidade de infiltração e taxa de infiltração

Segundo Lima (2009), a infiltração é representada pela taxa de infiltração e infiltração acumulada. Em que a taxa de infiltração é definida como sendo igual á densidade de fluxo, correspondendo ao volume da água que penetra na unidade de área e de tempo. A infiltração acumulada corresponde ao volume (por unidade de área) de água infiltrada ao longo do tempo. Wheater (1988) define a capacidade de infiltração como sendo o fluxo máximo que pode penetrar dentro do perfil do solo por unidade de tempo. Taxa de infiltração como o fluxo de água que penetra dentro do perfil do solo. Durante o processo de infiltração num perfil, a capacidade de infiltração diminui com o tempo para uma dada taxa de precipitação. No solo inicialmente seco, a taxa de infiltração tende a decrescer com o tempo, atingindo um valor final constante, para a taxa de infiltração em estado estacionário. Esta diminuição é devida ao gradiente de sucção de água dentro do solo. A figura 7 relaciona a infiltração real e a capacidade de infiltração na ocorrência de uma precipitação. No tempo $t=A$, a capacidade de infiltração diminui devido o aumento do teor de umidade. Para $t=B$ a capacidade de infiltração continua a decrescer e para $t=C$ o solo começa a perder umidade por evapotranspiração.

Figura 7: Curvas de capacidade e taxas de infiltração



Fonte: Silveira et al., (2003).

Quando uma determinada quantidade de precipitação atinge o solo apresentando uma intensidade menor que a capacidade de infiltração, toda a água penetra no solo, provocando uma progressiva diminuição da própria capacidade de infiltração, devido ao umedecimento do solo. Em casos em que a precipitação continue, existe um momento em que a capacidade de infiltração diminui tanto que a sua intensidade se iguala à precipitação. Mantendo-se a precipitação, a infiltração real se processa nas mesmas taxas da curva da capacidade de infiltração, que passa a decrescer exponencialmente no tempo tendendo a um valor mínimo de infiltração (Silveira et al., 1993). Nas condições em que não exista mais a precipitação e não exista mais o aporte de água na superfície do solo, a taxa de infiltração real torna-se nula, consequentemente permite que a capacidade de infiltração volte a crescer, devido a perda de umidade do solo para as camadas mais profundas (Peixoto, 2011).

2.2.1.3 Potencial de água no solo e sucção

A água é caracterizada por um estado de energia, podendo ser determinado de diferentes formas e quantidades. O conhecimento do estado de energia de água nos solos faz parte de uma das características importante seguido da umidade. Quanto menor a energia do corpo, maior a sua estabilidade, nisto a água move-se no sentido de diminuição de sua energia. Com o conhecimento dos potenciais em diferentes pontos do solo, pode-se determinar a tendência do seu movimento através da diferença entre eles (Silva, 2005).

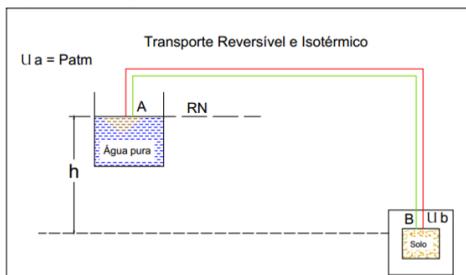
Conforme sustenta Reichardt (1985) a física clássica reconhece duas formas principais de energia, cinética e potencial. A energia cinética é desprezível porque geralmente o movimento de água nas diferentes partes do sistema solo-água é lento. Mas a energia potencial, que descreve a posição e a condição interna de água é de extrema importância na caracterização de seu estado de energia.

O potencial total de água no solo (ψ) representa a difusão da energia livre de Gibbs entre o estado de água no solo e um estado padrão. De modo a determinar essa diferença uma unidade de massa (volume ou peso) de água deve ser levada do estado padrão para o estado no solo, considerando que G ou (ψ) é dependente apenas do estado inicial e final, qualquer processo pode ser utilizado. Portanto apresenta como principais componentes: gravitacional (ψ_g) de pressão ou pneumático (ψ_{pn}), matricial (ψ_m) e osmótica (ψ_{os}) em que é representada pela equação (4) (Reichardt, 1985).

$$\psi = \psi_g + \psi_{pn} + \psi_m + \psi_{os} \quad (4)$$

A figura 8 descreve o processo do potencial total de água no solo. Quando o potencial em A (ψ_A) é maior do que em B (ψ_B), $[\nabla\psi = \psi_A - \psi_B]$ é positivo e a água passa de A para B espontaneamente, liberando a energia equivalente à diferença. Se A é menor que B, espontaneamente a água nunca passará para B, pois A é mais estável. Caso contrário será preciso fornecer energia $\nabla\psi$ para água. Assim conclui-se que as diferenças de potencial fazem parte de um indicativo de tendência de movimento de água (Silva, 2005).

Figura 8: Representação do Potencial Total da Água no solo



Fonte: Silva, (2005).

Segundo Reichardt (1985), os processos que ocorrem no solo são na maior parte isotérmicos, assim a componente térmica passa a não ser

relevante. Além do mais a maior parte dos problemas práticos em que se estuda a infiltração, o solo é considerado, expansivo, pressão atmosférica atuante nos vazios do solo e água em circunstâncias ideais. Nestas condições, o potencial total corresponde simplesmente ao somatório gravitacional e matricial, porque os outros componentes não intervêm no comportamento do solo (Lima, 2009).

Potencial gravitacional (ψ_g) é considerado como sendo a diferença do produto da aceleração da gravidade pela distância vertical (Libardi, 2005). Reichardt (1985) afirma que a componente gravitacional tem maior importância em solos saturados ou próximos da saturação e quando o solo perde água gradualmente o potencial matricial passa a ter maior importância.

Potencial matricial (ψ_m) é resultado de forças capilares de adsorção que surgem devido à interação entre a água e as partículas sólidas (matriz do solo). As forças atraem e fixam a água para estados de energia menores do que o estado livre (sob a pressão atmosférica). Devido a sua complexidade a componente matricial não é calculada, mas sim medida experimentalmente. Este é denominado frequentemente por potencial capilar, potencial de tensão, sucção ou pressão negativa (Reichardt, 1985).

Potencial osmótico ou de soluto (ψ_{os}) reflete a influência da presença de solutos na água do solo. É equivalente ao potencial total quando na água pura do reservatório padrão e a solução de água do solo encontram-se a mesma cota ($h = 0$), á mesma pressão ($h_b = p_{atm}$) e não ocorrem efeitos da matriz do solo (solo saturado) (Silva, 2005).

Potencial pneumático ou de pressão (ψ_{pn}) origina-se de pressões externas de gás diferentes da pressão atmosférica e tem importância relevante quando se consideram os ensaios de placa de pressão ou técnica de translação de eixos. É equivalente ao potencial total quando as águas do solo e do reservatório padrão são idênticas, está na mesma cota ($h=0$), porém sujeitas à pressão diferente da atmosférica e o solo saturado (Silva, 2005).

No momento em que a água esta sob pressões menores do que a pressão atmosférica, seu potencial é considerado negativo e quando ela esta sob pressões hidrostáticas maiores do que a pressão atmosférica, o potencial de pressão é considerado positivo. A sucção é definida como a pressão negativa que ocorre no processo descrito (Soto, 2008).

Marinho (2005) define sucção total como sendo a energia livre da água do solo, e pode ser determinada medindo-se a umidade relativa em volta da massa de solo ou utilizando-se uma membrana semipermeável.

Considerando que a umidade relativa do ar se relaciona com a sucção, ao medir a umidade relativa pode-se obter a sucção se o material do qual se quer obter a sucção e o ambiente onde o mesmo se encontra estiverem em equilíbrio.

De um modo geral a sucção total é dividida em sucção matricial e osmótica. Sendo a Sucção matricial (S_m) a principal entre elas e representa as grandezas negativas (potencial matricial) e a Sucção osmótica (S_{os}) representa as grandezas positivas (potencial osmótico).

$$\mathbf{S} = (\mathbf{S}_m) + (\mathbf{S}_{os}) \quad (5)$$

$$\mathbf{S} = (\mathbf{h}_a - \mathbf{h}) + \boldsymbol{\pi} \quad (6)$$

Em que: $S_m = (h_a - h)$, é a diferença entre as pressões no ar (h_{ar}) e na água (h) necessária para não haver fluxo através de uma membrana permeável tanto á água quanto aos solutos. $S_{os} = \pi$, é a pressão que deve ser aplicada a solução mais concentrada de solutos, de modo que seja evitado o fluxo entre a mesma e outra solução menos concentrada, isto é que permita o fluxo de água, porém não de solutos (Soto, 2008).

As mudanças de pressões na água do solo produzem mudanças no seu teor de umidade. Isto reflete na sucção matricial ao contrário da sucção osmótica, como consequente afeta a mudança da sucção total. No entanto a medição de sucção total é de grande importância principalmente quando se trata de intervalos de aspiração, onde medições de sucção matricial são difíceis de obter (Soto, 2008).

O processo de infiltração é especificamente influenciado pelo comportamento hidráulico dos solos não saturados. Assim o crescimento do teor de umidade do solo, através da infiltração torna-se cada vez menos a necessidade da retenção de água pelo solo. Devido à relação entre a umidade do solo e a sua sucção (a umidade do solo é inversamente proporcional à sucção), portanto a sua relação é representada pela curva de retenção de água ou curva característica.

2.2.1.4 Curva de retenção e condutividade hidráulica

Normalmente o nome que se dá à relação entre o teor da água no solo ou umidade (θ) e o potencial matricial do solo (ψ) é de *curva de retenção ou curva característica de água no solo*. Segundo Marinho (2005) podem ser feitas muitas críticas referentes ao nome de curva características da relação solo/água ou simplesmente curva características, devido às características da curva de retenção não ser favorável com o solo ou material poroso, mas sim com histórias de tensões e trajetória de umidificação. A determinação da curva de retenção é feita em laboratório de acordo com a drenagem crescente de uma amostra saturada, ou do umedecimento de uma amostra inicialmente seca. Ambos os métodos fornecem curvas contínuas, mas não idênticas (Silveira et al., 1993).

A curva de retenção é afetada pela mineralogia, estrutura, índice dos vazios dos materiais porosos e pela trajetória de umedecimento, gerando o fenômeno de histerese. Sendo este um fenômeno que envolve forças de superfície e está associado com a forma de absorção ou perda de água (Marinho, 2005).

O princípio básico da determinação da curva de retenção em laboratório é através da criação de gradiente de pressão entre duas faces de amostra do solo. A pressão de entrada do ar representa a diferença de pressão entre o ar e a água que é necessária para a drenagem do maior poro do solo. O valor da pressão de entrada de ar é determinado estendendo-se desde trecho de maior declividade da curva de retenção até a interseção com a horizontal que corresponde a 100% de saturação, ou com a horizontal que corresponde á umidade de saturação (Peixoto, 2011).

Existem várias literaturas que expressam a relação entre a umidade e a pressão capilar através de equações empíricas. Do ponto de vista prático, a função continua da curva de retenção (formato geral conhecido), expressamente é comum apresenta-se em termos de modelo matemático. Dos vários modelos matemáticos que têm sido propostos, a maior parte deles é derivada da equação 7 (Leong & Rahardjo, 1997).

$$a_1 \cdot \theta^{b_1} + a_2 \cdot e^{a_3 \cdot \theta^{b_1}} = a_4 \cdot \psi^{b_1} + a_5 e^{a_6 \cdot \psi^{b_2}} + a_7 \quad (7)$$

Em que: a_1 , a_2 , a_3 , a_4 , a_5 , a_6 , a_7 , b_1 e b_2 são constantes; θ é a saturação efetiva, adimensional.

Segundo Silva et al., (1993) os modelos de Van Genuchten e de Brooks–Corey, são as que, mais se destacaram para o ajustes

matemática da curva de retenção, proporcionando o maior valor de R^2 com dados experimentais. Um dos problemas que mais tem limitado aplicação bem sucedida da teoria do fluxo na zona não saturada é a falta de informações sobre os parâmetros de entrada, que governam as equações de transferências, como por exemplo, a dificuldade de obter uma estimativa confiável da condutividade hidráulica não saturada, pela extensa variabilidade no campo, pois consome um bom tempo e é um processo caro (Van genuchten, 1980).

Condutividade hidráulica faz parte de uma das propriedades do solo que apresenta uma grande variação. No solo saturado, o coeficiente de condutividade hidráulica varia aproximadamente em mais de dez ordens de grandeza, e para os solos não saturados, pode ocorrer a mesma ordem de grandeza, mas para um mesmo solo, dependendo do nível de sucção atuante (Lima, 2009).

O coeficiente de condutividade hidráulica saturada é representado por k_s , para solos granulares como função do índice do vazio e para solos não saturados é função tanto do índice de vazios quanto do teor de umidade. Em condição da incompreensibilidade da estrutura do solo, este pode ser dissociado em um parâmetro, sendo assim k_s pode ser quantificado em relação ao índice de vazios e a função condutividade hidráulica em relação ao teor de umidade $k(\theta)$. As medições indiretas da condutividade hidráulica são geralmente realizadas através das funções condutividades hidráulicas em que podem ser separadas em *empíricas, macroscópicas e modelos estatísticos* (Leong & Rahardjo, 1997). As formulações propostas e as simplificações adotadas por Leong & Rahardjo (1997), estão apresentadas na tabela 5 e 6 apresenta uma síntese dos principais modelos matemáticos empíricos desenvolvidos para a previsão da função condutividade do solo. Neste estudo serão somente descritos os modelos de Burdine (1953), Brooks & Corey (1964), Mualem (1976) e Van Genuchten(1980).

Tabela 4: Modelos matemáticos para a curva de retenção de água no solo

Autor	Equação	Simplificações	Termos auxiliares	legenda
Brooks-Corey (1964)	$\theta = \left(\frac{\psi_b}{\psi}\right)^\lambda$	$a_2=a_5=a_7=0$ $b_1=1$	$b_2 = -\lambda$ $a_4/a_1=\psi_b^\lambda$	ψ_b =sucção de entrada do ar λ =constante
Van Genuchten (1980)	$\theta = \left[\frac{1}{1 + (\alpha \cdot \psi)^n} \right]^m$	$a_1 = a_7$ $a_2 =$ $a_5=0$	$a_4 / a_1 = \alpha^n$ $b_1 = m$ $b_2 = n$	a_i, m e n são constantes
McKee & Bumb (1987)	$\theta = \frac{1}{1 + A \cdot e^{(\alpha\psi - B)}}$	$a_2 = a_4 = 0$ $b_2 = -1$ e $b_2 = 1$	$\frac{a_5}{a_1} = A \cdot e^{-B}$	A e B são constantes
Fredlund & Xing (1994)	$\theta = \left\{ \frac{1}{\ln \left[e + \left(\frac{\psi}{a} \right)^n \right] } \right\}^m$	$a_1 = a_5 = 0$ $a_3 = 1$	$a_4/a_1 = e^1$ $a_4/a_2 = (1/a)^{b_2}$ $b_1 = m$ $b_2 = n$	a_i, m e n são constantes

Fonte: Lima (2009)

Tabela 5: Síntese dos modelos matemáticos de funções condutividade hidráulica, segundo vários autores

Tipo	Modelo	Equação	Parâmetro de Ajuste
$K(\theta)$	Van Genuchten (1980)	$k = k_s \cdot \theta^{1/2} \cdot \left[1 - \left(1 - \theta^{\frac{1}{m}}\right)^m\right]^2$	m -constante de ajuste
$K(\psi)$	Brooks & Corey (1964)	$K = k_s$, para $\psi < \psi_b$ $K = k_s(\psi/\psi_b)^{-n}$, para $\psi \geq \psi_b$	ψ_b - pressão de entrada do ar
	Gardner (1958)	$k = k_s \cdot e^{(-\alpha\psi)}$	α - constante de ajuste
	Richards (1931)	$k = a \cdot \psi + b$	a e b - constantes de ajuste;
	Leong & Rahardjo (1997)	$k_r = \frac{1}{\left\{ \ln \left[e + \left(\frac{\psi}{A} \right)^B \right] \right\}^C}$	A, B e C - constantes de ajuste;
k_r : coeficiente de condutividade hidráulica relativa $k = k/k_s$			

Fonte: Peixoto, (2011).

Equações baseadas no modelo de Burdine

Burdine foi o primeiro a formular a equação para descrever a curva de retenção, mas os seus dados experimentais não foram satisfatórios. A equação (8) descreve o início do modelo de Burdine.

$$K_r = \theta^2 \int_0^\theta \frac{1}{h^2(x)} dx / \int_0^1 \frac{1}{h^2(x)} dx \quad (8)$$

Usando a regra de substituição para as condições de $h = h(\theta)$ da equação (8) obteve-se a equação (9).

$$k_r(\theta) = \theta^2 \left[\frac{f(\theta)}{f(1)} \right] \quad (9)$$

Substituindo $x = y^m$ na equação (8) tem-se:

$$f(\theta) = m \int_0^{\theta^{1/m}} y^{m-1+2/n} (1-y)^{-2/n} dy \quad (10)$$

Aplicando de novo a regra de substituição no expoente y por $m = 1 - 2/n$ a equação (10) se reduz em:

$$f(\theta) = 1 - (1 - \theta^{1/m})^m \quad (11)$$

A condutividade hidráulica relativa é expressa pela equação (12):

$$k_r(\Theta) = \Theta^2 \left[1 - (1 - \Theta^{1/m})^m \right] \left(m = 1 - \frac{2}{n} \right); \quad (0 < m < 1; n > 2) \quad (12)$$

Em termos de pressão:

$$k_r(h) = \frac{1 - (\alpha h)^{n-2} [1 + (\alpha h)^n]^{-m}}{[1 + (\alpha h)^n]^{2m}} \quad (13)$$

Em termos de Difusividade:

$$D(\Theta) = \frac{(1-m)K_s}{\alpha m(\theta_s - \theta_r)} \Theta^{(3-\frac{1}{m})/2} \left[(1 - \Theta^{1/m})^{-(m+1)/2} + (1 - \Theta^{1/m})^{(m-1)/2} \right] \quad (14)$$

Equações baseadas no modelo de Brooks & Corey

Após um grande número de dados experimentais Brooks & Corey obtiveram previsões razoavelmente precisas através do modelo de equações de Burdine, apesar de encontrarem uma descontinuidade na inclinação da curva da retenção de água no solo e da condutividade hidráulica não saturada, também obtiveram em valor negativo para a pressão. O modelo proposto pelo Brooks & Corey é representado na equação (15):

$$\Theta = \frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} = \left(\frac{h_d}{h_c} \right)^\lambda \quad \text{para} \quad \begin{matrix} h_c > h_d \\ \theta \leq 1, h_c \leq h_d \end{matrix} \quad (15)$$

Em que: Θ é a saturação efetiva, h_c é a pressão capilar (h_c é sempre positivo e tem relação com h através de $dh = -h_c$) ch_d e λ parâmetro característico do solo e de calibração. Para Silveira et al., (1993) λ é denominado índice de distribuição do tamanho dos poros. A equação (16) representa a expressão para o cálculo da pressão capilar.

$$\Theta = (\alpha h)^{-mn} \quad (16)$$

Aplicando a regra de substituição para, $m = 1 - 2/n$ e $\lambda = n - 2$. Surge à equação (17) que expressa à fórmula de condutividade hidráulica.

$$k_r(\Theta) = \Theta^{3+2/\lambda} \quad (17)$$

Para a pressão:

$$k_r(h) = (\alpha h)^{-2-3\lambda} \quad (18)$$

Em termos de Difusividade:

$$D(\Theta) = \frac{K_s}{\alpha \lambda (\theta_s - \theta_r)} \Theta^{2+1/\lambda} \quad (19)$$

O modelo proposto por Brooks & Corey apresenta concordância com os dados experimentais para os solos exibindo uma estrutura bem definida da entrada do ar para a zona saturada definido a curva em forma de um 'J'. No entanto o modelo não descreve com precisão o formato 'S' da curva de retenção (Valiantzas, 2011).

Equações baseadas no modelo de Mualem

Mualem derivou um novo modelo para prever a condutividade hidráulica a partir do conhecimento da curva de retenção da água no solo e a condutividade de saturação, levando a uma fórmula integral.

$$K_r = \theta^{1/2} \left[\int_0^\theta \frac{1}{h(x)} dx / \int_0^1 \frac{1}{h(x)} dx \right]^2 \quad (20)$$

Em que: k_r é a condutividade hidráulica relativa; θ condutividade hidráulica específica; h é a pressão capilar. Aplicando a regra de substituição para, $m = 1 - 1/n$ e $\lambda = n - 1$, na equação (20) surge a equação (21) que expressa a fórmula de condutividade hidráulica.

$$k_r(\theta) = \theta^{5/2+2/\lambda} \quad (21)$$

Para a pressão:

$$k_r(h) = (\alpha h)^{-2-5\lambda/2} \quad (22)$$

Em termos de Difusividade:

$$D(\theta) = \frac{K_s}{\alpha \lambda (\theta_s - \theta_r)} \theta^{3/2+1/\lambda} \quad (23)$$

Equação de van-Genuchten

Através do Modelo de Mualem, Van Genuchten (1980) propôs a seguinte equação:

$$\theta = \left[\frac{1}{1+(\alpha h)^n} \right]^m \quad (24)$$

Em que, α , n , e m são variáveis. Em muitos estudos experimentais considera-se $m=1$. A través de substituição da equação (16) na (21) aplicando as regras de integral surge a equação (25). Segundo Van Genutchen (1980), a equação (24) pode ser resolvida para $h = h(\theta)$ e substituindo na equação (21) resultando na equação (25):

$$k_r(\theta) = \theta^{1/2} \left[\frac{f(\theta)}{f(1)} \right]^2 \quad (25)$$

Em que:

$$f(\theta) = \int_0^\theta \left[\frac{x^{1/m}}{1-x^{1/m}} \right]^{1/n} dx \quad (26)$$

Substituindo $x = y^m$ na equação (27) tem-se:

$$f(\theta) = m \int_0^{\theta^{1/m}} y^{m-1+1/n} (1-y)^{-1/n} dy \quad (27)$$

A condutividade hidráulica relativa pode ser expressa em termos de pressão pela equação (28).

$$k_r(h) = \frac{\{1-(\alpha h)^{n-1} [1+(\alpha h)^n]^{-m}\}^2}{[1+(\alpha h)^n]^{m/2}}; \quad (m = 1 - \frac{1}{n}) \quad (28)$$

Para a condutividade hidráulica a curva de retenção pode ser obtida através da expressão (29) considerando a difusividade:

$$D(\theta) = K(\theta) \left| \frac{dh}{d\theta} \right| \quad (29)$$

$$D(\theta) = \frac{(1-m)K_s}{\alpha m(\theta_s - \theta_r)} \theta^{\frac{1}{2}-1/m} \left[(1 - \theta^{1/m})^{-m} + (1 - \theta^{1/m})^m - 2 \right] \quad (30)$$

Em que; $k_s = k/k_r$ é a condutividade hidráulica saturada.

2.3 FLUXOS DE ÁGUA NO SOLO

Geralmente o fluxo de água no solo ocorre em condições de saturação ou de não saturação. De acordo com Lima (2009), durante o secamento os solos que maior apresentam espaço são os primeiros a perderem água, estes apresentam menor resistência á sucção, e portanto maior fluxo na saturação. Nisso, sob condições de saturação, o fluxo de água é preferencialmente realizado pelos poros maiores, na influência maior da força de gravidade (potencial de pressão positivo) e, nos solos não saturados, pela influência dos poros menores, sobre as forças de sucção matricial (potencial de pressão negativo).

2.3.1 Fluxos em meio saturado

A dinâmica do movimento de água na zona saturada é expressa pela lei de Darcy apresentada na equação 31.

$$Q = -K_s \cdot A \cdot \frac{\Delta H}{L} \quad (31)$$

Tendo em conta os princípios da continuidade e da conservação de massa, as coordenadas de Q (fluxo de água) tornam-se na Equação (32):

$$S_s \frac{\partial h}{\partial x} = \frac{\partial}{\partial x} \left(k_x \frac{\partial h}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(k_y \frac{\partial h}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(k_z \frac{\partial h}{\partial z} \right) \quad (32)$$

Em que: S_s é o coeficiente de armazenamento específico de água no solo por unidade de potencial hidráulico [L^{-1}] k_x , k_y e k_z : Valores da condutividade hidráulica nas direções x, y e z [$L.T^{-1}$].

A condutividade hidráulica na zona saturada ao contrário da zona não saturada é constante para cada meio e para cada fluido sob mesmas condições, podendo ser influenciada pela massa específica e viscosidade do fluido, que por sua vez fazem parte da temperatura e pressão (Prevedello, 1966). A equação (33) expressa a condutividade hidráulica tendo em conta a influência do meio.

$$k = k_e \frac{\rho g}{\eta} \quad (33)$$

Em que:

k_e : Permeabilidade específica (m^2);

ρ : Massa específica do fluido (kg/m^3);

η : Viscosidade dinâmica do fluido (kg/m^3);

g : Aceleração da gravidade (m/s^2).

A porosidade é uma das variáveis que se considera importante no controle da permeabilidade, assim os solos arenosos são mais permeáveis do que solos argilosos por apresentar alta porosidade. Apesar de solos argilosos apresentarem maior número de poros em relação aos outros solos, os seus espaços individuais são muito menores, acentuando a força capilar que é inibidora dos fluxos gravitacionais livres. Portanto a permeabilidade saturada representa melhor a condição de transmissão de água no solo pelo fato da força capilar diminuir com o aumento de umidade no solo, sendo neutralizada quando o solo atinge a saturação (Coelho, 1994). A água subterrânea tem a sua origem na superfície e esta diretamente relacionada com a água superficial. A recarga da zona saturada é feita por meio da zona vadosa, que consequentemente pode aumentar o volume da recarga, elevando o nível do lençol freático de acordo com o tipo de aquífero, bem como interferência direta e indireta das ações do homem.

O movimento da água é feito de acordo com as condições das rochas hospedeiras. Ribeiro (2007), define rochas hospedeiras saturadas como aquíferos sob condições quantitativas significativas de água em que se podem movimentar no seu interior em condições naturais, o que implica a ocorrência de matérias com porosidade interconectada e boa permeabilidade. Essas rochas podem ser encontradas em condições que as definem como livres, confinada e de acordo o tipo litológico, poroso, fissural e cárstico.

2.3.2 Fluxos em meios não saturados

A primeira equação que possibilitou a quantificação da densidade de fluxo em meio poroso saturado foi desenvolvida por Darcy. Buckingham foi o pioneiro na discussão do uso dos princípios de Darcy para solos não saturados (Lima, 2010). Em sua teoria afirmava que o movimento de água em qualquer solo não saturado é dependente da sua condutividade e das forças envolvidas com a secagem do solo. Com base nesses princípios Gardner & Widtsoe descreveram a equação que

representa a densidade de fluxo em solos não-saturados, que atualmente é chamada de equação de Buckingham-Darcy representada pela equação (34) (Prevedello, 1996).

$$\mathbf{q} = -\mathbf{k}(\boldsymbol{\theta}) \cdot \frac{dh}{ds} \quad (34)$$

Em que:

s : Coordenada qualquer de posição, x , y ou z ;

q : Densidade do fluxo [$L \cdot T^{-1}$];

$k(\theta)$: Condutividade hidráulica, para o solo não saturado é uma função de umidade ou da pressão de água nos meniscos capilares [$L \cdot T^{-1}$];

$\frac{dh}{ds}$: Gradiente do potencial hidráulico [$L \cdot L^{-1}$].

Em caso do fluxo vertical a equação (34) se torna em equação (35).

$$\mathbf{q} = -\mathbf{k} \cdot \left(\frac{\partial h}{\partial z} + 1 \right) \quad (35)$$

Em que: K condutividade hidráulica [$L \cdot T^{-1}$], e h é a pressão de água expressa em termos de carga hidráulica [L] (pressão dividida pela gravidade e densidade de água). A carga de pressão de água é calculada baseando-se na definição de pressão capilar $h_c[L]$ na interface ar-água ($h_c = h_{ar} - h$), tomando em consideração que $h_{ar} = 0$, a pressão da água torna-se igual ao negativo da pressão capilar ($h = -h_c$), sendo sempre negativa na zona não-saturada.

Considerando que: $\Delta\psi = H_1 - H_2 = \psi_1 - \psi_2$ em relação as coordenadas (x , y ou z) a equação (34) pode ser reescrita em equação (36)

$$\mathbf{q} = -\mathbf{k}(\boldsymbol{\theta}) \cdot \left(\frac{\partial\psi(\boldsymbol{\theta})}{\partial x} + \frac{\partial\psi(\boldsymbol{\theta})}{\partial y} + \frac{\partial\psi(\boldsymbol{\theta})}{\partial z} \right) \quad (36)$$

$$\mathbf{q} = -\mathbf{k}(\boldsymbol{\theta}) \cdot \nabla\psi \quad (37)$$

Em termos de difusividade ou coeficiente de difusão $D(\theta[L^2T^{-1}])$ de água no solo pode expressa pela equação (38 e 39):

$$\mathbf{q} = - \left[\mathbf{k}(\boldsymbol{\theta}) \cdot \frac{d\psi_m(\boldsymbol{\theta})}{d\theta} \cdot \nabla\theta + \mathbf{k}(\boldsymbol{\theta}) \cdot \nabla\psi_z \right] \quad (38)$$

Ou

$$\mathbf{q} = -[D(\boldsymbol{\theta}) \cdot \nabla\theta + \mathbf{k}(\boldsymbol{\theta}) \cdot \nabla\psi_z] \quad (39)$$

Na direção vertical a equação 39 se torna:

$$\mathbf{q}_z = - \left[D(\boldsymbol{\theta}) \frac{\partial\theta}{\partial z} + \mathbf{k}(\boldsymbol{\theta}) \right] \quad (40)$$

A equação de Buckingham-Darcy só é valida para solos caracterizados por uma única curva de retenção, Isotrópicos (com relação à k e D) e não expansivos. Isto é uma equação para condições estacionária ou em equilíbrio dinâmico. A maior parte dos fluxos na

natureza apresenta-se em estado não estacionário, nisto para poder descrevê-la aplica-se a equação de continuidade. Matematicamente, a equação de continuidade estabelece que não pode haver criação nem destruição de massa, sendo este o princípio de conservação de massa.

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = - \left(\frac{\partial q_x}{\partial x} + \frac{\partial q_y}{\partial y} + \frac{\partial q_z}{\partial z} \right) \quad (41)$$

Aplicando os princípios da lei de conservação de massa, aliada à lei de Buckingham-Darcy a quantidade de água armazenada no sistema pode ser calculada por meio da equação de Richards (equação 42).

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left[\mathbf{k}(\mathbf{h}) \cdot \frac{\partial \Psi}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[\mathbf{k}(\mathbf{h}) \cdot \frac{\partial \Psi}{\partial y} \right] + \frac{\partial}{\partial z} \left[\mathbf{k}(\mathbf{h}) \cdot \frac{\partial \Psi}{\partial z} \right] \quad (42)$$

Em que:

$k(h)$: Condutividade hidráulica não saturada nas direções x , y e z [LT^{-1}];

h : potencial matricial da água no solo [L].

A equação de Richards apresenta como variáveis independentes potencial matricial, conteúdo volumétrico e condutividade hidráulica (h , θ e K), assim são necessárias mais duas equações para descrever o sistema, que são obtidas através das relações empíricas de pressão capilar e saturação e de permeabilidade relativas em função da saturação ou de pressão capilar (Cota, 2000). As expressões, mais utilizadas para o cálculo de pressão capilar, dado a saturação do fluido molhante, são as relações de Brooks –Corey (Equação 18) e van Genuchten (Equação 28). As expressões para estimativa de permeabilidade relativas são obtidas através do uso das relações entre pressão capilar e saturação da água nos modelos de Burdine utilizando Brooks-Corey (Equação 13) e van Genutchem em Mualém (Equação 22) dada em função de pressão capilar.

2.3.2.1 Métodos de solução da equação de Richards

Segundo Kresic (1997) a maioria dos problemas na hidrogeologia é resolvido usando modelos determinísticos que podem ser apresentados como simples ou complexos, nisto o modelo determinístico é dividido em dois grandes grupos de acordo com o tipo de equações matemáticas envolvidas:

– Analíticos - resolvem a equação do fluxo de água subterrânea em um momento e o resultado pode ser aplicado em um ponto ou linhas de pontos no campo de fluxo analisado.

– Numéricos - o fluxo de água subterrânea é descrito juntamente fornecendo soluções para vários pontos de dados especificados pelo

usuário. A área de interesse é subdividida em células ou elementos e resolve uma equação básica do fluxo para cada célula geralmente considerando o balanço de água. A solução para este problema é a distribuição das cargas hidráulicas em pontos representando células individuais, em que podem ser localizados no centro da célula, em interseções entre células adjacentes, ou em outra parte. A equação de fluxo diferencial para cada célula é substituída por uma equação algébrica e, este sistema de equações algébricas é resolvido numericamente, através de processos interativos (Souza, 2007). Autores como James (1978) Freeze & Cherry (1979), Schnoor (1996) e vários outros, consideram os métodos numéricos mais usados na solução da equação de Richards devido à sua maior flexibilidade para descrever diferentes condições de contorno e heterogeneidades. Portanto os métodos que mais são usados pela comunidade científica na solução deste tipo de problemas são *diferenças finitas e elementos finitos*.

O método das *Diferenças finitas* consiste em substituir a equação diferencial por uma série de equações algébricas, denominadas diferenças finitas, em pontos discretos, em que são resolvidas por métodos de matrizes. Cota (2000) afirma que este método é de mais fácil implementação, a entrada de dados é mais suscita, mas não representa muito bem problemas de geometria complexa, como o método de elementos finitos.

Segundo Freeze & Cherry (1979) o *Método de elementos finitos* geralmente é usado na simulação de rede de fluxo estacionário, como também pode ser utilizado para a simulação do aquífero no estado transiente. Este método conduz a um conjunto de n equações algébricas com N incógnitas para cada intervalo de tempo. Em que as incógnitas N são os valores das cargas hidráulicas de um conjunto de pontos nodais distribuídos através do aquífero. O método de elemento finito permite a concepção de uma malha irregular que pode ser medida para qualquer aplicação específica. O número de nós às vezes pode ser reduzido significativamente em relação ao um número necessário para uma simulação de diferenças finitas. Uma das desvantagens deste método esta na forma como trata as condições de contorno e na simulação média anisotrópica. O desenvolvimento das equações do elemento finito para cada nó requer um entendimento de ambas as equações diferenciais parciais e cálculos das variações.

Cota (2000) sustenta que o método dos elementos finitos é especialmente aplicável a problemas multidimensionais com limites de domínio complexos, isto pela facilidade de alteração do formato dos elementos. Schnoor (1996), afirma que os métodos de elementos finitos

são mais populares e usados para os problemas unidimensionais e bidimensionais, em que muitas das vezes fazem o uso de método de ponderação de Galerkin e geometrias complexas, são manipulados facilmente como polígonos para pontos de nós.

A escolha dos métodos é feita de acordo com as características físicas do problema em estudo, tanto o método de diferenças finitas e elementos finitos apresentam vantagens e desvantagens. Um exemplo de modelo de fluxo que utilizam diferenças finitas é o modelo CHEMFLO (Nofziger et al., 1989) e para o caso do exemplo de modelo que usa o elementos finitos é o modelo HYDRUS (Vogel et al., 1996; Simunek et al., 1998).

2.4 DESCRIÇÕES DOS MODELOS HYDRUS-1D E CHEMFLO

2.4.1 HYDRUS-1D

Representa o movimento da água no fluxo uniforme unidimensional em um meio poroso variavelmente saturado (Simunek, et al., 1996) desenvolvido pelo departamento Environmental Sciences da Universidade da Califórnia em Riverside, é descrito pela equação de Richards usando suposições de que a fase do ar desempenha um papel insignificante no processo de fluxo do líquido e fluxo da água, negligenciado o gradiente térmico. O modelo faz parte da versão unidimensional do HYDRUS 2D e HYDRUS 2/3D desenvolvidas pelo mesmo grupo. Neste trabalho foi utilizado o HYDRUS 1D para simulação do fluxo de água em uma trincheira de infiltração no movimento vertical, não considerando advecção- dispersão para calor e nem transporte de solutos.

O modelo HYDRUS-1D originou-se através do desenvolvimento do programa UNSATCHEM (Simunek et al., 1996), que faz parte de um dos modelos com aplicação especificamente química para simular o transporte de contaminantes. A programação foi em linguagem FORTRAN para funcionar no ambiente Microsoft Windows com a finalidade de simplificar a resolução de problemas mais complexos que representam o fluxo e transporte do contaminante nas águas subterrâneas, o que permite também visualizar graficamente os resultados finais simulados.

O balanço de massa é usado para descrever a mistura dinâmica dentro da matriz, tendo a possibilidade de se escolher o fluxo na base e no topo de cada sub-região de acordo com o problema em questão. O fluxo pode ser simulado para solos uniformes e não uniformes para um

determinado valor de anisotropia local, como também podem ser direcionados para um plano vertical e horizontal ou num espaço de três dimensões. Exibindo simetria radial em torno de um eixo vertical ou em uma região de três dimensões.

O modelo apresenta várias possibilidades de cenários em relação à geometria do solo, aos tipos de materiais que compõem as diferentes camadas, situações temporais da simulação e do cálculo computacional (discretização de tempo), condições iniciais e condições de contorno para o fluxo, e permitindo emprego de cinco modelos para a função de retenção de água no solo (Brooks & Corey, van Genuchten, Vogel & Císlerová, Kosugi, Durner,) podendo considerar ou não as condições de histerese durante o cálculo computacional, sendo esta hipótese apenas para o modelo hidrológico de van Genuchten-Mualem.

O modelo permite simular as propriedades hidráulicas do solo incluindo precipitação e as condições de contorno de Run-off (permite analisar a capacidade de armazenamento de água no solo); Surface Layer (permite simular o considerando uma lamina de água por cima da superfície) e evapotranspiração (ET). A condição de contorno inferior e pressão constante e variável, fluxo constante e variável drenagem livre, drenagem horizontal, Deep drainage (permite o cálculo do fluxo vertical tendo em conta a posição do aquífero) e o Seepage face (a água deixa a zona saturada através deste ponto sem acumular na superfície inferior) ponto de infiltração, solução numérica é baseada no método dos elementos finitos da equação de Richards.

São calculados para cada fluxo no domo o erro de balanço de massa (equação 43) e o equilíbrio de água para várias sub-regiões pré-selecionadas no domínio do fluxo. Essas informações do balanço hídrico para cada sub-região consistem no volume efetivo de água ou acumulado para cada sub-região (V) e da taxa do fluxo (O) [LT^{-1}] de entrada e saída em cada sub-região (equação 44 e 45). Na equação (45), a fórmula que indica o somatório é usada para todos os elementos dentro da sub-região. O modelo não se refere a um erro absoluto de volume de água dentro do domo do fluxo, mas sim o valor máximo para duas quantidades. A primeira quantidade representa a soma para alterações absolutas da umidade de água para todos os elementos e a segunda, a soma da quantidade para valores absolutos de todos os fluxos de entrada e saída no domo do fluxo.

$$\varepsilon_a^w = V_t - V_0 + \int_0^t T_a dt - \int_0^t (q_0 - q_N) dt \quad (43)$$

Em que: V_t e V_0 são volumes de água dentro do fluxo no domo

$$V = \sum_e \Delta x_i \frac{\theta_i + \theta_{i+1}}{2} \quad (44)$$

$$O = \frac{V_{new} - V_{old}}{\Delta t} \quad (45)$$

Em que: θ_i e θ_{i+1} umidade da água nos nós no elemento, Δx_i número do elemento, V_{new} e V_{old} volume da água dentro das subregiões computacionais em níveis de tempo anteriores e atuais.

A componente-x (espaço) dos fluxos nodais (n) podem ser computadas para cada nó segundo a equação (46). O fluxo nodal é calculado através da equação de Darcy para cada nível do tempo e espaço tendo em conta as alturas do líquido (pressão capilar) e a umidade adicionada ao limite de profundidade durante toda a simulação. A estrutura final na determinação da equação depende acima de tudo do fator de peso no tempo ϵ , implícito ($\epsilon = 0$) ou explícito ($\epsilon = 1$).

$$\begin{aligned} q_1^{j+1} &= -k_{1+\frac{1}{2}}^{j+1} \frac{h_2^{j+1} - h_1^{j+1}}{\Delta x_i} + 1 \\ q_1^{j+1} &= \frac{-k_{1+1/2}^{j+1} \left(\frac{h_2^{j+1} - h_1^{j+1}}{\Delta x_i} + 1 \right) \Delta x_{i-1} - k_{i-1/2}^{j+1} \left(\frac{h_2^{j+1} - h_1^{j+1}}{\Delta x_i} + 1 \right) \Delta x_i}{\Delta x_{-1} + \Delta x_i} + 1 \\ q_1^{j+1} &= -k_{i+1/2}^{j+1} \left(\frac{h_2^{j+1} - h_1^{j+1}}{\Delta x_{N-1}} + 1 \right) - \frac{\Delta x_{N-1}}{2} \left(\frac{\theta_N^{j+1} - h_N^{j+1}}{\Delta t} + S_N^j \right) \end{aligned} \quad (46)$$

A malha do elemento finito é calculada ou construída dividindo o perfil do solo em elementos lineares, cujo tamanho é definido pelas coordenadas-x para nós que formam as extremidades dos elementos. Os outros elementos devem ter aproximadamente o mesmo tamanho. As dimensões dos elementos são dependentes das propriedades hidráulicas do solo.

No Brasil vários autores desenvolveram estudos utilizando o modelo HYDRUS. Cota (2000) faz um levantamento das características do funcionamento comparando vários programas computacionais que permitem o fluxo de água quanti-quantitativo vertical e horizontal; Finotti (2007) fez levantamento de vários modelos computacionais dentre estes o HYDRUS apresenta vantagens na avaliação do impacto quantitativo das estruturas de drenagem compensatórias; Chaves (2009) estudou a sensibilidade do modelo HYDRUS-1D aos parâmetros hidráulicos do solo em diferentes texturas, o modelo apresentou maior sensibilidade sobre o solo argiloso seguido pelo solo arenoso. Pinho (2009) testou o modelo HYDRUS-1D na simulação de teores de água, nitrato e potássio em latossolo vermelho, amarelo e nitossolo vermelho, estudos demonstraram bom desempenho do modelo para a dinâmica de

água e do potássio no solo; Batalha (2011) estudou o fluxo vertical e o transporte de fosfógeno através da condição atmosférica “Run off” pelo modelo HYDRUS 1D. Lucas (2012) avaliou por meio do modelo HYDRUS-2D o dimensionamento do Bulbo molhado na irrigação por gotejamento tendo este bem desempenhado. Toma (2012) avaliou o modelo HYDRUS-1D a partir da comparação das umidades do solo medidas “in situ” por sensores (water content Reflectometer), e avaliou a capacidade deste modelo em relação a formação de “Run off” nos solos com altos valores de condutividade hidráulica em três coberturas vegetais distintas (sistemas orgânico de plantio de tomate, sistemas agro-florestais e capoeira). O modelo HYDRUS-1D, obteve resultado satisfatório com relação aos valores simulados de “Run off” e de infiltração de água, mostrando que nos solos estudados por apresentarem valores elevados de k a infiltração de água no solo foi também alta, reduzindo os valores de “Run off” a intervalos que não oferecem risco de erosão por enxurrada nas áreas estudadas. Nimmer et al., (2009) monitoraram durante 10 meses o nível de lençol freático devido à infiltração de água através de uma bacia de infiltração, os dados observados foram validados e calibrados para o modelo Hydrus-2D. Os autores observaram que o modelo apresenta elevada sensibilidade ao aumento da condutividade hidráulica acelerando a formação de domo na zona saturada, houve bom ajuste entre os resultados simulados pelo modelo em relação aos resultados obtidos experimentalmente, para o tempo e magnitude no aumento do lençol freático nos três eventos estudados.

Thompson et al., (2010) montaram diferentes tipos de cenários de modo a avaliar o efeito da variação dos parâmetros hidrogeológicos em recarga de aquífero por meio de bacias de infiltração localizadas em solos franco arenosos e franco argilosos para região de Wisconsin, os resultados foram obtidos através de simulações feitas pelo modelo HYDRUS -2D e depois comparados com dados experimentais, com objetivo de validar o modelo numérico. Este estudo tinha como finalidade facilitar e orientar os gestores que utilizam como estrutura bacia de infiltração para a seleção de locais que melhor se adequam à construção desta estrutura.

2.4.2 CHEMFLO

O CHEMFLO é um modelo de fluxo não saturado e unidimensional (Nofziger et al., 1989) desenvolvido pela Oklahoma State University, permite a simulação do movimento de água e de contaminantes na zona parcialmente saturada considerando algumas reações de transformação dos contaminantes. O movimento de água é modelado usando a equação de Richards e o transporte químico é modelado por meio da equação de dispersão-convecção. As equações são resolvidas numericamente para uma dimensão de fluxo e transporte utilizando o método de diferenças finitas. Considera as propriedades químicas e a do solo como homogêneas de acordo com a profundidade.

O movimento de água é simulado dentro de colunas de comprimento finito para condições uniformes e não uniformes. Apresenta condição de limite superior para precipitação, potencial mátrico, densidade de fluxo e potencial mátrico em condições constantes, a condição de limite inferior é dada para potencial mátrico, drenagem livre e densidade de fluxo. Estas condições são simuladas considerando os parâmetros constantes. A condição de limite inicial não uniforme permite a simulação em diferentes tamanhos de perfil considerando conjuntamente a opção de potencial mátrico com umidade volumétrica. O modelo apresenta a opção de simular uma lâmina de água por cima da superfície através do potencial mátrico, quando o solo se encontra saturado o modelo considera que a condição potencial constante é igual à zero.

Apresenta quatro modelos de equações para representação dos parâmetros do solo, dentre esses os modelos de van Genuchten e Brooks-Corey usados tanto para a condutividade hidráulica como para a curva de retenção, o modelo de Gardner e de Simmons para o cálculo da curva de retenção. O modelo permite como dados de entrada os parâmetros para cada modelo de equação escolhida pelo usuário, não apresenta um modelo interno pedo transferência que ajuste os modelos para as características do solo.

A solução numérica para equação de Richards é feita pelo método das diferenças finitas da derivada explícita temporal, o processo de interação de massa é baseado no método proposto por Célia et al., (1990). A solução da equação de Richard é baseada num sistema de equações simultâneas que são resolvidas para cada intervalo de tempo. É aplicada uma equação para cada ponto da malha em profundidade.

O modelo calcula o erro do balanço de massa (equação 47) como forma de demonstrar ao usuário, a eficiência dos resultados simulados,

sendo válido quanto menor for o erro de balanço de massa, que por sua vez é calculado através da diferença entre a água armazenada dentro do solo (para o tempo inicial e final), a quantidade de água que entra no solo e a quantidade de água que sai do solo.

$$\text{MBE}_w = \int_0^L \{ \theta(z, t) - \theta(z, t - \Delta t) \} dz - \left\{ \int_{t-\Delta t}^t \mathbf{q}(0, t) dt - \int_{t-\Delta t}^t \mathbf{q}(L, t) dt \right\} \quad (47)$$

A primeira integral da equação 47 representa a água armazenada dentro do solo entre o tempo $t - \Delta t$ e o tempo t . a segunda integral representa a quantidade de água que entra no solo em $z = 0$; o terceiro termo representa a quantidade de água que sai do solo em $Z=L$.

Vários estudos foram desenvolvidos usando o modelo CHEMFLO. Sauveur (1999) estudou a concentração e o transporte de fósforo na zona parcialmente saturada. Jackson et al., (2004) estudaram as fontes potenciais e distribuição do perclorato nas planícies da região do Texas e concluíram que fluxo e o transporte não afetam a migração do perclorato na zona parcialmente saturada. Carlos et al., (2007) estudaram variedades de modelos computacionais e suas aplicações, através de vários casos de estudo demonstram que o modelo é de fácil aplicação, apresenta dificuldades em simular problemas que apresentam valor de umidade saturada muito elevada. Rossi et al., (2012) estudaram o efeito de armazenamento e infiltração do escoamento superficial por meio de profundidade do solo e velocidade do fluxo de água.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

Esta seção está organizada em 5 etapas: 1) Apresentação dos parâmetros hidráulicos e hidrológicos da trincheira de infiltração; 2) Descrição dos parâmetros de entrada no modelo HYDRUS-1D e CHEMFLO; 3) simulação dos modelos à partir da trincheira de infiltração até a zona saturada; 4) Comparação entre os valores simulados e observados; 5) Desenvolvimento de matriz de avaliação dos programas destinados a simular o desempenho de estruturas de controle alternativo da drenagem urbana.

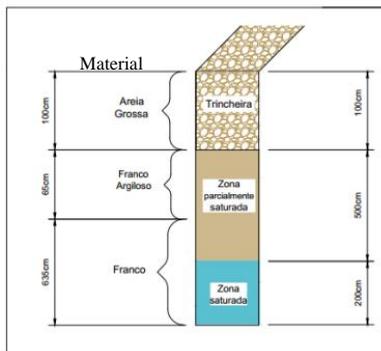
3.1 MODELOS CONCEITUAIS DA TRINCHEIRA DE INFILTRAÇÃO

A trincheira de infiltração é um elemento de controle da drenagem urbana que visa a infiltração rápida das águas de drenagem no perfil do solo levando as águas até a zona saturada se o volume de água for suficiente para tal.

O modelo conceitual desenvolvido para representar a trincheira é apresentado na Figura 9. O perfil do solo foi considerado como apresentando três camadas distintas. Todo o perfil foi considerado como sendo poroso sem a presença de rocha. A trincheira se localiza na primeira camada em contato direto com a atmosfera recebendo diretamente o escoamento superficial. Suas características são de material granulometria grossa. As demais camadas foram consideradas como solo sendo a segunda camada correspondente à zona parcialmente saturada e a terceira camada saturada, simulando um aquífero livre. A base da segunda camada permite livre drenagem do fluxo de água para a terceira camada. Não foi considerado o transporte de contaminantes, foi simulado exclusivamente o fluxo vertical.

A simulação desse modelo conceitual foi testada pela aplicação dos modelos computacionais HYDRUS-1D e CHEMFLO, desenvolvido por Simunek et al., (1998) e Nofziger et al., (2000). Aplicação desses programas foi privilegiada por se tratarem de modelos facilmente encontrados e por serem programas livres.

Figura 9: Modelo conceitual da trincheira de infiltração e características originais do perfil do solo



Obs: Não foi considerada a escala

Fonte: Autora

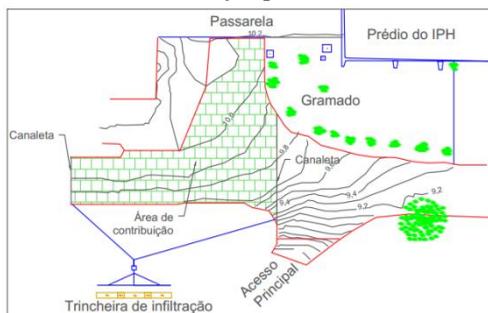
A avaliação dos programas foi realizada a partir de uma trincheira de infiltração experimental desenvolvida por Souza (2002), cujos dados de monitoramento foram disponibilizados para o presente trabalho. De acordo com os dados da trincheira, o modelo conceitual foi ajustado como apresentando na figura 9, a 1ª camada (trincheira de infiltração) apresenta 100 cm de profundidade e é constituída por areia grossa com granulometria entre 0,2 a 0,5 cm, a 2ª camada (zona parcialmente saturada) é constituída por material franco-argiloso (profundidade de 125cm a 165cm) e por material franco que vai até a base do perfil, em que se encontra a 3ª camada (zona saturada).

3.2 TRINCHEIRA DE INFILTRAÇÃO

3.2.1 Características hidráulicas, hidrológicas e de dimensionamento da trincheira em estudo

A trincheira que serviu de base para este trabalho foi construída por Souza (2002), em uma das áreas do IPH-UFRGS (Instituto de Pesquisas Hidráulicas - Universidade Federal do Rio grande do sul) em Porto Alegre. Recebia a contribuição de uma área de 450m², compreendida por um estacionamento pavimentado em paralelepípedo e ocupava uma área útil de 7,2 m² como mostra a figura (10).

Figura 10: Área de contribuição para a trincheira



Fonte: Souza (2002).

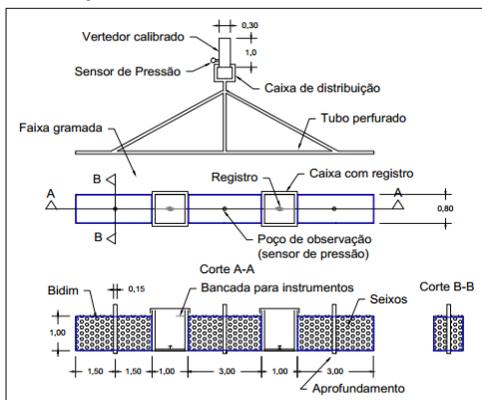
O projeto da trincheira é apresentado na figura (11) e suas dimensões são: 9m de comprimento, 0,8m de largura, com profundidade de 1m. Seu dimensionamento foi feito com base na metodologia descrita por Jonasson (1984) e Urbonas e Stahre (1993) que utilizam o método denominado “rain-envelope-method”, o seu princípio se encontra descrito no item 2. Souza (2002) utilizou o coeficiente de escoamento de 0,57 para a área contribuinte pela baixa declividade da área de contribuição (1,6%) para um período de retorno de 5 anos.

A trincheira foi instrumentalizada com dois poços de monitoramento localizados dentro dela para medir o acúmulo de água através do nível de água nos poços, um vertedor triangular equipado com sensor de nível para medir a vazão afluyente à trincheira e um poço instalado a 1 m de distância da trincheira para leitura da umidade através de sonda de nêutrons.

Foi utilizada para o enchimento da trincheira de infiltração seixo rolado que apresentou 38% de porosidade, Souza (2002) usou para o cálculo da curva IDF a equação (48) ajustada para o posto do IPH (1964-1983).

$$i_{max} = \frac{509,859.7^{0.196}}{(t+10)^{0.72}} \quad (48)$$

Figura 11: Projeto da trincheira



Fonte: Souza (2002)

As tabelas 6 e 7 apresentam as características da textura do perfil do solo onde foi construída a trincheira e os valores referentes ao peso específico e à porosidade.

Tabela 6: Perfil do solo no local de instalação da trincheira

Prof. (cm)	Argila (%)	Silte (%)	Areia (%)	Solo
0	34.64	17.3	48.04	Franco-argiloso-arenoso
35	56.04	12.2	31.74	Argiloso
90	44.83	27.5	27.66	Argiloso
125	30.49	36.6	32.93	Franco-argiloso-arenoso
165	23.21	41.4	35.42	Franco

Fonte: Souza (2002)

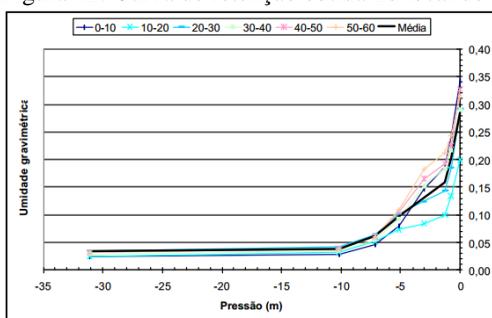
Tabela 7: Peso específico e porosidade do solo no local de implantação da trincheira

Profundidade	$\rho(g/cm^3)$	Porosidade (%)
0-10	1,64	45,6
10-20	1,66	34,2
20-30	1,38	42,1
30-40	1,30	45,2
50-60	1,26	48,8

Fonte: Souza (2002).

A condutividade hidráulica foi medida pelo método de poço invertido, Souza (2002) adotou no seu estudo o valor de infiltração referente à condutividade hidráulica saturada entre o mínimo e o máximo obtido nos ensaios de caracterização tomando então o valor de 30 mm/h. A curva de retenção foi obtida a partir de amostras indeformadas do solo no local de implementação da trincheira coletadas em triplicata a cada 10 cm, até a profundidade de 60 cm. A curva de retenção do solo foi obtida a partir do ensaio com panela de pressão na qual foi aplicada uma pressão inicial referente a 10 cm. A figura (12) apresenta a curva de retenção média para cada profundidade e a curva média de todo ensaio, obtidas no local de instalação da trincheira.

Figura 12: Curva de retenção obtida no local de instalação da trincheira



Fonte: Souza (2002)

A umidade do solo foi medida pela utilização de uma sonda de nêutrons. As medições foram feitas em uma única vertical localizada 200 cm a jusante da trincheira em três pontos na vertical (30 cm, 70 cm e 120 cm). As medições de umidade efetuadas entre Outubro de 2001 e Fevereiro de 2002 apresentam valores entre 11,3% e 20,4%, estando à média em 15,6%. Estes valores de umidade correspondem a pressões de cerca de -550 cm para solo seco e a -100 cm para solo úmido (Souza, 2002).

A vazão de entrada foi medida a partir de o vertedor triangular calibrado em laboratório e colocado a montante da trincheira. O vertedor apresenta um ângulo central de 90 graus e altura de 15 cm construído em chapa de alumínio de 0,3cm de espessura, colocado em uma caixa de acrílico de 100 cm de comprimento 30 cm de largura e 30 cm de altura, com conexão com um poço no qual estava o sensor de pressão. A curva de calibração do vertedor é representada pela equação (49).

$$y = 0.019x^{2.12} \quad (49)$$

Ao longo do tempo de ensaio da trincheira, monitorada conforme documentado por Souza (2002) , foram registrados 9 eventos de precipitação, dos quais 4 foram simulados nesta dissertação. As características dos eventos simulados são apresentadas na tabela 8.

Tabela 8: Características da chuva e dos eventos observados na trincheira

Evento	Data	Chuva				Trincheira			
		Início (hh:mm)	Fim (hh:mm)	Duração (d h:mm)	Ptotal (mm)	Início	Fim	Duração (d h:mm)	Nível máximo (mm)
1	28/09/2001	00:30	07:10	6:40	13,8	05:30	09:22	07:38	610
2	29/09/2001-01/10/2001	23:00	02:00	24 3:00	87	21:00	03:29	2 01:56	960
3	10/11/2001-11/11/2001	02:30	23:55	1 21:25	36,4	21:20	01:04	13:23	930
4	25/11/2001-28/11/2001	23:00	02:55	3 3:55	54,4	19:50	04:15	09:35	910

Fonte: adaptado de Souza (2002).

3.3 MODELAGEM DA TRINCHEIRA COM O MODELO HYDRUS-1D

O HYDRUS-1D é um modelo que apresenta vários cenários possíveis de modelagem, sendo a infiltração de água superficial uma das opções. O modelo conceitual da trincheira pode ser simulado com algumas adaptações. o modelo HYDRUS-1D requer como dados de entrada parâmetros geométricos, parâmetro de tempo e características hidrológicas e hidráulicas.

Parâmetros geométricos: tendo em vista que o problema em estudo trata do impacto quantitativo da trincheira de infiltração na zona parcialmente saturada e na zona saturada, foi montada uma célula de 8000mm de comprimento divididas em três camadas: a primeira camada corresponde à trincheira de infiltração com 1000mm de comprimento, a zona parcialmente saturada com 5000mm e a zona saturada com

2000mm (figura 9). A unidade adotada foi milímetro (mm), devido à necessidade do estudo em se obter uma discretização mais refinada dos elementos das malhas consideradas nas diferentes simulações.

Considerou-se o solo seco para todos os eventos com a pressão inicial variando de -1000 mm para a trincheira de infiltração e -100.000 mm para as camadas abaixo da trincheira, estes valores foram retirados da curva de van Genuchten representada na figura (13).

Parâmetro de Tempo: A unidade de tempo adotada foi minutos. Os valores considerados para o tempo inicial e final foram retirados da tabela 9 referente a cada evento. O intervalo de tempo escolhido para a discretização da intensidade da precipitação foi de 5min de acordo com os dados experimentais de Souza (2002).

Condição de contorno: Para a superfície foi adotada condição atmosférica com escoamento superficial-BC (Run off). Para a condição inferior, foi escolhida drenagem livre, considerando que toda a água que entre na trincheira saturada deva infiltrar e ser conduzida para a zona parcialmente saturada e posteriormente saturada, de modo que não cause o transbordamento na superfície. Esta condição é uma escolha razoável para a magnitude das precipitações simuladas e a profundidade do solo. Entretanto caso fosse necessário simular uma condição de saturação do perfil, o modelo permitiria, bastaria selecionar a condição de contorno inferior adequada. Foi também escolhida esta condição de modo que se pudesse observar a propagação da infiltração até a zona saturada, o que não consta na realidade da trincheira.

Considerou-se não existência de componente vegetal retirando água da matriz do solo, não existência de variações da temperatura e de evaporação na superfície do solo.

Características hidrológicas e hidráulicas: os dados referentes à taxa de precipitação para cada evento foram fornecidos pelo Souza (2002), estes dados são referentes ao monitoramento realizado durante 6 meses na trincheira de infiltração. Não foi considerado chuva antecedente em nenhum dos eventos.

A precipitação na área de contribuição da trincheira foi transformada em vazão afluente à trincheira através do método racional. A vazão afluente à trincheira foi transformada em lâmina de infiltração no intervalo de tempo da discretização devido à necessidade de se adaptar os dados referentes à chuva em altura de lâmina de água, porque é a forma de entrada de água no perfil admitida no modelo HYDRUS-1D. A equação resultante é a (50).

$$H = P \frac{C.A1}{A2} \quad (50)$$

Em que: H: altura da lâmina de água [L]; P: Precipitação [L]; C: coeficiente de escoamento (0,57); A1: área de contribuição que drena para a trincheira [L²]; A2: área da trincheira [L²].

Para o caso da primeira camada que representa a trincheira de infiltração adotou-se os dados de Souza (2002) substituindo o material seixo rolado por areia grossa pelo fato de ter sido detectado uma parcela de material mais fino no material utilizado para construção da trincheira. Partindo da granulometria indicada por Souza (2002) para o material da trincheira e da informação da presença de finos juntamente com o seixo rolado foi utilizada tabela de condutividade hidráulica do Manual de Drenagem de Rodovias (2006) para estimativa da condutividade hidráulica apresentada na tabela 9. Observa-se pela tabela 10 os parâmetros hidráulicos de ajuste do modelo de van Genuchten-Mualem para cada camadas do perfil do solo. As figuras 12 (a, b e c) mostram as curvas de retenção obtidas a partir dos dados das amostras de solo de Souza (2002) ajustadas pelo modelo RETC (Van Genutchen et al., 1991).

Tabela 9: Características físicas do solo da trincheira

Material	Granulometria (cm)	Condutividade hidráulica K (cm/h)
Areia grossa	0,2-0,5	360

Fonte: Calculado a partir do Manual de drenagem de Rodovias, 2006.

Tabela 10: Valores dos parâmetros Hidráulicos do solo para a trincheira conceitual-HYDRUS-1D

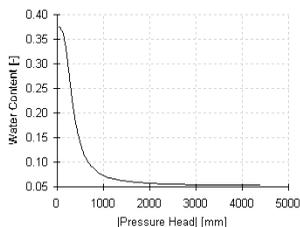
*Mat.	θ_r	θ_s	α (1/mm)	n(-)	k_s (mm/min)
1	,053	0,373	0,0035	,17	60
2	0,078	0,43	0,0011	1,43	0,5
3	0,068	0,42	0,00088	1,50	0,5

θ_r : conteúdo de água residual[v/v]; θ_s : conteúdo de água saturado [v/v]; k_s : condutividade hidráulica saturada; α : constante empírica da equação de van Genutchen[L⁻¹]; n constante empírica da equação

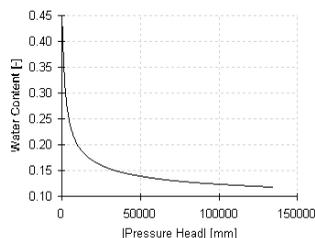
Fonte: Autora através do programa Rosetta.

Figura 13: Curva de retenção dos solos presentes no perfil de implantação da trincheira

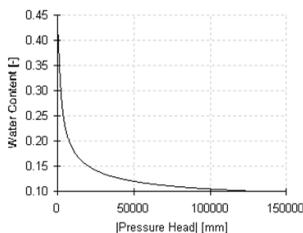
(a) Trincheira de infiltração



(b) Zona parcialmente saturada



(c) Zona saturada



Fonte: Ajustes realizados pela autora com uso do modelo RETC (1991).

3.4 MODELAGEM DA TRINCHEIRA COM O MODELO CHEMFLO

Os dados informados ao modelo foram semelhantes aos dados informados pelo modelo HYDRUS-1D.

Parâmetros hidráulicos: foi usada como condição de contorno superior intensidade da precipitação (Rainfall rate) e como condição inferior drenagem livre. Considerou-se condição inicial de pressão -300 cm para todo o perfil (solo seco). Este valor foi obtido através da curva de retenção (figura 12b) para a situação de solo seco. Considerou-se a profundidade (1m) largura (0,8m) e o comprimento (9m) trincheira, não foram consideradas as paredes laterais.

Parâmetros do solo: escolheu-se a opção de solo finito por permitir a entrada de várias camadas no perfil do solo, e o modelo de van Genuchten tanto para a curva de retenção como para condutividade hidráulica, as camadas do solo foram divididas em três sub-regiões, os parâmetros das curvas de retenção usados foram aqueles apresentados

na tabela 10 com diferença na unidade, para o modelo CHEMFLO os parâmetros representados na tabela 10 foram convertidos em cm/h. A figura (13) mostra a constituição do perfil do solo submetido ao modelo CHEMFLO. O valor do peso específico adotado para as três sub-regiões foi de $1,55 \text{ mg/m}^3$ que é o valor mínimo considerado pelo programa, este valor foi adotado para os três solos, porque os dados obtidos pelo Souza são referentes ao perfil do solo ate aos 60cm.

Parâmetros hidrológicos: A unidade de tempo adotada foi horas, e para a precipitação foi cm. Os valores considerados para o tempo inicial e final foram retirados da tabela 8 referente a cada evento (o tempo final foi alterado de acordo com o evento simulado). Não foi considerada chuva antecedente para os eventos.

Figura 14: Apresentação do perfil do solo submetido ao modelo CHEMFLO

Layer	Thickness (cm)	Conductivity Function	Water Characteristic Function	Organic Carbon (g/g)	Bulk Density (Mg/m ³)
1	100.0	van Genuchten	van Genuchten	0.0	1.55
		K_g (cm/h) = 30.0	θ_g (v/v) = 0.37		
		α (1/cm) = 0.004	θ_r (v/v) = 0.053		
		n = 3.17	α (1/cm) = 0.004		
2	65.0	van Genuchten	van Genuchten	0.0	1.55
		K_g (cm/h) = 4.5	θ_g (v/v) = 0.43		
		α (1/cm) = 0.43	θ_r (v/v) = 0.078		
		n = 1.43	α (1/cm) = 0.43		
3	635.0	van Genuchten	van Genuchten	0.0	1.55
		K_g (cm/h) = 4.5	θ_g (v/v) = 0.42		
		α (1/cm) = 0.41	θ_r (v/v) = 0.068		
		n = 1.5	α (1/cm) = 0.41		

Fonte: A autora a partir do modelo CHEMFLO (2000)

3.5 CALIBRAÇÃO DOS MODELOS

O processo de calibração foi feito para cada um dos modelos de modo que representassem da melhor forma possível os dados monitorados na trincheira. Foi escolhido o evento 2 para calibrar o modelo HYDRUS-1D e o evento 4 para calibrar o modelo CHEMFLO, parâmetros inicialmente fornecidos ao modelo foram apresentados na seção 3.4. A calibração foi conseguida com a variação da condutividade hidráulica da trincheira e do solo abaixo da trincheira (tabela 11).

Tabela 11: Ajuste dos valores de condutividade hidráulica para o modelo HYDRUS-1D

Material e camadas	HYDRUS-1D	CHEMFLO
	k_s Calibrado (mm/min)	k_s Calibrado (cm/h)
1	40	50
2	15	4,5
3	15	4,5

Mat.1- areia grossa; Mat.2-franco argiloso; Mat.3

3.6 COMPARAÇÃO ENTRE OS VALORES SIMULADOS E OBSERVADOS

A verificação da aproximação da simulação como representação da trincheira experimental foi feita através de comparação dos dados da trincheira experimental (Souza, 2002) e os valores fornecidos pela simulação nos programas. No caso HYDRUS-1D os resultados comparados foi o volume no interior da trincheira dividido pelo valor de porosidade de 0,5 (retirado de Souza, 2002) com os níveis de efetivos na trincheira monitorada. Para CHEMFLO os resultados comparado foram de volume de saída da trincheira acumulado e o volume de saída acumulado na trincheira monitorada. Estes parâmetros melhor representam o fluxo da água no interior da trincheira, fornecendo uma boa alternativa para comparação entre o caso real e a simulação, permitindo assim a avaliação do desempenho dos programas. A saturação da célula foi observada por meio da curva de profundidade-umidade para o caso do HYDRUS-1D e umidade- distância para o caso do CHEMFLO para cada evento.

Os estimadores estatísticos de erro apresentados por Wilmont et al. (1985) foram usados para comparação entre simulação e dados monitorados: erro percentual (**PBIAS**), razão dos desvios (**RD**) e o coeficiente de Eficiência de Nash-Sutcliffe (**NSE**). Estes estimadores foram obtidos através das equações (51, 52 e 53). O coeficiente de Eficiência de Nash-Sutcliffe (**NSE**), compara os valores simulados com o valor médio obtido experimentalmente. Deste modo, os valores variam entre $-\infty$ e 1, sendo a unidade o valor para o qual os dados simulados se adequam perfeitamente às observações. Valores entre 0 e 1 são geralmente tidos como aceitáveis e valores menores ou igual a que zero ($NSE \leq 0$) indicam que o valor observado é melhor que o simulado (Moriassi et al., 2007). **RD** descreve dispersão existente entre os valores observados e os calculados pelo programa. Moriassi et al., (2007) sustentam que quanto menor for o **RD** melhor é o desempenho do modelo. O **PBIAS** é um índice de erro que quantifica o desvio entre os dados simulados e observados nas próprias unidades da variável em estudo, mostra o quanto a simulação subestima ou superestima a medida em relação ao valor obtido experimentalmente.

$$\mathbf{PBias} (\%) = \left[\frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)}{\sum_{i=1}^n (y_i)} * 100 \right] \quad (51)$$

$$\mathbf{NSE} = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2}{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2} \quad (52)$$

$$\mathbf{RD} = \frac{\sqrt{\sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2}}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}} \quad (53)$$

Em que:

\hat{y}_i : Dado simulado pelo programa;

y_i : Dado observado;

\bar{y} : Média dos valores observados;

Valores negativos de ($PBIAS < 0$) superestimam os valores simulados e os valores positivos ($PBIAS > 0$) subestimam. Moriassi et al., (2007) definiram como intervalo aceitável $PBIAS = +/- 25\%$; $NSE > 0,50$ e $RD < 0,70$ na avaliação do método de análise comparativa entre os valores simulados e experimentais obtidos através do modelo distribuidores para a simulação do fluxo superficial em uma bacia. A tabela (14) mostra a classificação de desempenho das variáveis estatísticas.

Tabela 12: Classificação de desempenho de variáveis estatísticas através de modelos distribuidores com intervalos de simulação mensal

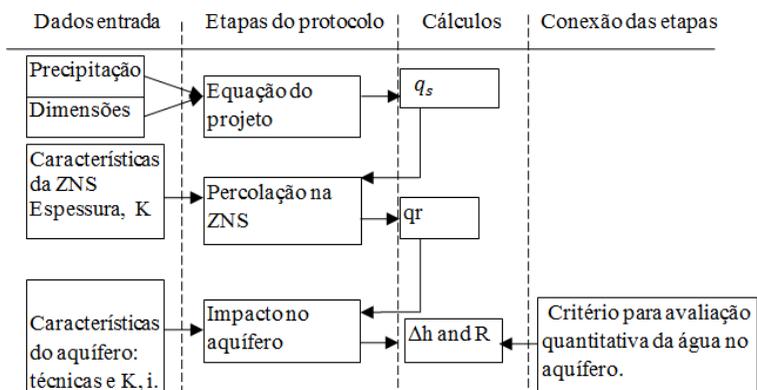
Classificação	RD	NSE	PBIAS(%)
Muito bom	$0,0 \leq RD \leq 0,50$	$0,75 < NSE \leq 1$	$PBIAS < \pm 10$
Bom	$0,50 < RD \leq 0,60$	$0,65 < NSE \leq 0,75$	$\pm 10 \leq PBIAS < \pm 15$
Satisfatório	$0,60 < RD \leq 0,70$	$0,50 < NSE \leq 0,65$	$\pm 15 \leq PBIAS < \pm 25$
Insatisfatório	$RD > 0,70$	$NSE \leq 0,50$	$PBIAS \geq \pm 25$

Fonte: Moriasi et al., (2007).

3.7 DESENVOLVIMENTO DE MATRIZ DE AVALIAÇÃO DOS PROGRAMAS DESTINADOS A SIMULAR O DESEMPENHO DE ESTRUTURAS DE CONTROLE ALTERNATIVO DA DRENAGEM URBANA

A matriz do desempenho dos programas foi desenvolvida com base nos critérios que melhor apresentem o funcionamento da trincheira experimental (estrutura alternativa da drenagem urbana) e que respondam ao protocolo quantitativo de avaliação de impactos ambientais provocados pelas estruturas de controle da drenagem urbana no ambiente subterrâneo. O protocolo de avaliação das estruturas de controle da drenagem urbana proposto por Finotti (2007) tendo em conta as características hidrológicas e hidráulicas do dimensionamento e/ou do funcionamento da estrutura é apresentado na (figura 18). A criação da matriz de avaliação de impactos ambientais está vinculada à etapa de conexão entre as outras fases especificamente para o desempenho dos programas relativamente ao fluxo da água. O desempenho em relação ao transporte de contaminantes será desenvolvido em trabalhos futuros. Os critérios utilizados para avaliação do desempenho dos programas se baseou em: adequação, abrangência, precisão, clareza e facilidade de comunicação e utilização,

Figura 15: protocolo para avaliação quantitativa



ZNS: zona não saturada, Δh : variação do nível do aquífero; R: raio do domo no aquífero; K: condutividade hidráulica; i: gradiente hidráulico, q_s : Fluxo de saída na trincheira q_r : fluxo de percolação na ZNS; h: altura de água na trincheira.

Fonte: Finotti, 2007

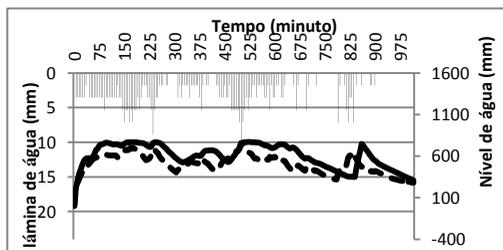
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 CALIBRAÇÃO DOS PROGRAMAS HYDRUS -1D E CHEMFLO

A figura 16 traz o hietograma do evento e os hidrogramas com a variação da vazão de saída da trincheira para o monitoramento e a simulação. A lâmina de água para o evento 2 apresenta nos instantes iniciais certa uniformidade porém, apresenta alguns pequenos intervalos de tempo sem lamina de água (não apresenta chuva) e com alguns valores elevados atingindo um máximo acima dos 10mm. As curvas que apresentam as vazões de saída para a trincheira experimental e para a trincheira simulada demonstram um comportamento semelhante, coincidindo para alguns pontos. Nos períodos de tempo sem chuva fazem com que o modelo não responda de imediato aos picos elevados de chuva, fazendo com que haja uma pequena diferença na resposta dos pontos com elevada precipitação.

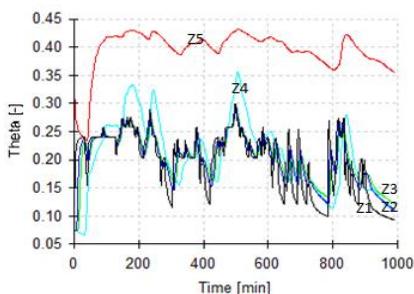
As variáveis estatísticas usadas para comparação entre os valores observados e simulados são apresentadas na tabela 14 e mostram que o PBias apresenta valor negativo igual a -16,8%, que significa que a simulação subestima a vazão de saída, mas que ainda assim o valor seria aceitável de acordo com os critérios de Moriasi et al. (2007). Os valores de ENS e RD apresentam-se também dentro das condições sugeridas por Moriasi et al.,(2007). O evento foi considerado calibrado depois de modificações na condutividade hidráulica. A calibração manual do modelo é bastante trabalhosa. Em trabalhos futuros pode ser testado algum esquema de otimização da calibração o que pode melhorar a qualidade dos resultados.

Figura 16: Hidrograma observado e simulado para o evento 2- Modelo HYDRUS-1D



A figura 17 mostra que o conteúdo volumétrico de água na trincheira atinge a saturação referente ao valor de 37%. A figura 19 mostra o perfil do solo saturado, pela elevada infiltração de água atingindo o aquífero. A forma de zig zag observada nos perfis de umidade pode estar indicando uma condutividade hidráulica elevada para o solo abaixo da trincheira o que o faz responder rapidamente a ciclos de chuva e períodos secos. Para o tempo que apresenta precipitação maior, observa-se um escoamento superficial (figura 18) com valores insignificantes. A condição de contorno inferior escolhida “drenagem livre” para o modelo HYDRUS-1D além de mostrar a infiltração da água em todo o perfil considera que toda água que chega até a base do perfil deve ser drenada ou removida e não acumulada na base do perfil, o que faz com que não se observe o processo de ascensão da água da zona saturada para a trincheira. Esta escolha conseguiu simular adequadamente o comportamento da água no perfil, visto que representa bem a situação real de implantação da trincheira.

Figura 17: Conteúdo volumétrico de água no perfil da trincheira-Modelo HYDRUS-1D



Z1=0mm; Z2=250mm; Z3=400mm; Z4=880mm; Z5=1035mm

Figura 18: Escoamento superficial-Modelo HYDRUS-1D

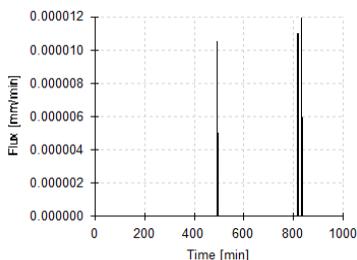
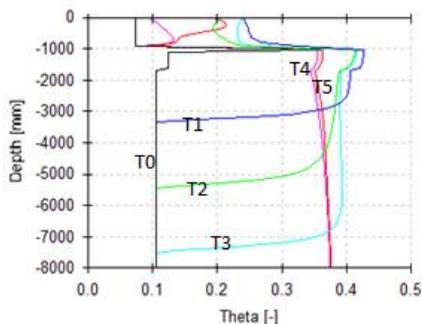


Figura 19: Variação do perfil da trincheira-Modelo HYDRUS-1D



T0=0min; T1=199min; T2=398min; T3=597min; T4=796min; T5=995min

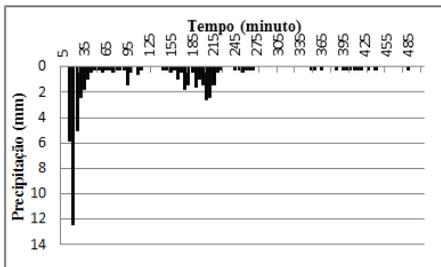
Representa-se na figura 20 (a) a chuva para o evento 4 e a na figura 20 (b) a variação da lâmina de água de saída acumulada na trincheira experimental e na simulação com o modelo CHEMFLO, utilizado para calibração. O modelo não permite a entrada de chuvas com variação temporal, apenas constantes. Desta forma para esta simulação foi utilizado o valor médio da chuva como sendo o somatório dos blocos de chuva durante toda sua duração dividido pela duração da chuva. Este valor foi considerado constante ao longo de toda a simulação.

A curva simulada pelo modelo apresenta o mesmo comportamento com a curva da trincheira experimental na maior parte do tempo e com valores muito próximos, observa-se sobreposição das curvas para alguns pontos. Os valores das curvas se aproximam porque existe um equilíbrio entre a duração da chuva com o tempo de funcionamento da trincheira, o modelo CHEMFLO ao considerar a intensidade da chuva constante não contabiliza os momentos sem chuva o que faz com que os resultados sejam aproximados aos observados na trincheira considerando que mesmo sem chuva a trincheira funciona até que a água contida no seu interior termine. Mostra-se através da figura 21 o conteúdo volumétrico de água no perfil da trincheira para o tempo final do evento 8,4 horas, verifica-se que o conteúdo volumétrico para todo o perfil da trincheira (100cm) chega próximo ao valor limite do conteúdo volumétrico saturado do meio (37%). Para a camada abaixo da trincheira observa-se elevação da umidade para 43% a 41%, entre o perfil de 320 a 800cm o conteúdo volumétrico diminui para 10%, indicando que a frente de molhamento não atingiu esta camada para o tempo indicado na simulação que foi de 8,4 horas. O modelo não

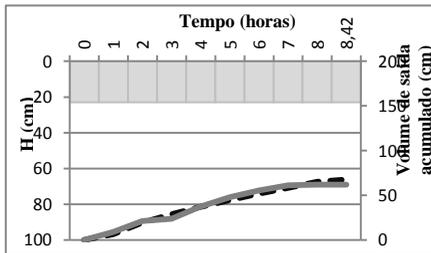
permite simular a duração da propagação da chuva no perfil do solo por intervalos diferentes do tempo de duração da chuva, o que se constitui em uma grande limitação. Pela figura 22 observa-se que muito antes de 1 hora de chuva a trincheira se satura e permanece saturada até o final da simulação.

Figura 20: Representação da chuva para o evento 7 (a) e variação do volume de saída acumulado na trincheira experimental para o Modelo CHEMFLO (b)

(a)



(b)



Precipitação total = 13,8mm; Horas = 6,67h; H = 7,37cm.

Figura 21: Conteúdo volumétrico de água no perfil da trincheira-Modelo CHEMFLO

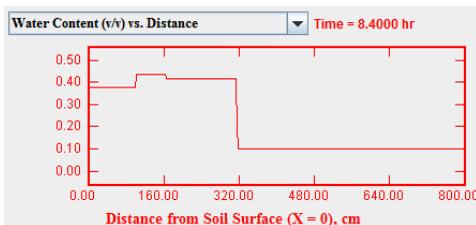
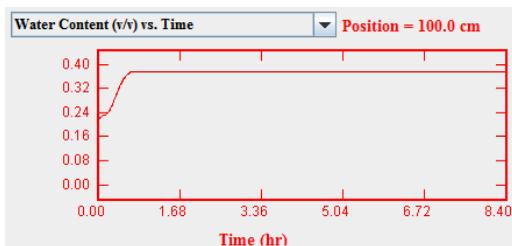


Figura 22: Variação do perfil da trincheira –Modelo CHEMFLO



De acordo com dados disponibilizados por Souza (2002) a duração da chuva para este evento apresenta uma compatibilidade com a duração do funcionamento da trincheira. As variáveis estatísticas usadas para comparação entre os valores observados e os simulados (tabela 13) mostram que o valor positivo para PBIAS demonstra que o modelo superestima os valores observados, NSE e RD apresentam altos índices de concordância e eficiência, dentro das condições impostas por Wilmont et al., (1996) e Moriasi et al., (2007). O uso do volume acumulado como parâmetro de comparação faz com que o erro do volume ou do nível de água na trincheira fique de certa forma mascarado. A curva de variação do volume na trincheira mostra umas descontinuidades em função da chuva variável e na curva da simulação a mudança da declividade da curva é devida à variação do conteúdo volumétrico que varia com o tipo de material considerado no perfil do solo.

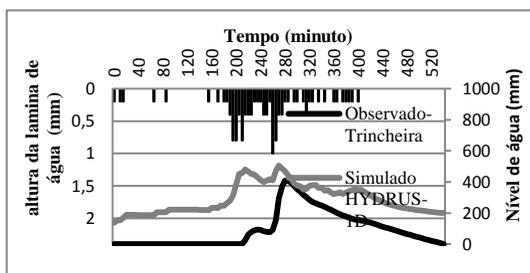
Tabela 13: Comparação dos resultados da altura acumulada de saída entre o evento calibrado com os valores observados na trincheira experimental

Estimadores estatísticos			
Evento	HYDRUS-1D		
2	PBIAS(%)	NSE	RD
	16,8	0,97	0,16
4	CHEMFLO		
	-23,5	0,94	0,24

4.2.SIMULAÇÕES DA TRINCHEIRA DE INFILTRAÇÃO PELO MODELO HYDRUS-1D

Evento 1: observa-se na figura 23 o hidrograma que representa a comparação entre os valores observados com os simulados. A altura da lâmina de água apresenta-se baixa, seguido de longos períodos sem água sem precipitação) de seguida apresenta aproximadamente 4 horas com altura de lamina de água variável. O valor máximo chega a 1mm. A lamina de água apresenta volumes menores em comparação com o do evento de calibração. Exatamente para esta figura pode se observar ainda descontinuidade entre a curva observada com a simulada devido a diferença existente entre o tempo de funcionamento das trincheiras (monitorada e simulada). O modelo responde rapidamente à chuva com aumento do nível na trincheira por que a chuva inserida na simulação já é a chuva efetiva calculada pelo método racional. Como a chuva deste evento tem volumes menores e com mais intervalos sem chuva provavelmente há uma geração de escoamento efetivo menor do que aquele calculado pelo método racional ou seja, na verdade não entrada de água na trincheira. O problema não seria exatamente do modelo mas do método escolhido para transformar a chuva na forma como ela deve ser informada e inserida no programa. Seria uma limitação da forma como o dado de chuva deve ser informado ao programa.

Figura 23: Hidrograma dos valores observados e simulados para o evento 1 para Modelo HYDRUS-1D



Demonstra-se na figura 24 o comportamento do evento 1 considerando o início da simulação quando há início o funcionamento da trincheira, este evento passa a ser chamado de evento 1b. Observa-se que o comportamento das curvas muda significativamente trazendo maior aderência entre os formatos fazendo com que haja uma

diminuição do nível de água de 506,12mm para 440,12mm para os valores simulados. A tabela 14 mostra a variação dos valores do nível máximo e do erro estatístico calculado entre os valores simulados e observados. Nisto constata-se que o nível de água no interior da trincheira e o erro de estimador para o modelo HYDRUS-1D são bastante sensíveis ao tipo de chuva e à sua duração. Lucas et al., (2013) observaram que o erro do nível máximo e a retenção nas áreas da vala de infiltração são sensíveis á calibração para modelagem pelo método de Puls.

Figura 24: Evento 1b – início da simulação coincidindo com funcionamento da trincheira –Modelo HYDRUS-1D

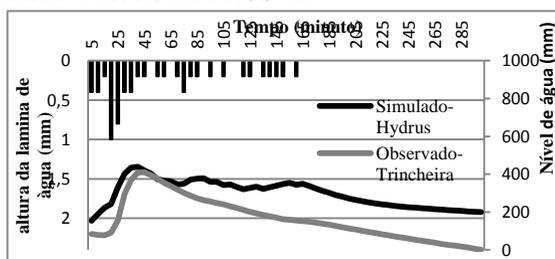
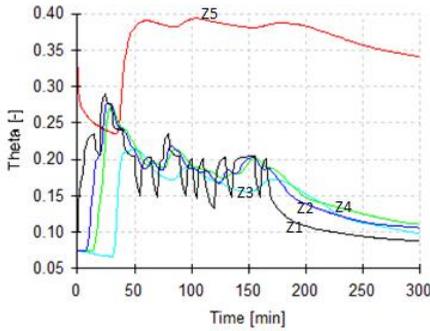


Tabela 14: Avaliação estatística e do nível máximo na trincheira com início da simulação do Evento 1b coincidente com funcionamento da trincheira

Varição	Nível máximo (mm)	PBIAS (%)
Antes do ajuste	506,12	-122
Depois do ajuste	440,12	-82

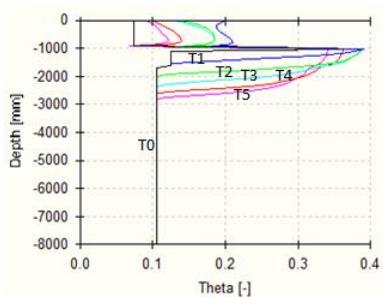
A figura 25 (a) mostra que a umidade volumétrica não atinge o nível máximo de saturação para os nós escolhidos. O nó Z5 que se encontra na vizinhança da mudança do tipo de solo abaixo da trincheira apresenta a umidade elevada no valor de 39%, porque a textura do solo nas camadas abaixo da trincheira é mais fina fazendo com que haja maior absorção de água nestas camadas. A figura 25 (b) mostra que o fluxo de infiltração não atinge a zona saturada devido aos volumes de água infiltrada não serem suficientes para a migração da água até a zona saturada no tempo de simulação.

Figura 25: Conteúdo volumétrico de água no perfil da Trincheira (a) e variação do perfil da trincheira com o tempo (b)-Modelo HYDRUS-1D
(a)



Z1=0mm; Z2=250mm; Z3=400mm; Z4=880mm; Z5=1035mm

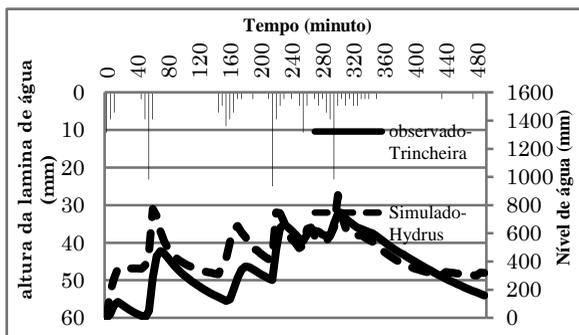
(b)



T0=0min; T1=60min; T2=120min; T3=180min; T4=240min; T5=300min

Representa-se na figura 26 característica da lamina de água submetida ao modelo para o evento 3, observa-se para este evento intervalos muito longos sem água e para um determinado tempo a altura da lamina de água eleva-se significativamente. Observa-se uma sobreposição entre as curvas da trincheira experimental com a simulada o que significa que existe uma semelhança nos resultados. A trincheira real responde aos blocos de chuva iniciais que estão dispersos e que apresentam valores baixos de precipitação, assim como a trincheira simulada observado para o evento 1b. A trincheira simulada mostra elevado retenção de água em seu interior para os primeiros minutos, o que não acontece na trincheira real.

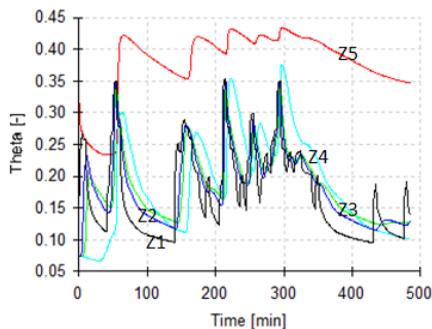
Figura 26: Hidrograma dos valores observados e simulado para o evento 3- modelo HYDRUS-1D



O conteúdo volumétrico representado pela figura 27 (a) atinge a saturação máxima aos 37% para o nó Z4 demonstrando para o ultimo perfil Z5 que se localiza nas camadas abaixo da trincheira (Z5=1035mm) valores de 43% de umidade, nota-se esta diferença devido a diferença de textura no material que compõem as camadas abaixo a trincheira. observa-se pela figura 27 (b) a infiltração de água no perfil do solo atingindo a metade da zona saturada, não chegando à base do perfil. O escoamento superficial acontece nos instantes que T=55minutos, T= 215minutos e T= 295minutos (figura 28), para os instantes em que os pontos de precipitação é elevada.

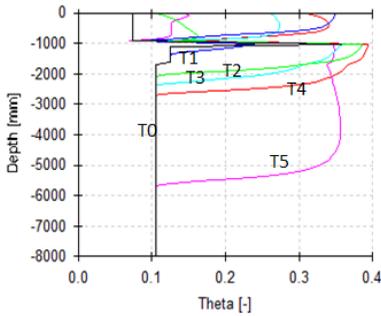
Figura 27: Conteúdo volumétrico de água no perfil da trincheira (a) e Variação do perfil da trincheira com o tempo (b)- Modelo HYDRUS-1D

(a)



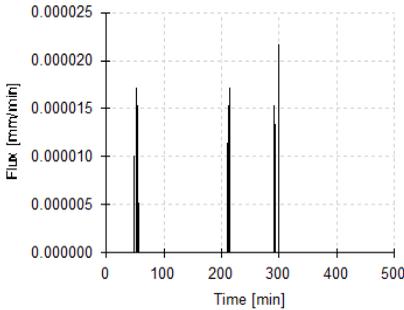
Z1=0mm; Z2=250mm; Z3=400mm; Z4=880mm; Z5=1035mm.

(b)



T0=0min; T1=97min; T2=194min; T3=291min; T4=388min; T5=485min

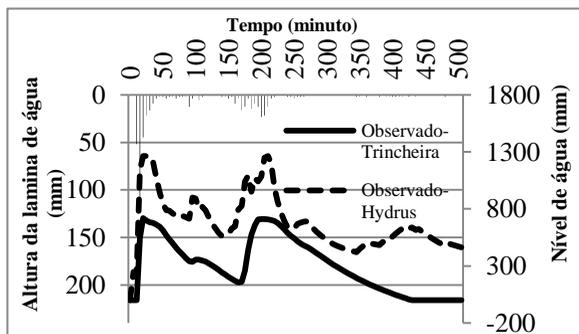
Figura 28: Escoamento superficial-Modelo HYDRUS-1D



Evento 4: o histograma do evento e o hidrograma são representados pela figura 29 com a variação da vazão de saída da trincheira para o monitoramento e a simulação. A lamina de água do evento 4 apresenta grande intensidade de 15 a 25 minutos seguida de um longo período com baixas intensidades por cerca de 2 horas seguida de outro período de cerca de 80 minutos com intensidades baixas. As curvas de níveis de água observado e simulada acompanham a variação da intensidade de precipitação.

Em relação às duas curvas pode-se notar que os picos na trincheira estão simulados adequadamente no programa, as alturas de chuva pequenas fazem o modelo dar uma resposta maior do que o nível na trincheira real, o que deve estar ligado ao fato de ter sido usado o método racional para converter a chuva em lâmina de infiltração na trincheira.

Figura 29: Hidrograma observado e simulado para o evento 4- Modelo HYDRUS-1D



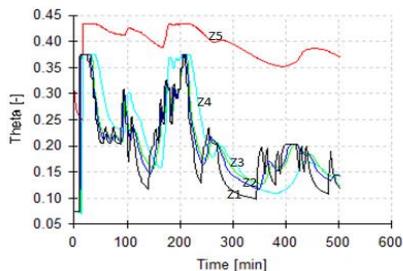
Apresenta-se no gráfico da figura 30 (a) a variação do conteúdo volumétrico ao longo do tempo para profundidades selecionadas. Verifica-se que o conteúdo volumétrico para todo perfil atinge o valor limite referente ao conteúdo volumétrico do solo saturado (dados na tabela 10) que é de 37% para a trincheira e de 43% para o solo abaixo da trincheira. Nos instantes em que a lamina de água é elevada (nos primeiros 40 minutos), esta elevação provoca um escoamento superficial (figura 31) para os instantes em que a lamina de água se encontra muito elevada em função do volume de entrada exceder a capacidade superficial do solo em termos de volume de vazios. Fisicamente há mais água do que superfície de vazios para infiltrar. Souza (2002) atesta nunca ter observado escoamento superficial na trincheira. Esta resposta do modelo deve-se à limitação da condição 1D, que faz com que os volumes devam ser todos transformados em alturas, diferenciando-o com a entrada da trincheira experimental.

A figura 30 (b) contém representadas as curvas de variação do conteúdo volumétrico ao longo da profundidade do perfil da simulação para tempos selecionados. Nestas curvas é possível observar a variação da frente molhamento e a propagação da água dentro do perfil do solo ao longo do tempo. Verificam-se curvas que tendem para a saturação no material mais fino abaixo da trincheira e dentro da trincheira curvas que respondem fortemente à quantidade de entrada da lamina de água. Verifica-se também que o modelo simula de forma bastante adequada os níveis de água dentro da trincheira com intervalos de tempo em que as curvas tem característica de enchimento e outros com característica de esvaziamento da trincheira. Outra observação que pode ser feita em

relação a estas curvas é o volume de água de infiltração chegando a zona saturada na parte inferior (6000mm até 8000mm).

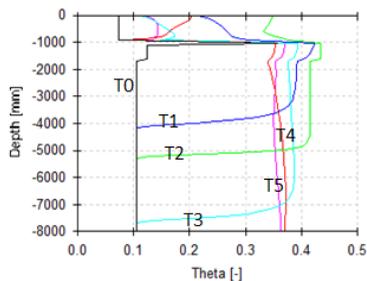
Figura 30: Variação do conteúdo volumétrico de água (a) e Variação do conteúdo volumétrico no perfil da trincheira em relação à profundidade-Modelo HYDRUS-1D

(a)



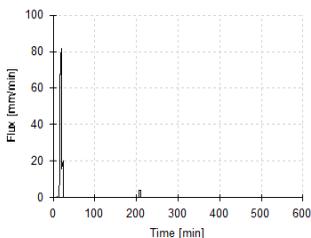
Z1=0mm; Z2=250mm; Z3=400mm; Z4=880mm; Z5=1035mm.

(b)



T0=0min; T1=101min; T2=202min; T3=303min; T4=404min; T5=505min.

Figura 31: Escoamento superficial no perfil da trincheira ao longo do tempo-Modelo HYDRUS-1D

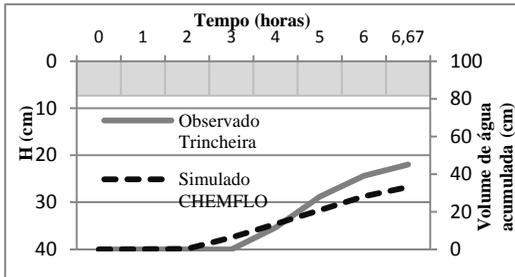


4.3 SIMULAÇÕES DA TRINCHEIRA DE INFILTRAÇÃO PELO MODELO CHEMFLO

Representa-se pela figura 32 relação entre a variação do volume de saída acumulado na trincheira experimental e na trincheira simulada em relação ao tempo e a variação do conteúdo volumétrico de água no perfil da trincheira para o evento 1. A curva simulada pelo modelo apresenta o mesmo comportamento com a curva da trincheira experimental na maior parte do tempo. Os valores das curvas se aproximam sobrepondo-se no tempo de 4 horas. Existe compatibilidade no comportamento entre a representação da chuva e curva de variação de lamina de água de saída acumulada. Souza (2002) afirma que os dados representados pela chuva para o evento 1 foi um dos eventos que apresentou menor intensidade da chuva e com tempo de duração muito curto, o que pode justificar a aproximação entre as curvas. Quanto menor for a intensidade da chuva e o tempo de duração, maior será a eficiência do modelo CHEMFLO, por apresentar condições de entrada de chuva constante, observou-se que esta característica faz com que todos os eventos atinjam o limite da umidade de saturação. O conteúdo volumétrico representado pela figura 33(a) para o perfil da trincheira mostra que para o tempo final do evento (6,67 horas) verifica-se que o conteúdo volumétrico para todo o perfil da trincheira (100cm) chega próximo ao valor limite da porosidade do meio (37%). Para a camada abaixo da trincheira observa-se elevação da umidade para 43% a 41%, muito antes do perfil 320 cm o conteúdo volumétrico diminui para 10% diferentemente do que acontece no evento 4 (usado para calibração), isto acontece devido a diferença no tempo de duração entre os eventos, fazendo com que quanto menor for o tempo de duração da chuva para o evento mas rápido a curva de umidade decresce.

Pela figura 33 (b) observa-se variação do perfil da trincheira que a maior parte do perfil da trincheira chega próximo ao valor limite da porosidade do meio (37%).

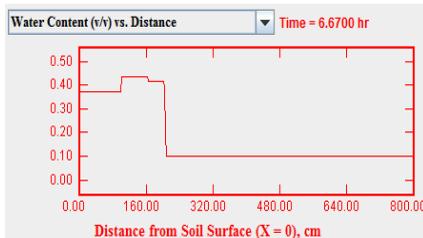
Figura 32: Variação do volume de saída acumulado na trincheira experimental e na simulada pelo Modelo CHEMFLO



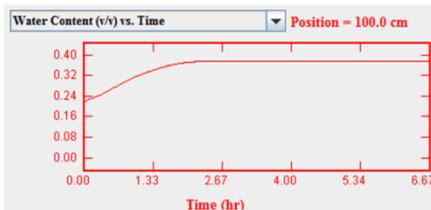
Precipitação total = 13,8mm; Horas = 6,67h; H = 7,37cm.

Figura 33: Variação do perfil da trincheira (a) e Conteúdo volumétrico de água no perfil da trincheira (b) para o evento1-CHEMFLO

(a)



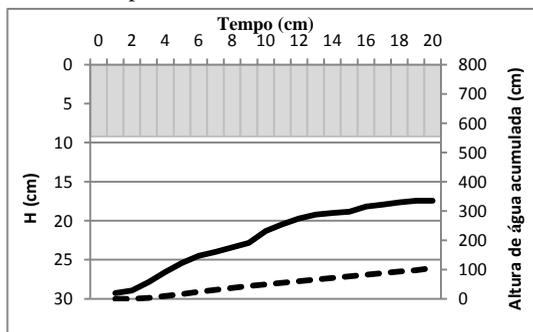
(b)



O evento 2 representado pela figura 34 demonstra valor do volume de saída da simulação menor do que, o que foi observado na trincheira experimental. Não existe nenhuma sobreposição entre as curvas da trincheira observada com a simulada. Esta questão pode ter sido influenciada pela quantidade da precipitação maior que o evento de calibração, mas principalmente pelo tempo de duração da precipitação

de 20,5 horas bem superior aos dois eventos anteriormente analisados. Como o CHEMFLO não permite adoção de um tempo para a precipitação e outro tempo mais longo para a simulação e somente admite chuva constante, durante todo o tempo de simulação há aporte de água para trincheira simulada. Entretanto este aporte de água é transformado em volume infiltrado limitado ao volume de água que pode ser propagado no perfil no intervalo de tempo. Verifica-se na figura 35 (a) e (b) que a trincheira apresenta-se saturada para a maior parte do tempo. O modelo CHEMFLO não considera a condição de escoamento superficial, aplica como zero o valor do potencial matricial na superfície quando o perfil do solo alcança a saturação. Lucas et al., (2013) observaram diferenças entre os valores observados e calculados através do método de Puls, pelo facto deste considerar capacidade constante de infiltração, não representando a variação entre a capacidade de infiltração inicial e final do solo, o que não diferencia do comportamento do modelo CHEMFLO.

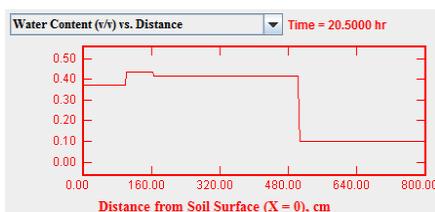
Figura 34: Variação do volume de saída acumulado na trincheira experimental e na simulada pelo Modelo CHEMFLO



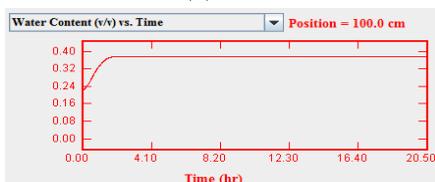
Precipitação total = 52,2mm; Horas = 20,5h; H = 9,21cm.

Figura 35: Conteúdo volumétrico de água no perfil da trincheira (a) e variação do perfil da trincheira (b)

(a)



(b)

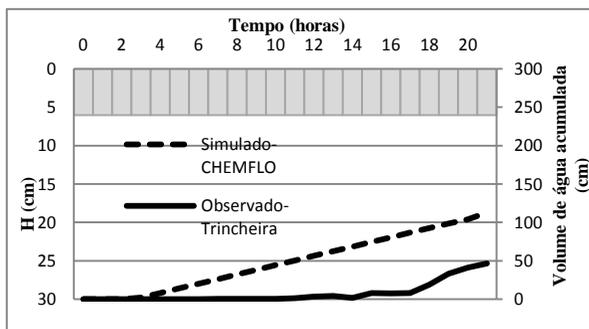


Observa-se pela figura 36 variação do volume de saída acumulado na trincheira experimental e na simulada, o conteúdo volumétrico de água no perfil da trincheira e a variação do perfil da trincheira são representados na figura 37 (a) e (b) para o evento 3.

Este evento caracteriza-se por ser de longa duração (mais de 20h) e com um volume total de chuva menor que o evento 2 e do que o evento de calibração. Diferentemente dos outros, o evento 3 apresenta valores do volume de saída acumulado simulado maior em relação aos volumes acumulados da trincheira experimental. A curva de volume acumulado simulado desse evento é muito semelhante à do evento anterior (evento 2), mesmo que a lâmina de chuva média desse evento seja a metade do evento anterior. Para essas duas curvas percebe-se como a duração da precipitação interfere na simulação do CHEMFLO. Pela figura 36 observa-se que a trincheira simulada para o evento 3 apresenta um comportamento semelhante ao evento anterior.

As últimas simulações (evento 2 e 3) mostram como o modelo tem limitações em representar eventos tão distintos, a resposta do modelo foi praticamente a mesma, enquanto que a curva da trincheira experimental nesses dois eventos foi muito diferente como pode-se ver nas figuras 35 e 37. Como o modelo apresenta condições de contorno constantes não responde com precisão a variação da chuva. Esta característica faz com que o modelo apresente dificuldades em simular eventos com maior precipitação e com tempo de duração longo. Scott et al., (2003) obtiveram resultados insatisfatórios na simulação da infiltração e transporte de Cromo IV (Cr IV) em solos insaturados com o uso do modelo CHEMFLO, devido a condição de contorno superior constante de precipitação.

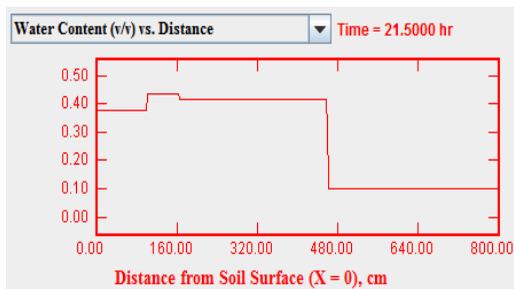
Figura 36: Variação do volume de saída acumulado na trincheira experimental e na simulada pelo Modelo CHEMFLO para o evento 3



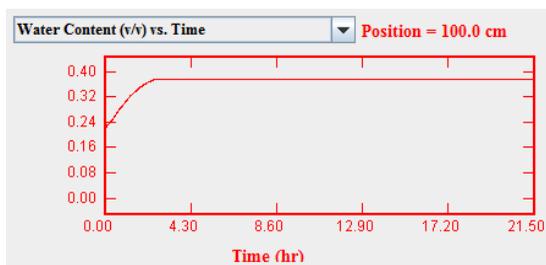
Precipitação total = 35,0mm; Horas = 21,5h; H = 6,05cm.

Figura 37: Conteúdo volumétrico de água no perfil da trincheira (a) e variação do perfil da trincheira (b)

(a)



(b)



4.4 DESEMPENHO DOS MODELOS

Pinho (2009) afirma que a avaliação adequada do desempenho de modelos de simulação precisa estar ligada por uma análise conjunta de diversos índices, pois um modelo pode se ajustar bem aos dados experimentais, sem que o processo real em questão seja bem representado. Segundo Moriasi et al. (2007) pode-se considerar uma simulação como satisfatória quando se tem os valores de $NSE > 0,50$; $PBIAS = \pm 25\%$ e $RD < 0,70$. A tabela 15 mostra os valores de índices de comparação entre a trincheira experimental e a simulada para os modelos HYDRUS-1D e CHEMFLO.

Tabela 15: Comparação entre os valores observados e simulados para os modelos HYDRUS-1D e CHEMFLO

Índice de comparação						
Eventos	HYDRUS-1D			CHEMFLO		
	PBias(%)	NSE	RD	PBias(%)	NSE	RD
1	146	1,21	1,48	17,16	0,96	196
2	16,8	0,97	0,16	712	0,44	0,75
3	-24	0,99	0,2	-503,9	26,87	5,28
4	-124	0,58	1,25	0,07	0,99	0,0006

NSE= coeficiente de eficiência de Nash-Sutcliffe; PBias(%)= erro percentual;
RD= razão dos desvios;

Os eventos 1 e 4 apresentam para todos os índices de comparação (tabela 15) valores insatisfatórios para o modelo HYDRUS-1D. O elevado valor positivo e negativo de PBias (%) para os eventos 1 e 4 demonstram que o modelo superestimou e subestimou em larga escala os valores experimentais, esta teoria pode ser reforçada pela observação dos valores negativos de NSE, que demonstra a não eficiência da simulação dos eventos. O evento 2 escolhido para calibração e o evento 3 apresentou para todos os índices de comparação valores satisfatórios. Para o modelo CHEMFLO os eventos 1 e 4 são os que apresentaram valores satisfatórios em comparação com os eventos 2 e 3, o elevado valor de PBias, menor valores de NSE e maior valores de RD, demonstra que a simulação da trincheira conceitual não foi satisfatória e os valores negativos observados de NSE para o evento 3 demonstram que existe uma dispersão muito significativa entre os valores simulados em relação aos valores observados. Esta questão foi observada na apresentação dos

resultados para as simulações, em que a curva dos valores simulados apresentou ser maior que a curva para os valores observados na trincheira monitorada.

Estes resultados pode ser justificado pelo comportamento da precipitação, pela duração da chuva e pela não consideração da chuva antecedente. Tais hipóteses podem ser responsáveis pelas limitações de representatividade do modelo para eventos de precipitação elevada e com período de duração longo, uma outra questão que não pode deixar de ser considerada é conversão do volume de água na trincheira em nível de água através da porosidade considerada (50%) influenciou bastante na análise do erro para os dois modelos. As características variáveis de cada evento e a transformação da precipitação em lamina de água através da equação (50) influenciou bastante na diferença dos resultados simulados com os monitorados na trincheira experimental

O modelo CHEMFLO apresenta uma limitação crucial para o problema em estudo devido as suas características funcionais que considera para toda simulação condições constantes de intensidade, o que não acontece com o comportamento da trincheira real (experimental).

Por meio das simulações realizadas pode-se concluir que:

– A condição de contorno escolhida para o modelo HYDRUS-1D *Run off* permite avaliar a quantidade de água que não é infiltrada no solo, que pode transformar-se em escoamento superficial e a condição *Rainfall rate* escolhida para o modelo CHEMFLO permite simular a taxa de precipitação que chega ao topo do solo. Ambos os programas foram calibrados considerando-se solo não saturado e sem chuvas antecedentes, mas foi observado escoamento superficial em alguns eventos para o modelo HYDRUS-1D, e a maior parte dos eventos apresentam conteúdo volumétrico saturado tanto para o HYDRUS-1D como para o CHEMFLO. Isto se deve a quantidade da lamina de água que infiltra para o solo, fazendo com que haja um aumento de umidade na zona parcialmente saturada e saturada em todos os eventos. Para os eventos 2 e 3 observou-se a infiltração de água ate a zona saturada. A carga hidráulica (lamina de água) submetida de evento para evento e o uso do coeficiente de escoamento médio (0,57) nas transformações matemáticas podem ter influenciado na questão de escoamento superficial e na saturação do conteúdo volumétrico.

– O modelo HYDRUS-1D apesar de ter apresentado resultados satisfatórios para o evento de calibração e para o vento 3, não apresentou bom desempenho para os restantes eventos, fazendo crer

que apresenta dificuldades em representar a trincheira experimental para este caso de estudo. Esta questão pode estar relacionada pela escolha do modelo 1D que dificultou o processo de calibração.

–O modelo CHEMFLO devido ao seu comportamento limitado o só apresenta bom desempenho para os eventos de curta duração levando a crer que mesmo assim, não seja confiável na representação da trincheira de infiltração, visto que a intensidade da chuva é tratada como constante ao longo de toda a simulação o que não corresponde a realidade do funcionamento da trincheira de infiltração.

4.5 DESENVOLVIMENTO DE MATRIZ DE AVALIAÇÃO DOS MODELOS DESTINADOS A SIMULAR O DESEMPENHO DE ESTRUTURAS DE CONTROLE ALTERNATIVO DA DRENAGEM URBANA

Recapitulando que este trabalho se insere dentro de um projeto mais amplo que visa avaliar os impactos advindos da implantação das estruturas de controle alternativo da drenagem urbana para auxiliar na tomada de decisão sobre qual técnica implantar e se deve implantar. Existe necessidade de análise baseada no risco de contaminação dos solos e águas subterrâneas e no impacto quantitativo no aquífero e no entorno da estrutura, antes da tomada de decisão. Este trabalho avaliou o uso de modelos computacionais, especificamente o HYDRUS-1D e o CHEMFLO como opções de avaliação do impacto quantitativo de uma das estruturas de controle da drenagem, as trincheiras. Para atingir este objetivo, nesta seção do trabalho, é apresentada a matriz de avaliação desenvolvida para aferir a aplicabilidade dos programas na tomada de decisão.

A fase denominada decisão refere-se à escolha entre diversas variáveis admissíveis ou entre diferentes cenários que possibilitam as soluções admissíveis. A decisão baseia-se em um conjunto de critérios de comparação, que dependem fortemente do decisor e do peso por ele atribuído aos diferentes aspectos em questão (Baptista et al., 2005).

Os pesos atribuídos para os critérios demonstram a importância e o desempenho dos modelos (HYDRUS-1D e CHEMFLO) em relação ao funcionamento das técnicas compensatórias tendo a trincheira como exemplo. Observa-se nas tabelas 16 e 17 que as primeiras duas colunas representam os critérios divididos em subcritérios, a terceira e a quarta coluna descreve as características funcionais dos modelos considerando

a trincheira de infiltração, a quinta avalia a funcionalidade do modelo em relação à funcionalidade da trincheira.

Avaliação do modelo HYDRUS-1D é apresentada na matriz 16, na aplicação de peso para cada subcritério observa-se que existe 3 subcritérios com grande impacto (+++), 2 subcritérios com impacto médio (++) e 9 subcritérios com impacto pequeno ou nulo (+) o que influencia diretamente no funcionamento e dimensionamento das técnicas compensatórias.

Para o caso do modelo CHEMFLO observa-se na matriz 17, 6 subcritérios grande impacto (+++), 3 subcritérios com impacto médio (++) e 7 subcritérios com impacto pequeno ou nulo (+).

Avaliação do desempenho para cada subcritério é representado pela ultima coluna da matriz 16 e 17 (sexta coluna), assim observa-se que o modelo HYDRUS-1D apresenta eficiência em 10 subcritérios, para 2 subcritérios pode ser adaptado e é considerado como não eficiente também para 2 subcritérios. Esta análise permite afirmar que o modelo HYDRUS-1D apresenta maiores números de subcritérios que são eficientes para representar o funcionamento de estruturas de drenagem compensatórias.

O modelo CHEMFLO representa para 7 subcritérios como não eficiente, para 2 subcritérios pode ser adaptado e para 5 subcritérios apresenta-se eficiente. Por conseguinte este modelo apresenta maiores números de subcritérios que não são eficientes para representar o funcionamento de estruturas de drenagem compensatórias. Cota (2000) sustenta que o método de diferenças finitas representado pelo modelo CHEMFLO é o de mais fácil implementação, a entrada de dados é, mas suscita, mas não representa muito bem problemas de geometria complexa, como é o caso do problema em estudo o que explica as características simples de funcionamento e facilidade no uso do modelo, mas com resultados menos acurados. Scott et al., (2003) obtiveram resultados insatisfatórios na simulação da infiltração e transporte de Cromo IV(Cr IV) em solos insaturados com o uso do modelo CHEMFLO, devido a condição de contorno superior constata de precipitação.

Para os dados de saída o modelo HYDRUS-1D apresenta mais opções para o usuário, para cada evento a informação gerada pelo balanço de massa mostra o erro relativo e absoluto dos resultados para todo o perfil. A escolha do método para resolver sistemas de equações algébricas gerada pelo modelo determinístico numérico depende das características físicas do problema em estudo. Este representa o fluxo de entrada e saída da água da estrutura para a zona parcialmente saturada e

saturada. Já o CHEMFLO não representa a zona saturada que é uma das condições básicas para avaliar o impacto quantitativo da infiltração de água no meio.

O usuário deve através de outro modelo fornecer os dados referentes aos parâmetros hidráulicos e hidrogeológicos para o caso do CHEMFLO, o modelo HYDRUS-1D contém acoplado códigos como o Rosetta lite (1999) que permite ajustar os parâmetros da curva de retenção do solo. Em ambos os modelos o usuário consegue visualizar o fluxo de percolação de água na zona não saturada.

O modelo CHEMFLO apresenta menor complexidade na utilização para o usuário e simplicidade na sua calibração, os resultados são apresentados em formatos de tabela e gráficos o que facilita o entendimento do usuário, não necessita de grande base de dados para simular o fluxo quantitativo (evaporação, temperatura, etc). Estas características são vantajosas por permitirem menos gastos de tempo e melhor facilidade no entendimento para o usuário.

Através das características do aquífero e da observação de infiltração de água até a zona saturada, o modelo HYDRUS-1D demonstra o impacto quantitativo da estrutura de drenagem compensatória para a zona saturada, o que responde basicamente a questão do protocolo quantitativo. Thompson et al., (2009) e Nimmer et al., (2009) estudaram o comportamento do impacto quantitativo das estruturas de drenagem compensatória no aquífero em uma bacia de infiltração através do programas HYDRUS-2D e 3D. Obtiveram resultados satisfatórios, comparando com os valores observados no campo.

Tabela 16: Matriz de avaliação de desempenho do modelo HYDRUS-1D

Critérios de comparação	Sub- critérios de comparação	HYDRUS-1D	Classificação em relação às restrições ao funci. da trinc.	Avaliação do desempenho
Adequação	Solução numérica	Elemento finito	+	Eficiente
	Complexidade para usuário	Características complexas	+++	Não eficiente
	Resultado a partir da simulação	Não satisfatório requerendo maior adequação na calibração.	+++	Não eficiente
	Tipo de modelo	Fluxo para a zona parcialmente saturada e zona saturada	+	Eficiente
	Condições de contorno	Variável	+	Eficiente
Abrangência	Parâmetro do solo	Está associado ao programa que utiliza funções de pedotransferência;	+	Eficiente

	Demonstração dos resultados	Resultados gerados em formato de gráficos	++	Pode ser adaptado
	Precipitação	Taxa de precipitação ilimitada	+	Eficiente
		Considera a chuva antecedente por meio de umidade do solo	+	Eficiente
Precisão	Condição inicial	Variável	+	Eficiente
	Balanço de massa	Fluxo de entrada e saída para cada posição de interesse.	+	Eficiente
Aplicação do modelo em técnicas compensatórias	Dimensionamento da estrutura	Não apresenta parâmetros de dimensionamento /utilizador faz manualmente	++	Pode ser adaptado
	Percolação na Zona não saturada	Comportamento da frente de molhamento é influenciado pela	+++	Eficiente

		entrada da lamina de água variável.		
	Impacto nas águas subterrâneas	Permite simular o impacto quantitativo da estrutura na zona saturada.	+	Eficiente

Legenda: +++: grande impacto; ++: médio impacto; +: impacto pequeno ou nulo.

Tabela 17: Matriz de avaliação de desempenho do programa- CHEMFLO

Critérios de comparação	Sub- critérios de comparação	CHEMFLO	Classificação em relação às restrições ao funci. da trinc.	Avaliação do desempenho
Adequação	Solução numérica	Diferenças finitas	+++	Não eficiente
	Complexidade para usuário	Características simples	++	Eficiente
	Resultado a partir da simulação	Não satisfatório comparando com o experimental	+++	Não eficiente
	Tipo de modelo	Fluxo para a zona parcialmente saturada	+++	Eficiente com adaptação para a zona saturada
	Condições de contorno	Constante	+++	Não eficiente
Abrangência	Parâmetro do solo	Não está associado nenhum programa que utilize funções de pedotransferência;	+	Pode ser adaptado

	Demonstração dos resultados	Resultados gerados em formato de tabela e gráficos.	+	Eficiente
	Precipitação	Taxa de precipitação limitada	+	Não eficiente
		Considera a chuva antecedente por meio de umidade do solo.	+	Eficiente
Precisão	Condição inicial	Constante	++	Não eficiente
	Balanço de massa	Fluxo de entrada e saída para cada posição de interesse.	+	Eficiente
Aplicação do modelo em técnicas compensatórias	Dimensionamento da estrutura	Não apresenta parâmetros de dimensionamento /utilizador faz manualmente	++	Pode ser adaptado
	Percolação na Zona não saturada	Comportamento da frente de molhamento é	+++	Não eficiente

	influenciado pela taxa de precipitação constante.		
Impacto nas águas subterrâneas	Não permite simular a zona saturada.	+++	Não eficiente

5 CONCLUSÕES

O presente trabalho objetivou avaliar o uso de programas de simulação de infiltração de água no solo para simular o desempenho de uma trincheira de infiltração de águas pluviais visando o controle da drenagem urbana o qual influenciará na criação de protocolo de avaliação quantitativa das estruturas de drenagem compensatórias. Através do conhecimento do funcionamento da trincheira de infiltração por meio de programas computacionais, foi possível elaborar uma matriz de avaliação que permita avaliar aplicabilidade desses programas na tomada de decisão de modo que auxilie ao gestor de estruturas de drenagem urbana, na escolha da técnica, mais favorável.

O modelo conceitual desenvolvido para representar a trincheira de infiltração urbana demonstrou resultados satisfatórios para os modelos computacionais de infiltração, mas o teste dos modelos (calibração) demonstrou que a simulação de estruturas de controle de drenagem baseadas em infiltração é factível, mas demanda um grande conjunto de dados de caracterização do meio, dados discretizados de precipitação e um bom conhecimento do usuário em termos de modelagem do meio parcialmente saturado

O modelo HYDRUS-1D não apresentou bom desempenho para alguns eventos comparando com os resultados obtidos na trincheira experimental, os valores simulados para os níveis de água no interior da trincheira não correspondem aos observados em campo para alguns eventos, o que pode ter sido influenciado pela equação (50) usada na transformação da chuva em lâmina de água como dado de entrada no modelo. Verificou-se infiltração de água na zona saturada para os eventos que apresentam intensidade de chuva elevada e tempo de duração de chuva longo, o que demonstra aplicabilidade do modelo em quantificar o fluxo de água tanto para a zona não saturada como para zona saturada.

O modelo CHEMFLO também não apresentou resultados satisfatórios para eventos com duração maior de precipitação, conseqüentemente a intensidade (ou volume de precipitação) constante ao longo de toda a simulação é uma das principais responsáveis pela dificuldade em simular os eventos de longa duração.

A matriz de avaliação dos modelos de simulação de infiltração permitiu avaliar que o modelo HYDRUS -1D apresenta melhor

desempenho como ferramenta auxiliar no processo de tomada de decisão para seleção de técnicas de controle da drenagem urbana, mas é necessário grandes ajustes no modelo de modo que represente adequadamente a estrutura de infiltração. Já o modelo CHEMFLO apresentou limitações para diferentes critérios de avaliação, tais razões fazem com que não apresente melhor desempenho para responder o protocolo de avaliação quantitativa das estruturas de controle da drenagem urbana proposto por Finotti (2007).

6 SUGESTÕES

Por não haver registo de análise semelhante no estudo de trincheiras de infiltração urbana usando o modelo HYDRUS-1D e CHEMFLO. São feitas sugestões para estudos futuros como:

- Estudos aprofundados do modelo HYDRUS-2D e 3D que apresentem perfil heterogêneo composto pelo material de trincheira de infiltração;
- Adoção de algum método de otimização de variáveis na calibração;
- Simulação dos programas com outras estruturas de infiltração;
- Avaliação qualitativa da trincheira de infiltração através do modelo HYDRUS.

REFERÊNCIAS

ACIOLI, L.A; AGRA, S.G; GOLDENFUM, J.A; SILVEIRA, A.L.L. **Implantação de um módulo experimental para análise da eficiência de pavimentos permeáveis no controle do escoamento superficial na fonte**. RBRH, 2003.

ACUNTO, B; PARENTE, F; URCIUOLI, G. **Numerical models for 2D free boundary analysis of ground water in slopes stabilized by drains trenches**. Elsevier, Jun. 2006, p1615-1626.

ARAUJO, A.G. **Análise do desempenho de poços de infiltração na cidade de Goiânia**. Dissertação de mestrado, Universidade Federal de Goiás, 2010.

AZZOUT, Y; BARRAUD, S; CRÈS, F.N; ALFAKIN.E. **Techniques alternatives en assainissement pluvial**. Paris, Edição Tec & Doc-Lavoisier, 372p, 1996.

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

BROWNE, D; DELETIC, A; MUDD, G.M; FLETCHER, T.D.A. **Newsaturated /unsaturated model for storm water infiltration systems**. Hydrological Processes, v.22, 2008, p4838-4849.

BONGANHA, C.A; Jr. GUIGUER, N; PEREIRA, S.Y; DE OLIVEIRA, L.C; RIBEIRO, M.L. **Conceitos e fundamentos da modelagem matemática para gerenciamento de recursos hídricos subterrâneos**. Revista analytica, , nº30, Agost/Set. 2007.

BAPTISTA, M; NASCIMENTO, N; BARRAUD, S. **Técnicas compensatórias em drenagem urbana**. Porto Alegre, ABRH, 266p, 2005.

BERNAD-VALETTE, N. **Simulation Des impacts surles eaux souterraines de l'infiltration des eaux pluviales en milieu urbanise**. Tese de Doutorado. INSA-Lyon, 2000.

BRITO, D.S. **Metodologia para seleção de alternativas de sistemas de drenagem**. Dissertação de Mestrado. Departamento de Engenharia Civil e Ambiental-Universidade de Brasília, 2006.

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

CAPUTO, U.K. **Avaliação do potencial de utilização de trincheiras de infiltração em espaços com urbanização consolidada/ estudo de caso do Município de Belo horizonte –MG**. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Minas Gerais, 2012.

CAPELO, J; CASTRO, M.A H. De. **Richards equation feasibility in predicting flow in unsaturated solid waste at a semi-arid tropical landfill**. J. Environmental systems, Vol.30, 2004, p233-253.

CELIA, M.A; BOULOUTAS, E.T. **A general mass conservative numerical solution for unsaturated flow equation**. Water resource research, v26, n°7, jul. 1990, p1483-1496.

CECÍLIO, R.A; SILVA, D.D; PRUSKI, F.F; MARTINEZ.M.A. **Modelagem da infiltração de água no solo sob condições de estratificação utilizando-se a equação de Green –Ampt**. Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental, v.7, n°3, Campina Grande, 2003, p415-422.

COELHO NETTO, A.L. **Hidrologia de encosta na interface com a Geomorfologia**. In. GUERRA, A.J.T, 2004.

COTA, S.D.S. **Modelamento da contaminação de aquíferos livres por NAPLS residuais na zona insaturada**. Tese de doutorado, Universidade federal do rio grande do sul. Porte Alegre, Agost. 2000.

COLLISCHONN, W; TASSI, R. **Introduzindo hidrologia**. Apostila, IPH e UFRGS, 2008, 151p.

CUNHA, S.B.(organizadores). **Geomorfologia: uma atualização de bases e conceitos**. Rio de Janeiro: Bertrand do Brasil, 1994.

CRUZ, M.A.S; ARAUJO, P.R; AGRA, S.G; SOUZA, V.C.B; COLLISCHONN, W. **Valorização da água no meio urbano: Um desafio possível**, In: XIV simpósio brasileiro de recursos hídricos, aracaju. Anais. Aracaju: ABRH. 2001, 14p.

DETAY, M. **La Gestion Active Des Aquifères**. Paris: Maisson, 1997, 411p.

DNIT- DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRA-ESTRUTURAS DE TRANSPORTES. **Manual de drenagem de rodovias**, versão preliminar, disponível em <<http://ipr.dnit.gov.br/>> 2006, 327p.

DUCHENE, M; MCBEAN, E.A ; THOMSON, N.R. **Modeling of infiltration from trenches for storm-water control**. Journal of water resource planning and management, v120, n°3, May/Jun. 1994, p276-293.

ED, M. **Miljöteknisk undersökning enligt MIFO**. Tese de Doutorado, Departamento de ciências da terra, Universidade de Uppsala, Suécia, 2006.

FREEZE, R.A; CHERRY.J.A. **Groundwater**. New Jersey: Prentice-Hall, 1979.

FINOTTI, A.R. **Ground water impact assessment of infiltrations structures for urban drainage control**. Novatech, 6th International conference, Jun/Jul. 2007.

FINOTTI, A.R. **Impacto ambiental de estruturas de controle da drenagem urbana nos solos e nas águas subterrâneas**. Projeto de candidatura a bolsa de produtividade em pesquisa- CNPq. Florianópolis, Set. 2010.

GRACIOSA, M.C; MEDIONDO, E.M; CHAUDHRY.F.H: **Metodologia para o dimensionamento de Trincheiras de infiltração para o controle do escoamento superficial na origem**, v13, n°2 p207-214, Abr/Jun. 2008.

HILL, D. **Applications of soil physics**. San Diego, California: Academic Press, 385p.

JAMES. A; **Mathematical models in water pollution control**. New York: John Wiley & sons, 1978.

JACKSON, W. A; RAINWATER, K; ANDERSON, TODD; LEHMAN, T; TOCK, R; RAJAGOPALAN, S; RIDLEY, M. **Distribution And Potential Sources Of Perchlorate In The High Plains Region Of Texas**. Relatório final, Centro de Recursos hídricos da Universidade de Texas, 2004.

JACKSON, M; CROUCH, S; BAXTER, R. **Software evaluation: Criteria-based Assessment**. Software Sustainability Institute. Nov. 2011. Disponível em: <http://software.ac.uk/sites/default/files/SSI-SoftwareEvaluationCriteria.pdf> acesso em: 25 Nov. 2013.

JONASSON, S.A. **Dimensioning Methods for Storm water infiltration Systems**. In: International conference on urban storm drainage. Goteborg: Chalmers University of Tecnology, v3, 1984, p1037-1046.

KRESIC, N. **Quantitative solutions in Hydrogeology and Groundwater Modeling**, dwell edition, 1997, 480p.

KUMAR C. P. **Modelling of Unsaturated Flow**. In National Conference on "Modern Trends in Water Resources Development and Environmental Engineering, 2002.

KUO,C.Y; ZHU, J.L; DOLLARDI, L.A.A. **Study of infiltration trenches**. Virginia, Water Resources Research Center, bulletin 163, 1989, p87.

LEONG, E.C; RAHARDJO, H. **Review of soil-water characteristic curve equations**. Journal of Geotechnical and Geo environmental Engineering, Dec. 1997.

LIBARDI, P.L. **Dinâmica da água no solo**. São Paulo, editora da universidade de São Paulo, 2005, 200p.

LIER, Q.J.V. **Extração da água do solo por plantas: Desenvolvimento e validação de um modelo**. Piracicaba, São Paulo, jan. 1994.

LIMA, V. **Análise experimental e numérica de trincheiras de infiltração em meio não saturado.** São Carlos, Universidade de São Paulo, 2009.

LIMA, J.E.F.W. **Modelagem numérica do fluxo da água no solo e do escoamento de base em uma bacia experimental em área agrícola no cerrado.** Tese de Doutorado. Universidade de Brasília, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental. 2010.

LUCAS, A.H. **Monitoramento e modelagem de um sistema filtro-valeta-trincheira de infiltração em escala real.** Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de São Carlos, Centro de Ciências Exatas e de Tecnologia, São Carlos, 2011.

LUCAS, A.H, BARBASSA, A. P, MORUZZ, R. B. **Monitoramento e modelagem de um sistema filtro-valeta-trincheira de infiltração pelo método de Puls adaptado para calibração de parâmetros.** RBRH, v18, n°2, Abr/Jun. 2013, p225-236

LUNA. C.N. **Águas subterrâneas,** In TUCCI.C.E.M (Organizador). Hidrologia: Ciência e Aplicação: Editora da Universidade. v4, coleção ABRH, Porto Alegre, 1993, 939p.

MARINHO, F.A.M. **Os solos não saturados: aspectos teóricos, experimentais e aplicados.** Departamento de engenharia de estruturas e fundações, São Paulo, fev. 2005.

MASSAYUKISATO, L. **Avaliação de modelos matemáticos para dimensionamento do bulbo molhado na irrigação por gotejamento.** Dissertação de mestrado. Universidade Federal de São Carlos. Centro de ciências agrárias; ARARAS, 2012.

MORIASI, D. N; ARNOLD, J.G; VAN LIEW. M.W; BINGNER, R.L; HARMEL.T.L; VEITH.T.L. **Model evaluation guidelines for systematic quantification of accuracy in watershed simulations.** Transactions of the ASABE, St. Joseph, v50, n°3, 2007, p885-900.

MUÑOZ-CARPENA, R; GOWDISH, L. **Aplicación Del Método De Infiltración De Green-Ampt ConRedistribución De Humedad Del Suelo Entre Encharcamientos.** Estudios de la Zona No Saturada del Suelo, v7, 2005.

NASCIMENTO, E.A; QUELHAS, O.L.G; FONSECA, P.L. **Qualidade do meio ambiente urbano: Medidas para o controle do escoamento superficial na cidade do rio de janeiro.** Brasil Ciência & Engenharia, v16, n1/2, jan/dez. 2007, p81 – 87.

NASCIMENTO, N. O. Curso: **Tecnologias Alternativas em Drenagem Urbana.** Escola de Engenharia – UFMG. 1996.

NEVES.R, LEITAO. P.C. **Modelação numérica da circulação da água no solo: O Modelo MOHID.** Pedologia, Oeiras 28, 2000, p46-55.

NIMMER, M; THOMPSON, A; MISRA, D. **Water table Mounding Beneath storm water infiltration Basins.** Environmental& Engineering Geoscience, v19, n°2, May. 2009, p67-79.

NOFZIGER, D.L; RAJENDER, K; NAYUDU, S. K. SU, P.Y. **CHEMFLO: One-dimensional water and chemical movement in unsaturated soils.** Department of Agronomy, Oklahoma state university, Oklahoma, 2000, p113.

PEITER, T; POLETO, C. **Estudos dos Efeitos de Trincheiras de Infiltração sobre o Escoamento Superficial.** Revista de estudos ambientais (Online)-REA, 2012, p57-67.

PEIXOTO, V.C. **Análise paramétrica e dimensionamento de poços de infiltração para fins de drenagem urbana.** Universidade de São Paulo, São Carlos, 2011.

PIZARRO, M. DE L.P. **Simulação de fluxo de Agua e transporte de solutos na zona não saturada do solo pelo Método de elementos finitos adaptativos,** EESSC/USP, São Carlos, 2009.

PINHO. R.E da.C. **Teores de água e solutos no solo: Desempenho e sensibilidade do modelo HYDRUS -1D.** Universidade de São Paulo, Escola superior de agricultura “Luiz de Queiroz”, Piracicaba, 2009.

PREVEDELLO, C.L. **Física do solo com problemas resolvidos.** Curitiba: sociedade autônoma de estudos avançados em física do solo, 1996, 446p.

PREVEDELLO, C.L. **Estimativa da profundidade da frente de molhamento a partir da curva de infiltração**, v4, n°3, Jul/Set. 1999, p17-21.

PORTAL BRASIL. **Lei das águas**, Disponível em: <http://www.brasil.gov.br/meio-ambiente/2010/10/lei-das-aguas>. Publicado em 20/10.2010, acesso em 14/10/2012.

REICHARDT, K. **Processos de transferência no sistema solo-planta-atmosfera**. Campinas, SP: Fundação Cargill, 1895.

REMSON, I.; HORNBERGER G.M; MOLZ, F.J. **Numerical methods in sub surface Hydrology**, Wiley-Interscience, 1971.

RIBEIRO, M.L; LOURENCETTI, C; PEREIRA, S.Y; DE MARCHI, M.R.R. **Contaminação de águas subterrâneas por pesticidas: Avaliação preliminar**. Química Nova, v.30, n°3, São Paulo, Mai/Jun. 2007.

ROSSI, M.J; J. ARES, J.O. **Depression storage and infiltration effects on overland flow depth-velocity-friction at desert conditions: field plot results and model**. Hydrology and Earth System Sciences, n°16, 2012, p3293-3307.

RUIZ, C.E; ZAKIKHANI, M; MCGRATH, C. J; DELIMAN, P.N; HOWINGTON, S; EVANS, R.A; TRACY, F.T. **Documentation on Limitations and Applicabilities of the Use of Off-the-Shelf Groundwater Models in Site Cleanup**. Reporte técnico, 1997.

RUBIN, J. **Numerical analysis of ponded rainfall infiltration, water Resources Division**, U.S Geological Survey, Menlo Park, California, U.S.A. Disponível em: http://iahs.info/redbooks/a082/iahs_082_0440.pdf acesso em: 14 fev. 2013.

SAUVEUR, S.C. **Estimation of Phosphorus Contributed to Lakes From on-site sewage disposal systems**. Master degree, Dalhousie University-Daltech, Halifax, Nova Scotia, 1999, p154.

SCHAAP, M.G. **ROSETTA**, version 1, 1999.

SCHNOOR, J.L. **Environmental modeling “fate and transport of pollutants in water, air, and soil”**. New York, 1996.

SILVA, A.M. **Banco de dados de curvas de retenção de água de solos brasileiros**. Universidade de São Paulo, São Carlos, 2005.

SILVEIRA, A.L. de; BELTRAME, L.F; **Infiltração e armazenamento no solo**. In TUCCI.C.E.M (Organizador). Hidrologia: Ciência e aplicação: Editora da Universidade, v4, coleção ABRH, Porto Alegre, 1993. 939p.

SILVEIRA, A.L.L. **Hidrologia urbana no Brasil**. RBRH, n°3, Porto alegre, Editora da Universidade, 1998.

SILVEIRA A.L.L. **Aspectos históricos da drenagem urbana no Brasil**. Instituto de Pesquisas Hidráulicas –UFRGS, 2000.

SILVEIRA, A.L.L. **Pré-dimensionamento hidrológico de pavimentos permeáveis e trincheiras de infiltração**. RBRH, Curitiba, 2003.

SIMUNEK, J; VAN GENUCHTEN, M.Th; SEJNA,M.The **HYDRUS software package for simulating the two and three dimensional movement of water, heat, and multiple solutes in variably-saturated media**. Technical Manual, version1, 2006, 241p.

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

SOUZA, V.O.A. **Simulação de fluxo vertical em aterro de resíduos sólidos urbanos**. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Rio de Janeiro: Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós-Graduação e Pesquisa de Engenharia, Rio de Janeiro, 2011.

SOUZA, C.D. de. **Simulação computacional do fluxo hídrico subterrâneo na região do Cariri e calibração utilizando gradiente das cargas hidráulicas**. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal do Ceará, 2007.

SOTO, M.A.A. **Geotecnia em suelos no saturados**. Revista acadêmica colômbia ciência, v32, n°125, dec. 2008, p472-481.

SCOTT, P.K; PETURA, J.C; HARRIS, M. **Derivation of a Liquid-to-Solid Ratio for ASTM Method D3987-85 for Soils Containing Chromite Ore Processing Residue Using Selected Unsaturated Zone Models**. Soil and Sediment Contamination, n°12, 2003, p443-480.

SNOWLING, S.D; KRAMER, J.R. **Evaluating modeling uncertainty for model selection**. Ecological Modelling, v138, 2001, p.17-30.

TODD, D.K. **Groundwater Hydrology**. 2° edição. NewYork: John wiley & Sons. 1976.

TOMAZ, P. **Curso de Manejo de águas pluviais: capítulo 16-Reservatório de infiltração**, Set. 2010, 45p.

TOMA, R.S. **Evolução do funcionamento físico -hídrico do solo em diferentes sistemas de manejo em áreas de agricultura familiar na região do Vale do Ribeira, SP**. Tese de Doutorado, Universidade de São Paulo, Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz". Piracicaba, 2012.

THOMPSON, A; NIMMER, M; MISRA, D. **Effects of variations in hydrogeological parameters on water-table mounding in sandy loam and loamy sand soils beneath storm water infiltrations basins**. Hydrogeology Journal, 2010, p501-508.

TUCCI, C. E. M. (Org.). **Hidrologia: Ciências e aplicação**. Porto Alegre: Ed. da Universidade: ABRH: EDUSP, 943p. 1993.

URBONAS, B; STAHR, P. **Storm water: best management practices and detention for water quality, drainage and CSO management**. Englewood Cliffs, Prentice Hall, 1993, 447p.

VAN GENCHUTEN, M.Th. **Aclosed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils**. Soil Science Society of American, v44, n°5, Out.1980, p892-897.

VAN GENUCHTEN, M.Th; LEIJ, F.J; YATES, S.R. **The RETC code for quantifying the hydraulic functions of unsaturated soils.** Environmental protection, Washington, Dec. 1991, 100p.

VAN MEIR, N; GAUDET, J.P; PHOMMAVANH, V ; LAURENT J.P; BUGAI , D; BIRON, R. **Flow in the unsaturated zone around a shallow subsurface radioactive waste trench: Interpretation of an infiltration –drainage test at the chernobly pilot site.** Applied Geochemistry, Elsevier, august. 2011, p1297-1303.

VALIANTZAS, J. D. **Combined Brooks-Corey/Burdine & van Genuchten/Mualen closed-form model for improving prediction of unsaturated conductivity.** Journal of irrigation and drainage engineering, Abr. 2011, p223-233.

VERRUIJT.A. **Ground water Flow.** 2^aed. Sutton, London, 1982.

WHEATER, H.S. **Hydrological processes: A course on the hydrological relationships of soils, vegetation and the atmosphere.** Imperial College of Science and Technology, London, 1988.

WILLMOTT, C.J; ACKLESON,S.G; DAVIS, R.E; FEDDEMA, J.J; KLINK, K.M; LEGATES, D.R; O'DONNELL, J; ROWE, C.M. **Statistics for the evaluation and comparison of models.** Journal of Geophysical Research, v90, n°C5, 1985, p8995-9005.