

**UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA
FACULDADE DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL**

**INFILTRAÇÃO DE ÁGUA NO SOLO SOB CONDIÇÕES
SATURADAS-NÃO SATURADAS A PARTIR DE
DISPOSITIVOS DE INFILTRAÇÃO**

MÁRCIO BITTAR BIGONHA

ORIENTADOR: SERGIO KOIDE

**DISSERTAÇÃO DE MESTRADO EM TECNOLOGIA AMBIENTAL E
RECURSOS HÍDRICOS**

PUBLICAÇÃO: PPGTARH. DM – 279/2024

BRASÍLIA/DF: DEZEMBRO – 2024

**UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA
FACULDADE DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL**

**INFILTRAÇÃO DE ÁGUA NO SOLO SOB CONDIÇÕES
SATURADAS-NÃO SATURADAS A PARTIR DE DISPOSITIVOS DE
INFILTRAÇÃO
MÁRCIO BITTAR BIGONHA**

**DISSERTAÇÃO SUBMETIDA AO DEPARTAMENTO DE
ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL DA FACULDADE DE
TECNOLOGIA DA UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA COMO PARTE
DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU
DE MESTRE EM TECNOLOGIA AMBIENTAL E RECURSOS
HÍDRICOS.**

APROVADA POR:

**Prof. Sergio Koide, PhD (ENC-UnB)
(Orientador)**

**Prof. Carlos Henrique Ribeiro Lima, PhD (ENC-UnB)
(Examinador Interno)**

**Prof. Gustavo Barbosa Lima da Silva, Dr (UFPB)
(Examinador Externo)**

BRASÍLIA/DF, 19 DE DEZEMBRO DE 2024

FICHA CATALOGRÁFICA

BIGONHA, MÁRCIO BITTAR

Infiltração de água no solo sob condições saturadas-não saturadas a partir de dispositivos de infiltração [Distrito Federal] 2024.

xvii, 170p., 210 x 297 mm (ENC/FT/UnB, Mestre, Tecnologia Ambiental e Recursos Hídricos, 2014).

Dissertação de Mestrado – Universidade de Brasília. Faculdade de Tecnologia.

Departamento de Engenharia Civil e Ambiental.

1. Infiltração no solo

2. Medidas compensatórias

3. Modelagem hidrológica

4. Drenagem urbana

I. ENC/FT/UnB

II. Título (série)

REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

BIGONHA, M. B. (2024). Infiltração de Água no Solo sob Condições Saturadas-não Saturadas a Partir de Dispositivos de Infiltração. Dissertação de Mestrado em Tecnologia Ambiental e Recursos Hídricos, PPGTARH. DM – 279/2024, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 170p.

CESSÃO DE DIREITOS

AUTOR: Márcio Bittar Bigonha.

TÍTULO: Infiltração de Água no Solo sob Condições Saturadas-não Saturadas a Partir de Dispositivos de Infiltração.

GRAU: Mestre

ANO: 2024

É concedida à Universidade de Brasília permissão para reproduzir cópias desta dissertação de mestrado e para emprestar ou vender tais cópias somente para propósitos acadêmicos e científicos. O autor reserva outros direitos de publicação e nenhuma parte dessa dissertação de mestrado pode ser reproduzida sem autorização por escrito do autor.

Márcio Bittar Bigonha

AGRADECIMENTOS

Aos meus pais, Antonio Carlos e Márcia, pela vida e pela contínua lição de como vivê-la.

Aos meus irmãos Antonio e Roberto, pelo indispensável suporte afetivo e por sua grande generosidade.

A toda a equipe da Universidade de Brasília. Ao meu orientador, Sergio Koide, pela paciência incansável e pela sabedoria com que me guiou ao longo do desafiador e transformador processo de amadurecimento acadêmico na pesquisa científica. A Maria Elisa Leite Costa e a Andréia de Almeida, que me conduziram com sabedoria técnica e carinho por essa jornada.

Aos amigos que fiz na graduação e no PTARH, que me incentivaram a trabalhar com dedicação na pesquisa, em especial a Artur Borges, que me acompanhou para atividades em campo durante o trabalho. A Antônio Brito e à equipe da CSANEO, que tornaram possível a realização dos ensaios experimentais.

A todos os amigos que tenho nessa vida, sempre presentes e fundamentais. Aos amigos da música, que me ajudaram a me desenvolver no mundo das artes mesmo durante o período de mestrado. Aos amigos de escola, que até hoje me acompanham e incentivam, em especial aos amigos Carlo de Vito, Gustavo Madruga e Gustavo Takahashi.

RESUMO

INFILTRAÇÃO DE ÁGUA NO SOLO SOB CONDIÇÕES SATURADAS-NÃO SATURADAS A PARTIR DE DISPOSITIVOS DE INFILTRAÇÃO

Este estudo analisou os processos de infiltração em dispositivos de drenagem urbana, comparando trincheiras retangulares e poços de infiltração circulares. As simulações foram realizadas utilizando o modelo de fluxo saturado-não saturado baseado na equação de Richards no programa FEFLOW, contrastando os resultados com as metodologias simplificadas, como a adotada pelo programa SWMM. As metodologias simplificadas demonstraram limitações ao adotar abordagens conservadoras, como a consideração de uma taxa de infiltração constante restrita à área de fundo dos dispositivos. Em contraste, a modelagem detalhada no FEFLOW evidenciou uma compreensão mais precisa dos processos de infiltração, incorporando fatores como forças matriciais, gradientes de pressão e variáveis associadas à profundidade dos dispositivos e ao nível do lençol freático. Os resultados mostraram que as diferenças metodológicas podem levar a variações significativas na estimativa de vazões infiltradas, sobretudo em cenários onde a lâmina d'água e a condutividade hidráulica saturada têm grande influência. Essas diferenças podem impactar diretamente os custos de implantação de dispositivos de infiltração, uma vez que a disponibilidade de áreas em regiões urbanizadas é um fator limitante para a implantação de infraestrutura. A modelagem de trincheiras de infiltração permitiu avaliações detalhadas de propriedades do solo, conteúdo inicial de umidade, configurações do nível do lençol freático e efeitos de colmatação. O estudo também explorou o impacto da geometria das trincheiras, incluindo profundidade, largura e comprimento, na capacidade de infiltração. Os poços de infiltração foram modelados para permitir também uma avaliação experimental, que contou com processo de calibração e verificação, além da avaliação de diferentes configurações, de características pedológicas e do comportamento hidráulico em condições de malha simplificada e refinada. Os resultados revelam dependências significativas das taxas de infiltração em relação à umidade do solo, gradientes do lençol freático e colmatação, destacando a importância da configuração do sistema para a otimização de desempenho.

ABSTRACT

WATER INFILTRATION INTO SOIL UNDER SATURATED-UNSATURATED CONDITIONS FROM INFILTRATION DEVICES

This study analyzed infiltration processes in urban drainage devices, comparing rectangular infiltration trenches and circular infiltration wells. Simulations were conducted using a saturated-unsaturated flow model based on the Richards equation in the FEFLOW program, contrasting the results with simplified methodologies, such as those adopted by the SWMM program. The simplified methodologies demonstrated limitations due to conservative approaches, such as considering a constant infiltration rate restricted to the bottom area of the devices. In contrast, the detailed modeling in FEFLOW provided a more accurate understanding of infiltration processes, incorporating factors such as matric forces, pressure gradients, and variables associated with device depth and the water table level. The results showed that methodological differences could lead to significant variations in infiltrated flow estimates, especially in scenarios where water depth and saturated hydraulic conductivity have substantial influence. These differences can directly impact the costs of implementing infiltration devices, given that the availability of space in urbanized regions is a limiting factor for infrastructure deployment. The modeling of infiltration trenches enabled detailed assessments of soil properties, initial moisture content, water table level configurations, and clogging effects. The study also explored the impact of trench geometry, including depth, width, and length, on infiltration capacity. Infiltration wells were modeled to allow for experimental evaluation, including calibration and verification processes, as well as the assessment of different configurations, pedological characteristics, and hydraulic behavior under simplified and refined mesh conditions. The results revealed significant dependencies of infiltration rates on soil moisture, water table gradients, and clogging, highlighting the importance of system configuration for performance optimization.

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	20
2	OBJETIVOS	22
2.1	OBJETIVO GERAL	22
2.2	OBJETIVOS ESPECÍFICOS	22
3	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA E REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	23
3.1	TÉCNICAS COMPENSATÓRIAS DE DRENAGEM URBANA	23
3.1.1	POÇOS DE INFILTRAÇÃO	24
3.1.2	TRINCHEIRAS DE INFILTRAÇÃO	28
3.2	DRENAGEM URBANA NO DISTRITO FEDERAL	30
3.2.1	TÉCNICAS COMPENSATÓRIAS NO DISTRITO FEDERAL	32
3.2.2	CARACTERIZAÇÃO GEOMORFOLÓGICA DO DISTRITO FEDERAL	35
3.2.2.1	PEDOLOGIA	35
3.2.2.2	PRECIPITAÇÃO	37
3.3	MODELAGEM EM DRENAGEM URBANA	38
3.3.1	VAZÃO DE RESTRIÇÃO	38
3.3.2	MODELOS HIDROLÓGICOS	40
3.4	MODELOS DE INFILTRAÇÃO E ESCOAMENTO SUPERFICIAL	41
3.4.1	EQUAÇÃO DE RICHARDS	41
3.5	ABORDAGENS NO DIMENSIONAMENTO DE TÉCNICAS COMPENSATÓRIAS ...	44
3.5.1	SWMM	45
3.5.1.1	APRESENTAÇÃO DO MODELO	45
3.5.1.2	LIDS NO SWMM	47
3.5.2	MANUAL DE DRENAGEM DO DISTRITO FEDERAL	49
3.5.3	FEFLOW	50
3.5.3.1	MÉTODO DOS ELEMENTOS FINITOS NO FEFLOW	51
3.5.3.2	A EQUAÇÃO DE RICHARDS NO FEFLOW	51
3.5.3.3	CONFIGURAÇÕES BÁSICAS DE UM PROBLEMA NO FEFLOW ...	53
3.5.4	TRABALHOS SOBRE FLUXOS EM DISPOSITIVOS DE INFILTRAÇÃO	54
3.6	LEVANTAMENTO DE DADOS PARA A MODELAGEM COMPUTACIONAL	58
3.6.1	CONDUTIVIDADE HIDRÁULICA DO SOLO	58
3.6.2	DADOS DE SOLOS DO DF	59

4	METODOLOGIA	61
4.1	MODELAGEM DE LIDS USANDO O SWMM - TRINCHEIRA DE INFILTRAÇÃO	62
4.2	QUANTIFICAÇÃO DE INFILTRAÇÃO PELO MANUAL DE DRENAGEM URBANA DA ADASA - TRINCHEIRAS DE INFILTRAÇÃO	64
4.3	MODELAGEM DE LIDS USANDO O FEFLOW - CRIAÇÃO DE CENÁRIOS	66
4.4	MODELAGEM DE LIDS USANDO O FEFLOW - TRINCHEIRAS DE INFILTRAÇÃO	67
4.4.1	CASO GERAL	68
4.4.2	PERCOLAÇÃO PELO FUNDO (SWMM)	71
4.4.3	CARACTERÍSTICAS DO SOLO	73
4.4.4	UMIDADE INICIAL DO SOLO	74
4.4.5	COLMATAÇÃO	76
4.4.6	NÍVEL DO LENÇOL FREÁTICO	77
4.4.6.1	LENÇOL FREÁTICO HORIZONTAL	77
4.4.6.2	LENÇOL FREÁTICO COM GRADIENTE HIDRÁULICO	78
4.4.7	CARACTERÍSTICAS FÍSICAS DAS TRINCHEIRAS	79
4.4.7.1	PROFUNDIDADE	80
4.4.7.2	COMPRIMENTO	81
4.4.7.3	LARGURA	81
4.5	MODELAGEM DE POÇOS DE INFILTRAÇÃO	82
4.5.1	LOCALIZAÇÃO	83
4.5.2	PEDOLOGIA	84
4.5.3	POÇOS RK	86
4.5.4	PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL	87
4.5.5	CENÁRIO RK USANDO O FEFLOW	89
4.5.6	CALIBRAÇÃO E VERIFICAÇÃO DO POÇO RK	92
4.5.7	DIFERENTES CONFIGURAÇÕES	93
4.5.8	DIFERENTES PROFUNDIDADES	95
5	RESULTADOS E DISCUSSÃO	97
5.1	MODELAGEM COMPUTACIONAL DE LIDS USANDO O SWMM	98
5.2	QUANTIFICAÇÃO DE INFILTRAÇÃO PELO MANUAL DE DRENAGEM URBANA DA ADASA - TRINCHEIRAS DE INFILTRAÇÃO	101
5.3	MODELAGEM COMPUTACIONAL DE TRINCHEIRA DE INFILTRAÇÃO USANDO O FEFLOW	103
5.3.1	CASO GERAL	105
5.3.2	PERCOLAÇÃO PELO FUNDO (SWMM)	110
5.3.3	UMIDADE INICIAL DO SOLO	114

5.3.4 NÍVEL DO LENÇOL FREÁTICO	116
5.3.5 COLMATAÇÃO	120
5.3.6 CARACTERÍSTICAS DO SOLO	122
5.3.7 CARACTERÍSTICAS FÍSICAS DAS TRINCHEIRAS	124
5.3.8 DIFERENTES PROFUNDIDADES	127
5.4 CONSIDERAÇÕES GERAIS SOBRE OS RESULTADOS OBTIDOS PARA TRINCHEIRAS DE INFILTRAÇÃO	133
5.5 MODELAGEM COMPUTACIONAL DE POÇO DE INFILTRAÇÃO USANDO O FEFLOW	137
5.5.1 PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL	137
5.5.2 CONFIGURAÇÃO DOS CENÁRIOS RK USANDO FEFLOW	141
5.5.3 CALIBRAÇÃO E VERIFICAÇÃO DO POÇO RK COM MALHA SIMPLIFICADA	143
5.5.4 CALIBRAÇÃO E VERIFICAÇÃO DO POÇO RK COM MALHA REFINADA	147
5.5.5 COMPARAÇÃO DOS RESULTADOS UTILIZANDO AS MALHAS SIMPLIFICADA E REFINADA	148
5.5.6 DIFERENTES CONFIGURAÇÕES	149
5.5.7 DIFERENTES PROFUNDIDADES DO POÇO RK.....	152
5.6 RELAÇÕES ENTRE ÁREA CONSTRUÍDA E ÁREA OCUPADA POR MEDIDAS DE CONTROLE POR INFILTRAÇÃO	157
5.7 CONSIDERAÇÕES GERAIS SOBRE OS RESULTADOS OBTIDOS PARA POÇOS DE INFILTRAÇÃO	162
6 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES.....	163

Lista de Figuras

3.1	Esquema de configuração de poços de infiltração (ADASA, 2018).....	25
3.2	Esquema de configuração de poços de infiltração com sistema de decantação (ADASA, 2018).....	26
3.3	(A) Esquema de configuração de poços de infiltração fechados P-SC; (B) Anéis de concreto; (C) Configuração da tubulação (FERREIRA; BARBASSA; MORUZZI, 2018).	27
3.4	(A) Esquema de configuração de poços de infiltração adaptados P-GHidro; (B) Anéis de concreto com brita nas laterais; (C) Tampa modificada (FERREIRA; BARBASSA; MORUZZI, 2018).....	27
3.5	Esquema de configuração de trincheiras de infiltração, corte transversal (ADASA, 2018).....	29
3.6	Esquema de configuração de trincheiras de infiltração, corte longitudinal (ADASA, 2018).....	29
3.7	Mapa de solos do Distrito Federal , na escala 1:100.000, com indicação das classes de solos (REATTO et al., 2004).....	36
3.8	Hietogramada chuva de projeto de Brasília com Tempo de Retorno de 10 anos pelo método dos blocos alternados.	38
3.9	Representação das camadas horizontais que modelam LIDs no SWMM (ROSMAN, 2016) adaptado.	47
4.1	Fluxograma da metodologia empregada no projeto.	62
4.2	Representação do cenário proposto para o modelo de trincheira usando o SWMM.....	63
4.3	Representação do cenário proposto para a quantificação da infiltração de trincheira usando a metodologia sugerida por ADASA (2023a).....	64
4.4	Painel de casos estudados no FEFLOW para análise de trincheiras de infiltração.	68
4.5	Representação esquemática do cenário criado no FEFLOW para o Caso Geral.	69
4.6	Cortes AA e BB da representação esquemática do cenário criado no FEFLOW para o Caso Geral.....	69
4.7	Representação esquemática de cenário criado no FEFLOW para o grupo de cenários <i>percolação pelo fundo</i> (SWMM).	73
4.8	Cortes AA e BB da representação esquemática dos cenários criados no FEFLOW para o grupo de cenários <i>percolação pelo fundo</i> (SWMM).	73

4.9	Representação esquemática de cenário criado no FEFLOW para o grupo de cenários <i>Características do solo</i>	74
4.10	Cortes AA e BB da representação esquemática dos cenários criados no FEFLOW para cada parâmetro do grupo de cenários <i>Características do solo</i>	74
4.11	Representação esquemática de cenário criado no FEFLOW para o grupo de cenários <i>umidade inicial do solo</i>	75
4.12	Cortes AA e BB da representação esquemática dos cenários criados no FEFLOW para o grupo de cenários <i>umidade inicial do solo</i>	75
4.13	Representação esquemática de cenário criado no FEFLOW para o grupo de cenários <i>Colmatação</i>	77
4.14	Cortes AA e BB da representação esquemática dos cenários criados no FEFLOW para o grupo de cenários <i>Colmatação</i>	77
4.15	Representação esquemática de cenário criado no FEFLOW para o grupo de cenários <i>Nível de lençol freático plano</i>	78
4.16	Cortes AA e BB da representação esquemática dos cenários criados no FEFLOW para o grupo de cenários <i>Nível de lençol freático plano</i>	78
4.17	Representação esquemática de cenário criado no FEFLOW para o grupo de cenários <i>lençol freático com gradiente</i>	79
4.18	Cortes AA e BB da representação esquemática dos cenários criados no FEFLOW para o grupo de cenários <i>lençol freático com gradiente</i>	79
4.19	Representação esquemática de cenário criado no FEFLOW para o grupo de cenários <i>características físicas das trincheiras - Profundidade</i>	80
4.20	Cortes AA e BB da representação esquemática dos cenários criados no FEFLOW para cada parâmetro do grupo de cenários <i>características físicas das trincheiras - Profundidade</i>	80
4.21	Representação esquemática de cenário criado no FEFLOW para o grupo de cenários <i>características físicas das trincheiras - Comprimento</i>	81
4.22	Cortes AA e BB da representação esquemática dos cenários criados no FEFLOW para cada parâmetro do grupo de cenários <i>características físicas das trincheiras - Comprimento</i>	81
4.23	Representação esquemática de cenário criado no FEFLOW para o grupo de cenários <i>características físicas das trincheiras - Largura</i>	82
4.24	Cortes AA e BB da representação esquemática dos cenários criados no FEFLOW para cada parâmetro do grupo de cenários <i>características físicas das trincheiras - Largura</i>	82
4.25	Organograma dos cenários criados no FEFLOW para o estudo de poços de infiltração.	83

4.26	Mapa de situação da área de estudo.	84
4.27	Mapa pedológico da área de estudo.	85
4.28	Poço de infiltração - detalhe do processo de construção com anéis de concreto.	86
4.29	Poço de infiltração - detalhe dos dispositivos de infiltração.	86
4.30	Poço de infiltração - configuração final antes de soterramento.	86
4.31	Desenho esquemático do poço e dimensões.	87
4.32	Poço de infiltração - detalhe da instalação da régua linimétrica.	88
4.33	Poço de infiltração - detalhe da régua linimétrica e nível d'água.	88
4.34	Poço de infiltração - Representação esquemática do cenário do poço e vista em planta.	89
4.35	Representação esquemática de cenário criado no FEFLOW para o grupo de cenários <i>Diferentes configurações</i>	95
4.36	Cortes AA e BB da representação esquemática dos cenários criados no FEFLOW para o grupo de cenários <i>Diferentes configurações</i>	95
4.37	Representação esquemática de cenário criado no FEFLOW para o grupo de cenários <i>Diferentes profundidades</i>	96
4.38	Cortes AA e BB da representação esquemática dos cenários criados no FEFLOW para o grupo de cenários <i>Diferentes profundidades</i>	96
5.1	Representação do cenário criado no modelo SWMM	98
5.2	Taxa de infiltração do cenário preliminar no SWMM, aplicando condutividade hidráulica de 45,8 mm/h.	99
5.3	Volume acumulado infiltrado pela trincheira do cenário preliminar no SWMM, aplicando condutividade hidráulica de 45,8 mm/h.	99
5.4	Vazão infiltrada pela metodologia sugerida por ADASA (2023a), aplicando condutividade hidráulica de 45,8 mm/h.	101
5.5	Volume infiltrado pela metodologia sugerida por ADASA (2023a), aplicando condutividade hidráulica de 45,8 mm/h.	102
5.6	Configuração do cenário usando o FEFLOW - <i>Supermesh</i>	103
5.7	Configuração do cenário usando o FEFLOW - malha de elementos finitos na primeira camada da malha.	104
5.8	Configuração do cenário usando o FEFLOW - perfil de solo.	104
5.9	Comparação entre volumes infiltrados usando o modelo SWMM e o modelo FEFLOW para o caso geral.	105
5.10	Comparação entre volumes infiltrados usando o modelo SWMM e o modelo FEFLOW para o caso geral.	106
5.11	Volumes infiltrados pelas laterais e pelo fundo da trincheira para o Caso Geral aplicando o FEFLOW.	107

5.12	Volumes infiltrados pelas laterais e pelo fundo da trincheira para o Caso Geral aplicando o FEFLOW.	108
5.13	Processo de infiltração no Caso Geral usando o FEFLOW (corte AA).....	110
5.14	Comparação entre volumes infiltrados usando o modelo SWMM e o modelo FEFLOW com percolação apenas pelo fundo para o caso geral.	111
5.15	Trincheiras de mesma área superficial e diferentes profundidades com percolação apenas pelo fundo usando o FEFLOW e o SWMM.	112
5.16	Vazão infiltrada por trincheiras de mesma área superficial e diferentes profundidades com percolação apenas pelo fundo usando o FEFLOW e o SWMM.	113
5.17	Vazão infiltrada por trincheiras de mesma área superficial e diferentes profundidades com percolação apenas pelo fundo usando o FEFLOW e o SWMM após 2 horas de simulação.	113
5.18	Volumes infiltrados após aplicando umidade inicial igual à capacidade de campo do solo a diferentes profundidades.....	114
5.19	Volumes infiltrados aplicando umidade inicial igual à capacidade de campo do solo a diferentes profundidades.	115
5.20	Vazão infiltrada após 2 horas de simulação aplicando umidade inicial igual à capacidade de campo do solo a diferentes profundidades.	116
5.21	Volumes infiltrados aplicando diferentes níveis do lençol freático.	117
5.22	Vazões infiltradas aplicando diferentes níveis do lençol freático.	118
5.23	Ajuste de vazões infiltradas após 2 horas de simulação aplicando diferentes níveis do lençol freático.....	118
5.24	Volumes infiltrados após 2 horas de simulação aplicando diferentes gradientes ao lençol freático.	119
5.25	Volumes infiltrados aplicando diferentes níveis de impermeabilização no fundo da trincheira.....	120
5.26	Vazões infiltradas aplicando diferentes níveis de colmatção no fundo da trincheira.....	121
5.27	Ajuste de valores de vazão de infiltração após 2 horas de simulação para diferentes níveis de colmatção no fundo da trincheira.	122
5.28	Varição dos parâmetros do solo na modelagem de trincheiras de infiltração no FEFLOW.	123
5.29	Volumes infiltrados após 2 horas de simulação variando as dimensões da trincheira.....	124
5.30	Lâminas infiltradas após 2 horas de simulação variando as dimensões da trincheira.....	126

5.31	Lâmina infiltrada após 2 horas de simulação variando as dimensões da trincheira.	127
5.32	Comparação entre volumes infiltrados usando o modelo FEFLOW para trincheiras com diferentes profundidades.	128
5.33	Comparação entre vazões infiltradas usando o modelo FEFLOW para trincheiras com diferentes profundidades.	129
5.34	Comparação entre lâminas infiltradas usando o modelo FEFLOW para trincheiras com diferentes profundidades.	130
5.35	$K_{equivalente}$ do fundo em função da profundidade do dispositivo. Em que $K_{equivalente}$ é um fator multiplicador de K_{Sat}	131
5.36	$K_{equivalente}$ das laterais em função da profundidade do dispositivo. Em que $K_{equivalente}$ é um fator multiplicador de K_{Sat}	132
5.37	Vazão infiltrada para trincheiras de diferentes configurações geradas a partir dos resultados das simulações usando o FEFLOW.	133
5.38	Dados do ensaio de enchimento do poço de infiltração.	138
5.39	Registro da ocorrência de vazões na rede durante o ensaio em campo.	139
5.40	Vazões infiltradas calculadas a partir dos dados de esvaziamento de campo.	140
5.41	Volumes infiltrados calculados a partir das vazões infiltradas.	140
5.42	Cenário RK simplificado usando o FEFLOW - <i>Supermesh</i>	141
5.43	Cenário RK simplificado usando o FEFLOW - Malha de elementos finitos.....	141
5.44	Cenário RK no FEFLOW - Corte AA do cenário com dados iniciais definidos	142
5.45	Cenário RK refinado no FEFLOW - <i>Supermesh</i>	143
5.46	Cenário RK refinado no FEFLOW - Malha de elementos finitos.....	143
5.47	Cenário RK refinado no FEFLOW - Corte AA do cenário com dados iniciais definidos.....	143
5.48	Cenário RK no FEFLOW - Calibração preliminar do volume infiltrado.	144
5.49	Cenário RK no FEFLOW - Calibração preliminar da vazão infiltrada.	145
5.50	Cenário RK no FEFLOW - Verificação preliminar do volume infiltrado.	146
5.51	Cenário RK no FEFLOW - Verificação preliminar da vazão infiltrada.	146
5.52	Cenário RK no FEFLOW - Calibração de volume e vazão aplicando o cenário refinado.	147
5.53	Cenário RK no FEFLOW - Verificação de volume e vazão aplicando o cenário refinado.	148
5.54	Comparação entre a verificação realizada pela malha simplificada e a refinada.	149
5.55	Comparação entre volumes infiltrados usando o modelo FEFLOW para poços com diferentes configurações.....	150

5.56	Comparação entre vazões infiltradas usando o modelo FEFLOW para poços com diferentes configurações.	150
5.57	Comparação entre lâminas infiltradas usando o modelo FEFLOW para poços com diferentes configurações.	151
5.58	Comparação entre volumes infiltrados usando o modelo FEFLOW para poços com diferentes profundidades.	152
5.59	Comparação entre vazões infiltradas usando o modelo FEFLOW para poços com diferentes profundidades.	153
5.60	Comparação entre lâminas infiltradas usando o modelo FEFLOW para poços com diferentes profundidades.	154
5.61	$K_{equivalente}$ do fundo em função da profundidade do dispositivo. Em que $K_{equivalente}$ é um fator multiplicador de K_{Sat}	155
5.62	$K_{equivalente}$ das laterais em função da profundidade do dispositivo. Em que $K_{equivalente}$ é um fator multiplicador de K_{Sat}	155
5.63	Curva de vazão infiltrada para poços de diferentes profundidades com base nas relações de $K_{equivalente}$	156
5.64	Curva de vazão infiltrada para trincheiras de 1 m de profundidade com base nas relações de $K_{equivalente}$	159
5.65	Curva de vazão infiltrada para poços de diferentes profundidades com base nas relações de $K_{equivalente}$. Destaque para a profundidade cuja vazão infiltrada é 0,044 m ³ /min.	159
5.66	Curva de vazão infiltrada para trincheiras de 0.5 m de profundidade com base nas relações de $K_{equivalente}$	161

Lista de Tabelas

3.1	Potencialidades e desafios no uso de poços de infiltração.	28
3.2	Potencialidades e desafios no uso de trincheiras de infiltração.	30
3.3	Trabalhos selecionados que estudaram técnicas compensatórias no DF e regiões próximas.	32
3.4	Trabalhos selecionados que estudaram formas de quantificar a infiltração de medidas de controle de escoamento.	54
3.5	Trabalhos selecionados que estudaram formas de quantificar a infiltração de medidas de controle de escoamento no Brasil.	56
3.6	Estatísticas básicas dos dados coletados por Lima (2010) para a caracterização da estação hidrológica Olhos d'Água.	59
3.7	Estatísticas básicas dos dados coletados por Lima (2010) para a caracterização da Bacia experimental do Alto Rio Jardim.	60
4.1	Características do modelo usando o SWMM.	64
4.2	Características físicas do cenário Caso Geral no FEFLOW para trincheiras de infiltração.	69
4.3	Características de umidade inicial, condições de contorno, nível do lençol freático e colmatção do cenário Caso Geral no FEFLOW para trincheiras de infiltração.	70
4.4	Características do solo do cenário Caso Geral no FEFLOW para trincheiras de infiltração.	71
4.5	Distribuição das camadas da malha do Caso Geral no FEFLOW para trincheiras de infiltração.	71
4.6	Características físicas dos cenários do grupo <i>percolação pelo fundo (SWMM)</i> no FEFLOW para trincheiras de infiltração.	72
4.7	Características de umidade inicial, condições de contorno, nível do lençol freático e colmatção do grupo de cenários <i>percolação pelo fundo (SWMM)</i> no FEFLOW para trincheiras de infiltração.	72
4.8	Características do solo do grupo <i>Características do solo</i> no FEFLOW para trincheiras de infiltração.	74
4.9	Características de umidade inicial, condições de contorno, nível do lençol freático e colmatção do grupo de cenários <i>umidade inicial do solo</i> no FEFLOW para trincheiras de infiltração.	75

4.10	Características de umidade inicial, condições de contorno, nível do lençol freático e colmatação do grupo de cenários Colmatação no FEFLOW para trincheiras de infiltração.	76
4.11	Características de umidade inicial, condições de contorno, nível do lençol freático e colmatação do grupo de cenários <i>nível do lençol freático plano</i> no FEFLOW para trincheiras de infiltração.	77
4.12	Características de umidade inicial, condições de contorno, nível do lençol freático e colmatação do grupo de cenários <i>lençol freático com gradiente</i> no FEFLOW para trincheiras de infiltração.	79
4.13	Características físicas dos cenários do grupo <i>características físicas das trincheiras - Profundidade</i> no FEFLOW para trincheiras de infiltração.	80
4.14	Características físicas dos cenários do grupo <i>características físicas das trincheiras - Comprimento</i> no FEFLOW para trincheiras de infiltração.	81
4.15	Características físicas dos cenários do grupo <i>características físicas das trincheiras - Largura</i> no FEFLOW para trincheiras de infiltração.	82
4.16	Características físicas do cenário RK no FEFLOW.	90
4.17	Características de umidade inicial, condições de contorno, nível do lençol freático e colmatação do cenário RK no FEFLOW.	90
4.18	Características do solo do cenário RK no FEFLOW.	91
4.19	Distribuição das camadas da malha no cenário RK no FEFLOW.	91
4.20	Características físicas dos cenários do grupo Diferentes configurações no FEFLOW.	94
4.21	Características de umidade inicial, condições de contorno, nível do lençol freático e colmatação dos cenários do grupo Diferentes configurações no FEFLOW.	94
4.22	Características físicas do cenário Diferentes profundidas no FEFLOW.	95
4.23	Características de umidade inicial, condições de contorno, nível do lençol freático e colmatação do cenário Diferentes profundidades no FEFLOW.	96
5.1	Relação entre condutividade hidráulica e condutividade equivalente de cada região para diferentes profundidades do dispositivo.	130
5.2	Dados do experimento de enchimento do poço de infiltração - origem na superfície do solo.	137
5.3	Relação entre condutividade hidráulica e condutividade equivalente de cada região para diferentes profundidades do dispositivo.	154

Lista de Abreviações

<i>ADASA</i>	Agência Reguladora de águas, Energia e Saneamento do Distrito Federal
<i>AMC</i>	<i>Antecedent Moisture Condition</i>
<i>ANA</i>	Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico
<i>BIM</i>	modelo da informação da Cconstrução
<i>CAD</i>	desenho assistido por computador
<i>CHIWATER</i>	<i>Computational Hydraulics International</i>
<i>CN</i>	coeficiente curva número
<i>EMBRAPA</i>	Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária
<i>EPA</i>	<i>Environmental Protect Agency</i>
<i>FEFLOW</i>	<i>Finite Element Subsurface Flow & Transport Simulation System</i>
<i>FEM</i>	<i>Finite-Element Mesh</i>
<i>h</i>	horas
<i>ha</i>	hectares
<i>I_a</i>	abstração inicial
<i>IDF</i>	curva Intensidade – Duração – Frequência
<i>LID</i>	<i>Low Impact Development</i>
<i>LIUDD</i>	<i>Low Impact Urban Design and Development</i>
<i>m²</i>	metros quadrados
<i>m³</i>	metros cúbicos
<i>min</i>	minutos
<i>mm</i>	milímetros
<i>NOVACAP</i>	Companhia Urbanizadora da Nova Capital
<i>P</i>	precipitação
<i>PDDU</i>	Plano Diretor de Drenagem Urbana
<i>PDOT</i>	Plano Diretor de Ordenamento Territorial
<i>Pe</i>	precipitação efetiva
<i>Q</i>	vazão
<i>s</i>	segundos
<i>S</i>	Capacidade de armazenamento no solo
<i>SCS</i>	Serviço de Conservação do Solo dos Estados Unidos
<i>SIG</i>	sistema de informações geográficas
<i>SUDS</i>	<i>Sustainable Urban Drainage Systems</i>
<i>SWMM</i>	<i>Storm Water Management Model</i>
<i>T_c</i>	tempo de concentração

T_r tempo de retorno
WSUD *Water Sensitive Urban Design*

1 INTRODUÇÃO

A impermeabilização, causada pela redução da cobertura vegetal da superfície de bacias hidrográficas e das áreas de infiltração no processo de urbanização, é importante no manejo de águas pluviais urbanas (ADASA, 2023a). A impermeabilização impacta diretamente no regime de águas superficiais decorrente de chuvas, aumentando o volume de água escoada e antecipando a ocorrência da máxima vazão escoada. O planejamento do manejo de águas pluviais pode se dar pela implementação de diversas técnicas, como os dispositivos de baixo impacto, que têm sido estudados com o intuito de promover reduções de vazão por meio de intervenções urbanas menos impactantes.

medidas de controle de escoamento na fonte podem ser empregadas em diferentes escalas, buscando aproximar vazões resultantes do desenvolvimento urbano daquelas observadas na situação de pré-desenvolvimento. Elas requerem áreas internas ao meio urbano, por vezes já ocupadas, ou à jusante, muitas vezes próximo a corpos d'água, em áreas de proteção ambiental. Assim, ainda que sejam vistas como soluções viáveis para reduzir o impacto da ocupação urbana, muitas vezes, encontra-se limitada disponibilidade de espaço para sua implementação. Mesmo em áreas planejadas, há resistência à separação de áreas para medidas de controle em função da valorização dos terrenos. Esse cenário, de necessidade de medidas de controle e de dificuldade na sua alocação, evidencia a importância de se realizarem investigações a respeito da sua eficiência e dos ganhos associados quando elas são inseridas nos espaços urbanos.

Uma vez que é fundamentada em processos naturais, a operação de medidas compensatórias apresenta funcionamento condicionado às características climáticas e geológicas regionais. Por exemplo, em regiões de climas tropicais e subtropicais, como o cerrado brasileiro, o regime de chuvas e os tipos de solo característicos podem fazer com que a operação dos dispositivos seja diferente daquela observada em regiões de clima temperado. A maioria dos métodos de dimensionamento de medidas de controle, como os implementados no *Storm Water Management Model* (SWMM), são baseados em cálculos simplificados ou fórmulas empíricas fundamentadas em experimentos. Investigações mais detalhadas podem ser exploradas para melhor caracterizar os impactos da utilização dos dispositivos, considerando especificidades do solo local e aplicando modelos que simulem com detalhamento não apenas os processos de retenção, mas com foco nos processos de infiltração.

Estudos hidrológicos e hidráulicos podem ser conduzido mediante a utilização do modelo computacional SWMM, modelo hidrológico de manejo de águas pluviais desenvolvido para

permitir a previsão hidráulica, hidrológica e de qualidade de escoamento em sistemas de drenagem para determinado cenário. Para o estudo mais acurado das diferentes medidas de controle em situações em que se conhece a permeabilidade do solo e a profundidade do lençol freático, podem ser estudados os fenômenos de percolação em meio saturado-não saturado. O *Finite-Element Simulation System for Subsurface Flow and Transport Processes* (FEFLOW) é um dos modelos numéricos para a resolução desse tipo de problema. Ambos modelos foram aplicados e seus resultados foram comparados.

Estudos vêm sendo realizados para caracterizar a relevância da infiltração em medidas compensatórias de drenagem. Guo e Luu (2015) destacam a importância da caracterização da condutividade hidráulica do solo. Locatelli et al. (2015) comentam sobre a relevância da distância entre o dispositivo de infiltração e o aquífero subterrâneo. Sage, Berthier e Gromaire (2020) trazem uma reflexão acerca do processo de redistribuição de água no solo. Coutinho et al. (2015) chamam atenção para a relevância da heterogeneidade do solo, que gera variabilidade espacial do fluxo.

No Distrito Federal, a Resolução Nº 26 de 17 de agosto de 2023 (ADASA, 2023b) estabelece critérios para a outorga de lançamento de águas pluviais em corpos hídricos. Segundo o documento, a outorga de lançamento decorrente de impermeabilização deve se limitar à vazão específica de até $24,4 L \cdot s^{-1} \cdot ha^{-1}$. Portanto, a vazão máxima efluente de determinado empreendimento deve ser obtida levando em conta a vazão específica fixada, a área do terreno e a área impermeabilizada, sendo possível que tal controle seja feito por meio de retenção, infiltração ou uma combinação de ambos mecanismos. Assim, a quantificação da infiltração dos dispositivos para os solos do Distrito Federal, em especial para aqueles de menor capacidade de infiltração, os cambissolos, é de interesse do manejo de águas pluviais.

O presente estudo teve como objetivo verificar os impactos hidrológicos da implementação de medidas de controle incluindo etapas de modelagem e um estudo de caso com coleta de dados em campo no Distrito Federal, Brasil. De modo específico, o estudo buscou avaliar o funcionamento de medidas de controle quanto à infiltração da água da chuva, considerando o efeito de diferentes métodos de simulação da água no solo (SWMM, FEFLOW e Adasa); de variações na profundidade de instalação das medidas de controle; e de tipos de medidas compensatórias (trincheira de infiltração e poço de infiltração).

O trabalho está estruturado em 6 capítulos. O capítulo 2 apresenta objetivos gerais e específicos. O capítulo 3 contém referencial teórico e revisão bibliográfica fundamental para a realização do trabalho, trazendo conceitos e abordagens importantes para a compreensão da temática abordada. No capítulo 4 é detalhada a metodologia empregada para alcançar os objetivos fixados no capítulo 2. O capítulo 5 apresenta os resultados do trabalho e o capítulo 6 traz conclusões e recomendações para trabalhos futuros.

2 OBJETIVOS

2.1 OBJETIVO GERAL

Analisar por meio de modelagem computacional o funcionamento de dispositivos de infiltração destinados ao controle do escoamento na fonte em ambientes urbanos.

2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Analisar a infiltração a partir de trincheiras de infiltração retangulares para diferentes formas e condições do lençol freático usando o FEFLOW;
- Comparar a infiltração obtida por trincheiras de infiltração utilizando o FEFLOW, o SWMM e o procedimento proposto pela ADASA;
- Analisar a infiltração a partir de poços de infiltração usando o FEFLOW e comparar com resultados obtidos em campo de um poço em operação;
- Relacionar o espaço físico requerido por dispositivos de infiltração para compensar as vazões excedentes geradas pela impermeabilização.

3

FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA E REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Este capítulo apresenta conceitos e referências importantes para a elaboração do trabalho. As seções iniciais contextualizam as abordagens adotadas na área da drenagem urbana para lidar com as modificações promovidas no ciclo hidrológico pela urbanização, discutindo técnicas tradicionais de drenagem e introduzindo a ideia de técnicas compensatórias. A seção 3.2 traz um panorama da drenagem no Distrito Federal, com a apresentação de trabalhos selecionados que abordam a aplicação de medidas de controle de escoamento na fonte e também com a apresentação de características geomorfológicas da região. As seções seguintes, 3.3, 3.4, 3.5 e 3.6, tratam sobre modelagem em drenagem urbana. São detalhados os funcionamentos de modelos no processo de infiltração em medidas compensatórias e são apresentadas metodologias de levantamento de dados para a modelagem computacional.

3.1 TÉCNICAS COMPENSATÓRIAS DE DRENAGEM URBANA

Esta seção apresentará detalhes sobre características de funcionamento de diferentes técnicas compensatórias de drenagem urbana, por vezes chamadas de *Low Impact Developments* (LIDs), com exemplos de aplicação. Baptista (2005) classifica sistematicamente as medidas compensatórias estruturais em três grupos: técnicas para controle na fonte, técnicas lineares e técnicas para controle centralizado. São detalhados nos capítulos 3.1.1 e 3.1.2 poços e trincheiras de infiltração, de interesse especial para o presente trabalho.

A literatura internacional conta com bibliografia na área de técnicas compensatórias já há alguns anos, o livro de Urbonas e Stahre (1993) pode ser citado como exemplo. No Brasil, alguns trabalhos também alcançaram espaço de destaque na área (BAPTISTA, 2005; CANHOLI, 2015). Manuais técnicos também são importantes na área de técnicas compensatórias. Neles, aspectos construtivos são registrados com uma visão prática, diferente da encontrada na bibliografia acadêmica. Alguns exemplos internacionais e nacionais podem ser elencados (ADASA, 2023a; SUDERHSA, 2002; CIRIA, 2015; SEMCOG, 2008). Para complementar o entendimento teórico e compreender as tendências práticas mais atuais da área, trabalhos de implantação de técnicas compensatórias no Brasil e no mundo fornecem uma visão mais prática e atualizada do assunto.

Quanto à estratégia adotada para o controle das vazões, podem-se empregar individual ou conjuntamente tecnologias de retenção e infiltração. Logo, a implementação das medidas compensatórias requer, muitas vezes, o conhecimento da capacidade de infiltração do solo. No Plano Diretor de Drenagem Urbana do DF, (GDF, 2009), recomenda-se a adoção de condutividade hidráulica saturada mínima de $7,6 \text{ mmh}^{-1}$, que significa a adoção de coeficiente de condutividade hidráulica (ou coeficiente de permeabilidade) do solo (k) de $2,1 \cdot 10^{-6} \text{ ms}^{-1}$. Contudo, ADASA (2023a) alerta para a variabilidade das taxas de infiltração e a questão da colapsibilidade do solo do DF.

Algumas questões são importantes quando propostas tecnologias de infiltração. Uma delas é o conhecimento da profundidade do lençol subterrâneo. O nível deve ser considerado para que não ocorra a poluição das águas subterrâneas pela infiltração das cargas de águas pluviais. Assim, recomenda-se o distanciamento de pelo menos um metro entre o ponto mais baixo das medidas empregadas e a cota máxima do lençol (BAPTISTA, 2005), para ADASA (2023a) a recomendação é de uma 1,5 metro. A realização de manutenções periódicas é também muito importante para técnicas compensatórias, para que seja evitado o processo de colmatação, aumentando a vida útil dos dispositivos.

O uso de modelos para a representação de técnicas compensatórias pode ser um desafio no Brasil, uma vez que as formulações para dimensionamento dos dispositivos são propostas para climas temperados. Ainda assim, estudos de aplicação de técnicas compensatórias no Distrito Federal têm crescido nos últimos anos (FILENI; COSTA; ALVES, 2019). Dos Santos et al. (2021) registram uma análise dos efeitos hidrológicos da aplicação de técnicas compensatórias no Brasil e seus impactos ambientais no controle de inundações. Tais estudos apontam a atualidade da discussão e a importância da pesquisa dessa área para o Brasil e para países de clima tropical.

As técnicas compensatórias configuram certamente uma ferramenta valiosa para o controle de cheias urbanas, mas sua aplicação pode ser desafiadora devido à dificuldade em quantificar sua eficácia na infiltração de água. E se há trabalhos que pretendem enfatizar que seu valor está principalmente nos serviços ecossistêmicos que proporcionam, a importância precisa desses serviços também depende da quantificação dos volumes infiltrados. Sem uma quantificação adequada, torna-se difícil avaliar completamente o impacto das técnicas compensatórias no controle de cheias e no meio ambiente.

3.1.1 Poços de infiltração

Dispositivos pontuais de até 20 metros de profundidade, poços de infiltração têm como princípio de funcionamento o rearranjo do volume escoado, direcionado para o subsolo por

meio de infiltração. Seu uso apresenta destaque nas situações em que camadas subterrâneas apresentem maior permeabilidade que as camadas mais superficiais. ADASA (2018) ressalta a importância de posicionar poços de modo a evitar o seu processo de colmatção, provocado pela presença de material particulado fino na região. A manutenção, que deve ocorrer regularmente, pode significar um desafio dadas as profundidades que as infraestruturas podem alcançar e a depender da visitabilidade do local (BAPTISTA, 2005).

Segundo as diretrizes técnicas apresentadas por (ADASA, 2018), a configuração dos poços se dá utilizando material graúdo uniforme no preenchimento envolto em material geotêxtil com transpasse mínimo de 50 centímetros, como esquematizado na Figura 3.1. O estudo realizado por Barbassa, Sobrinha e Moruzzi (2014) destaca a importância da incorporação de manta geotêxtil para melhor funcionamento hidráulico da estrutura e a facilidade da substituição da manta, que contribui para aumento do tempo de vida da infraestrutura e manutenção das vazões de infiltração.

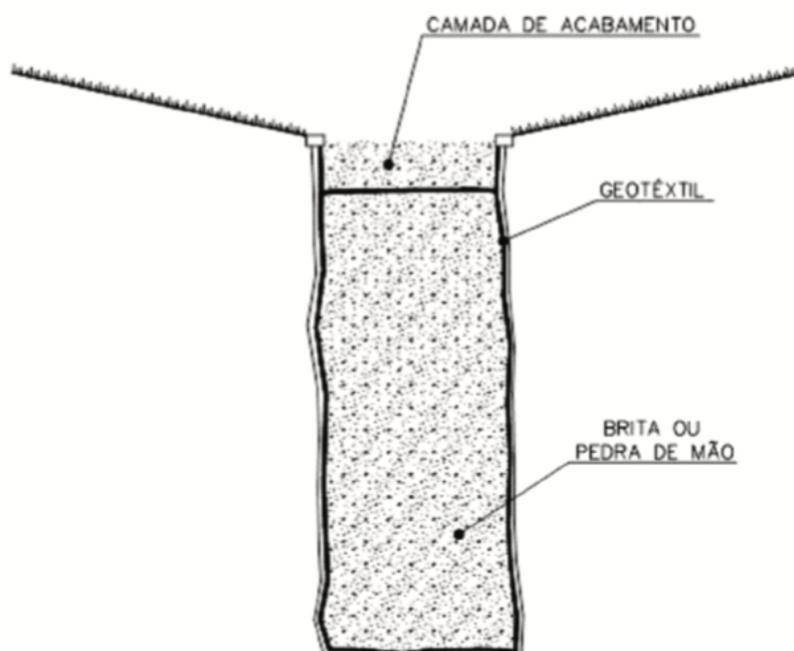


Figura 3.1: Esquema de configuração de poços de infiltração (ADASA, 2018).

Segundo (BAPTISTA, 2005), o funcionamento dos poços de infiltração pode se dar de modo difuso ou localizado. Enquanto esse pressupõe a condução do escoamento diretamente por ação da topografia ao poço, aquele recebe contribuição de uma rede de drenagem. A água é, então, evacuada por infiltração no solo ou por injeção direta no lençol subterrâneo.

neo, contribuindo para a alimentação do lençol. No caso de injeção direta, é aconselhado o uso de dispositivos de pré-tratamento para minimizar riscos associados à qualidade da água infiltrada. Um tipo de dispositivo de pré-tratamento é exemplificado na Figura 3.2.

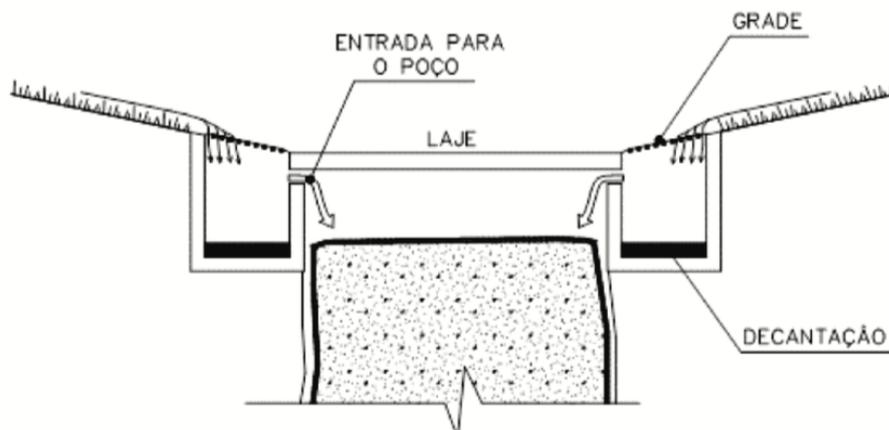


Figura 3.2: Esquema de configuração de poços de infiltração com sistema de decantação (ADASA, 2018).

Dada a pequena demanda por área superficial, possui boa integração no ambiente urbano. Ferreira, Barbassa e Moruzzi (2018) conduziram estudo de modificação da configuração tradicional de poços do tipo P-SC de infiltração fechados e de funcionamento localizado, que recebem vazões apenas por condutos, como esquematizado na Figura 3.3. A alteração se deu incorporando orifícios nas paredes laterais, na tampa e no fundo da estrutura de concreto, como exemplificado na Figura 3.4. Pela realização de ensaios com chuvas simuladas, verificou-se maior desempenho do poço modificado P-GHidro, que apresentou esvaziamento em tempos 4% menores e armazenamento 25% menor quando comparado com os poços convencionais.

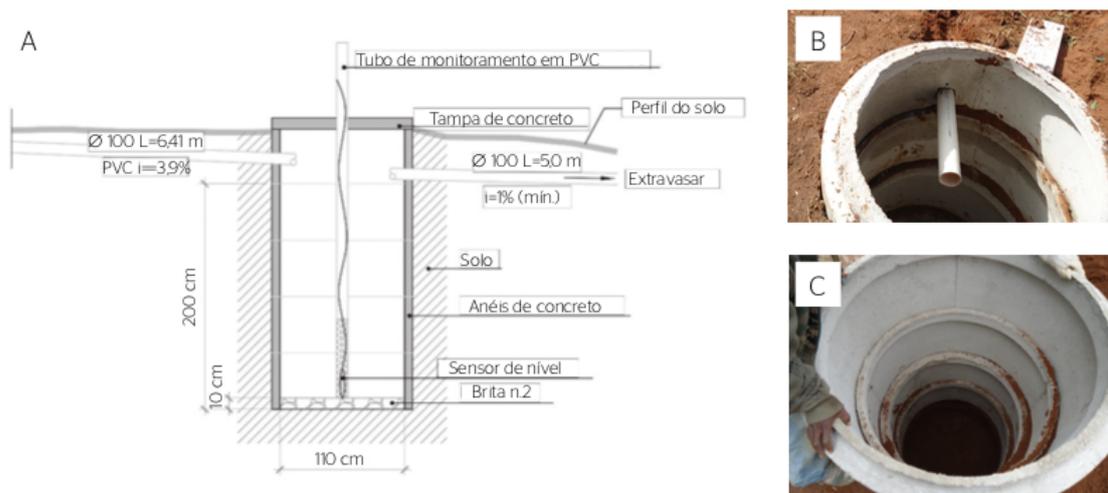


Figura 3.3: (A) Esquema de configuração de poços de infiltração fechados P-SC; (B) Anéis de concreto; (C) Configuração da tubulação (FERREIRA; BARBASSA; MORUZZI, 2018).

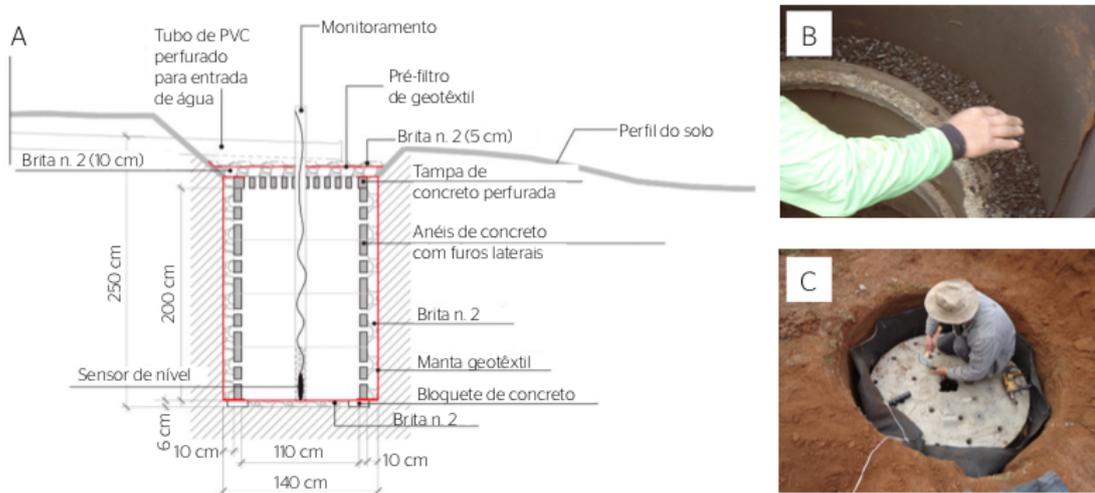


Figura 3.4: (A) Esquema de configuração de poços de infiltração adaptados P-GHidro; (B) Anéis de concreto com brita nas laterais; (C) Tampa modificada (FERREIRA; BARBASSA; MORUZZI, 2018).

Potencialidades e desafios da aplicação da tecnologia de poços de infiltração no manejo de águas pluviais são apresentados na tabela 3.1.

Tabela 3.1: Potencialidades e desafios no uso de poços de infiltração.

Potencialidades	Desafios
Aplicável em áreas de menor permeabilidade em camadas superficiais e maior em camadas profundas; Alimentação da vegetação e do lençol subterrâneo; Pequena ocupação de área superficial; Boa integração no ambiente urbano.	Necessidade de manutenção onerosa, que deve ser realizada regularmente para evitar a colmatção; Necessidade de dispositivo de tratamento no caso de injeção localizada; Risco de poluição do lençol subterrâneo.

3.1.2 Trincheiras de infiltração

Tipicamente aplicadas na superfície ou com pequena profundidade, as trincheiras de infiltração são elementos em que a dimensão de comprimento predomina sobre as outras. A tecnologia é implementada por meio de escavações no solo e preenchimento com material graúdo de granulometria uniforme envolvido em geotêxtil ou filtro de areia para controlar a entrada de sedimentos (SEMCOG, 2008). Os dispositivos podem ser aplicados em uma variedade de espaços urbanos, desde avenidas a praças e jardins, conferindo a valorização do ambiente. Por meio de condução direta pela topografia ou por sistemas de drenagem convencional, o dispositivo recebe águas pluviais que serão destinadas à infiltração no solo natural (BAPTISTA, 2005; SEMCOG, 2008).

Quando a água passa pelo reservatório preenchido por material granulometria uniforme, tem-se um ganho de qualidade pelo processo de filtração (BAPTISTA, 2005). Assim, para evitar a colmatção dos canalículos do reservatório e da superfície, manutenções periódicas devem ser realizadas. Uma medida que pode ser importante para a redução do processo de colmatção é a instalação de faixa vegetada ou dispositivo de sedimentação (ADASA, 2018). Pelo risco de perda de eficiência pela colmatção, a aplicação das trincheiras é mais recomendada em regiões já urbanizadas, em que o aporte de sedimentos é reduzido.

As figuras 3.6 e 3.5 esquematizam a configuração típica desse tipo de dispositivo.

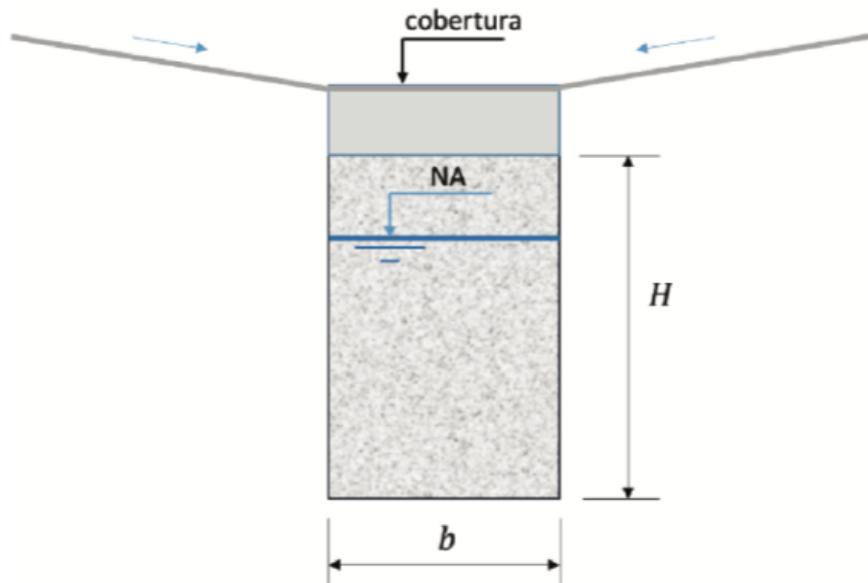


Figura 3.5: Esquema de configuração de trincheiras de infiltração, corte transversal (ADASA, 2018).

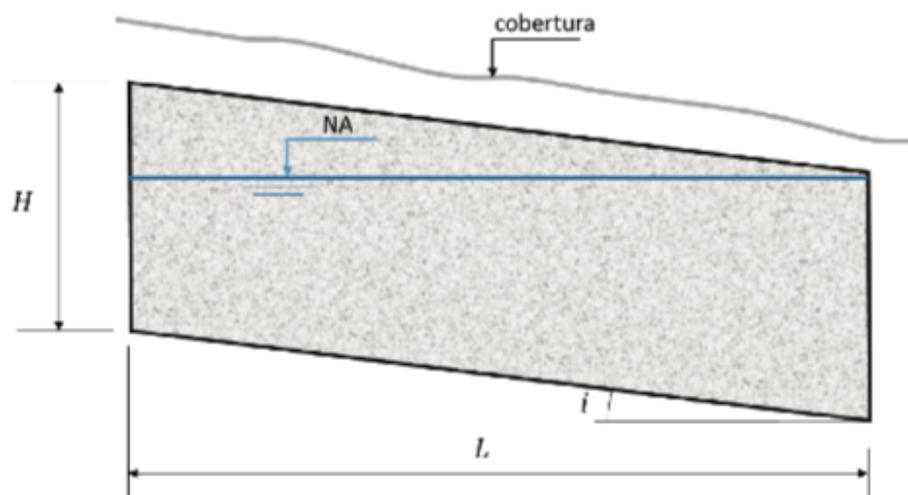


Figura 3.6: Esquema de configuração de trincheiras de infiltração, corte longitudinal (ADASA, 2018).

Ahmed et al. (2017) conduziram estudo de implementação de trincheiras de infiltração no campus da *University Technology Malaysia*. A pesquisa verificou, por meio de modelagem computacional aplicando o SWMM, o impacto da implantação das medidas na drenagem do campus. Pra que fosse possível compreender a importância da incorporação das medidas, foram avaliados cenários com e sem técnicas compensatórias. Os resultados indicaram

redução na faixa de 17,5% a 20% do pico de cheia em sub-bacias delimitadas na área de estudo.

Os estudos de Silva (2007) e Silva (2012) verificaram questões técnicas da viabilidade de implantação de trincheiras de infiltração adaptadas, com a inclusão de garrafas PET em sua composição. A tecnologia adaptada, além de promover ganhos ambientais relativos à reciclagem e ao aumento do volume de armazenamento, também provocou uma redução da sobrecarga e do colapso no solo. O estudo chama atenção para questões técnicas de implantação das trincheiras, uma vez que no Distrito Federal, a colapsibilidade do solo torna elevada a possibilidade de erosão interna nos dispositivos.

Potencialidades e desafios da aplicação de trincheiras de infiltração são citados na tabela 3.2.

Tabela 3.2: Potencialidades e desafios no uso de trincheiras de infiltração.

Potencialidades	Desafios
Boa integração na paisagem urbana; Simples e barata implementação; Ganho na qualidade de água infiltrada por ação da passagem pela estrutura; Aplicabilidade em grandes áreas do meio urbano.	Possibilidade de colmatação; Risco de poluição do lençol subterrâneo; Menor eficiência em regiões de maior declividade; Necessidade de manutenções para a garantia da longevidade.

3.2 DRENAGEM URBANA NO DISTRITO FEDERAL

A drenagem urbana no Brasil é configurada, em sua maioria, por sistema separador absoluto. São estruturas em que as tubulações escoam exclusivamente as águas pluviais, o que é especialmente interessante em regiões de chuvas intensas e solos pouco permeáveis. No Distrito Federal a drenagem é feita com base nesse tipo de sistema. Contudo, um grande desafio enfrentado pelas companhias de saneamento são as ligações clandestinas de esgoto em redes de águas pluviais, conforme já apontado por diversos autores (COSTA; KOIDE, 2014; SOUZA, 2014; PAULA, 2019; COSTA, 2022).

O Plano Diretor de Drenagem Urbana do Distrito Federal (PDDU-DF) é um marco na drenagem do DF. Trata-se do primeiro plano diretor que unifica os sistemas de drenagem na capital do país e traz uma abordagem que busca estimular a adoção de soluções de infraestrutura verde de controle de escoamento na fonte. O plano conta com manuais técnicos que tratam sobre modelagem e abordagens em drenagem urbana, relatório de caracterização com

estudos sobre situação da rede de macrodrenagem, erosão urbana e risco geológico. O documento traz ainda relatório de análise e articulação entre planejamento urbano e o sistema de drenagem, diagnósticos e plano de modernização, e planos de gestão e informação (GDF, 2009).

Nos manuais técnicos do PDDU, são abordados modelos hidrológicos e questões técnicas sobre drenagem urbana. No que diz respeito à modelagem hidrológica, o documento traz detalhes sobre o modelo IPHS1, desenvolvido pelo Instituto de Pesquisas Hidráulicas da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (IPH-UFRGS). O manual traz também a apresentação do modelo SWMM. Tratam-se de modelos hidrológicos que podem ser usados para simular o comportamento das bacias hidrográficas em resposta às chuvas. Ambos consideram a bacia como um sistema composto por sub-bacias e utiliza equações matemáticas para representar os processos de precipitação, infiltração, escoamento superficial e subterrâneo, permitindo a análise do comportamento hidrológico da bacia em diferentes cenários. Uma das diferenças observadas entre os modelos é que o IPHS1 não possui módulo para a simulação de medidas de controle na fonte (FILHO et al., 2004).

O manual de drenagem urbana do PDDU aborda o projeto de soluções alternativas de drenagem pluvial e normas para apresentação de projetos. Ele detalha como as normas do plano devem ser incorporadas na elaboração dos projetos, indicando os principais procedimentos. O documento aborda também a implantação, operação e manutenção de novas soluções tecnológicas de drenagem urbana. Esse manual orienta sobre as práticas de implementação dos projetos. No que diz respeito ao dimensionamento de estruturas, o documento se baseia na resolução da ADASA (2023b), que fixa uma vazão de restrição para lotes com mais de 600 km^2 . Desde a publicação do plano, podem-se observar publicações no Distrito Federal aplicando modelagem com SWMM em medidas compensatórias de drenagem. Alguns trabalhos são apresentados na seção seguinte.

A Agência Reguladora da Água, Energia e Saneamento do Distrito Federal (Adasa) limita as descargas de escoamento dos novos desenvolvimentos a $24,4 \text{ l/s/ha}$ e incentiva a utilização de dispositivos LID para atingir esta vazão de restrição (ADASA, 2023b). A agência também exige a manutenção da qualidade da água escoada, sugerindo a instalação de bacias de qualidade de águas pluviais. A resolução da Adasa recomenda a utilização de estruturas de controle na fonte. No entanto, ao indicar procedimentos de cálculo para o dimensionamento de bacias de retenção e detenção, a resolução induz os projetistas a concentrar medidas de controle apenas nos pontos de descarga, o que faria com que a utilização de estruturas de controle na fonte servisse apenas como forma de redução na área utilizada para o dimensionamento das bacias.

O Manual de Drenagem do Distrito Federal (ADASA, 2018) fornece detalhes de vários

dispositivos LID e propõe métodos de dimensionamento. Assim, o manual serve de guia para a utilização de dispositivos LID no território do Distrito Federal (DF). O manual sugere a adoção de fórmulas de dimensionamento que contam com a condutividade hidráulica saturada mas que não consideram o processo de molhamento do solo.

3.2.1 Técnicas compensatórias no Distrito Federal

Estudos vêm sendo realizados no DF com o objetivo de testar a utilização de medidas de gestão sustentável das águas pluviais em diferentes tipos de aplicação e diferentes tipos de uso do solo. Os locais de estudo correspondem, em sua maioria, a Regiões Administrativas com ocupação urbana consolidada. Todavia, como no Distrito Federal ainda há terras de posse da União, tem-se uma oportunidade de realização de políticas urbanas com melhores práticas para ocupação do espaço urbano, com características de cidades sensíveis à água (BIGONHA et al., 2023). Alguns trabalhos realizados no DF e em regiões próximas dos últimos anos são apresentados na tabela 3.3.

Tabela 3.3: Trabalhos selecionados que estudaram técnicas compensatórias no DF e regiões próximas.

Autor	Título	LID	Método	Principais resultados
Cadamuro e Campos (2005)	Recarga artificial de aquíferos fraturados no Distrito Federal: uma ferramenta para a gestão dos recursos hídricos	Poços profundos e caixas de infiltração	aplicação e teste de poços profundos de recarga direta	Poços profundos foram capazes de promover recarga que supera em até 10% a situação de pré-desenvolvimento
Silva (2012)	Estruturas de infiltração com utilização de materiais alternativos no controle de alagamentos, inundações e prevenção de processos erosivos	Trincheiras de infiltração	Ensaios de enchimento de trincheira experimental	Resultados concentrados nas características construtivas da trincheira.
Carvalho (2013)	Avaliação geotécnica de poços de infiltração de águas pluviais	Poços de infiltração	Ensaios de infiltração com carga variável	Mesmo em solos com baixas permeabilidades os poços podem apresentar bom funcionamento

Campos e Gonçalves (2015); Campos et al. (2021)	Diretrizes para o desenvolvimento de recarga artificial de aquíferos no Distrito Federal	Trincheiras, calhas e caixas de infiltração	Proposição de dimensões para os dispositivos	Operacionalização da recarga artificial no Distrito Federal
Camuzi (2017)	Análise da drenagem urbana no Riacho Fundo.	telhados verdes, jardins de chuva, pavimentos permeáveis	Modelagem com o SWMM	O uso de dispositivos LID apresentaria pouca variação (1%) no exutório da área estudada
Oliveira et al. (2017)	Avaliação de usos de técnicas compensatórias em sub-bacia do lago Paranoá - Brasília-DF	trincheiras de infiltração e jardins de chuva	Modelagem com o SWMM	Não houve redução no pico de vazão. Geração de benefícios ecossistêmicos
Sales (2018)	Metodologia para definição de projeto para um sistema de drenagem pluvial urbana sustentável com estudo de caso.	trincheiras de infiltração e pavimentos permeáveis	Formulação pelo método de Silveira e Goldenfum (2007), baseado na Curva Envelope	Redução de 61% no volume escoado
Carvalho et al. (2019)	<i>Modelling water quantity in low impact development solution for stormwater management in residential area: a case study</i>	valas de infiltração	Modelagem com o SWMM	Redução de 78% da precipitação

Bezerra et al. (2020)	Simulação de técnicas de infraestrutura verde de drenagem urbana para captação do escoamento superficial	trincheiras de infiltração e jardins de chuva	Modelagem com o SWMM	Redução do escoamento superficial
Nunes e Campos (2020)	Estudo da capacidade de infiltração em sistemas de recarga artificial de aquíferos contaminados no Distrito Federal	Poços profundos e caixas de infiltração	Propostas de Cada-muro e Campos (2005)	Verificação da eficiência da injeção direta para recarga de aquífero e redução do escoamento superficial
Brito (2020)	Avaliação do impacto das características geomorfológicas e padrões de uso e ocupação do solo urbano no distrito federal no manejo de Águas pluviais.	trincheiras de infiltração e valas de infiltração	Modelagem com o SWMM	A topografia afeta moderadamente no funcionamento de técnicas compensatórias. O trabalho ressalta a importância da geração de benefícios ecossistêmicos
de Vito (2021)	Análise hidrológica do assentamento 26 de setembro considerando ocupação ordenada com implantação de medidas compensatórias.	Pavimentos permeáveis, microrreservatórios, trincheiras de infiltração, bacias de detenção	Modelagem com o SWMM	Redução de até 30% da vazão de pico
Bezerra e Nunes (2024)	Soluções baseadas na Natureza para Drenagem: Retrofit das áreas verdes públicas do Paranoá	Jardins, áreas verdes	Concepção paisagística	Redução do escoamento superficial

A partir dos trabalhos estudados, pode-se verificar um aumento no interesse pelas medidas de controle de escoamento na fonte no Distrito Federal. Diferentes abordagens são observadas, mas o interesse na aplicação e a crença na redução dos volumes de escoamento superficial aparecem de maneira consistente. No entanto, a compreensão do volume infil-

trado por essas medidas ainda é limitada. Uma quantificação precisa do volume infiltrado é essencial para avaliar a eficácia das medidas implementadas e orientar futuras ações de manejo do solo e da água. Portanto, tornam-se relevantes pesquisas no sentido de abordar essa lacuna de conhecimento, visando a aprimorar a gestão ambiental e a sustentabilidade dos sistemas de drenagem na região.

3.2.2 Caracterização geomorfológica do Distrito Federal

Para a realização do trabalho, foram levantados dados sobre a área de estudo. O trabalho focou no estudo do funcionamento de medidas de controle de escoamento na fonte para cenários diferentes de uma mesma realidade local do Distrito Federal. Desse modo, não foi realizada a caracterização de uma área de estudo específica ou de um cenário único. Em vez disso, foram estudadas as características relevantes do Distrito Federal no que diz respeito ao funcionamento de medidas de controle na fonte, e tais informações foram aplicadas para uma verificação ampla do processo de funcionamento das tecnologias com atenção aos mecanismos de infiltração envolvidos. O presente capítulo registra a caracterização da área de interesse e os dados utilizados para a realização do trabalho.

3.2.2.1 Pedologia

O mapeamento de solos realizado por Reatto et al. (2004) definiu a classe dominante na região estudada como Latossolos Vermelhos, como se pode observar na Figura 3.7.

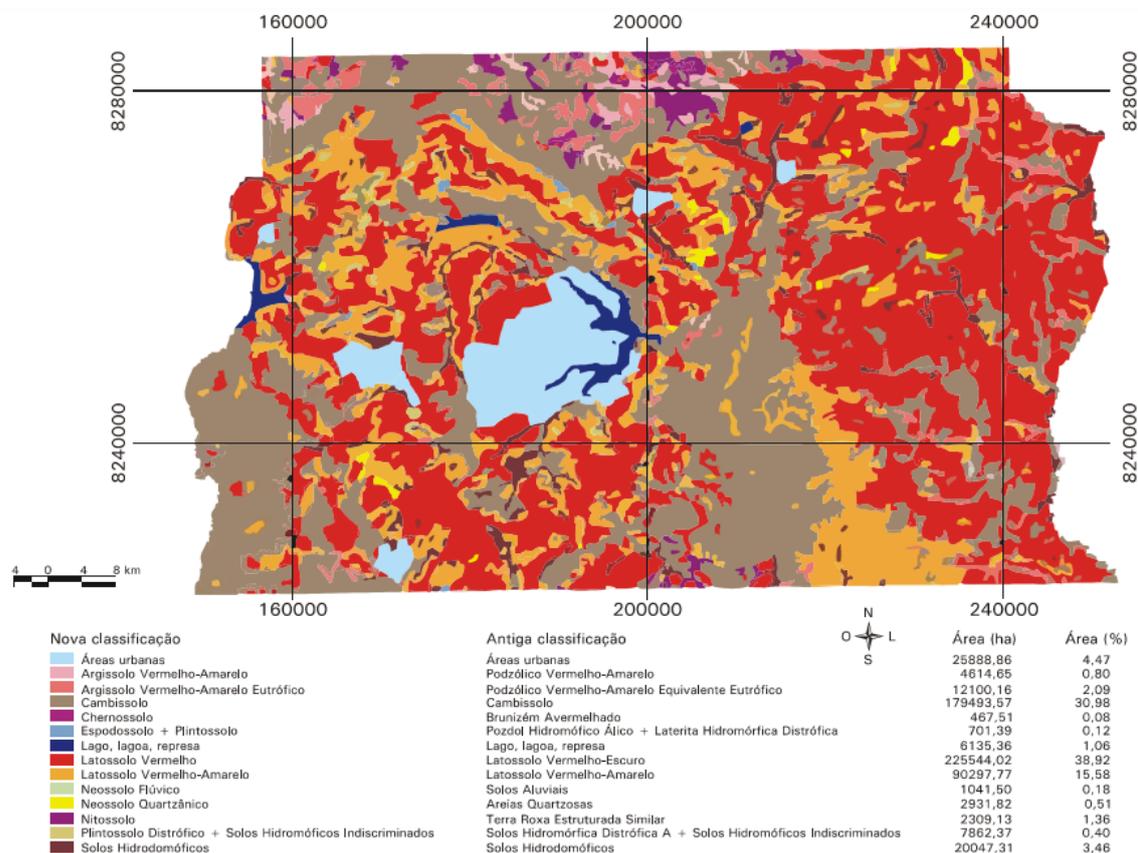


Figura 3.7: Mapa de solos do Distrito Federal, na escala 1:100.000, com indicação das classes de solos (REATTO et al., 2004).

Esse tipo de solo apresenta alto teor de quartzo, o que confere o caráter arenoso e a baixa capacidade de armazenamento de água. Os Latossolos Vermelhos contêm, ainda, baixo teor de silte, entre 10% e 20%, e o teor de argila pode variar entre 15% e 80%. Tratam-se, segundo o estudo, de solos altamente permeáveis a depender de natureza, textura, estrutura e situação topográfica (REATTO et al., 2004). Ainda segundo o estudo, cerca de 85% do território do DF possui solos tropicais, vermelhos, ricos em ferro e alumínio, ácidos e pobres em macro e micronutrientes. Os Latossolos Vermelhos ocupam cerca de 38,65% da área do DF, seguidos por Cambissolos com 31,02% e Latossolos Amarelos, com 15,83%.

Há, segundo Reatto et al. (2004), em menores concentrações, solos menos permeáveis. Concentrações de Gleissolos, Espodossolos, Argissolos, Nitossolos, Neossolos Quartzânicos, Pintossolos, Neossolos Flúvicos e Chernossolos são registrados por Reatto et al. (2004) totalizando menos de 10% dos solos do Distrito Federal. A definição do grupo de solos verificado na área de estudo influi nos valores adotados para o parâmetro Curva Número quando aplicado o método CN e também nos coeficientes de permeabilidade para os modelos de fluxos saturado-não saturado. É importante notar que, devido ao processo de urbanização,

na preparação de terrenos para construção, os solos do DF sofreram movimentações e processos de compactação, o que altera as características originais do solo e modifica as taxas de infiltração (NUNES, 2016). Por sua alta permeabilidade, Latossolos podem ser classificados como Classe A no método CN. Os Cambissolos, por outro lado, apresentam baixa permeabilidade e são classificados como Classe C (GENOVEZ; NETO; SARTORI, 2005).

3.2.2.2 Precipitação

Para a análise dos sistemas de drenagem do DF, pode ser adotada a curva Intensidade-Duração-Frequência (IDF) de Brasília (Equação 3.1) (NOVACAP, 2019). A IDF de Brasília foi determinada com base na série histórica de 32 anos do INMET, composta por meio de pluviogramas de chuvas diárias maiores que 10 mm, digitalizados com discretização temporal de 10 minutos (GDF, 2009), e é recomendado pelas normativas locais (NOVACAP, 2019). Aplicando a discretização em intervalos de 5 minutos e a distribuição das chuvas pelo método dos Blocos Alternados, a precipitação de projeto do DF para o período de retorno de 10 anos é apresentada no hietograma (Figura 3.8). O valor máximo dessa chuva apresenta o valor aproximado de 18,2 mm.

$$I = \frac{1574.70 * T_R^{0.207}}{(d + 11)^{0.884}} \quad (3.1)$$

Em que,

- I - Intensidade [mm/h]
- d - Duração [minutos]
- T_R - Tempo de retorno [anos]

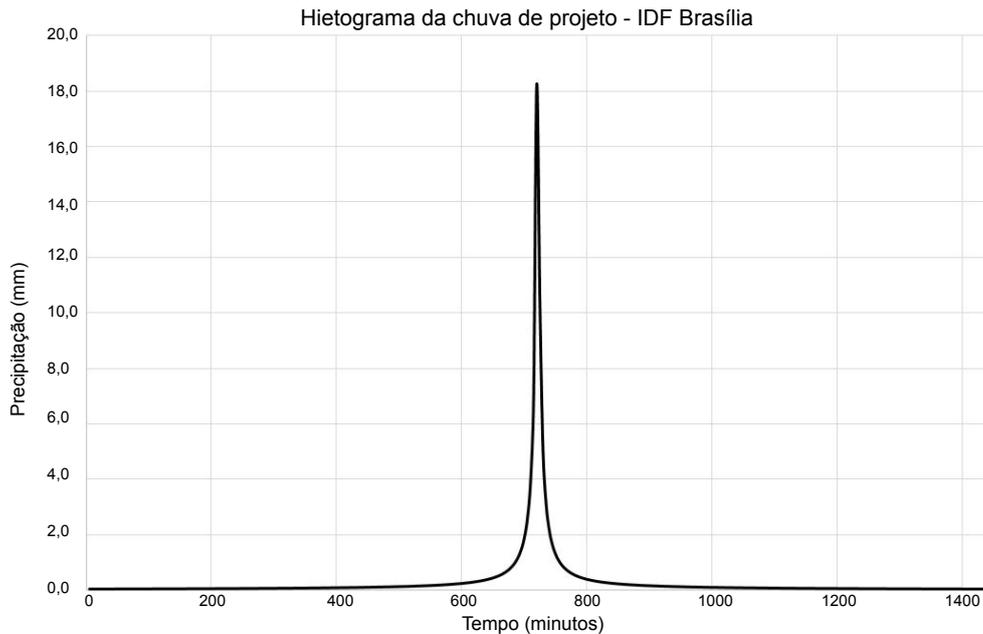


Figura 3.8: Hietogramada chuva de projeto de Brasília com Tempo de Retorno de 10 anos pelo método dos blocos alternados.

3.3 MODELAGEM EM DRENAGEM URBANA

Para que se possa definir as soluções adequadas a serem implementadas enquanto realizando um estudo de drenagem, é comum que algumas etapas sejam seguidas. A realização de diagnóstico da infraestrutura existente e da situação vigente do sistema são passos importantes para que se possa propor objetivos claros a serem alcançados. A construção de hidrogramas é fundamental para a análise dos impactos provocados pela implantação de determinado tipo de estrutura. Assim, podem ser realizadas comparações de desempenho para cada proposta, isso pode ser realizado com auxílio da modelagem matemática computacional (BAPTISTA, 2005).

3.3.1 Vazão de restrição

A vazão de projeto é uma variável importante para as formulações de estruturas de drenagem. Com a perspectiva de renaturalização de ambientes urbanizados, uma estratégia possível é tentar alcançar, com a implantação dos sistemas de drenagem, a situação de pré-desenvolvimento. Assim, para a etapa de concepção, faz-se necessário o conhecimento prévio da dinâmica hidrológica da região. Esse conhecimento hidrológico é obtido com base

em dados experimentais. Assim, é importante que se tenha um banco de dados de vazões e precipitações, de modo a permitir a proposição de risco hidrológico da região e a formulação de uma vazão de restrição a ser empregada (BAPTISTA, 2005).

Obras de engenharia, no campo da hidrologia, são com frequência desenvolvidas com base em estatísticas. Isso se deve à dificuldade de se realizarem previsões quando tratando de variáveis climáticas e à necessidade de se ajustar o nível de investimento realizado à redução de riscos a ele associada. Conhecendo a dinâmica hidrológica de uma região é possível estimar o seu comportamento futuro. Nesse sentido, o conceito de tempo de retorno é importante para a definição do porte que determinada estrutura proposta deve apresentar. (BAPTISTA, 2005; ADASA, 2018).

Se uma infraestrutura é dimensionada para ter tempo de retorno de 25 anos, isso significa que o evento correspondente a esse tempo de retorno será o balizador para o dimensionamento da estrutura, de modo que eventos de menor magnitude serão comportados pela estrutura e os de maior magnitude irão superar sua capacidade. Isso não significa, contudo, que a cada 25 anos a capacidade da estrutura será superada. A informação que se pode desprender é que, na teoria, espera-se a ocorrência, na média, de um evento de magnitude igual ou superior àquela utilizada para o dimensionamento a cada 25 anos, de modo que o evento crítico pode ocorrer mais de uma vez nesse intervalo de tempo ou mesmo não ocorrer (ADASA, 2018).

As vazões de escoamento superficial utilizadas para o dimensionamento no projeto de drenagem urbana são calculadas com base na vazão de restrição. Ela orienta o dimensionamento de infraestruturas uma vez que é a vazão que se quer alcançar após a instalação das infraestruturas. A vazão de restrição é muitas vezes usada no Brasil como sinônimo de vazão máxima de pré-urbanização, que pode ser estimada por modelos hidrológicos chuva-vazão (PEPLAU; NEVES, 2014). Contudo, há ainda a possibilidade de existir a regulação dessa vazão de restrição. No DF, a vazão de restrição proposta por ADASA (2023b) é de $24,4 \text{ l.s}^{-1}.\text{ha}^{-1}$. Assim, geralmente as estruturas são pensadas para uma vazão de saída que esteja de acordo com a norma.

No Distrito Federal, a Resolução Nº 9 de 8 de abril de 2011 (ADASA, 2023b) estabelece critérios para a outorga de lançamento de águas pluviais em corpos hídricos. O documento leva em consideração a vazão máxima gerada pelo empreendimento para tempo de retorno de 10 anos, condições de retenção do aumento do escoamento do empreendimento e área máxima impermeabilizada.

Segundo ADASA (2023b) a outorga de lançamento decorrente de impermeabilização deve se limitar à vazão específica de até $24,4 \text{ L} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{ha}^{-1}$. Assim, a vazão máxima efluente de determinado empreendimento deve ser obtida levando em conta a vazão específica

fixada, a área do terreno e a área impermeabilizada, de modo a garantir condições no corpo hídrico equivalentes às observadas na situação anterior à modificação do loteamento. Tais diretrizes podem ser seguidas e para a avaliação de soluções para volumes excedentes de escoamento.

3.3.2 Modelos hidrológicos

A drenagem urbana envolve sistemas hidrológicos complexos. Para a realização de estudos de drenagem, é necessário verificar o comportamento da dinâmica hidrológica da área de interesse e as suas especificidades. Esses estudos são realizados mediante a disponibilidade de dados, que devem ser coletados continuamente para a formação de um banco completo e que podem considerar, além dos aspectos ambientais, aspectos físicos e socioeconômicos. Algumas das informações importantes dizem respeito aos pontos de alagamento, hidrografia, mapeamento de solos, mapeamento de áreas sujeitas à erosão (ADASA, 2018).

Ainda que uma boa base de dados seja construída, com histórico de dados georreferenciados e acessíveis, existe na área da hidrologia a limitação de técnicas de medição de fenômenos no tempo e no espaço. O monitoramento contínuo e periódico é a forma de tomar amostras dos sistemas e compor o banco de dados. De posse dos dados, faz-se necessária a adoção de metodologias que tomem os dados e componham representações da realidade (BEVEN, 2012). Assim a modelagem computacional surge como uma forma de compreender de maneira mais aprofundada os fenômenos do sistema que está sendo analisado, permitindo, em alguns casos, a extrapolação física e temporal para a predição (VIESSMAN; LEWIS, 2012).

Modelos chuva-vazão são muito comuns nos estudos hidrológicos. Existem diversos métodos que buscam determinar vazões superficiais e subterrâneas dada a ocorrência de uma precipitação. Há modelos que promovem a representação do escoamento por meio de idealizações, como os modelos de Horton, Green-Ampt, método de Santa Bárbara e o modelo SCS. A aplicação desses é limitada pelas variabilidades geomorfológicas observadas nas bacias hidrográficas e pela disponibilidade das informações (TUCCI, 2001). Estudos de drenagem urbana se utilizam de modelos hidrológicos combinados a modelos hidráulicos para simular cenários e proposições. O SWMM é um desses modelos. Implementado computacionalmente e de código aberto, é um dos mais utilizados em estudos de drenagem.

O funcionamento de técnicas compensatórias envolve fluxos hidráulicos no solo. A complexidade da composição de solos dificulta a descrição do comportamento dos fluxos que nele ocorrem. Assim, considerações são estabelecidas para viabilizar a representação dos meios porosos e das variáveis hidráulicas em modelos (TUCCI, 2001). O SWMM, por

exemplo, não considera forças mátricas na representação de técnicas compensatórias (ROSSMAN, 2016). A lei de Darcy é amplamente aplicada para a resolução de problemas de águas subterrâneas em solos saturados (VIESSMAN; LEWIS, 2012). Já para fluxo de água em solos não saturados, o modelo de Richards é o mais aplicado (ANDERSON; MCDONNELL, 2005). Métodos numéricos são usados para resolver as equações de fluxos em águas subterrâneas. O modelo computacional *Finite Element Subsurface Flow Simulation* (FEFLOW), distribuído pela *Dansk Hydraulisk Institut* (DHI), utiliza o método dos elementos finitos para resolver as equações e conta com interface dinâmica que potencializa seu uso (LIMA, 2010).

3.4 MODELOS DE INFILTRAÇÃO E ESCOAMENTO SUPERFICIAL

Segundo Viessman e Lewis (2012), a melhor descrição matemática do processo de infiltração é feita pela equação de Richards. Isso porque a equação combina a Lei de Darcy com a equação de conservação de massa para modelar o fluxo de água em meios porosos variavelmente saturados. A resolução da equação é complexa e pressupõe conhecimento da relação entre permeabilidade do solo e tensão capilar, ambas função da quantidade de água no solo.

Equações simplificadas podem ser aplicadas para se obter valores de infiltração. São exemplos de modelos amplamente utilizados, o modelo de Horton e o modelo de Green-Ampt. Também é possível obter valores de infiltração a partir de modelos que calculam a relação entre precipitação e escoamento superficial, e que alcançam um valor de infiltração a partir do balanço hidrológico, como é o caso do modelo CN.

3.4.1 Equação de Richards

O conteúdo apresentado na presente seção se baseia em Hillel (1998), livro intitulado *Environmental soil physics*, que fornece uma análise abrangente sobre fluxo em solos. O fluxo em meios porosos varia de acordo com o conteúdo de umidade. A Lei de Darcy descreve o fluxo em meios saturados, governado por um gradiente hidráulico direcionado ao menor potencial hidráulico, com a taxa de fluxo proporcional ao gradiente e influenciada pelas propriedades geométricas dos poros. Em solos não saturados, o fluxo de água provoca mudanças no estado e no conteúdo de umidade, com relações complexas entre umidade do solo, sucção matricial e condutividade, complicadas pela histerese. Além da força gravitacional, que é independente da umidade, a principal força motriz em solos saturados é o gradiente de pressão potencial positivo. Em solos não saturados, a água está sujeita à suc-

ção matricial, um potencial de pressão negativo, cujo gradiente também constitui uma força motriz significativa.

O potencial matricial origina-se da afinidade física entre a água e a matriz do solo, abrangendo tanto as superfícies das partículas do solo quanto os poros capilares. Quando a sucção é uniforme em uma coluna horizontal de solo, a coluna permanece em equilíbrio e não há força motriz. No entanto, na presença de um gradiente de sucção, a água é atraída de regiões onde os envoltórios de umidade ao redor das partículas são mais espessos para regiões onde são mais finos, e de áreas onde os meniscos capilares são menos curvados para onde são mais curvados. Isso resulta em um fluxo de água das áreas com menor sucção matricial para as áreas com maior sucção matricial. A água fluirá pelos poros saturados na sucção existente e se moverá ao longo das camadas de umidade nas superfícies das partículas, visando equilibrar o potencial.

Quando o solo está saturado, todos os poros estão preenchidos com água e a conduzindo. A fase líquida é contínua e a condutividade é máxima. Quando o solo deixa de estar saturado, alguns dos poros passam a estar preenchidos por ar de modo que a porção que realiza a condução na seção transversal diminui. Além disso, com o desenvolvimento da sucção, os primeiros poros a se esvaziarem são os maiores, que são os mais condutivos (lei de Poiseuille), ficando os poros menores responsáveis então pela condutividade hidráulica.

No fluxo não saturado, os poros maiores devem ser contornados, de modo que, com a diminuição da saturação do solo, a tortuosidade aumenta. Em solos de textura grossa, a água pode ficar confinada quase inteiramente à capilaridade nos pontos de contato das partículas, assim formando bolsões separados e descontínuos de água. Em solos agregados, também, os grandes espaços entre os agregados, que conferem alta condutividade quando saturados, tornam-se barreiras para o fluxo quando estão secos.

A Lei de Darcy, originalmente concebida para fluxo em meio poroso saturado, foi estendida por Richards (1931) para fluxos não saturados, com a correção que a condutividade, nesse caso, torna-se uma função da carga de sucção mátrica, ou seja, $K = K(\psi)$.

$$q = -K(\psi)\nabla H \quad (3.2)$$

Em que ∇H é o gradiente de carga hidráulica, que pode incluir componentes tanto de sucção quanto de força gravitacional.

A equação 3.2 como está formulada não considera as características de histerese da relação entre solo e água (Miller e Miller, 1956). Em processos que envolvam fases de secamento e molhamento, o $K(\psi)$ pode ser altamente histerético. A relação entre condutividade e con-

teúdo de umidade $K(\theta)$, ou grau de saturação $K(s)$, é afetada em uma menor extensão pela histerese do que o $K(\psi)$. Assim, a lei de Darcy para solos não saturados pode ser escrita como:

$$q = -K(\theta)\nabla H \quad (3.3)$$

que, contudo, ainda nos deixa com o problema de lidar com a relação entre θ e ψ .

Para obter a equação geral do fluxo e considerar processos de fluxo transiente e constante, devemos introduzir o princípio da continuidade. A taxa de variação da umidade do solo em um ponto é igual à divergência negativa do fluxo de água nesse ponto. Se houver um fluxo de água positivo (água entrando) em um volume de solo, a umidade do solo nesse volume aumentará; se houver um fluxo de água negativo (água saindo), a umidade do solo diminuirá.

$$\partial\theta/\partial t = -\nabla \cdot q \quad (3.4)$$

e, assim:

$$\partial\theta/\partial t = \nabla \cdot [K(\psi)\nabla H] \quad (3.5)$$

Essa equação (3.5) é conhecida como equação de Richards.

Relembrando que a carga hidráulica é, em geral, a soma da carga de pressão (ou o seu negativo, a carga de sucção ψ) e a carga gravitacional (ou elevação z), podemos escrever:

$$\partial\theta/\partial t = \nabla \cdot [K(\psi)\nabla(\psi - z)] \quad (3.6)$$

Uma vez que ∇z é zero no fluxo horizontal e uma unidade no fluxo vertical, podemos escrever:

$$\frac{\partial\theta}{\partial t} = -\nabla \cdot (K(\psi)\nabla\psi) + \frac{\partial K}{\partial z} \quad (3.7)$$

ou

$$\frac{\partial\theta}{\partial t} = -\frac{\partial}{\partial x} \left(K \frac{\partial\psi}{\partial x} \right) - \frac{\partial}{\partial y} \left(K \frac{\partial\psi}{\partial y} \right) - \frac{\partial}{\partial z} \left(K \frac{\partial\psi}{\partial z} \right) + \frac{\partial K}{\partial z} \quad (3.8)$$

Por conta da forte não-linearidade dos parâmetros envolvidos, a equação de fluxo geral não pode ser resolvida analiticamente, exceto em casos muito específicos. Assim, métodos

numéricos são usados para representar uma equação diferencial contínua como uma equação algébrica aproximada em que o domínio de interesse é cortado em intervalos discretos e derivadas são substituídas por diferenças que podem ser resolvidas computacionalmente.

Diferentes equações foram propostas para descrever a relação entre a umidade do solo, a sucção matricial e a condutividade hidráulica. Mualem (1976) desenvolveu a seguinte função $K(\psi)$:

$$\frac{K(\psi)}{K_s} = \frac{\{1 - (\alpha |\psi|)^{n-1} [1 + (\alpha |\psi|)^n]^{-m}\}^2}{[1 + (\alpha |\psi|)^n]^{m/2}} \quad (3.9)$$

Van Genuchten (1980) desenvolveu as seguintes equações para relacionar umidade e sucção matricial, e condutividade hidráulica e umidade.

$$\theta(\psi) = [1 + \alpha(-\psi)^n]^{-m} \quad (3.10)$$

$$K(\theta) = K_s \theta_*^{1/2} [1 - (1 - \theta_*^{1/m})^m]^2 \quad (3.11)$$

Em que $\theta_* = (\theta - \theta_r) / (\theta_s - \theta_r)$ e $m = 1 - 1/n$.

A relação desenvolvida por Van Genuchten e Mualem pode ser usada para modelar o comportamento hidráulico dos solos não saturados, descrevendo as relações entre a umidade do solo, a sucção matricial e a condutividade hidráulica. Essas relações são fundamentais para resolver a equação de Richards.

3.5 ABORDAGENS NO DIMENSIONAMENTO DE TÉCNICAS COMPENSATÓRIAS

Análises hidrológicas buscam verificar quantitativamente o desempenho das medidas de controle de escoamento. São geralmente conduzidas em simulações hidrológicas computacionais e buscam estudar a avaliação e implantação de técnicas compensatórias. O modelo SWMM é comumente aplicado para esse tipo de estudo. O modelo permite simular a propagação de ondas dinâmicas de cheia e demais componentes hidráulicos de maneira integrada em toda a rede de drenagem no decorrer do tempo.

Com relação à modelagem hidrológica, o SWMM permite a implementação do modelo SCS para a separação da infiltração e do escoamento efetivo, amplamente aplicado nesse tipo de estudo pela simplicidade e pelos bons resultados. Além disso, taxas relativas à percolação

podem ser empregadas, de modo a simular o funcionamento das técnicas compensatórias em uma condição determinada do solo (ROSSMAN, 2016). Com uma a bibliografia fornecida pela EPA e por artigos disponíveis nas plataformas *online* do SWMM, os aspectos funcionais podem ser avaliados e ajustados.

Para o estudo individual de técnicas compensatórias em diferentes condições ambientais, com vistas à caracterização e quantificação da sua aplicação, uma abordagem mais detalhada aplicando as equações de Richards se mostra interessante, como afirma (ROSSMAN, 2016). Assim, podem ser estudados os fenômenos de percolação em meio saturado-não saturado na aplicação das técnicas compensatórias, de modo a caracterizar com maior detalhe sua operação para os diferentes cenários. Rossman (2016) afirma que, para grandes estudos aplicando uma diversidade de técnicas compensatórias, a resolução das equações de Richards geraria um aumento na demanda computacional que não provocaria ganhos equivalentes nos resultados da modelagem.

Para o projeto de estruturas de drenagem, o dimensionamento é baseado na chuva de projeto e na vazão de restrição. Assim, técnicas compensatórias podem ser dimensionadas para comportarem determinadas vazões escoadas por chuvas de determinado tempo de retorno. Esse tipo de avaliação pode ser simulado em modelos computacionais, permitindo que sejam verificadas as dinâmicas de escoamento, enchimento e esvaziamento de uma estrutura para aquela chuva determinada. Por outro lado, a avaliação a longo prazo das técnicas compensatórias, com uma simulação contínua, permite que seja observado o desempenho das estruturas em diferentes condições, geradas naturalmente pela dinâmica hidrológica e pelas condições de contorno. Para a simulação contínua, dados pluviométricos da área de estudo devem ser incorporados.

3.5.1 SWMM

3.5.1.1 Apresentação do Modelo

O *Storm Water Management Model* (SWMM) é um modelo hidrológico e hidráulico computacional que começou a ser desenvolvido em 1971 pela *Environmental Protect Agency* (EPA). Vem sendo amplamente utilizado na área de saneamento para a simulação de comportamento dos sistemas hidráulicos e hidrológicos (RIGHETTO, 2009). O modelo realiza a representação de diferentes sistemas ambientais. O sistema atmosférico, origem das precipitações, o sistema composto pela superfície do solo, que recebe os volumes precipitados, o sistema de águas subterrâneas, que recebe os volumes infiltrados e transfere parte desse volume ao sistema de transporte que, por sua vez, recebe contribuições de vazões de origem superficial ou subterrânea e promove a condução ao exutório (ROSSMAN, 2010).

A avaliação realizada pelo modelo, tanto para quantidade quanto para qualidade do escoamento, permite simulação de efeitos de precipitação pontual ou de eventos hidrológicos contínuos (ROSSMAN, 2010). A modelagem computacional ocorre pela análise dos fenômenos em áreas de características homogêneas subdivididas na área de estudo, chamadas sub-bacias (ROSSMAN, 2010). As sub-bacias são, portanto, dotadas de características homogêneas de topografia e características de escoamento, e conduzem o escoamento para um mesmo ponto de descarga. Os passos necessários para a realização de simulações são definição da precipitação, delimitação e caracterização de áreas de contribuição e a configuração do sistema de drenagem (RIGHETTO, 2009).

Podem ser especificados, no sistema de drenagem incorporado ao modelo, diversos elementos, como condutos, poços de visita, exutórios, pontos de armazenamento e bocais para descarga (ROSSMAN, 2010). Diversos eventos hidrológicos quantitativos podem ser simulados no modelo, como precipitações variáveis no tempo, evaporação de águas empoçadas, armazenamento em depressões, infiltração, percolação da água infiltrada, fluxo entre aquíferos e sistema de drenagem (ROSSMAN, 2010). São constituintes do modelo, também, os processos hidráulicos que ocorrem na rede e em dispositivos de controle de escoamento, como redes e infraestruturas de manejo (RIGHETTO, 2009).

O cálculo da infiltração pode ser realizado, no SWMM, pelos métodos de Horton, Green e Ampt, e SCS (ROSSMAN, 2010). Pela simplicidade de aplicação, dada a necessidade de menor número de entradas, e a confiabilidade dos resultados, é comum a utilização do método SCS para simulações hidrológicas. Pode-se especificar percentuais de impermeabilização do solo, de modo a restringir para cada sub-bacia estudada uma área permeável, em que a vazão será infiltrada até a condição de saturação, e uma área impermeável, que apresenta apenas retenção de volumes em depressões ou escoamento superficial (RIGHETTO, 2009).

O modelo SWMM tem sido muito aplicado na área de drenagem sustentável, inclusive no Brasil. O estudo conduzido por Gonçalves, Ribeiro e Baptista (2016) avaliou a implementação de sistemas alternativos de drenagem na área do campus da Universidade Federal de São Carlos, São Paulo. Adotando critérios físicos e urbanísticos para a implementação dos dispositivos de controle, foram alcançadas reduções no volume escoado e na vazão de pico. Fileni, Costa e Alves (2019) estudaram a implementação de sistemas alternativos de drenagem na região de Ceilândia, no Distrito Federal, alcançando reduções no volume escoado e diminuição da vazão de pico.

3.5.1.2 LIDs no SWMM

O SWMM é capaz de implementar tanto sistemas clássicos quanto as soluções alternativas de drenagem. Para implementar as LIDs, o programa separa um módulo específico, em que podem ser introduzidas características das diferentes alternativas de drenagem sustentável: célula de biorretenção, jardim de chuva, telhado verde, trincheira de infiltração, pavimento permeável, microrreservatório, telhado desconectado e vala de infiltração. Diferentes soluções podem ser combinadas em um sistema de drenagem. Uma vez que as contribuições recebidas pela LID são de ordem distribuída, as estruturas podem, na modelagem computacional, ocupar toda uma sub-bacia ou apenas uma porção dela (ROSSMAN, 2016).

A modelagem computacional das LIDs pode ser feita pela representação das estruturas em diferentes camadas. O SWMM considera que a entrada de água se dá de maneira igualmente distribuída na superfície da estrutura e que a percolação se dá de maneira unidimensional na vertical (ROSSMAN, 2016). A figura 3.9 apresenta a configuração das camadas horizontais que modelam as LIDs no SWMM. Para a modelagem, o SWMM desconsidera forças mátricas e admite que a umidade é distribuída de maneira homogênea nas camadas de solo, sendo armazenada como em um reservatório preenchido do fundo à superfície.

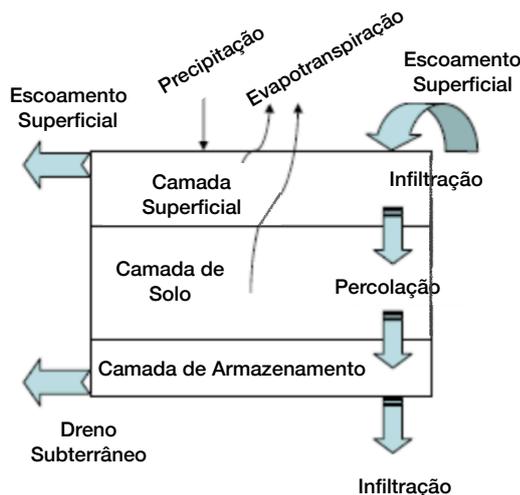


Figura 3.9: Representação das camadas horizontais que modelam LIDs no SWMM (ROSSMAN, 2016) adaptado.

A partir das considerações simplificadoras, as estruturas podem ser modeladas pela aplicação da equação da continuidade em cada uma das três camadas. Rossman (2016) apresenta

as formulações:

$$\phi_1 \frac{\partial d_1}{\partial t} = i + q_0 - e_1 - f_1 - q_1 \quad (3.12)$$

$$D_2 \frac{\partial \theta_2}{\partial t} = f_1 - e_2 - f_2 \quad (3.13)$$

$$\phi_3 \frac{\partial d_3}{\partial t} = f_2 - e_3 - f_3 - q_3 \quad (3.14)$$

Em que:

- d_1 = Altura da lâmina d'água na camada superficial;
- θ_2 = Umidade do solo;
- d_3 = Altura da lâmina d'água na camada de armazenamento;
- i = Taxa de precipitação que cai diretamente sobre a camada superficial;
- q_0 = Escoamento superficial que chega à camada superficial da LID por outras áreas;
- q_1 = Escoamento superficial;
- q_3 = Vazão do dreno subterrâneo;
- e_1 = Evapotranspiração da camada superficial;
- e_2 = Evapotranspiração da camada de solo;
- e_3 = Evapotranspiração da camada de armazenamento;
- f_1 = Taxa de infiltração na camada de solo;
- f_2 = Percolação da camada de solo para a camada de armazenamento;
- f_3 = Percolação de água da camada de solo para o solo nativo;
- ϕ_1 = Volume de vazios na camada superficial;
- ϕ_2 = Porosidade da camada de solo;
- ϕ_3 = Fração de vazios na camada de armazenamento;
- D_1 = Altura da água armazenada em depressões;

- D_2 = Espessura da camada de solo;
- D_3 = Espessura da camada de armazenamento.

A Equação 3.12 apresenta a aplicação do princípio da continuidade para a camada superficial. Os fluxos (q , e e f) são função da quantidade de água nas diferentes camadas e características de solo (d_1 , θ_2 e d_3). Essas equações são solucionadas computacionalmente pelo modelo SWMM para cada passo de tempo para determinar hidrogramas de escoamento superficial (q_1), vazão no dreno subterrâneo (q_3) e infiltração no solo nativo (f_3) para as LIDs a partir das entradas (i e q_0) (ROSSMAN, 2016).

Percebe-se que a representação da camada superficial, dada pela Equação 3.12, faz sentido em um contexto de operação da medida de controle. O modelo considera a variação da umidade na camada e promove uma infiltração no fundo que, aplicada em toda a área do dispositivo, corresponde a um volume infiltrado por passo de tempo. O mesmo vale para uma eventual camada de solo presente no modelo, representada pela equação 3.13, em que a infiltração só ocorreria pela base do dispositivo. Já para a camada de armazenamento, que aplica a equação 3.14, a aplicação de uma infiltração constante dada por f_3 significa considerar apenas a percolação do dispositivo na área de fundo, o que é conflitante com a operação de alguns tipos de medida de drenagem, que podem realizar a infiltração pelo fundo e também pelas paredes.

A representação de dispositivos de infiltração no modelo SWMM leva em consideração apenas a condutividade hidráulica saturada do solo abaixo do dispositivo (Rossman e Huber, 2016), uma simplificação que pode gerar bons resultados para cenários específicos, mas também pode afastar os resultados da realidade em algumas condições de operação, como no caso de solos inicialmente secos, no caso de lâminas d'água consideráveis intensificando o processo de infiltração, ou no caso de colmatção do fundo do dispositivo de infiltração por sedimentos finos.

3.5.2 Manual de drenagem do Distrito Federal

O manual de drenagem da Adasa (ADASA, 2023a) traz diretrizes para a configuração de medidas de controle. Na seção de dimensionamento hidráulico de medidas de controle por infiltração, o manual define uma fórmula para a quantificação da infiltração dessas medidas. A equação 3.15 apresenta a formulação trazida no manual, trata-se de simplificação do processo de infiltração semelhante ao empregado pelo modelo SWMM, em que a taxa de infiltração é admitida constante. Aqui, contudo, recomenda-se considerar a área de infiltração (A_{inf}) como sendo a soma entre a área de fundo do dispositivo e metade das áreas laterais.

$$Q_{ei} = 1000 \cdot k \cdot A_{inf} \cdot C_s \quad (3.15)$$

Em que:

Q_{ei} é a vazão efluente infiltrada, Ls^{-1} ,

k é o coeficiente de permeabilidade do solo saturado, ms^{-1} ,

A_{inf} é a área de infiltração, m^2 ,

C_s é o coeficiente de segurança de redução do coeficiente de permeabilidade, *adim*,

Percebe-se que a metodologia sugerida pelo manual da Adasa considera uma área de infiltração superior à considerada pelo SWMM, o que sugere uma consideração de maiores volumes infiltrados no dimensionamento das estruturas. Contudo, o manual impõe um coeficiente de segurança de redução do coeficiente de permeabilidade na formulação, e recomenda o uso de um valor de 0,5 para o coeficiente. Desse modo, a condutividade hidráulica utilizada na quantificação da infiltração passa a ser, na prática, a metade daquela observada experimentalmente.

3.5.3 FEFLOW

O *Finite-Element Simulation System for Subsurface Flow and Transport Processes* (FEFLOW) é um software comercial de modelagem numérica desenvolvido pelo DHI Group. O presente trabalho contou com uma licença para atividades acadêmicas do *FEFLOW 8.0 Standard 64 bit Version*. O programa é usado principalmente para simular fluxos de águas subterrâneas, transportes de solutos e processos termo-hidro-mecânicos subsuperficiais. É uma ferramenta muito utilizada em estudos hidrológicos, geotécnicos e para o gerenciamento de recursos hídricos. É conhecido por sua capacidade de lidar com modelos complexos e processos acoplados, o que configura uma ferramenta poderosa para análise e previsão de sistemas hidrológicos.

O FEFLOW não conta com módulo de técnicas compensatórias, diferentemente do SWMM. A modelagem computacional utilizando o FEFLOW se dá pela configuração de um modelo, em malha, com a definição do problema sendo proposta pelo usuário do programa. O software promove, de maneira ampla, a modelagem numérica do fluxo de água subterrânea e o transporte de solutos em meios porosos. Embora seja mais frequentemente aplicado para modelar processos de água subterrânea, ele pode ser usado para simular algumas técnicas compensatórias.

Uma vez que o FEFLOW é um software que resolve equações de fluxos em solos, a representação de técnicas compensatórias no FEFLOW se torna mais interessante para as técnicas que envolvem a infiltração, como pavimentos permeáveis, telhados verdes, trincheiras de infiltração e poços de infiltração. Para a sua aplicação com tal propósito, devem ser definidas as propriedades hidráulicas do solo que contém o dispositivo de drenagem bem como as características das técnicas compensatórias no modelo numérico. É importante ressaltar que, apesar de o FEFLOW ser mais voltado para modelagem de água subterrânea e não ser especializado em simular superfícies impermeáveis, é possível mediante a especificação de condições de contorno definir áreas de fluxo nulo.

3.5.3.1 Método dos elementos finitos no FEFLOW

O método dos elementos finitos é amplamente utilizado em engenharia e ciências aplicadas devido à sua capacidade de lidar com geometrias complexas e condições de contorno variáveis, bem como sua capacidade de fornecer soluções de alta precisão para uma ampla gama de problemas físicos. Empregado pelo FEFLOW, é uma técnica numérica de solução de equações diferenciais por aproximação. O método divide o domínio do problema em elementos finitos, que juntos compõem uma grade (triângulos ou quadriláteros em 2D, que formam tetraedros ou hexaedros em 3D). Os elementos da grade são conectados por pontos chamados de nós. As equações diferenciais do problema são aproximadas por meio de funções de forma sobre cada elemento e a combinação de todas as equações do domínio compõe um sistema de equações algébricas. Este sistema é então resolvido numericamente para que se possa obter a solução aproximada do problema.

3.5.3.2 A equação de Richards no FEFLOW

A equação de Richards é uma equação diferencial parcial que descreve o fluxo de água em meios porosos não saturados. Ela é frequentemente utilizada em modelagem hidrológica. No FEFLOW, a equação de Richards é usada para simular o fluxo de água em meios porosos não saturados. Ela é parte do conjunto de equações diferenciais que o FEFLOW resolve para modelar o comportamento hidrodinâmico de um sistema, considerando as condições de contorno e as propriedades do meio poroso. Para resolver a relação entre a umidade do solo e a pressão da água no solo, é preciso que seja incorporada à equação de Richards a característica de retenção de água do solo.

No FEFLOW, a função de retenção de água no solo pode ser representada de várias maneiras, dependendo da complexidade desejada do modelo. Para modelar a função de retenção de água de forma transiente, ou seja, que varia com o tempo, podem ser aplicadas

diferentes abordagens. Uma abordagem simplificada é considerar a função de retenção de água como dependente apenas da umidade do solo, sem considerar a dependência com o tempo e os diferentes processos envolvidos no molhamento ou no secamento do solo. Nesse caso, a curva de retenção de água pode ser definida por meio de uma equação empírica, como a equação de van Genuchten ou a equação de Brooks-Corey.

Se o objetivo é considerar a variação da função de retenção de água no solo com o tempo, em busca de representar as diferentes dinâmicas da água no processo de secamento e de molhamento, é possível utilizar abordagens mais complexas, como modelos que consideram a histerese da curva de retenção de água, onde a função de retenção de água depende não só da umidade do solo, mas também do histórico de umidade do solo. A escolha do modelo adequado depende das propriedades do solo em estudo e dos objetivos da simulação.

Para a simulação em regime transiente, o FEFLOW permite que sejam definidos passos de tempo em intervalos constantes ou variáveis. Adicionalmente, há uma funcionalidade que realiza o controle automático de passos de tempo, com um modelo preditor-corretor que permite a definição de um passo de tempo inicial. O usuário do programa pode ainda definir se os passos de tempo devem ser calculados usando a integração do tempo de 1ª ordem (*Forward Euler/Backward Euler - FE/BE*) ou usando um esquema de integração do tempo de 2ª ordem (*Forward Adams Bashforth/Backward Trapezoid - AB/TR*).

Para modelar a retenção de água no solo utilizando a equação de Van Genuchten no FEFLOW, deve-se definir os parâmetros da equação, que são θ_r , θ_s , α , e n , chamados, respectivamente, a umidade residual, a umidade saturada, o parâmetro alfa, e o parâmetro n. Esses parâmetros são específicos para cada tipo de solo e podem ser obtidos a partir de dados experimentais ou da literatura.

Existem três diferentes tipos de condições de contorno que podem ser aplicadas na equação de Richards, sua escolha se dá dependendo do problema específico que está sendo modelado. As condições de contorno de fluxo constante consideram o fluxo de água na fronteira como uma função do tempo ou do espaço. Isso pode representar, por exemplo, uma borda que está em contato com uma camada impermeável onde a pressão da água é mantida constante. As condições de carga constante aplicam uma pressão determinada de água no solo na fronteira. Isso pode representar, por exemplo, a entrada ou saída de água em uma borda do domínio. E, para as condições de contorno mistas, são especificados tanto pressões quanto características de fluxo na fronteira.

3.5.3.3 Configurações básicas de um problema no FEFLOW

O FEFLOW permite a configuração de grades bidimensionais e tridimensionais para a solução de problemas. A configuração do domínio pode se dar com base em grades estruturadas ou não, e o domínio pode ser criado dentro do modelo, por meio de ferramentas de desenho geométrico, ou importado de mapas. Deve-se indicar se serão aplicadas as formulações de fluxo em meio saturado ou as equações de Richards, para meios insaturados ou variavelmente saturados. Podem ser incluídas análises sobre transporte de massa, calor e acompanhamento da idade da água subterrânea. Ainda, é possível definir o tipo de simulação, que pode ser estacionário ou transiente.

Para criar uma *Supermesh* no FEFLOW, algumas etapas são seguidas. Primeiramente, deve-se definir o conjunto de malhas do problema, que configuram o modelo FEM, (*Finite-Element Mesh*). Estas malhas podem apresentar formas geométricas diferentes, configuradas manualmente pelo usuário, ou por meio de importação de mapas ou projetos anteriores. Já sobre o processo de geração de malha no FEFLOW, há diferentes algoritmos de geração automática disponíveis para criação de malhas bidimensionais. As *Supermeshes* no FEFLOW podem ser usadas tanto em modelos 2D quanto em modelos 3D, o que aumenta sua versatilidade e aplicabilidade em diferentes tipos de problemas.

O método *Advancing Front* cria malhas avançando uma frente da fronteira para o interior do domínio. É adequado para criar malhas estruturadas e não estruturadas e é eficiente para geometrias moderadamente complexas. O método *Triangle* gera triangulações de Delaunay, que são adequadas para a criação de malhas para geometrias complexas. É especialmente útil para criar malhas de alta qualidade com boas formas de elementos. O método *GridBuilder* é utilizado para criar malhas estruturadas, tais como malhas quadrilaterais ou hexaédricas. É adequado para geometrias simples e regulares em que é preferível uma malha estruturada. Por fim, o método *Transport Mapping* está disponível apenas para a geração de malhas regulares compostas por quadriláteros.

Uma vez lançada a malha de elementos finitos a partir da *Supermesh*, é possível promover o refinamento por meio de diferentes métodos fornecidos pelo programa, sejam eles ligados ao refinamento por meio de ajustes adaptativos automatizados ou pela criação de novos elementos por meio da subdivisão de elementos selecionados pelo usuário. Adicionalmente, o modelo bidimensional pode ser convertido a tridimensional pela incorporação de informações no eixo Z. Para tanto, o modelo permite que se escolha a direção na qual se deseja adicionar a nova dimensão. Após adicionar a nova dimensão, suas propriedades devem ser configuradas, como a espessura das camadas da nova dimensão e o número de camadas.

Para configurar os cenários, o usuário deve, ainda, definir uma série de parâmetros, condições iniciais e condições de contorno no modelo. Com relação aos parâmetros do solo, deve-se incorporar a condutividade hidráulica saturada, a porosidade e os parâmetros da equação de retenção de água no solo. No caso da utilização da equação de van Genuchten, os parâmetros alfa (α), n (n), saturação residual (S_R) e saturação máxima (S_S). As condições iniciais de umidade podem ser atribuídas no modelo na forma de conteúdo de umidade, pressão ou grau de saturação. Quanto às condições de contorno, o FEFLOW permite definir regiões com condição de carga definida (*1st-kind, Dirichlet, flow BC*), fluxo definido (*2nd-kind, Neumann, flow BC*) e a condição de terceiro grau, que é a combinação das duas primeiras (*Reference hydraulic head for 3rd-kind, Cauchy, flow BC*).

3.5.4 Trabalhos sobre fluxos em dispositivos de infiltração

Alguns trabalhos foram estudados na elaboração do presente estudo a fim de melhor delimitar a metodologia e compreender o histórico do interesse acadêmico na temática. As tabelas 3.4 e 3.5 apresentam sínteses das referências bibliográficas internacionais e nacionais que mais contribuíram para a configuração do presente trabalho. Cada referência está organizada com base no autor, título da obra, metodologia empregada e principais resultados obtidos.

Os trabalhos da tabela 3.4 apresentam, de maneira geral, a aplicação de técnicas computacionais para a simulação do processo de molhamento do solo e quantificação da influência de condições iniciais e de contorno nos resultados de infiltração. O que se verificou nos estudos apresentados é uma preocupação com o processo de molhamento e redistribuição, que não é bem descrito por equações simplificadas, comumente encontradas em modelos hidrológicos amplamente utilizados. Assim, à exceção do trabalho de Lucas (2010), que apresenta uma metodologia alternativa para modelagem de medidas de controle no SWMM, todos os trabalhos apresentados na tabela 3.4 apresentam modelos desenvolvidos especificamente para descrição dos fluxos em medidas de controle.

Tabela 3.4: Trabalhos selecionados que estudaram formas de quantificar a infiltração de medidas de controle de escoamento.

Autor	Título	Método	Principais resultados
Browne et al. (2008)	<i>A new saturated/unsaturated model for stormwater infiltration systems</i>	Aplica Darcy e solução da equação de Richards para representar o fluxo unidimensional.	O modelo se ajustou bem aos dados observados e aos resultados da modelagem aplicando o modelo Hydrus.

Lucas (2008) e Lucas (2010)	<i>Design of Integrated Bioinfiltration-Detention Urban Retrofits with Design Storm and Continuous Simulation Methods</i>	Aplicação do modelo HydroCAD e adaptação do modelo SWMM usando dispositivos hidráulicos e sub-bacias adicionais para a simulação de infiltração vertical e horizontal nos dispositivos.	A metodologia permitiu consideração do processo de molhamento, de fluxos verticais e horizontais e avaliação de desempenho por meio de simulação contínua.
Browne et al. (2012)	<i>A two-dimensional model of hydraulic performance of stormwater infiltration systems</i>	Modelo desenvolvido para a simulação bidimensional de reservatório combinando modelos de fluxo em meio saturado, em meio não saturado e em meio altamente poroso.	Boa representação do processo de infiltração, considerando condições de umidade, e possibilidade de previsão do comportamento do nível do reservatório de infiltração.
Locatelli et al. (2015)	<i>Determining the extent of groundwater interference on the performance of infiltration trenches</i>	Simulação contínua para avaliar como a infiltração é afetada pela posição do aquífero. Aplicação de dois modelos, um que considera a variação da posição o aquífero e um que não considera.	A espessura da camada de solo não saturado entre o dispositivo de infiltração e o aquífero pode reduzir significativamente a performance hidrológica da trincheira. Valores limites podem ser encontrados a depender do tipo de solo.
Barbu e Bal-lestero (2015)	<i>Unsaturated Flow Functions for Filter Media Used in Low-Impact Development—Stormwater Management Systems</i>	Metodologia para determinação de características hidráulicas de solos preparados para meios filtrantes de dispositivos de infiltração.	São apresentadas funções que podem ser usadas para caracterizar hidraulicamente vários tipos de meios filtrantes.

Guo e Luu (2015)	<i>Hydrologic Model Developed for Stormwater Infiltration Practices</i>	Modelo desenvolvido para simular a retenção e o processo de infiltração em sistemas de controle de escoamento.	O modelo permite considerar colmatação e ressalta a importância da calibração para condutividade hidráulica e umidade inicial do solo.
Sage, Berthier e Gro-maire (2020)	<i>Modeling Soil Moisture Redistribution and Infiltration Dynamics in Urban Drainage Systems</i>	Metodologia simplificada para investigar a relevância de caracterização do processo de infiltração, considerando redistribuição de umidade entre chuvas.	Importância da descrição da infiltração para melhor quantificar os impactos da drenagem sustentável, em especial medidas de pequena profundidade.

A tabela a seguir apresenta uma compilação das principais referências bibliográficas publicadas por pesquisadores brasileiros que foram relevantes para o desenvolvimento deste estudo. O interesse em destacar as contribuições nacionais para a temática de estudo se dá no sentido de procurar especificidades regionais relevantes para o presente estudo. Os trabalhos apresentaram interesse em verificar a capacidade de infiltração das tecnologias, a fim de consolidar seu uso como medida de controle de escoamento. Além disso, questões acerca da heterogeneidade dos solos e das condições iniciais e de contorno da operação dos dispositivos foi tratada. O modelo mais encontrado nos trabalhos estudados foi o Hydrus, em suas diferentes versões, unidimensional, bidimensional e tridimensional.

Tabela 3.5: Trabalhos selecionados que estudaram formas de quantificar a infiltração de medidas de controle de escoamento no Brasil.

Autor	Título	Método	Principais resultados
Graciosa, Mendi-ondo e Chaudhry (2008a)	Simulação Hidráulica de Trincheiras de Infiltração de Águas Pluviais	Apresentação e calibração de modelo bidimensional baseado na equação de Richards para estimativa de volumes infiltrados e de umidade do solo na operação de trincheiras de infiltração.	O modelo subestimou a capacidade de infiltração dos solos, mas mesmo em situação de saturação a trincheira foi capaz de infiltrar 40% da chuva de projeto.

<p>Graciosa, Metodologia para o Dimensionamento de Trincheiras de Infiltração para o Controle do Escoamento Superficial na Origem</p>	<p>Comparação de metodologias para dimensionamento de trincheiras de infiltração com base nos modelos de Philip e de Richards para infiltração.</p>	<p>Os modelos apresentaram resultados semelhantes de volume infiltrado. Foi possível alcançar uma configuração de trincheira e os custos para sua implantação foram estimados.</p>
<p>Coutinho et al. (2015) <i>Vadose Zone Heterogeneity Effect on Unsaturated Water Flow Modeling at Meso-Scale</i></p>	<p>Avaliar o efeito da heterogeneidade do solo na infiltração de uma bacia de infiltração considerando a variabilidade espacial do solo usando o modelo Hydrus.</p>	<p>A heterogeneidade do solo impacta o fluxo em meio não saturado. Indicadores são apresentados para explicar e prever a variabilidade espacial do fluxo.</p>
<p>Coutinho et al. (2016) <i>Hydraulic characterization and hydrological behaviour of a pilot permeable pavement in an urban centre, Brazil</i></p>	<p>Caracterização da eficiência hidrológica de pavimento permeável no que diz respeito à infiltração por meio de caracterização experimental e simulação usando o Hydrus.</p>	<p>A infiltração no pavimento permeável está ligada ao desempenho hidrológico dos elementos que compõem o solo. Verificou-se variabilidade espacial das propriedades do solo na área de estudo.</p>
<p>Costa et al. (2020) Sensibilidade dos parâmetros hidrodinâmicos na simulação dos processos de transferência de água em um pavimento permeável</p>	<p>Avaliar a incerteza de parâmetros hidrodinâmicos nos processos de infiltração, evapotranspiração, armazenamento e recarga de aquífero usando o modelo Hydrus e aplicando Richards.</p>	<p>Discretização da malha não gerou ganhos significativos. Condutividade hidráulica saturada é o parâmetro mais relevante na infiltração. Demais parâmetros são relevantes para o armazenamento de água no solo.</p>

3.6 LEVANTAMENTO DE DADOS PARA A MODELAGEM COMPUTACIONAL

Os dados de campo são fundamentais para a modelagem hidrológica. Permeabilidade, capacidade de armazenamento de água, condutividade hidráulica e porosidade são algumas das informações importantes para definir as propriedades do solo no modelo e representar os fenômenos de interesse. Informações sobre as condições iniciais e de contorno do problema também podem ser aferidas em campo, como o nível do aquífero e fluxos de água superficiais e subsuperficiais.

Uma vez configurado o modelo, dados levantados em campo podem ser utilizados para a calibração do modelo, de modo que se promova um reajuste dos parâmetros para a melhor adequação do modelo ao problema. Em seguida, a etapa de verificação pode ser realizada. Aplicando um conjunto de dados reservado para esta etapa, podem ser comparadas as previsões realizadas pelo modelo e as observações registradas em campo, o que permite caracterizar a precisão do modelo.

3.6.1 Condutividade hidráulica do solo

Existem técnicas de medição da condutividade hidráulica saturada do solo. O parâmetro condutividade hidráulica saturada é fundamental para a modelagem computacional de problemas de infiltração, e foi o parâmetro calibrado por Lima (2010) em seus modelos aplicando o FEFLOW para um estudo de fluxo de água em meio não saturado. A obtenção dos dados pode envolver algumas dificuldades, principalmente devido à heterogeneidade do solo, compactação e presença de macroporos. Além disso, mesmo em solos homogêneos para algumas características, a condutividade hidráulica saturada pode variar significativamente no espaço, fazendo com que seja necessário um bom planejamento e uma amostragem para representar adequadamente a variabilidade do solo.

Os métodos de determinação experimental da condutividade hidráulica saturada do solo podem ser divididos em dois grupos, os realizados em campo e os realizados em laboratório. A grande diferença entre a realização do método *in situ* e *ex-situ* é justamente a possibilidade de se realizar uma amostragem representativa do solo. Enquanto em laboratório o processo de amostragem é realizado em condições controladas, maior variedade de amostras e diferentes condições de um mesmo solo, os métodos de campo podem apresentar condições menos controladas, o que pode resultar em dados com interferências. Todavia, o processo de amostragem para ensaios laboratoriais pode ser complexo

Uma técnica comum para a medição da condutividade hidráulica saturada em laboratório

é o método do permeâmetro de carga constante. Para a medição, um permeâmetro recebe a amostra de solo e uma carga constante é aplicada na forma de lâmina d'água. A infiltração de água no solo é medida com base no volume infiltrado no tempo e a condutividade hidráulica saturada é calculada com base na lei de Darcy. Método semelhante ao do permeâmetro de carga constante, mas que aplica água por gotejamento no solo a uma taxa constante, é o método do permeâmetro de gotejamento. Nesse método, também, a taxa de aplicação de água é medida para determinar a condutividade hidráulica saturada.

O método de infiltração por infiltrômetro de anel duplo é uma técnica que pode ser aplicada em campo. Um anel duplo é instalado no solo e é adicionada água no interior do anel. A taxa de infiltração de água no solo é medida ao longo do tempo e a condutividade hidráulica saturada é calculada com base em modelos de infiltração. Outro método que pode ser aplicado em campo é o teste de permeabilidade e poços de observação. Esse método consiste em medir o tempo necessário para que um poço perfurado em aquífero seja preenchido por água. A condutividade hidráulica saturada pode, então, ser calculada com base na taxa de preenchimento do poço. Traçadores também podem ser utilizados para a medição da condutividade, nesses métodos, a curva de chegada de um traçador aplicado no solo é usada para calcular a condutividade hidráulica saturada.

3.6.2 Dados de solos do DF

Lima (2010) realizou investigações experimentais e utilizou o software de modelagem FEFLOW na simulação da variação do nível freático e do escoamento de base em uma bacia hidrográfica do bioma Cerrado. Foram levantados dados para caracterização física e hidrológica. O autor promoveu a organização dos dados de modo a servirem como referência para estudos futuros. Aqui são registrados dados coletados por Lima (2010) para a estação olhos d'água e para a bacia experimental do Alto Rio Jardim que são interessantes para o presente trabalho.

Tabela 3.6: Estatísticas básicas dos dados coletados por Lima (2010) para a caracterização da estação hidrológica Olhos d'Água.

Parâmetro	Unidade	Mínimo	Mediana	Máximo
α	kPa^{-1}	0,5152	0,65815	1,5193
n	<i>adim.</i>	1,3528	1,6644	1,9080
Saturação máxima (S_S)	$g.g^{-1}$	0,478	0,538	0,582
Saturação residual (S_R)	$g.g^{-1}$	0,108	0,208	0,217

Condutividade hidráulica saturada (K_{Sat})	$m.d^{-1}$	5,616	14,028	23,928
---	------------	-------	--------	--------

Tabela 3.7: Estatísticas básicas dos dados coletados por Lima (2010) para a caracterização da Bacia experimental do Alto Rio Jardim.

Parâmetro	Unidade	Mínimo	Mediana	Máximo
α	mca^{-1}	1,9584	6,6245	21,3933
n	<i>adim.</i>	1,0841	1,5599	1,8850
Saturação residual (S_R)	$g.g^{-1}$	0,0001	0,3905	0,4774
Porosidade total	<i>adim.</i>	0,4865	0,5765	0,6188
Condutividade hidráulica saturada (K_{Sat})	$m.d^{-1}$	0,195	13,172	62,462

Lima et al. (2013) registram informações de densidade, curva de retenção, condutividade hidráulica, matéria orgânica e textura de solos da Bacia do Alto Rio Jardim, no DF, e apresentam valores de condutividade hidráulica saturada variando entre 0,34 e 2602,59 mm/h para Latossolos e entre 123,03 e 1436,40 mm/h para Cambissolos, com amostragens em diferentes profundidades. É interessante perceber que, para camadas superficiais, tanto latossolos como cambissolos apresentam alta condutividade hidráulica saturada, com valores de 874,33 mm/hr para cambissolo e 612,20 e 1112,85 mm/hr para latossolo vermelho e latossolo vermelho-amarelo, respectivamente. A variação no K para solos de mesmo tipo aponta para as diversas possibilidades de condução da água, não apenas fluxo em meios poroso.

O trabalho de Fiori, Campos e Almeida (2010) traz uma outra caracterização de condutividade hidráulica dos solos do estado de Goiás e Distrito Federal, agrupando-os em 5 grupos hidrológicos. O Grupo 2 engloba todas as classes de Latossolos (Vermelho, Vermelho-Amarelo, Amarelo e Bruno) e estão associados a uma condutividade hidráulica que varia de 10^{-7} a 10^{-4} m/s (0,36 a 360 mm/h) na superfície e de 10^{-9} a 10^{-4} m/s (0,0036 a 360 mm/h) em profundidade, com médias de $3,3 \times 10^{-5}$ m/s (118,8 mm/h) na superfície e $4,0 \times 10^{-6}$ m/s (14,4 mm/h) em profundidade. Já o Grupo 4 é caracterizado pela presença de solos jovens ou pouco desenvolvidos, como Cambissolos, com valores de condutividade hidráulica saturada inferiores a 10^{-6} m/s (3,6 mm/h), tanto na superfície quanto em profundidade. De acordo com a pesquisa, nas regiões dominadas por esses solos, é frequente a presença de cursos d'água superficiais, devido à infiltração limitada da água da chuva.

4

METODOLOGIA

O trabalho se propõe a analisar o funcionamento de LIDs na compensação de vazões excedentes geradas pela impermeabilização resultante da urbanização. As LIDs podem ser aplicadas em diferentes escalas e com diferentes configurações. Cada LID apresenta formas específicas de combinar mecanismos de retenção e infiltração para o manejo das águas pluviais. As condições ambientais, por sua vez, exercem estímulos que afetam o desempenho dos mecanismos de infiltração e retenção.

Foram aplicadas três metodologias para a quantificação da infiltração por meio de dispositivos de controle de escoamento, utilizando o modelo SWMM, o modelo FEFLOW e a metodologia sugerida por ADASA (2023a). Em um primeiro momento, a proposta foi comparar a forma de representar medidas de controle por infiltração de cada um dos modelos a fim de verificar particularidades e melhor compreender as limitações de cada metodologia. Em seguida, foram explorados cenários adicionais utilizando o modelo FEFLOW, que apresentou a possibilidade de maiores variações em condições específicas da modelagem do processo de infiltração.

Aplicando o modelo FEFLOW, foi investigada a operação das LIDs sob a influência de diferentes condicionantes ambientais para, assim, quantificar volumes infiltrados em diferentes situações, o que permite ampliar o entendimento de sua aplicação na mitigação de impactos de cheias e os serviços ecossistêmicos associados. As atividades foram realizadas mediante aplicação de modelagem hidrológica computacional. A avaliação se deu para características de solo do Distrito Federal, seguindo dados coletados em campo por Lima (2010), de modo a relacionar o espaço físico requerido por esses dispositivos em cenários pedológicos e fisiográficos que podem ser encontrados no DF.

Os programas usados para as modelagens foram o FEFLOW 8.0 64 bit Version com licença completa fornecida pela *DHI Water and Environment* e o EPA SWMM 5.1, de livre acesso. Para serem alcançados os objetivos delimitados no capítulo 2, foi realizada a condução metodológica apresentada no fluxograma da figura 4.1 e detalhada neste capítulo.

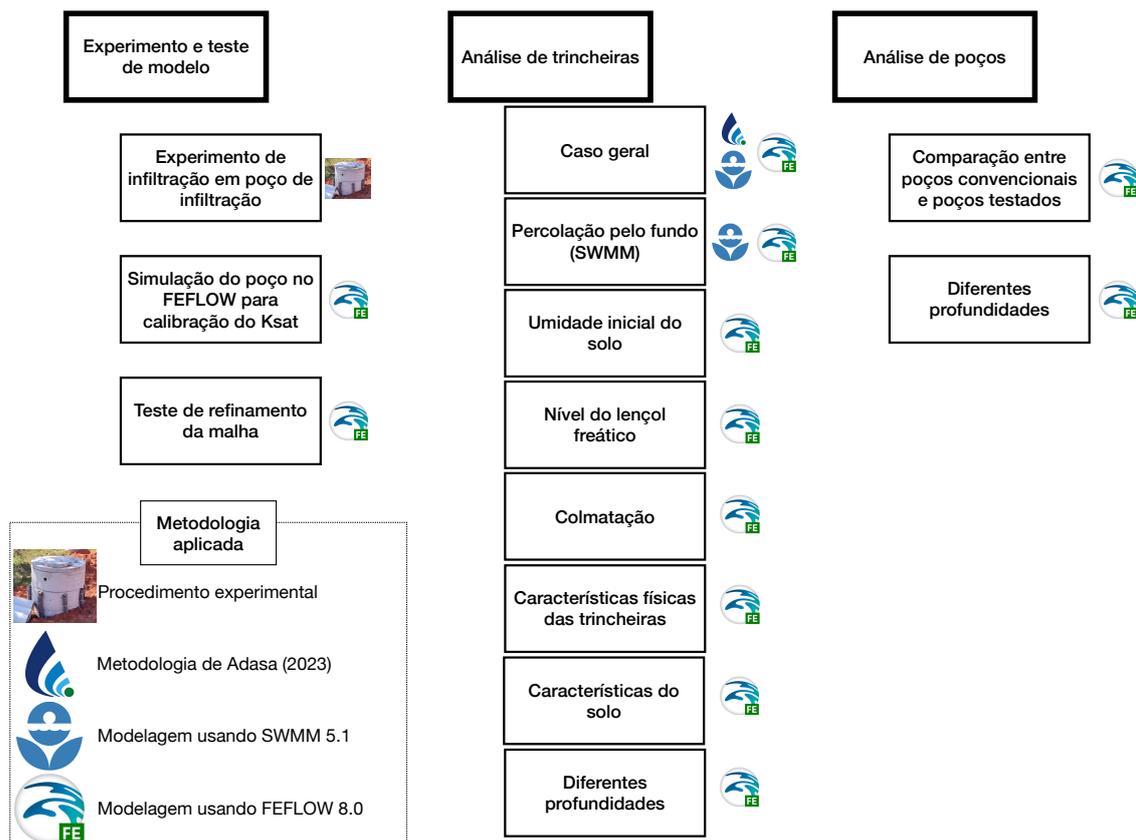


Figura 4.1: Fluxograma da metodologia empregada no projeto.

4.1 MODELAGEM DE LIDS USANDO O SWMM - TRINCHEIRA DE INFILTRAÇÃO

Para alcançar um entendimento sobre o processo de modelagem de uma medida de controle usando o SWMM e verificar sua forma de modelagem, buscou-se uma configuração que evidenciasse a ocorrência da infiltração de uma medida de controle no modelo. Propôs-se, então, um modelo composto apenas por uma parcela de solo e uma medida de controle, completamente preenchida por água e que, desse modo, representasse apenas a infiltração, não retenção, no controle de uma cheia. Foi proposta uma trincheira de infiltração para a composição do cenário, como mostra a figura 4.2.

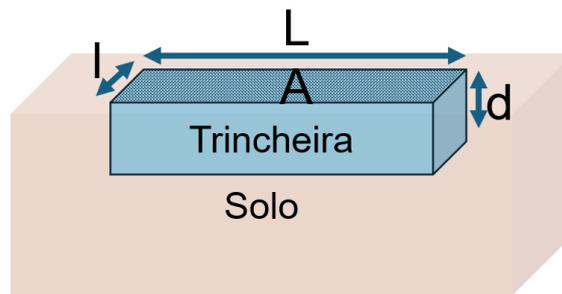


Figura 4.2: Representação do cenário proposto para o modelo de trincheira usando o SWMM.

Para a representação do cenário usando o SWMM, configurou-se um modelo com apenas uma sub-bacia, com dimensões de 10 m x 1 m, resultando em uma área de 10 m^2 . Dessa forma, o modelo é composto por uma área ocupada inteiramente por uma medida de controle na fonte, sem levar em consideração processos hidrológicos que não aqueles promovidos pela trincheira. Adicionalmente, foi fixado um exutório para onde o escoamento do volume adicional não infiltrado seria encaminhado.

Para a verificar os processos de infiltração e desconsiderar os processo de retenção de água no solo, considerou-se uma condição em que a trincheira permanecesse cheia de água. Assim, atribuiu-se à trincheira 100% de saturação no início da simulação no editor de LIDs do SWMM. Não foi considerado dreno subterrâneo e os parâmetros da camada superficial foram mantidos como os pré-definidos, uma vez que o interesse da simulação seria o do funcionamento da camada subterrânea e, no seu funcionamento, tais parâmetros não apresentariam influência.

Para a camada de armazenamento, chamada "*Storage*" no modelo, os parâmetros foram definidos para finalizar a configuração do modelo. A espessura da camada de armazenamento foi definida como sendo de 1 metro, de modo que o volume total da trincheira fosse de 10 m^3 . O único parâmetro de simulação que caracteriza a infiltração promovida pelas medidas de controle no SWMM é especificado no campo "*Seepage Rate*" da camada de armazenamento. Trata-se de valor constante que é aplicado somente à área de fundo da trincheira para configurar a infiltração. O manual do SWMM recomenda a utilização da condutividade hidráulica saturada para esse parâmetro (ROSSMAN, 2016). Assim, foi atribuído um valor de 45,8 mm/h, valor obtido na calibração realizada em campo e descrita em 5.5. O fator de colmatção foi definido como o valor padrão de 0, que corresponde a uma trincheira sem colmatção alguma.

Sabendo que o modelo opera em passos de tempo e tendo a condição inicial de trincheira preenchida com água, espera-se que ocorra a infiltração de volumes constantes no tempo

proporcionais à condutividade hidráulica especificada. A simulação foi realizada para um período de 2 horas de operação do dispositivo. Para evitar que a trincheira se esvaziasse no decorrer da simulação, definiu-se uma chuva sobre a trincheira com intensidade igual à taxa de infiltração. Os valores utilizados na modelagem no SWMM são apresentados na tabela 4.1.

Tabela 4.1: Características do modelo usando o SWMM

Parâmetro	Valor adotado
Comprimento (L)	10 m
Largura (l)	1 m
Profundidade (d)	1 m
Condutividade hidráulica (K)	45,8 mm/h
Precipitação	45,8 mm/h

4.2 QUANTIFICAÇÃO DE INFILTRAÇÃO PELO MANUAL DE DRENAGEM URBANA DA ADASA - TRINCHEIRAS DE INFILTRAÇÃO

A fim de testar a metodologia sugerida pelo manual da ADASA (2023a) para dispositivos de infiltração e realizar comparação com os modelos empregados no SWMM e no FEFLOW, buscou-se replicar a configuração de modelo apresentada no cenário estudado no SWMM, descrito em 4.1. Considerou-se, então, cenário composto de uma trincheira de infiltração, como mostra a figura 4.3.

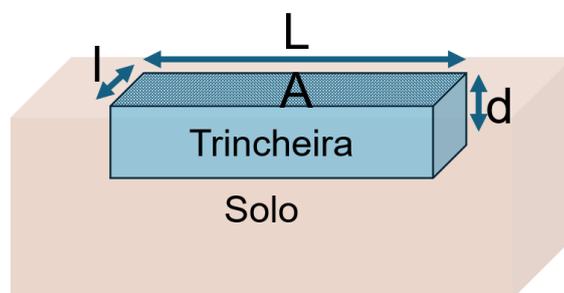


Figura 4.3: Representação do cenário proposto para a quantificação da infiltração de trincheira usando a metodologia sugerida por ADASA (2023a).

Propôs-se trincheira de área em planta de dimensões de 10 m x 1 m, resultando em uma área superficial de 10 m^2 . A profundidade do dispositivo foi definida como sendo de 1 metro, de modo que o volume total da trincheira fosse de 10 m^3 . O único parâmetro da metodologia

que caracteriza a infiltração pelas medidas de controle é a condutividade hidráulica saturada k , como mostra a equação 4.1.

$$Q_{ei} = 1000 \cdot k \cdot A_{inf} \cdot C_s \quad (4.1)$$

Em que:

Q_{ei} é a vazão efluente infiltrada, LS^{-1} ,

k é o coeficiente de permeabilidade do solo saturado, ms^{-1} ,

A_{inf} é a área de infiltração, m^2 ,

C_s é o coeficiente de segurança de redução do coeficiente de permeabilidade, *adim*,

A condutividade hidráulica saturada é tomada como um valor constante que é aplicado à soma entre a área de fundo e metade das áreas laterais da trincheira para configurar a infiltração. A área total de infiltração (A_i) para o cenário estudado é, portanto, de $21 m^2$. Dessa forma, o valor de $21 m^2$ equivale a 2,1 vezes a área de infiltração adotada pelo SWMM, de $10 m^2$, que também considera a infiltração constante com taxa igual à condutividade hidráulica saturada, mas a aplica apenas ao fundo do dispositivo.

O manual da Adasa recomenda, ainda, a adoção de um coeficiente de segurança C_s no valor de 0,5. Assim, realizando a multiplicação entre o coeficiente de segurança e a área, pode-se dizer que a área considerada para a infiltração para ADASA (2023a) passa a ser de 1,05 vez a área considerada no SWMM, o que sugere a obtenção de resultados muito semelhantes entre as duas metodologias para o cenário estudado. As equações apresentadas em 4.2 trazem a comparação entre as áreas consideradas pelas duas metodologias.

$$A_{i(Adasa)} = 2,1 \cdot A_{i(SWMM)} \cdot C_s \quad (4.2)$$

$$A_{i(Adasa)} = 2,1 \cdot A_{i(SWMM)} \cdot 0,5$$

$$A_{i(Adasa)} = 1,05 \cdot A_{i(SWMM)}$$

Em que:

$A_{i(Adasa)}$ é a área de infiltração considerada pela metodologia de ADASA (2023a),

$A_{i(SWMM)}$ é a área de infiltração considerada na modelagem usando o SWMM (ROSSMAN, 2016).

O valor adotado para a condutividade hidráulica saturada para a aplicação da metodologia sugerida por ADASA (2023a) foi de 45,8 mm/h ($1,27 \cdot 10^{-5} \text{ ms}^{-1}$), valor obtido na calibração realizada em campo e descrita em 5.5.

Aplicando a taxa de infiltração resultante da equação 4.1 pelo período de 2 horas de simulação, temos a quantificação contínua de infiltração e volume infiltrado para a metodologia sugerida pela Adasa, e que pode ser comparada com as demais metodologias avaliadas no presente estudo.

4.3 MODELAGEM DE LIDS USANDO O FEFLOW - CRIAÇÃO DE CENÁRIOS

Para a avaliação do funcionamento das LIDs em um modelo que considera o processo de molhamento do solo, optou-se pela aplicação do modelo FEFLOW. A aplicação do modelo depende de uma configuração de cenários. Não foram encontrados estudos na literatura que realizassem a modelagem de dispositivos de infiltração de modo a quantificar esse fenômeno aplicando modelos de fluxo em meios porosos não saturados tais como o FEFLOW. A metodologia básica para a formulação de um cenário de LIDs é apresentada na presente seção, e foi aplicada tanto para trincheiras quanto para poços de infiltração.

Malhas FEM (*Finite Element Method*) foram criadas no FEFLOW no formato de malhas 3D estruturadas em camadas. As configurações do domínio da malha foram especificadas no próprio ambiente de desenho do FEFLOW para as trincheiras. Já para os cenários de poços, foram importados mapas no formato *shapefile* previamente elaborados para a composição do cenário. Tanto para as trincheiras quanto para os poços, foram delimitadas áreas centralizadas da malha, onde foi realizado adensamento da malha de elementos finitos para melhores resultados.

Para a configuração dos cenários de trincheira, uma vez que são dispositivos retangulares, preferiu-se uma configuração de malha de elementos finitos retangulares. Já para o cenário de poços, o método aplicado foi diversificado, avaliando, em cada caso, aquele que gerava a malha triangular mais regular. Para os dois tipos de cenário, de trincheiras e de poços de infiltração, optou-se pela remoção dos elementos que ocupariam o volume interno do dispositivo de infiltração e a aplicação de condições de contorno de carga constante nas paredes internas da cavidade.

O FEFLOW permite especificar regiões de interesse em que se podem monitorar fluxos

de entrada e saída de água. Assim, para todos os cenários, de poços e trincheiras, para a quantificação da infiltração, foram selecionados o fundo e as laterais dos dispositivos. Os dados desse monitoramento são exibidos de forma gráfica no painel de operação do programa nos formatos de volume infiltrado e vazão infiltrada por minuto e podem ser exportados em formato de arquivo de texto.

É importante registrar as premissas que são consideradas na modelagem com o FEFLOW. Assume-se que o meio poroso em que ocorre a infiltração é homogêneo e isotrópico, ou seja, que as propriedades hidráulicas são uniformes em todas as direções e ao longo da área modelada. Na realidade, solos são heterogêneos, com variações significativas em suas propriedades ao longo de curtas distâncias. Em muitos casos, a condutividade hidráulica é anisotrópica, como em camadas sedimentares, em que a água pode se mover mais facilmente ao longo da camada do que perpendicularmente a ela. Os macroporos são outro aspecto crucial que distancia os fenômenos naturais daqueles modelados considerando meios porosos homogêneos e isotrópicos. Solos frequentemente contêm macroporos, formados por raízes de plantas, atividades de organismos do solo, e fraturas naturais no solo ou na rocha, por onde o fluxo ocorre preferencialmente e com grandes vazões.

4.4 MODELAGEM DE LIDS USANDO O FEFLOW - TRINCHEIRAS DE INFILTRAÇÃO

A configuração inicial do cenário de trincheiras de infiltração no FEFLOW foi semelhante ao cenário implementado no SWMM, registrado na Seção 4.1, e à metodologia sugerida por ADASA (2023a), apresentada na Seção 4.2. Tal configuração foi chamada de *Caso Geral* e suas especificações estão detalhadas na Seção 4.4.1. Em seguida, foram criados cenários para investigação de alterações em parâmetros relevantes da operação de LIDs. As configurações dos cenários são apresentadas a partir da Seção 4.4.2.

O painel apresentado pela Figura 4.4 traz de maneira esquemática os diferentes aspectos estudados pelo presente trabalho. Buscou-se uma avaliação de diferentes características relevantes para a operação das medidas de controle. O presente capítulo irá detalhar as investigações realizadas por cada conjunto de condições estudadas.

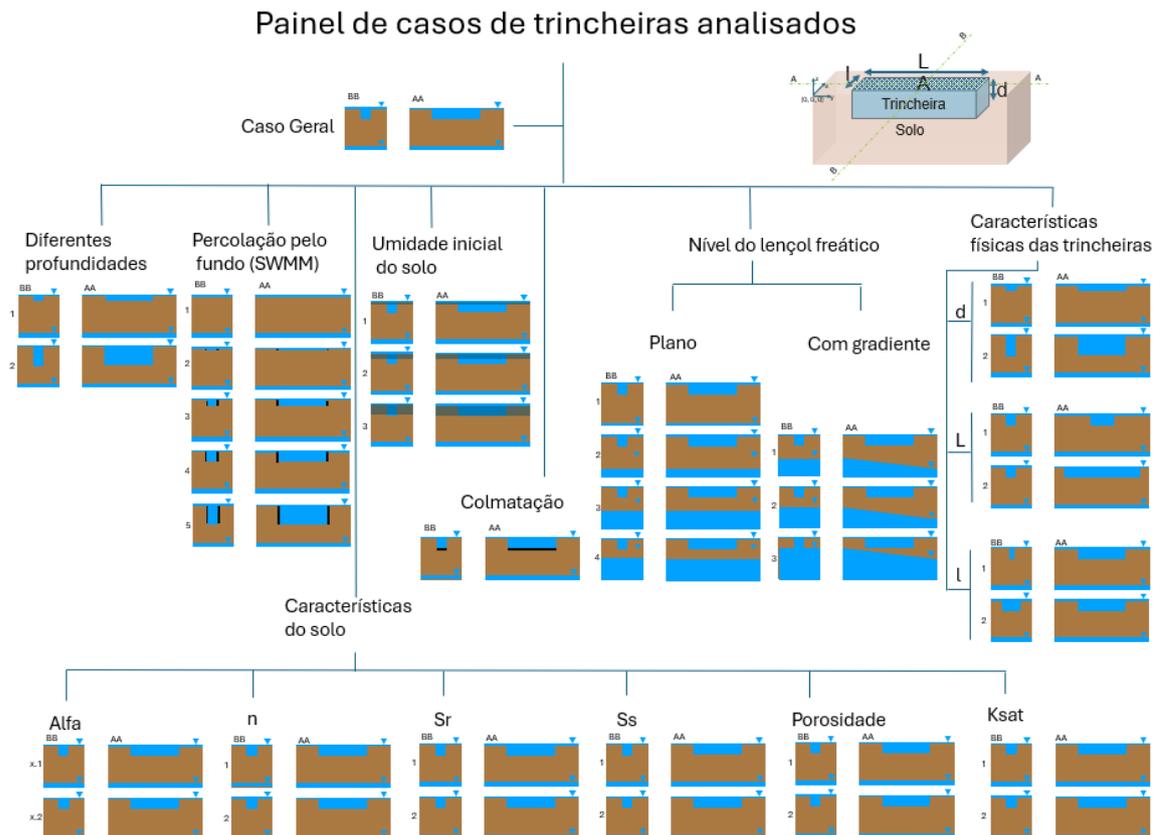


Figura 4.4: Painel de casos estudados no FEFLOW para análise de trincheiras de infiltração.

4.4.1 Caso Geral

Para a configuração de um Caso Geral do cenário de trincheiras de infiltração, que representasse, no FEFLOW, uma condição semelhante àquela apresentada nas Seções 4.1 e 4.2, foram incorporadas características do dispositivo e do solo. Especificações a respeito de condições físicas do dispositivo, umidade inicial do solo, nível do lençol freático, estágio de colmatação e características do solo foram determinadas. Foram utilizadas as mesmas dimensões do dispositivo de infiltração aplicado para as metodologias usando SWMM e as recomendações de ADASA (2023a). Já para o domínio do cenário, a abordagem foi diferente da aplicada no cenário configurado no SWMM. Uma vez que a modelagem no FEFLOW considera o processo de molhamento do solo e a infiltração pelas paredes laterais da trincheira, foi configurado um domínio mais amplo. As dimensões do cenário e do dispositivo de infiltração utilizados são apresentadas na tabela 4.2. A representação esquemática do cenário é apresentada nas figuras 4.5 e 4.6.

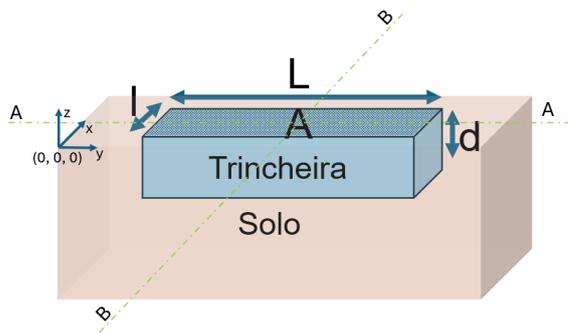


Figura 4.5: Representação esquemática do cenário criado no FEFLOW para o Caso Geral.

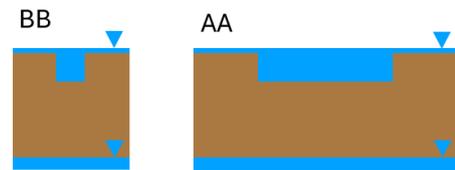


Figura 4.6: Cortes AA e BB da representação esquemática do cenário criado no FEFLOW para o Caso Geral.

Tabela 4.2: Características físicas do cenário Caso Geral no FEFLOW para trincheiras de infiltração.

Parâmetro	Valor adotado
Comprimento do domínio do cenário	210 m
Largura do domínio do cenário	42 m
Profundidade do domínio do cenário	10 m
Comprimento da trincheira (L)	10 m
Largura da trincheira (l)	1 m
Profundidade da trincheira (d)	1 m

O domínio da malha bidimensional foi estabelecido em 210m x 42m, de modo que, posicionada no centro do espaço, a trincheira não sofresse com o efeito de bordas no processo de infiltração. Para que se alcançasse tal definição das dimensões do domínio, foram realizadas simulações de infiltração testando diferentes cenários até que fosse encontrada uma configuração em que não se verificasse efeito de bordas.

A umidade inicial do problema foi definida de modo a criar equilíbrio na distribuição de umidade entre o nível do lençol freático, posicionado a 6 metros de profundidade, e a superfície do solo. A posição do lençol freático foi definida no decorrer do processo de modelagem, em função do desempenho do cenário, configurando uma posição intermediária, em que não se observa influência do nível do lençol freático no início da simulação, mas que pode passar a exercer tal influência no decorrer do processo de infiltração. Tal configuração foi alcançada pela variação da posição do lençol freático e a verificação de sua influência na operação do dispositivo, o que é mostrado na Seção 4.4.6.

Foram atribuídas condições de contorno aos limites da malha e às paredes internas da trincheira. Para a camada mais superior da malha, a primeira camada, que representa o nível

do terreno e contém a superfície da trincheira, aplicou-se condição de contorno de carga hidráulica constante de 0 m, de modo a representar uma lâmina de precipitação constante, mas sem carga estática adicional, apenas a carga promovida pela água ocupando o interior do dispositivo. Assim, . Para o Caso Geral, não se considerou colmatação de fundo. A tabela 4.3 traz as informações de umidade inicial, condições de contorno, nível do lençol freático e colmatação.

Tabela 4.3: Características de umidade inicial, condições de contorno, nível do lençol freático e colmatação do cenário Caso Geral no FEFLOW para trincheiras de infiltração.

Parâmetro	Valor adotado
Carga hidráulica na superfície do solo	Z = 0 na superfície
Condição inicial de carga hidráulica no solo	-6 m, (lençol freático a 6 m da superfície)
Condição inicial de carga hidráulica na trincheira	0 m
Condição de contorno na última camada da malha	Fluxo nulo
Condição de contorno na primeira camada da malha	Carga constante de 0 m
Condição de contorno na lateral direita da malha	Carga constante de -6 m
Condição de contorno na lateral esquerda da malha	Carga constante de -6 m
Condição de contorno nos pontos internos da trincheira	Carga constante de 0 m
Colmatação no fundo	Não aplicada

Para as características do solo, utilizando a formulação de van Genuchten (eq. 3.11), os valores utilizados para os parâmetros α , n , S_S e S_R da equação foram as medianas dos valores encontrados por Lima (2010) para a região da estação experimental Olhos d'Água. O dado de porosidade total não constava na caracterização realizada pelo autor para essa região. Assim, tomou-se o valor da mediana dos valores apresentados por Lima (2010) para a região da bacia experimental do Alto Rio Jardim. A mediana dos valores encontrados na literatura foi utilizada a fim de se adotar um valor representativo do conjunto de dados e que sofresse menor influência do que a média com o efeito de extremos da série.

O trabalho de Lima (2010) traz a caracterização de solos da estação Olhos d'água e da bacia experimental do Alto Rio Jardim. Optou-se pela utilização dos dados coletados por Lima (2010) para a estação experimental Olhos d'Água pois, uma vez que se trata de localização pontual, com informações de um único local, a amplitude de valores é menor. Já para a bacia experimental estudada pelo autor, a variabilidade de possíveis valores encontrados pode ser maior. Ainda assim, face à falta de dados da estação experimental Olhos d'Água, dados da bacia experimental foram utilizados. Para o valor de condutividade hidráulica saturada foi utilizado valor obtido experimentalmente em campo, processo descrito em 4.5 e

5.5. A tabela 4.4 traz as informações utilizadas para as características do solo no cenário.

Tabela 4.4: Características do solo do cenário Caso Geral no FEFLOW para trincheiras de infiltração.

Parâmetro	Valor adotado
α (LIMA, 2010)	6,4525
n (LIMA, 2010)	1,6644
Saturação máxima (S_S) (LIMA, 2010)	0,538
Saturação residual (S_R) (LIMA, 2010)	0,208
Porosidade total (UFP) (LIMA, 2010)	0,5765
Condutividade hidráulica saturada (K_{Sat})	1,1 m/d (45,8 mm/h)

Para melhor representação dos processos de infiltração na trincheira e nas suas proximidades, foram incorporadas camadas mais finas nas proximidades da trincheira e mais espessas conforme o aumento da profundidade. A tabela 4.5 apresenta a distribuição da elevação das camadas subterrâneas na malha.

Tabela 4.5: Distribuição das camadas da malha do Caso Geral no FEFLOW para trincheiras de infiltração.

<i>Slice</i>	Elevação (m)	<i>Slice</i>	Elevação (m)	<i>Slice</i>	Elevação (m)
1	0	12	-2,2	23	-4,4
2	-0,2	13	-2,4	24	-4,6
3	-0,4	14	-2,6	25	-4,8
4	-0,6	15	-2,8	26	-5,0
5	-0,8	16	-3,0	27	-5,5
6	-1,0	17	-3,2	28	-6,0
7	-1,2	18	-3,4	29	-6,5
8	-1,4	19	-3,6	30	-7,0
9	-1,6	20	-3,8	31	-8,0
10	-1,8	21	-4,0	32	-9,0
11	-2,0	22	-4,2	33	-10,0

4.4.2 Percolação pelo fundo (SWMM)

O grupo de cenários chamado de percolação pelo fundo (SWMM) busca comparar a modelagem do mesmo problema modelado usando o SWMM (apresentado na Seção 4.1). Para esse grupo, após a verificação de que o Caso Geral apresenta resultados muito distantes dos

observados no cenário usando o SWMM, buscou-se incorporar no FEFLOW as simplificações de modelagem adotadas pelo SWMM. Assim, o cenário se distancia da representação do cenário do Caso Geral, mas se aproxima fisicamente do que promove o SWMM no seu processo de modelagem. Isso acontece pela definição de condição de contorno de fluxo nulo nas paredes da trincheira, fazendo com que a trincheira promova infiltração apenas pelo fundo.

Sabendo que o SWMM não considera variações no resultado de infiltração para trincheiras de diferentes profundidades, foram testadas nos cenários FEFLOW trincheiras com profundidades variadas. As dimensões da malha e do dispositivo de infiltração utilizados são apresentadas na tabela 4.6. As condições iniciais e de contorno utilizadas são apresentadas na tabela 4.7. A representação esquemática dos cenários desse grupo de cenários é apresentada nas figuras 4.13 e 4.38. As demais características dos cenários foram mantidas iguais às do Caso Geral e são as apresentadas pelas tabelas 4.4 e 4.5.

Tabela 4.6: Características físicas dos cenários do grupo *percolação pelo fundo (SWMM)* no FEFLOW para trincheiras de infiltração.

Parâmetro	Valor adotado
Comprimento do domínio da malha	210 m
Largura do domínio da malha	42 m
Profundidade do domínio	10 m
Comprimento da trincheira (L)	10 m
Largura da trincheira (l)	1 m
Profundidade da trincheira (d)	0 m, 0,1 m, 0,5 m, 1 m e 2 m

Tabela 4.7: Características de umidade inicial, condições de contorno, nível do lençol freático e colmatação do grupo de cenários *percolação pelo fundo (SWMM)* no FEFLOW para trincheiras de infiltração.

Parâmetro	Valor adotado
Carga hidráulica na superfície do solo	$Z = 0$ na superfície
Condição inicial de carga hidráulica no solo	-6 m, desde o lençol até a superfície do solo
Condição inicial de carga hidráulica no fundo da trincheira	0 m
Condição de contorno nas paredes da trincheira	Fluxo nulo
Condição de contorno na última camada da malha	Fluxo nulo
Condição de contorno na primeira camada da malha	Carga constante de 0 m

Condição de contorno na lateral direita da malha	Carga constante de -6 m
Condição de contorno na lateral esquerda da malha	Carga constante de -6 m
Condição de contorno nos pontos internos da trincheira	Carga constante de 0 m
Colmatação no fundo	Não aplicada

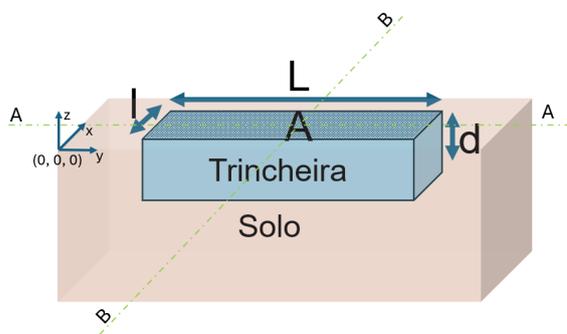


Figura 4.7: Representação esquemática de cenário criado no FEFLOW para o grupo de cenários *percolação pelo fundo (SWMM)*.

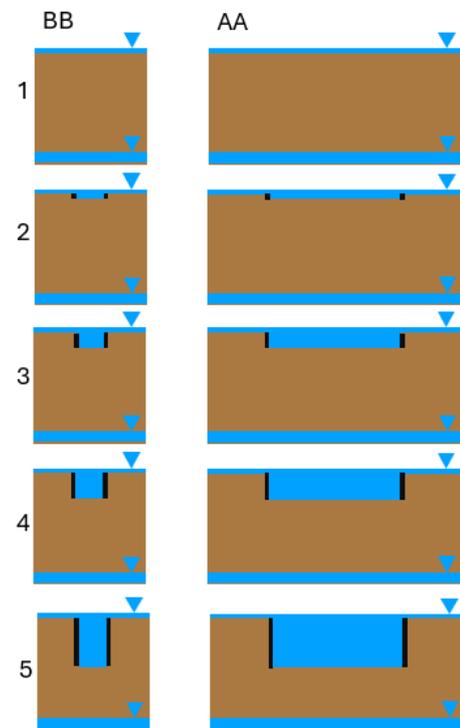


Figura 4.8: Cortes AA e BB da representação esquemática dos cenários criados no FEFLOW para o grupo de cenários *percolação pelo fundo (SWMM)*.

4.4.3 Características do solo

Buscou-se configurar cenários que permitissem avaliar o impacto da variação dos parâmetros relevantes para a modelagem do fluxo no solo. Para a análise, foram utilizados diferentes valores para os parâmetros da equação de van Genuchten e da equação de Mualem (eq. 3.11), α , n , S_S e S_R , porosidade total e condutividade hidráulica saturada. A fim de verificar a influência dos parâmetros na modelagem, foram aplicados os valores mínimo e máximo registrados por Lima (2010) para comparação com os resultados do caso geral, em que se utilizou a mediana dos parâmetros e o valor obtido experimentalmente de K_{Sat} . As condições utilizadas são apresentadas na tabela 4.8. A representação esquemática dos cená-

rios desse grupo de cenários é apresentada nas figuras 4.9 e 4.10. As demais características dos cenários foram mantidas iguais às do Caso Geral e são as apresentadas pelas tabelas 4.2, 4.3 e 4.5.

Tabela 4.8: Características do solo do grupo *Características do solo* no FEFLOW para trincheiras de infiltração.

Parâmetro	Valores adotados
α (LIMA, 2010)	5,051 e 14,8952
n (LIMA, 2010)	1,3528 e 1,9080
Saturação máxima (S_S) (LIMA, 2010)	0,478 e 0,582
Saturação residual (S_R) (LIMA, 2010)	0,184 e 0,217
Porosidade total (UFP) (LIMA, 2010)	0,4865 e 0,6188
Condutividade hidráulica saturada (K_{Sat}) (LIMA, 2010)	0,195 e 23,93 m/d (8,1 e 997,1 mm/h)

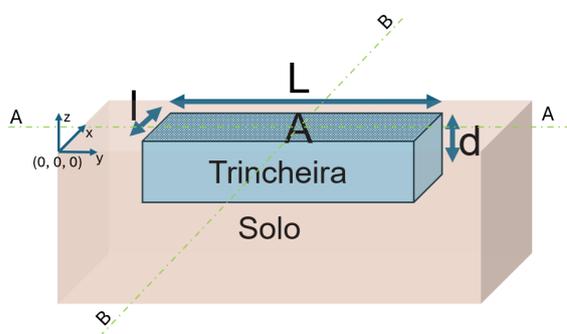


Figura 4.9: Representação esquemática de cenário criado no FEFLOW para o grupo de cenários *Características do solo*.

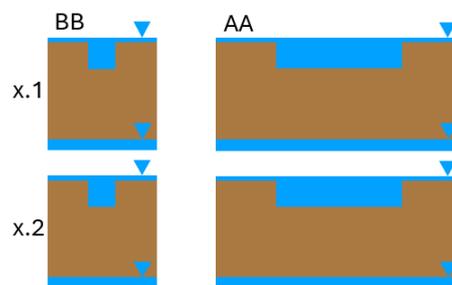


Figura 4.10: Cortes AA e BB da representação esquemática dos cenários criados no FEFLOW para cada parâmetro do grupo de cenários *Características do solo*.

4.4.4 Umidade inicial do solo

O grupo de cenários chamado de *umidade inicial do solo* foi configurado para verificar o impacto de outro parâmetro não considerado na modelagem do SWMM, a condição inicial de umidade do solo em que a trincheira se insere. Assim, foram criados no FEFLOW cenários com diferentes condições iniciais de umidade do solo, preservando as demais características dos cenários aplicado no SWMM e no Caso Geral (apresentados respectivamente na Seção 4.1 e na Seção 4.4.1). A condição de solo úmido foi configurada aplicando uma condição de umidade igual à capacidade de campo (pressão de -10 kPa) nos cenários do FEFLOW desde a superfície até a profundidade especificada em cada caso. As condições

iniciais e de contorno utilizadas são apresentadas na tabela 4.10. A representação esquemática dos cenários desse grupo de cenários é apresentada nas figuras 4.13 e 4.38. As demais características dos cenários foram mantidas iguais às do Caso Geral e são as apresentadas pelas tabelas 4.2, 4.4 e 4.5.

Tabela 4.9: Características de umidade inicial, condições de contorno, nível do lençol freático e colmatção do grupo de cenários *umidade inicial do solo* no FEFLOW para trincheiras de infiltração.

Parâmetro	Valor adotado
Carga hidráulica na superfície do solo	$Z = 0$ na superfície
Condição inicial de carga hidráulica no solo	-6 m, desde o lençol até a superfície do solo
Condição inicial de carga hidráulica no solo até as profundidades de 0,6 m, 1 m e 2 m.	-10 kPa
Condição inicial de carga hidráulica na trincheira	0 m
Condição de contorno na última camada da malha	Fluxo nulo
Condição de contorno na primeira camada da malha	Carga constante de 0 m
Condição de contorno na lateral direita da malha	Carga constante de -6 m
Condição de contorno na lateral esquerda da malha	Carga constante de -6 m
Condição de contorno nos pontos internos da trincheira	Carga constante de 0 m
Colmatção no fundo	Não aplicada

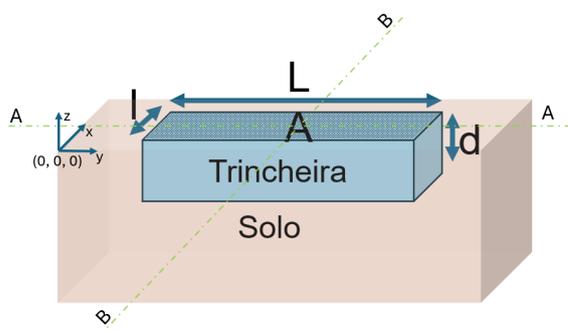


Figura 4.11: Representação esquemática de cenário criado no FEFLOW para o grupo de cenários *umidade inicial do solo*.

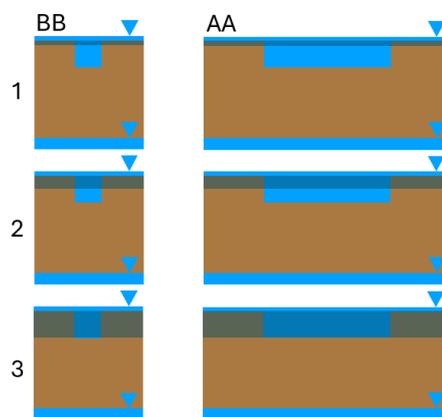


Figura 4.12: Cortes AA e BB da representação esquemática dos cenários criados no FEFLOW para o grupo de cenários *umidade inicial do solo*.

4.4.5 Colmatação

O grupo *Colmatação* foi configurado para verificar a importância da colmatação do fundo da trincheira para a infiltração do dispositivo. As trincheiras foram simuladas no FEFLOW com diferentes condições de colmatação do fundo da trincheira, preservando as demais características dos cenários aplicado no Caso Geral (apresentados na Seção 4.4.1). A condição de colmatação foi configurada aplicando valores de condutividade hidráulica saturada reduzida na camada de solo imediatamente abaixo ao fundo da trincheira. As condições utilizadas são apresentadas na tabela 4.10. A representação esquemática dos cenários desse grupo de cenários é apresentada nas figuras 4.13 e 4.38. As demais características dos cenários foram mantidas iguais às do Caso Geral e são as apresentadas pelas tabelas 4.2, 4.4 e 4.5.

Tabela 4.10: Características de umidade inicial, condições de contorno, nível do lençol freático e colmatação do grupo de cenários Colmatação no FEFLOW para trincheiras de infiltração.

Parâmetro	Valor adotado
Carga hidráulica na superfície do solo	Z = 0 na superfície
Condição inicial de carga hidráulica no solo	-6 m, desde o lençol até a superfície do solo
Condição inicial de carga hidráulica nas paredes da trincheira	0 m
Condição de contorno na última camada da malha	Fluxo nulo
Condição de contorno na primeira camada da malha	Carga constante de 0 m
Condição de contorno na lateral direita da malha	Carga constante de -6 m
Condição de contorno na lateral esquerda da malha	Carga constante de -6 m
Condição de contorno nos pontos internos da trincheira	Carga constante de 0 m
Condutividade hidráulica na camada de solo abaixo da trincheira	45, 8mm/h, 34, 35mm/h, 22, 9mm/h, 11, 45mm/h, 4, 58mm/h, 0, 458mm/h, 0mm/h

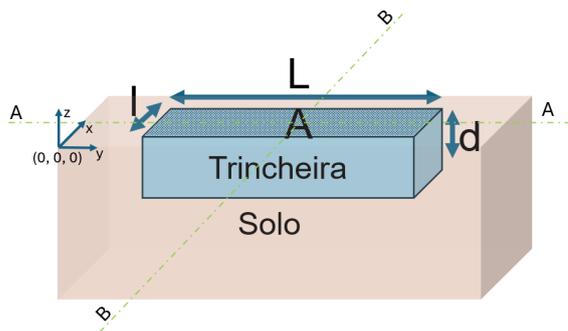


Figura 4.13: Representação esquemática de cenário criado no FEFLOW para o grupo de cenários *Colmatação*.

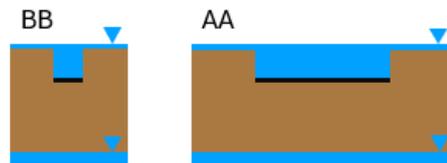


Figura 4.14: Cortes AA e BB da representação esquemática dos cenários criados no FEFLOW para o grupo de cenários *Colmatação*.

4.4.6 Nível do lençol freático

O nível do lençol freático foi analisado considerando diferentes profundidades e a existência de gradiente no lençol freático. O objetivo foi verificar a influência do nível d'água do lençol freático no funcionamento dos dispositivos de infiltração, o que não é considerado no SWMM. Analisou-se também o impacto de uma inclinação de 1:100 no lençol freático com relação ao seu equivalente plano, considerando também a altura do lençol freático com relação ao centro da trincheira.

4.4.6.1 Lençol freático horizontal

Para as variações do nível do lençol freático, foram considerados valores acima do adotado no Caso Geral e uma condição de lençol freático mais baixa. As condições utilizadas são apresentadas na tabela 4.11. A representação esquemática dos cenários desse grupo de cenários é apresentada nas figuras 4.15 e 4.16. As demais características dos cenários foram mantidas iguais às do Caso Geral e são as apresentadas pelas tabelas 4.2, 4.4 e 4.5.

Tabela 4.11: Características de umidade inicial, condições de contorno, nível do lençol freático e colmatação do grupo de cenários *nível do lençol freático plano* no FEFLOW para trincheiras de infiltração.

Parâmetro	Valor adotado
Carga hidráulica na superfície do solo	$Z = 0$ na superfície
Condição inicial de carga hidráulica no solo	-8 m, -4 m, -3 m e -2 m em equilíbrio até a superfície do solo
Condição inicial de carga hidráulica na trincheira	0 m

Condição de contorno na última camada da malha	Fluxo nulo
Condição de contorno na primeira camada da malha	Carga constante de 0 m
Condição de contorno na lateral direita da malha	Carga constante de -8 m, -4 m, -3 m e -2 m
Condição de contorno na lateral esquerda da malha	Carga constante de -8 m, -4 m, -3 m e -2 m
Condição de contorno nos pontos internos da trincheira	Carga constante de 0 m
Colmatação no fundo	Não aplicada

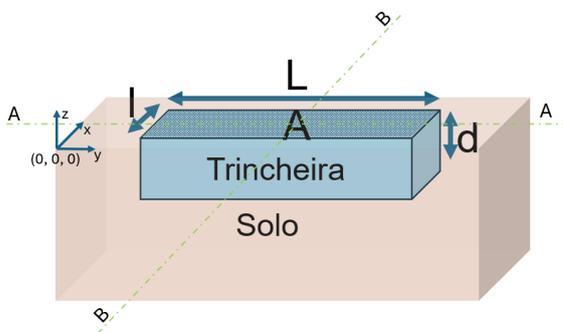


Figura 4.15: Representação esquemática de cenário criado no FEFLOW para o grupo de cenários *Nível de lençol freático plano*.

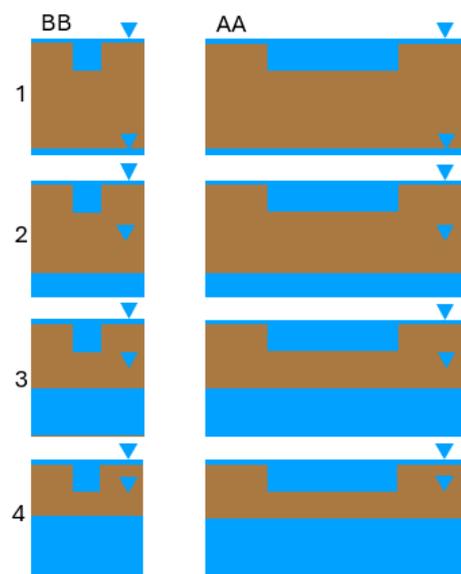


Figura 4.16: Cortes AA e BB da representação esquemática dos cenários criados no FEFLOW para o grupo de cenários *Nível de lençol freático plano*.

4.4.6.2 Lençol freático com gradiente hidráulico

Para análise de influência do gradiente hidráulico, foram consideradas as mesmas condições aplicadas no grupo de lençol freático plano em nível acima do observado no caso geral, mas adotando inclinação de 1:100, de modo que o nível no centro da trincheira fosse -4 m, -3 m, -2 m. As condições utilizadas são apresentadas na tabela 4.12. A representação esquemática dos cenários desse grupo de cenários é apresentada nas figuras 4.17 e 4.18. As demais características dos cenários foram mantidas iguais às do Caso Geral e são as apresentadas pelas tabelas 4.2, 4.4 e 4.5.

Tabela 4.12: Características de umidade inicial, condições de contorno, nível do lençol freático e colmatagem do grupo de cenários *lençol freático com gradiente* no FEFLOW para trincheiras de infiltração.

Parâmetro	Valor adotado
Carga hidráulica na superfície do solo	$Z = 0$ na superfície
Condição inicial de carga hidráulica no solo	Em equilíbrio até a superfície do solo
Condição inicial de carga hidráulica na trincheira	0 m
Condição de contorno na última camada da malha	Fluxo nulo
Condição de contorno na primeira camada da malha	Carga constante de 0 m
Condição de contorno na lateral direita da malha	Carga constante de -5 m, -4 m e -3 m
Condição de contorno na lateral esquerda da malha	Carga constante de -3 m, -2 m e -1 m
Condição de contorno nos pontos internos da trincheira	Carga constante de 0 m
Colmatagem no fundo	Não aplicada

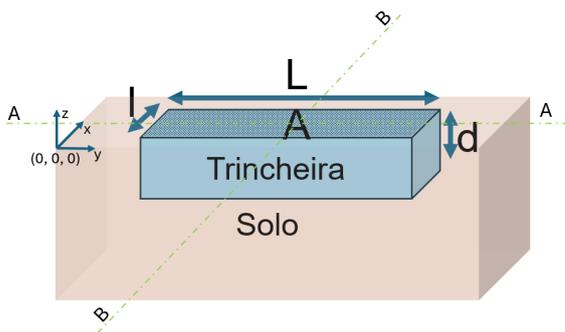


Figura 4.17: Representação esquemática de cenário criado no FEFLOW para o grupo de cenários *lençol freático com gradiente*.

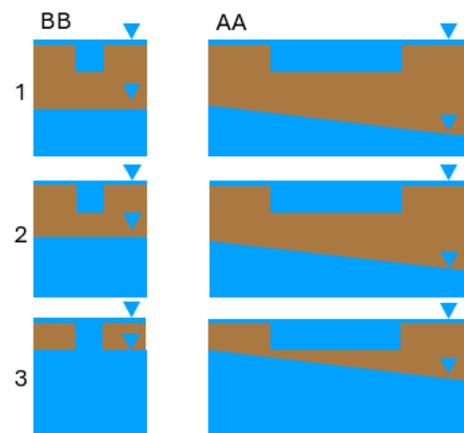


Figura 4.18: Cortes AA e BB da representação esquemática dos cenários criados no FEFLOW para o grupo de cenários *lençol freático com gradiente*.

4.4.7 Características físicas das trincheiras

O grupo de cenários chamado de *características físicas das trincheiras* foi proposto para verificar o impacto de mudanças nas dimensões das trincheiras no processo de infiltração.

Assim, foram testadas variações na profundidade (seção 4.4.7.1), no comprimento (seção 4.4.7.2) e na largura (seção 4.4.7.3) dos dispositivos. Para cada uma das métricas, o valor do Caso Geral foi variado para o dobro ou reduzido à metade, como descrito nas seções seguintes.

4.4.7.1 Profundidade

Para verificar a influência da profundidade, foram testadas as profundidades de 0,5 m e de 2 m. As condições utilizadas são apresentadas na tabela 4.13. As demais características dos cenários foram mantidas iguais às do Caso Geral e são as apresentadas pelas tabelas 4.3, 4.4 e 4.5. A representação esquemática dos cenários desse grupo de cenários é apresentada nas figuras 4.19 e 4.20.

Tabela 4.13: Características físicas dos cenários do grupo *características físicas das trincheiras - Profundidade* no FEFLOW para trincheiras de infiltração.

Parâmetro	Valor adotado
Comprimento do domínio da malha	210 m
Largura do domínio da malha	42 m
Profundidade do domínio	10 m
Comprimento da trincheira (L)	10 m
Largura da trincheira (l)	1 m
Profundidade da trincheira (d)	0,5 m e 2 m

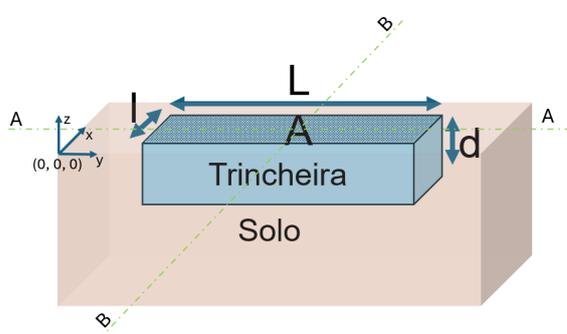


Figura 4.19: Representação esquemática de cenário criado no FEFLOW para o grupo de cenários *características físicas das trincheiras - Profundidade*.

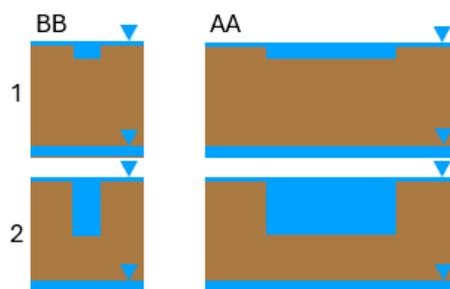


Figura 4.20: Cortes AA e BB da representação esquemática dos cenários criados no FEFLOW para cada parâmetro do grupo de cenários *características físicas das trincheiras - Profundidade*.

4.4.7.2 Comprimento

Para verificar a influência do comprimento, foram testados os comprimentos de 5 m e de 20 m. As condições utilizadas são apresentadas na tabela 4.14. As demais características dos cenários foram mantidas iguais às do Caso Geral e são as apresentadas pelas tabelas 4.3, 4.4 e 4.5. A representação esquemática dos cenários desse grupo de cenários é apresentada nas figuras 4.21 e 4.22.

Tabela 4.14: Características físicas dos cenários do grupo *características físicas das trincheiras - Comprimento* no FEFLOW para trincheiras de infiltração.

Parâmetro	Valor adotado
Comprimento do domínio da malha	210 m
Largura do domínio da malha	42 m
Profundidade do domínio	10 m
Comprimento da trincheira (L)	5 m e 20 m
Largura da trincheira (l)	1 m
Profundidade da trincheira (d)	1 m

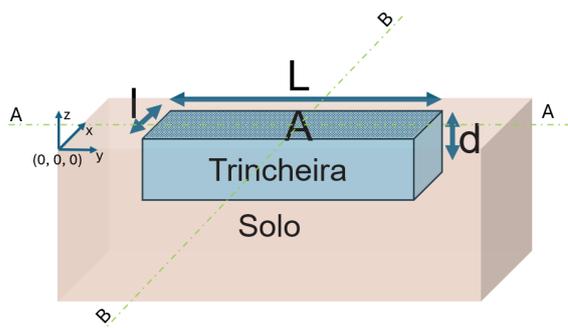


Figura 4.21: Representação esquemática de cenário criado no FEFLOW para o grupo de cenários *características físicas das trincheiras - Comprimento*.

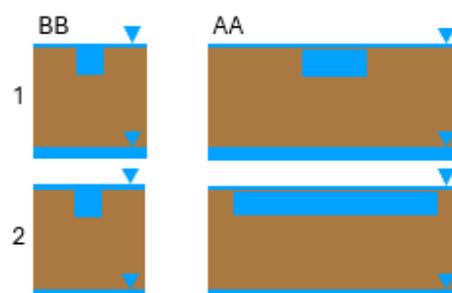


Figura 4.22: Cortes AA e BB da representação esquemática dos cenários criados no FEFLOW para cada parâmetro do grupo de cenários *características físicas das trincheiras - Comprimento*.

4.4.7.3 Largura

Para verificar a influência da largura dos dispositivos, foram testadas as larguras de trincheira de 0.5 m e de 2 m. As condições utilizadas são apresentadas na tabela 4.15. As demais características dos cenários foram mantidas iguais às do Caso Geral e são as apresentadas pelas tabelas 4.3, 4.4 e 4.5. A representação esquemática dos cenários desse grupo de cenários

é apresentada nas figuras 4.23 e 4.24.

Tabela 4.15: Características físicas dos cenários do grupo *características físicas das trincheiras - Largura* no FEFLOW para trincheiras de infiltração.

Parâmetro	Valor adotado
Comprimento do domínio da malha	210 m
Largura do domínio da malha	42 m
Profundidade do domínio	10 m
Comprimento da trincheira (L)	1 m
Largura da trincheira (l)	0,5 m e 2 m
Profundidade da trincheira (d)	1 m

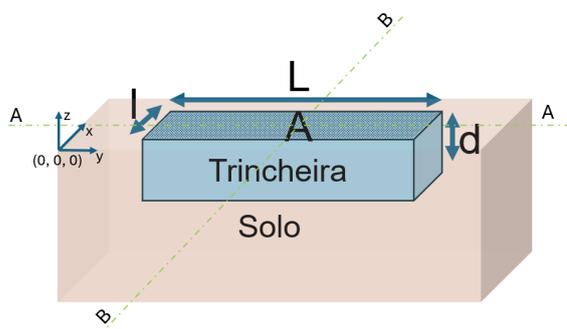


Figura 4.23: Representação esquemática de cenário criado no FEFLOW para o grupo de cenários *características físicas das trincheiras - Largura*.

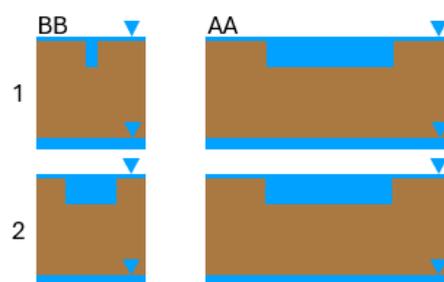


Figura 4.24: Cortes AA e BB da representação esquemática dos cenários criados no FEFLOW para cada parâmetro do grupo de cenários *características físicas das trincheiras - Largura*.

4.5 MODELAGEM DE POÇOS DE INFILTRAÇÃO

O cenário de poço de infiltração no FEFLOW foi configurado buscando a representação de um poço construído e em operação, localizado no Condomínio Residencial RK. Trata-se de configuração de poço diferente do usual, em que tubos-dreno verticais, preenchidos com material drenante, são acoplados à estrutura do poço, como apresentado na seção 4.5.3. Foram realizadas atividades em campo para o levantamento de dados e, a partir deles, foram realizadas a calibração e a verificação do modelo. As configurações dos cenários são apresentadas a partir da Seção 4.5.5. O organograma apresentado pela Figura 4.25 traz de maneira esquemática os diferentes aspectos estudados nesta seção do trabalho. Nela, podem-se observar a etapa experimental e a etapa de modelagem, que, dada a demanda computacional,

foi dividida em duas.

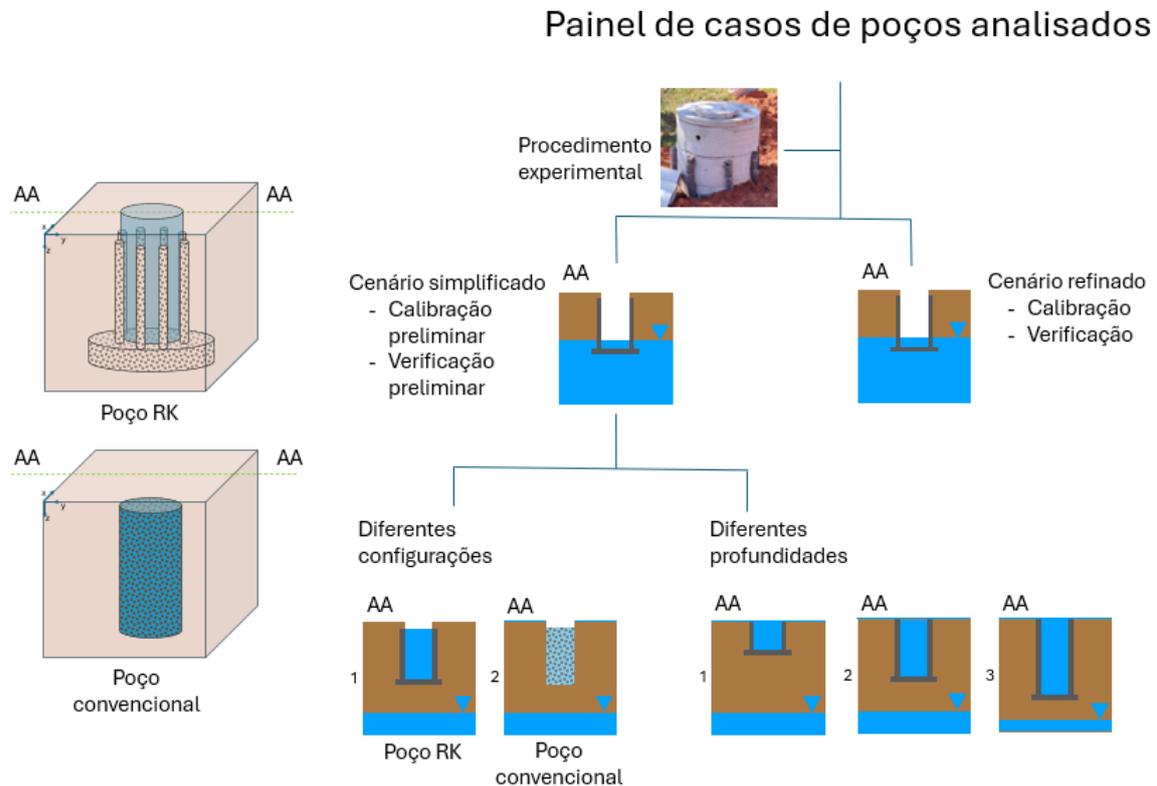


Figura 4.25: Organograma dos cenários criados no FEFLOW para o estudo de poços de infiltração.

Numa primeira etapa, foi realizada modelagem em malha simplificada e foram realizadas calibração e verificação preliminares do valor da condutividade hidráulica saturada. Em seguida, foi criada uma configuração adicional, com malha mais refinada para verificar a influência do refinamento nos resultados. Percebendo o pouco ganho nos resultados pela aplicação de malha refinada, foram realizadas as demais simulações utilizando a base do cenário simplificado, de malha menos refinada. Foi realizada também uma comparação da infiltração dos poços usados pelo condomínio RK de diferentes profundidades.

4.5.1 Localização

O poço de infiltração estudado está localizado no Condomínio Residencial RK, em Sobradinho, Distrito Federal. O acesso ao condomínio é realizado pela rodovia DF-440. A localização detalhada da área de estudo é apresentada no Mapa de situação apresentado na Figura 4.26. A área se encontra próximo a nascentes, na unidade hidrográfica do rio Sobradinho, que é afluente do rio São Bartolomeu. O poço de infiltração estudado está situado nas

proximidades de um curso d'água, desfavorável do ponto de vista ambiental, mas interessante do ponto de vista do manejo de águas pluviais pois fica à justante de grande parte da área urbana do condomínio. O polígono da área urbana, destacado na Figura 4.26, tem 146 hectares.

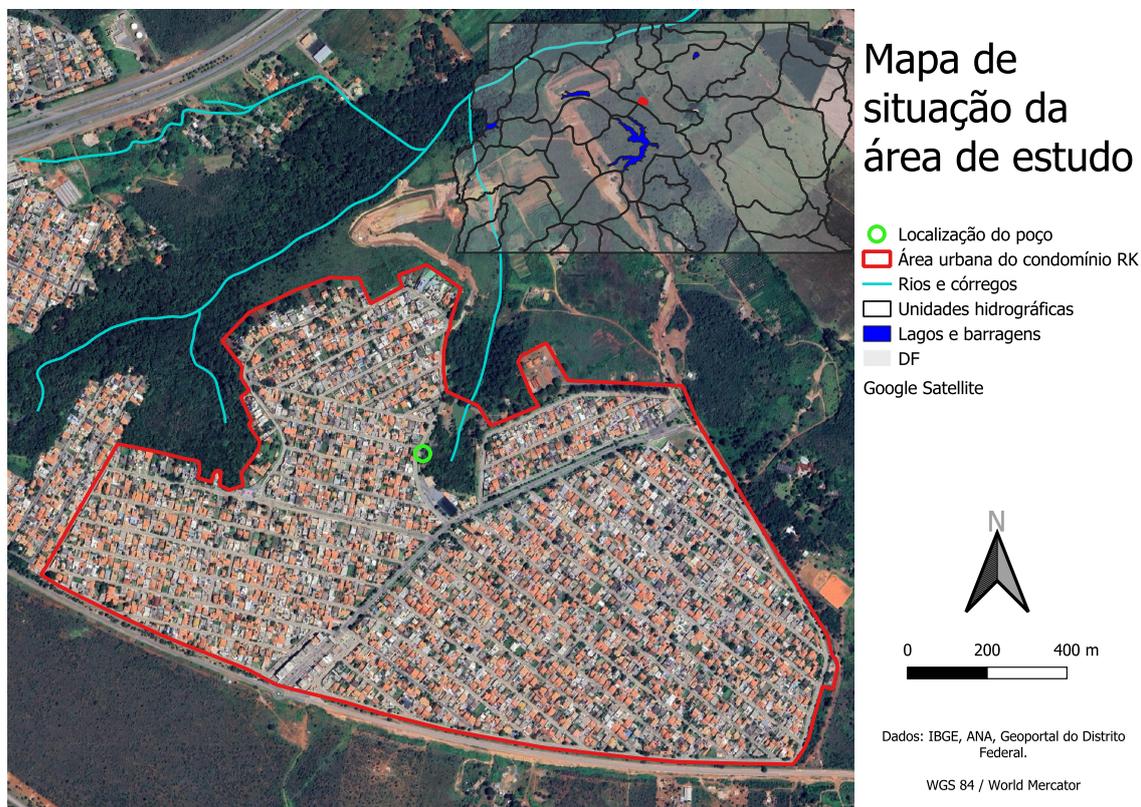


Figura 4.26: Mapa de situação da área de estudo.

4.5.2 Pedologia

Dados de pedologia do Sistema Distrital de Informações Ambientais (SISDIA) foram usados para a elaboração do mapa apresentado na figura 4.27. Pode-se observar a predominância de latossolos, situados principalmente nas regiões de planícies. Já nas regiões próximas a rios, pode-se verificar a ocorrência de cambissolos. A ocorrência de plintossolos é pequena e fica fora do polígono urbano do condomínio. De acordo com os dados do SISDIA, área urbana está situada majoritariamente sobre latossolos, mas há uma pequena parcela que ocupa cambissolos, é o caso da região onde se situa o poço de infiltração.

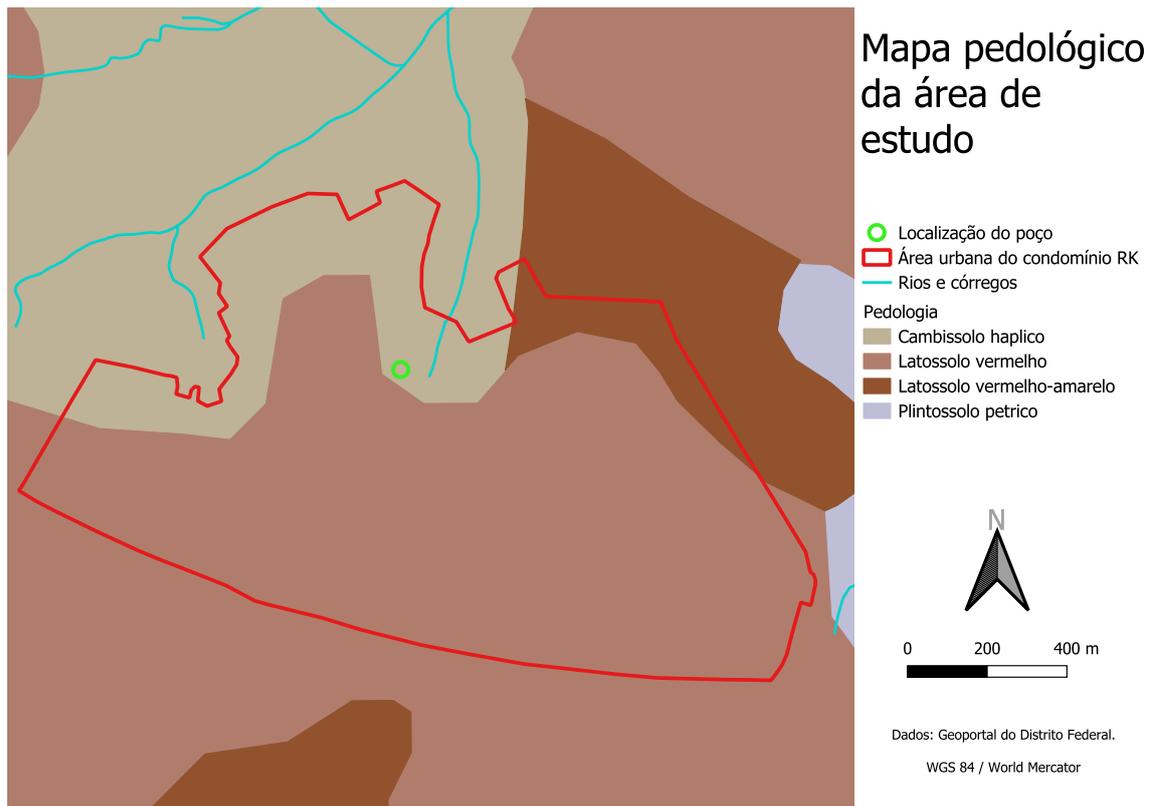


Figura 4.27: Mapa pedológico da área de estudo.

Estudos geotécnicos realizados em 2023 na área de estudo foram disponibilizados pelo condomínio. Dentre as caracterizações, foi realizado ensaio de infiltração para a determinação da taxa de infiltração do solo. Os procedimentos adotados para foram baseados em orientações do anexo A da NBR 13969 para Tanques sépticos - Unidades de tratamento complementar e disposição final dos efluentes líquidos - Projeto, construção e operação. Para o ensaio, realiza-se um furo no solo com auxílio de trado e adiciona-se uma camada de 5 cm de brita no fundo. Após a saturação do solo, realiza-se a medição do tempo de abaixamento do nível d'água aplicado no solo.

Os ensaios foram realizados nas profundidades de 0,5 m, 1 m e 1,5 m nos locais onde, na Figura 4.27, se encontram as bacias de drenagem. Os valores apresentados são uma média dos resultados ponderados pela profundidade. As taxas de infiltração foram de 340,6 min/m (129,5 mm/h) e 463,4 min/m (176,1 mm/h) para os pontos estudados. Os valores são condizentes com a faixa indicada na bibliografia para os limites superiores de condutividade hidráulica saturada de cambissolos. A variabilidade observada é condizente com o que foi registrado para outra área de estudo por Coutinho et al. (2016).

4.5.3 Poços RK

Antes da realização de experimentos, buscou-se a caracterização do poço de infiltração e levantamento de características gerais de operação do dispositivo. Foram fornecidos, pela equipe da CSANEO, registros da construção do poço, o que facilitou a compreensão da sua configuração. As figuras 4.28, 4.29 e 4.30 apresentam registros do processo de construção do poço.



Figura 4.28: Poço de infiltração - detalhe do processo de construção com anéis de concreto.

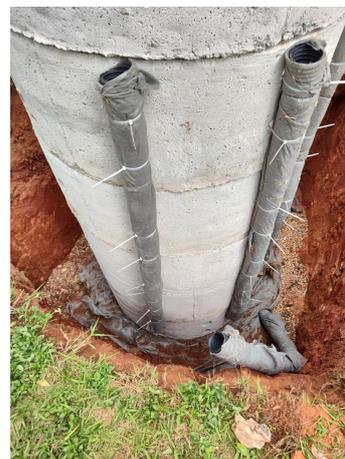


Figura 4.29: Poço de infiltração - detalhe dos dispositivos de infiltração.



Figura 4.30: Poço de infiltração - configuração final antes de soterramento.

Em uma visita realizada no dia 13 de novembro de 2023, foram observados os 8 poços construídos na área de estudo. Os poços foram construídos com a utilização de peças pré-fabricadas de concreto e sua montagem foi realizada no local. Para a potencialização do processo de infiltração, foram acopladas às laterais dos poços, nos furos observados na

figura 4.28, colunas de manta bidim preenchida com material granular. Para a avaliação do presente trabalho, foi escolhido um dos oito poços do condomínio. O critério de escolha foi a facilidade de acesso, já que todos os poços foram construídos na mesma época e apresentaram condições semelhantes. A figura 4.28 apresenta representações esquemáticas e registra as dimensões do dispositivo estudado. As dimensões apresentadas não estão em escala.

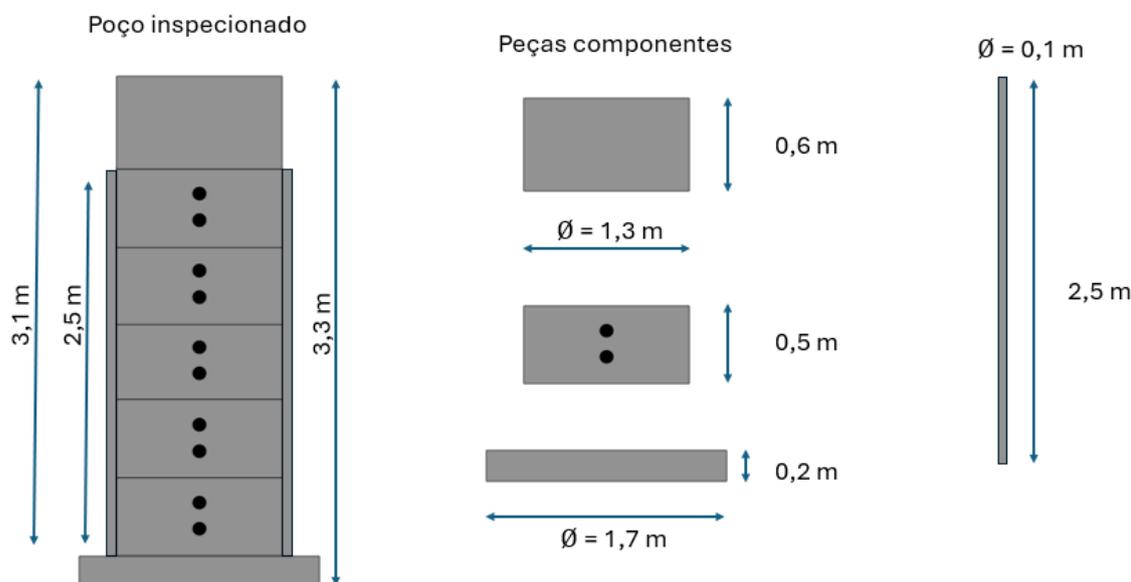


Figura 4.31: Desenho esquemático do poço e dimensões.

4.5.4 Procedimento experimental

Foram realizadas duas visitas à área de estudo. Uma visita preliminar foi realizada no dia 13 de novembro de 2023 com a presença da equipe da CSANEO, responsável pelo projeto e construção dos poços de infiltração. Nessa primeira visita, foi apresentado o sistema de drenagem de águas pluviais do condomínio com especial detalhamento dos dispositivos de controle de escoamento.

Em uma segunda visita, no dia 16 de novembro de 2023, foi realizado o procedimento experimental. A ideia do experimento foi realizar o preenchimento do poço de infiltração até um nível conhecido e aguardar a descida do nível, promovida pela infiltração do volume d'água. Foram registrados, em ambos momentos, de enchimento e esvaziamento, o tempo decorrido e o nível d'água. Realizando duas vezes o ciclo, de enchimento controlado e esvaziamento pela infiltração, o experimento estaria concluído.

Para a medição do nível d'água no dispositivo durante o procedimento experimental, foram instaladas réguas linimétricas dentro do poço de infiltração, como apresentado nas

figuras 4.32 e 4.33, de modo que se pudesse definir o nível inicial de água e sua variação com o tempo. Para o enchimento do poço, o condomínio RK disponibilizou um caminhão-pipa abastecido com água e dotado de dispositivo de bombeamento.



Figura 4.32: Poço de infiltração - detalhe da instalação da régua linimétrica.



Figura 4.33: Poço de infiltração - detalhe da régua linimétrica e nível d'água.

Com os dados de nível d'água, foi possível calcular a velocidade de enchimento e a velocidade de infiltração no poço. Para a obtenção de valores por minuto para todos os minutos no decorrer do experimento, foi aplicada interpolação linear nos dados registrados em campo. Por método volumétrico, desconsiderando a evaporação, foi realizada a subtração dos níveis d'água observados entre os tempos t e t_0 , a diferença foi multiplicada pela área do poço e o valor obtido foi dividido pela variação temporal, como apresentado na equação 4.3. A integral da velocidade de infiltração no tempo multiplicada pela área do poço equivale ao volume acumulado infiltrado no experimento. Desse modo, a taxa de infiltração média no poço pode ser estimada por:

$$f = \frac{\pi D^2 (L - L_0)}{4 (t - t_0)} \quad (4.3)$$

Em que:

f é a taxa de infiltração, $m^3 \cdot min^{-1}$,

D é o diâmetro interno do poço, m ,

t_0 é o tempo inicial, min ,

t é o tempo final, min ,

L é o nível d'água no tempo t , m ,

L_0 é o nível d'água no tempo t_0 , m .

4.5.5 Cenário RK usando o FEFLOW

Para a criação do cenário do poço de infiltração do cenário RK, foram seguidos os passos descritos na seção 4.3. Para a configuração do cenário RK, foram incorporadas informações relativas a diferentes aspectos do dispositivo. Características físicas dos poços, umidade inicial do solo, nível do lençol freático, estágio de colmatação e características do solo foram estabelecidos com base nos dados coletados em campo. As dimensões da malha e do dispositivo de infiltração utilizados são apresentadas na tabela 4.2. O desenho esquemático do modelo conceitual do poço, apresentado na figura 4.34, demonstra em vista tridimensional e em planta a configuração do poço. As imagens apresentadas não estão em escala.

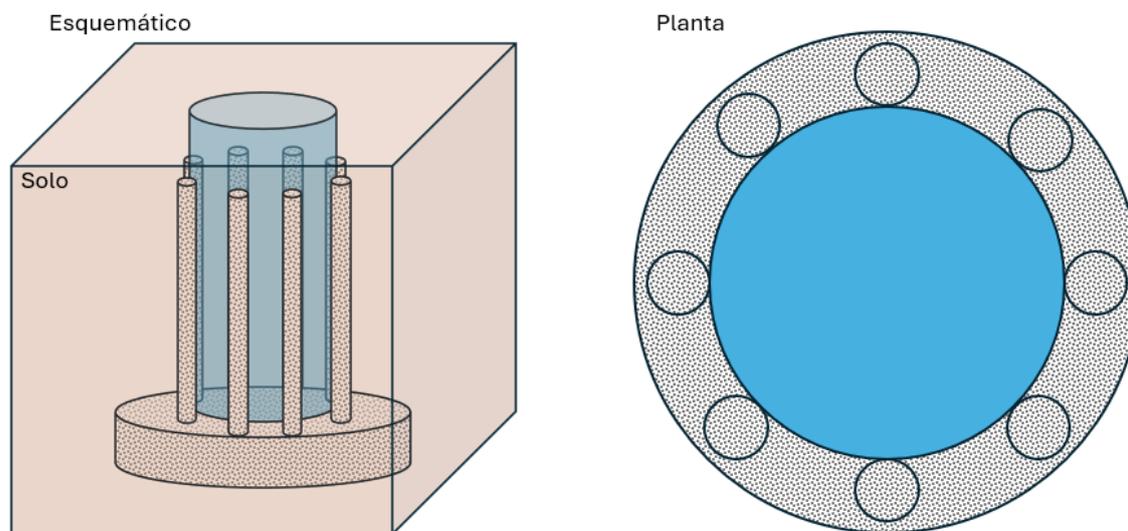


Figura 4.34: Poço de infiltração - Representação esquemática do cenário do poço e vista em planta.

Tabela 4.16: Características físicas do cenário RK no FEFLOW.

Parâmetro	Valor adotado
Comprimento do domínio da malha	50 m
Largura do domínio da malha	50 m
Profundidade do domínio	10 m
Raio do poço de infiltração (r)	0,65 m
Diâmetro do poço de infiltração ($2r$)	1,3 m
Profundidade do poço de infiltração (d)	3,3 m

O domínio da malha bidimensional foi estabelecido em 50 x 50 m para que o poço de infiltração, localizado no centro da malha, não sofresse a influência de bordas. A umidade inicial foi definida de modo a se verificar equilíbrio na distribuição de umidade entre o nível do lençol freático, verificado em campo, e a superfície do solo. Foram atribuídas condições de contorno aos limites da malha e às paredes internas do poço. Para os limites laterais da malha, foram usadas condições de contorno de carga constante no nível de 2,8 m de profundidade, nível esse registrado em campo. Para a camada de fundo, foi aplicada condição de contorno de fluxo nulo. A tabela 4.3 traz as informações de umidade inicial, condições de contorno e nível do lençol freático.

Tabela 4.17: Características de umidade inicial, condições de contorno, nível do lençol freático e colmatação do cenário RK no FEFLOW.

Parâmetro	Valor adotado
Condição inicial de carga hidráulica no solo	-2.8 m, em equilíbrio até a superfície do solo
Condição inicial de carga hidráulica no poço	-2.8 m
Condição de contorno na última camada da malha	Fluxo nulo
Condição de contorno na primeira camada da malha	Fluxo nulo
Condição de contorno na lateral direita da malha	Carga constante de -2.8 m
Condição de contorno na lateral esquerda da malha	Carga constante de -2.8 m
Condição de contorno nos pontos internos do poço	Inicialmente a -2.8 m e variando durante a simulação
Colmatação no fundo	Não aplicada

Para as características do solo, aplicando a equação de Richards, alguns parâmetros devem ser especificados. Os dados utilizados inicialmente para os parâmetros α , n , S_S , S_R , K_{Sat} e porosidade foram os mesmos aplicados nos cenários de trincheiras de infiltração, as medianas dos valores registrados por Lima (2010) para a região da estação experimental

Olhos d'Água e da bacia experimental do Alto Rio Jardim. A tabela 4.18 traz as informações utilizadas para as características do solo no cenário.

Tabela 4.18: Características do solo do cenário RK no FEFLOW.

Parâmetro	Valor adotado
α (LIMA, 2010)	6,4525
n (LIMA, 2010)	1,6644
Saturação máxima (S_S) (LIMA, 2010)	0,538
Saturação residual (S_R) (LIMA, 2010)	0,208
Porosidade total (UFP) (LIMA, 2010)	0,5765
Condutividade hidráulica saturada (K_{Sat})	45,8 mm/h

Para melhores resultados nos processos de infiltração no poço de infiltração e nas suas proximidades, foram incorporadas camadas mais estreitas nas regiões mais próximas ao poço e mais espessas conforme o aumento da profundidade. A tabela 4.19 apresenta a distribuição das camadas subterrâneas da malha de elementos finitos.

Tabela 4.19: Distribuição das camadas da malha no cenário RK no FEFLOW.

Slice	Elevação (m)	Slice	Elevação (m)	Slice	Elevação (m)
1	0	15	-2,6	30	-4,0
2	-0,2	16	-2,7	31	-4,2
3	-0,4	17	-2,8	32	-4,4
4	-0,6	18	-2,9	33	-4,6
5	-0,8	19	-3,0	34	-4,8
6	-1,0	20	-3,1	35	-5
7	-1,2	21	-3,2	36	-5,5
8	-1,4	22	-3,3	37	-6,0
9	-1,6	23	-3,4	38	-6,5
10	-1,8	24	-3,5	39	-7
11	-2,0	25	-3,6	40	-8
12	-2,2	26	-3,7	41	-9,0
13	-2,4	27	-3,8	42	-10,0
14	-2,5	28	-3,9		

4.5.6 Calibração e verificação do poço RK

Para a etapa de calibração do poço RK, foi realizada uma calibração manual do parâmetro K_{Sat} . Partindo da configuração descrita na tabela 4.23, foram incorporados os dados sequenciais de nível registrados em campo no primeiro enchimento do experimento realizado. Realizada a simulação, foi feita comparação entre o volume infiltrado pelo modelo e o volume infiltrado medido em campo. A partir do ajuste do parâmetro K_{Sat} , buscou-se minimizar o erro encontrado entre os volumes infiltrados até que se alcançasse um valor satisfatório.

Para a verificação, o mesmo procedimento empregado na calibração foi realizado. Contudo, nesse caso, partiu-se de condição inicial diferente. Uma vez que o evento utilizado para a verificação foi realizado experimentalmente na sequência do evento utilizado na calibração, a condição inicial da simulação de verificação foi aquela encontrada ao final do processo de calibração. Realizada a modelagem do evento experimental, foi feita a comparação entre volumes infiltrados em campo e aqueles obtidos pelo modelo.

Dada a complexidade do modelo e a demanda computacional para a sua resolução, foram elaboradas duas configurações distintas do cenário. Uma primeira configuração contou com malha de elementos finitos menos refinada, a fim de realizar calibração e verificação preliminar. Realizadas as simulações para diferentes faixas de valores de condutividade hidráulica saturada, foi possível definir o valor ideal para calibração e verificação em cenário mais refinado. Assim, foi realizada a mesma simulação em um cenário mais detalhado, que representou o mesmo cenário, mas contou com malha de elementos finitos mais refinada. Ao fim da etapa de verificação, foram comparados os resultados de ambos os cenários.

Para verificar a existência de relação linear entre os dados experimentais e os resultantes do cenário calibrado, foi calculado o coeficiente de correlação linear entre eles. Já para verificar a qualidade do ajuste do modelo aos dados experimentais, aplicou-se o erro médio entre os dois conjuntos de dados, que leva em consideração a magnitude média dos erros das previsões do modelo. Outro coeficiente aplicado, que avalia a eficiência do modelo em comparação com a média dos valores observados, foi o coeficiente de Nash-Sutcliffe. As equações dos três coeficientes são apresentadas a seguir.

O coeficiente de correlação de Pearson (COR) é dado por:

$$\text{COR} = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}} \quad (4.4)$$

em que:

n é o número total de observações,
 x_i são os valores de uma variável,
 y_i são os valores de outra variável,
 \bar{x} é a média dos valores de x ,
 \bar{y} é a média dos valores de y .

O erro absoluto médio (EM) é dado por:

$$EM = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |y_i - \hat{y}_i| \quad (4.5)$$

em que:

n é o número total de observações,
 y_i são os valores observados,
 \hat{y}_i são os valores previstos.

O coeficiente de eficiência de Nash-Sutcliffe (NSE) é dado por:

$$NSE = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2}{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2} \quad (4.6)$$

em que:

n é o número total de observações,
 y_i são os valores observados,
 \hat{y}_i são os valores previstos,
 \bar{y} é a média dos valores observados.

4.5.7 Diferentes configurações

O grupo de cenários chamado de Diferentes configurações foi estudado com o objetivo de investigar e comparar o processo de operação de um poço convencional e um poço do tipo RK. As condições físicas utilizadas são apresentadas na tabela 4.20. As características iniciais e de contorno são apresentadas na tabela 4.21. Importante registrar que a carga

hidráulica interna do poço foi adotada como de 0,6 metros abaixo do nível do solo uma vez que é a altura máxima dos drenos laterais do poço e a cota da soleira das tubulações de entrada e saída do dispositivo estudado em campo. A representação esquemática dos cenários desse grupo de cenários é apresentada nas figuras 4.35 e 4.36. As demais características dos cenários foram mantidas iguais às do cenário simplificado e são as apresentadas pela tabela 4.18.

Tabela 4.20: Características físicas dos cenários do grupo Diferentes configurações no FE-FLOW.

Parâmetro	Valor adotado
Comprimento do domínio da malha	50 m
Largura do domínio da malha	50 m
Profundidade do domínio	10 m
Raio do poço de infiltração (r)	0,65 m
Diâmetro do poço de infiltração ($2r$)	1,3 m
Profundidade do poço de infiltração (d)	3,3 m

Tabela 4.21: Características de umidade inicial, condições de contorno, nível do lençol freático e colmatação dos cenários do grupo Diferentes configurações no FEFLOW.

Parâmetro	Valor adotado
Condição inicial de carga hidráulica no solo	-6 m, desde o lençol até a superfície do solo
Condição inicial de carga hidráulica no poço	-6 m
Condição de contorno na última camada da malha	Fluxo nulo
Condição de contorno na primeira camada da malha	Carga constante de 0 m
Condição de contorno na lateral direita da malha	Carga constante de -6 m
Condição de contorno na lateral esquerda da malha	Carga constante de -6 m
Condição de contorno nos pontos internos do poço	Carga constante de -0,6 m
Colmatação no fundo	Não aplicada

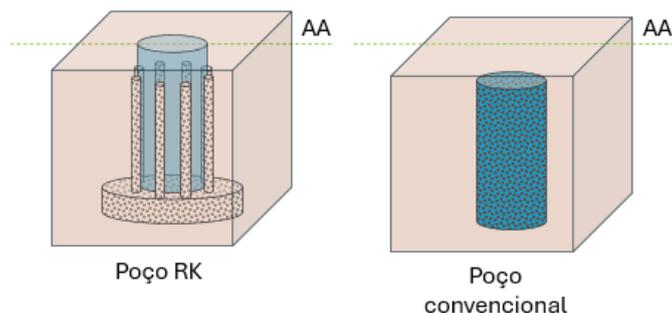


Figura 4.35: Representação esquemática de cenário criado no FEFLOW para o grupo de cenários *Diferentes configurações*.

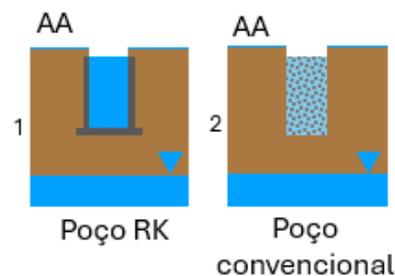


Figura 4.36: Cortes AA e BB da representação esquemática dos cenários criados no FEFLOW para o grupo de cenários *Diferentes configurações*.

4.5.8 Diferentes profundidades

O grupo de cenários chamado de Diferentes profundidades foi estudado com o objetivo de investigar o comportamento da infiltração no solo em situações de diferentes profundidades do poço. As condições físicas utilizadas são apresentadas na tabela 4.22. As características iniciais e de contorno são apresentadas na tabela 4.23. A representação esquemática dos cenários desse grupo de cenários é apresentada nas figuras 4.13 e 4.38.

As demais características dos cenários foram mantidas iguais às do cenário simplificado e são as apresentadas pela tabela 4.18. O detalhe para o cenário de poço de 5 m de profundidade foi o rebaixamento do lençol freático, para que o impacto do posicionamento não gerasse muita influência na vazão infiltrada, como nos demais cenários, uma vez que se verificou que a proximidade de 1 m entre o lençol freático e o dispositivo gerava maiores impactos.

Tabela 4.22: Características físicas do cenário Diferentes profundidades no FEFLOW.

Parâmetro	Valor adotado
Comprimento do domínio da malha	50 m
Largura do domínio da malha	50 m
Profundidade do domínio	10 m
Raio do poço de infiltração (r)	0,65 m
Diâmetro do poço de infiltração ($2r$)	1,3 m
Profundidade do poço de infiltração (d)	1 m, 3 m e 5 m

Tabela 4.23: Características de umidade inicial, condições de contorno, nível do lençol freático e colmatação do cenário Diferentes profundidades no FEFLOW.

Parâmetro	Valor adotado
Condição inicial de carga hidráulica no solo	-6 m e -8 m, em equilíbrio até a superfície do solo
Condição inicial de carga hidráulica no poço	-6 m e -8 m
Condição de contorno na última camada da malha	Fluxo nulo
Condição de contorno na primeira camada da malha	Carga constante de 0 m
Condição de contorno na lateral direita da malha	Carga constante de -6 m e -8 m
Condição de contorno na lateral esquerda da malha	Carga constante de -6 m e -8 m
Condição de contorno nos pontos internos do poço	Carga constante de 0 m
Colmatação no fundo	Não aplicada

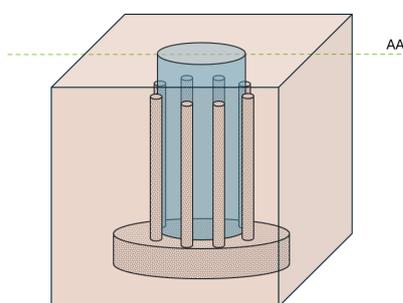


Figura 4.37: Representação esquemática de cenário criado no FEFLOW para o grupo de cenários *Diferentes profundidades*.

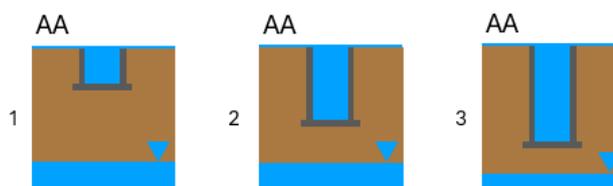


Figura 4.38: Cortes AA e BB da representação esquemática dos cenários criados no FEFLOW para o grupo de cenários *Diferentes profundidades*.

5

RESULTADOS E DISCUSSÃO

O presente capítulo apresenta os principais resultados do trabalho. Dispositivos de infiltração podem desempenhar um papel importante na gestão sustentável das águas pluviais, promovendo a recarga dos aquíferos e reduzindo o escoamento superficial. Esses dispositivos, como trincheiras de infiltração e poços de infiltração, potencializam a penetração da água no solo, contribuindo para a diminuição de enchentes e erosão, além de melhorar a qualidade da água.

O modelo SWMM (Storm Water Management Model) representa a infiltração de maneira simplificada, facilitando a análise e o planejamento de sistemas de drenagem urbana. A seção 5.1 apresenta resultados da simulação de uma trincheira de infiltração no SWMM verificando a forma de representação do modelo. São apresentadas as curvas de volume infiltrado e vazão infiltrada pelo cenário. A partir dos resultados, fica claro que a representação do processo de infiltração é simplificada no modelo, o que pode induzir o operador do modelo a subestimar a capacidade de operação dos dispositivos.

O presente capítulo também traz os resultados da quantificação da infiltração seguindo as diretrizes propostas por ADASA (2023a). A seção 5.2 traz os principais resultados da aplicação da metodologia. São apresentadas as curvas de volume infiltrado e vazão infiltrada para a metodologia proposta. A abordagem utilizada pela agência é diferente da adotada no modelo SWMM, mas conta também com simplificações que podem fazer com que a infiltração de dispositivos de controle de escoamento seja subestimada.

Na sequência são apresentados os resultados da aplicação da metodologia usando o modelo FEFLOW. Na seção 5.3 são apresentados resultados de cenários de trincheiras de infiltração e na seção 5.5 são apresentados os resultados para poços de infiltração. É interessante analisar os resultados de maneira comparativa entre cenários e modelos. A calibração apresentada na seção 5.5 valida a abordagem metodológica, mas diz respeito a uma quantificação muito particular do poço de infiltração em que foi realizado o experimento, podendo não ser representativo para outras situações, mesmo de solos semelhantes.

A seção 5.6 traz um estudo de caso em que a vazão excedente provocada pela impermeabilização de determinada área deve ser compensada por meio da infiltração. São formuladas configurações para trincheiras e poços de infiltração para o cenário estudado com base nos resultados de infiltração do presente trabalho e são apresentadas vantagens e desvantagens de cada uma das soluções apresentadas. As seções 5.4 e 5.7 trazem as considerações gerais dos capítulos, agrupando os principais resultados alcançados em cada seção.

5.1 MODELAGEM COMPUTACIONAL DE LIDS USANDO O SWMM

Esta seção traz resultados das simulações realizadas no SWMM. Os resultados serviram como base para a compreensão do comportamento das medidas de controle no que diz respeito à quantificação da infiltração no modelo. A figura 5.1 apresenta a configuração do cenário incorporado no SWMM, que conta com apenas uma sub-bacia, completamente ocupada por uma medida de controle de escoamento superficial, que conduz vazões excedentes para um único exutório.

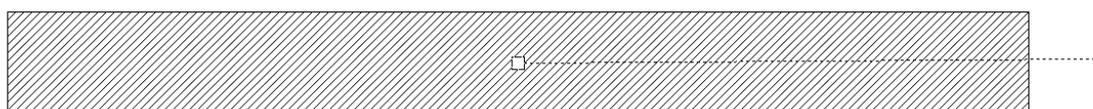


Figura 5.1: Representação do cenário criado no modelo SWMM

A figura 5.2 apresenta o gráfico da taxa de infiltração observada na modelagem usando o SWMM para as condições do cenário. Conforme esperado, durante os 120 minutos estudados, a modelagem considera que a trincheira opera promovendo uma infiltração constante. É como se o solo estivesse saturado desde o início da simulação e tivesse alcançado o valor estável de condutividade hidráulica característico dessa condição. Trata-se de uma consideração que pode ser interessante para o dimensionamento em condições conservadoras, de modo que é desconsiderado o processo de molhamento do solo, que envolve taxas de infiltração mais elevadas. Mas fica evidente a simplificação dos fenômenos de infiltração.

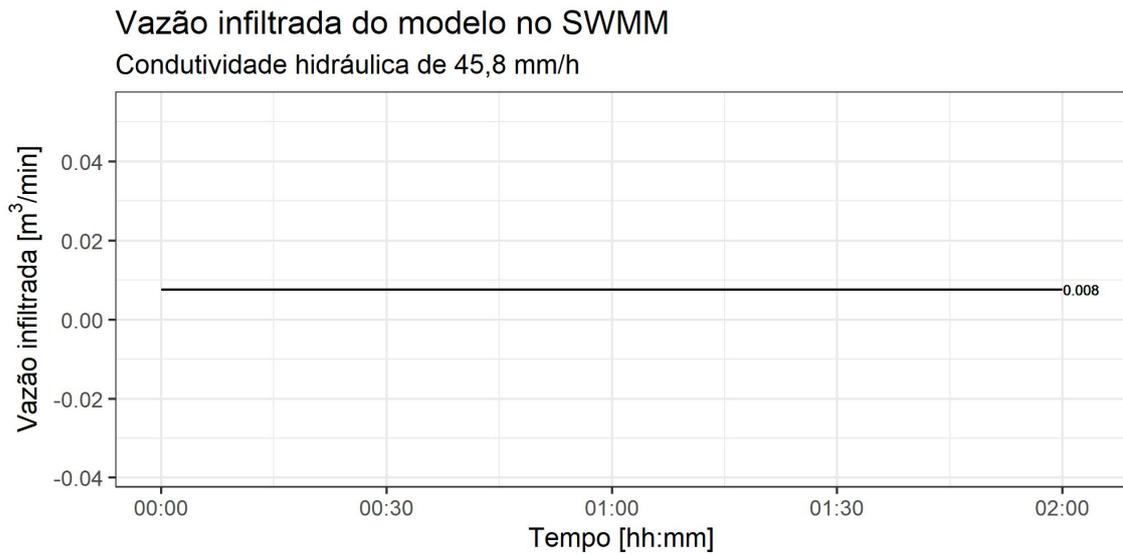


Figura 5.2: Taxa de infiltração do cenário preliminar no SWMM, aplicando condutividade hidráulica de 45,8 mm/h.

A Figura 5.3 traz a consequência do que é apresentado pela figura 5.2 em termos de volumes infiltrados.

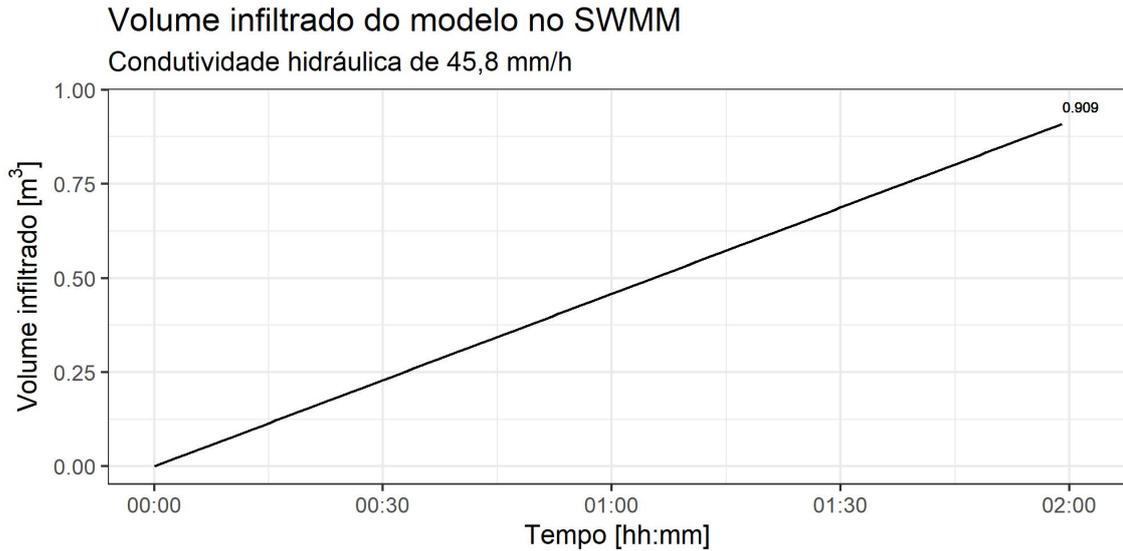


Figura 5.3: Volume acumulado infiltrado pela trincheira do cenário preliminar no SWMM, aplicando condutividade hidráulica de 45,8 mm/h.

Uma vez que é aplicada taxa de infiltração constante no cenário durante toda a simulação, a curva de volume infiltrado pela trincheira corresponderá a uma linha reta, resultado da função linear que, no SWMM, representa o processo de infiltração nas medidas de controle

na fonte. Percebe-se, ainda, pela análise das figuras 5.2 e 5.3, que o modelo considera, de fato, a percolação ocorrendo apenas pelo fundo dos dispositivos. Assim, apenas 10 m^2 da área total de 32 m^2 do dispositivo que estaria disponível para a passagem de água promovem a infiltração.

Além da desconsideração do processo de molhamento do solo, o modelo desconsidera a atuação de forças de pressão resultantes da altura da lâmina d'água, o que pode ser uma simplificação relevante especialmente para reservatórios de infiltração de maior profundidade. A carga hidráulica proveniente da coluna d'água no interior dos dispositivos de controle pode gerar impactos significativos no processo de infiltração, o que não é considerado na modelagem do SWMM.

A partir da confirmação da limitação observada pelo processo de modelagem usando o SWMM na representação de medidas de controle de escoamento por mecanismos de infiltração e com interesse numa quantificação mais precisa e detalhada do que a apresentada pelo modelo, promoveu-se a definição de cenários a serem estudados no presente trabalho. Sabendo que o SWMM promove simplificações na representação dos processos de infiltração, esse pode ser considerado um modelo conservador para o dimensionamento de dispositivos de controle que promovem infiltração, que pode subestimar a importância das medidas de controle na fonte na quantificação de benefícios ecossistêmicos promovidos pela infiltração.

5.2 QUANTIFICAÇÃO DE INFILTRAÇÃO PELO MANUAL DE DRENAGEM URBANA DA ADASA - TRINCHEIRAS DE INFILTRAÇÃO

Esta seção traz resultados da quantificação da infiltração no cenário proposto seguindo a metodologia sugerida pela Adasa (ADASA, 2023a). Tal metodologia é de especial interesse para a região do Distrito Federal, pois as diretrizes da agência servem como base para a elaboração de sistemas de drenagem na região.

A figura 5.4 apresenta o gráfico da taxa de infiltração resultante da aplicação da metodologia para a trincheira de $10 m^3$ de volume e $10 m^2$ de área de base. Assim como se observa na modelagem empregando o SWMM, durante os 120 minutos estudados, a metodologia considera que a trincheira opera promovendo uma infiltração constante.

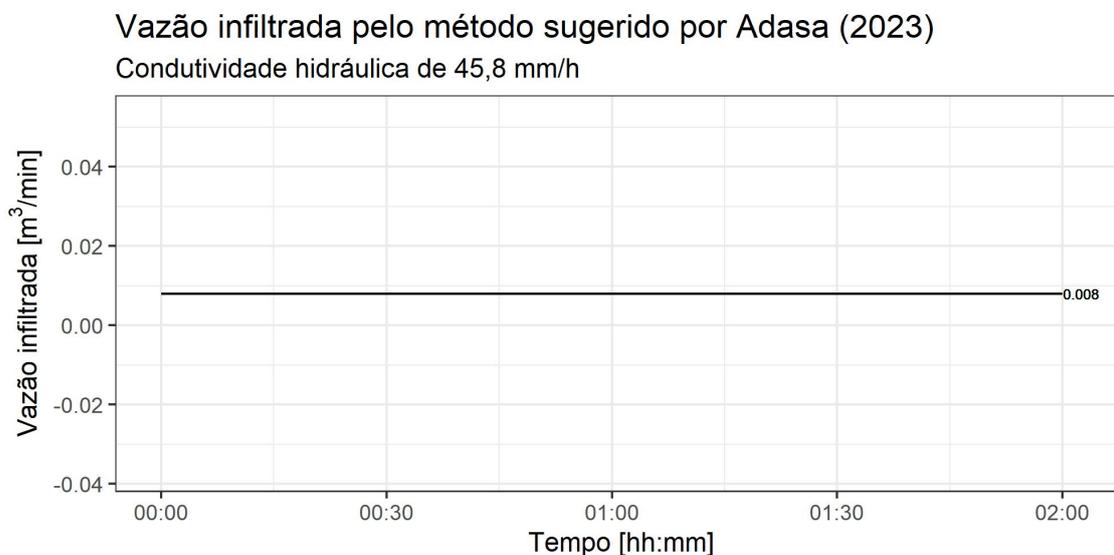


Figura 5.4: Vazão infiltrada pela metodologia sugerida por ADASA (2023a), aplicando condutividade hidráulica de 45,8 mm/h.

A quantificação observada do processo de infiltração corresponde ao emprego de taxa de infiltração em solo saturado desde o início da operação. Trata-se de consideração conservadora, que desconsidera o processo de molhamento do solo e cargas hidráulicas adicionais provenientes da lâmina d'água, que promovem taxas de infiltração mais elevadas, especialmente no início da operação do dispositivo. Nesta metodologia, assim como observado no SWMM, fica clara a simplificação dos fenômenos de infiltração. A Figura 5.5 traz os volumes infiltrados, que apresentam comportamento linear crescente, o que está de acordo com o observado nas taxas de infiltração.

Volume infiltrado pelo método sugerido por Adasa (2023)

Condutividade hidráulica de 45,8 mm/h

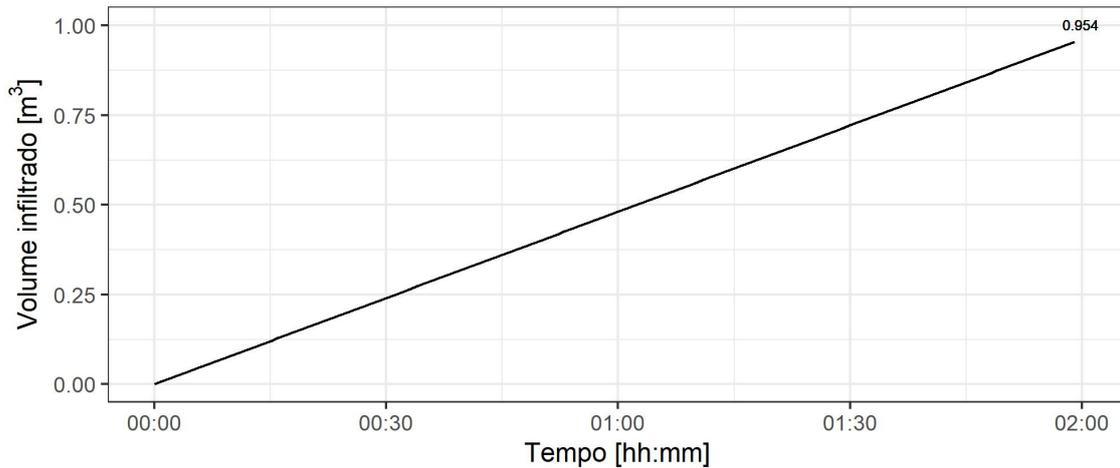


Figura 5.5: Volume infiltrado pela metodologia sugerida por ADASA (2023a), aplicando condutividade hidráulica de 45,8 mm/h.

Como esperado, ambos taxa de infiltração e volume infiltrado observados na quantificação sugerida por ADASA (2023a) se aproximam dos resultados obtidos da modelagem realizada aplicando o SWMM. Contudo, embora semelhantes, os resultados não são fruto de metodologias idênticas, que podem gerar quantificações bastante distintas da infiltração a depender da formatação do dispositivo de infiltração. O que aproximou as metodologias foi o fato de a área adicional considerada para a infiltração na metodologia da Adasa ter se aproximado do valor da área da base, o que foi compensado pelo fator de segurança aplicado, de 0,5, o que não iria ocorrer para dispositivos de menores comprimentos, por exemplo.

5.3 MODELAGEM COMPUTACIONAL DE TRINCHEIRA DE INFILTRAÇÃO USANDO O FEFLOW

Esta seção apresenta os resultados obtidos pela aplicação da modelagem matemática computacional utilizando o FEFLOW para a representação de cenários de operação de trincheiras de infiltração. A intenção é avaliar a infiltração no solo para diferentes cenários, considerando o processo de molhamento e as cargas adicionais promovidas pela lâmina d'água.

A figura 5.6 apresenta a configuração da *Supermesh* criada para a configuração do cenário usando o FEFLOW. Trata-se de domínio que permite o lançamento de uma malha de elementos finitos. O domínio foi seccionado em 9 regiões para que fosse possível concentrar o refinamento da malha de elementos finitos na região central. Foram criados, para cada um dos casos estudados, cenários individuais usando o FEFLOW.

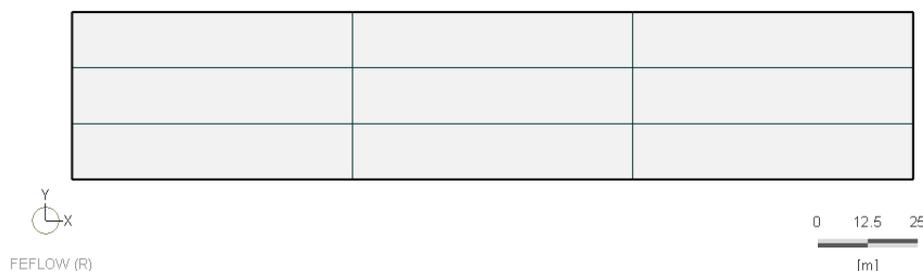


Figura 5.6: Configuração do cenário usando o FEFLOW - *Supermesh*.

A figura 5.7 traz a configuração da malha de elementos finitos para a primeira camada da malha, com maior refinamento dos elementos nas áreas centrais e já incorporando a cavidade no local da trincheira de infiltração, no ponto central. A malha tridimensional contou com 132.372 nós e 131.552 elementos, dos quais 14.976 correspondem a prismas triangulares, convertidos no processo de refinamento da malha, e os demais correspondem a prismas quadrangulares.

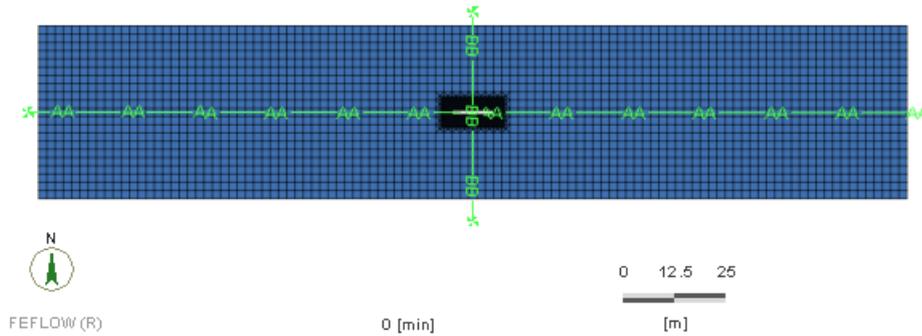


Figura 5.7: Configuração do cenário usando o FEFLOW - malha de elementos finitos na primeira camada da malha.

O perfil da seção central do solo para as condições iniciais do Caso Geral no FEFLOW é apresentado na Figura 5.8. A distribuição dos níveis de cada camada, mais refinados na superfície e mais espaçados com o ganho de profundidade, seguiu a descrição da tabela 4.5. Pode-se observar que o recorte apresentado possui maior refinamento dos elementos na região central, que diminui nas áreas laterais. A variação da saturação no solo permite verificar a condição de solo saturado na profundidade de 6 m e o equilíbrio entre o nível d'água e a superfície do solo.

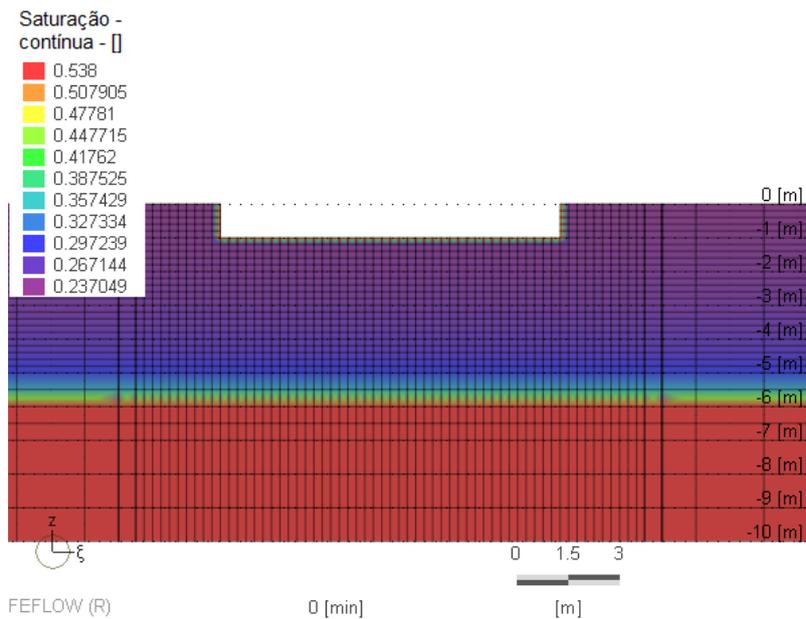


Figura 5.8: Configuração do cenário usando o FEFLOW - perfil de solo.

5.3.1 Caso Geral

O resultado da modelagem empregando o FEFLOW para o Caso Geral traz conclusões interessantes a respeito da quantificação da infiltração, em especial quando feitas comparações com as demais metodologias empregadas. Por isso, os resultados são apresentados em conjunto. As figuras 5.9 e 5.10 apresentam os resultados das três metodologias. O que se pode observar é um distanciamento entre os resultados obtidos para as metodologias simplificadas, que consideram a infiltração como um processo regido por uma taxa constante em área inferior à área disponível para infiltração dos dispositivos, e o resultado da modelagem usando o FEFLOW.

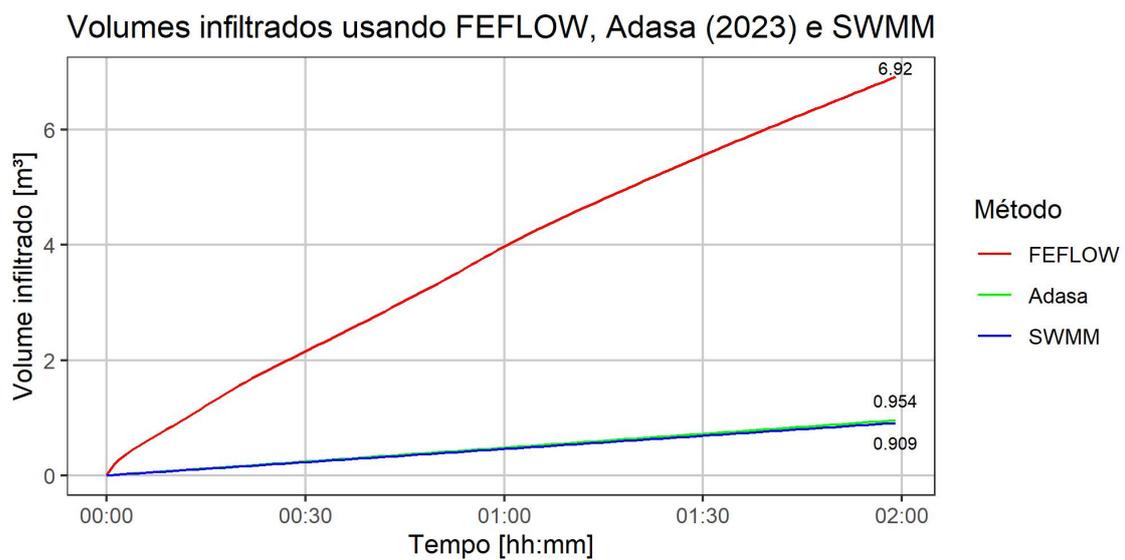


Figura 5.9: Comparação entre volumes infiltrados usando o modelo SWMM e o modelo FEFLOW para o caso geral.

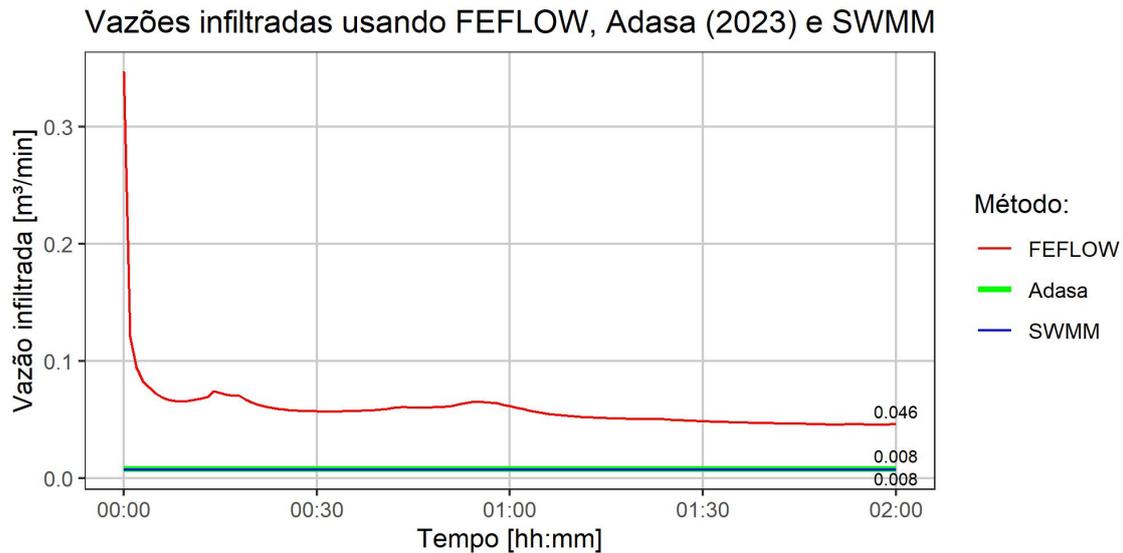


Figura 5.10: Comparação entre volumes infiltrados usando o modelo SWMM e o modelo FEFLOW para o caso geral.

A proximidade entre os resultados obtidos para as metodologias de ADASA (2023a) e empregando o SWMM se deve à forma como o problema estudado é representado em ambas, o que foi discutido nas Seções 5.1 e 5.2. O fato de ambas considerarem a infiltração em área inferior à área que fica em contato com a água durante a operação da trincheira já sugeria que o FEFLOW, que considera a infiltração em todas as paredes e também no fundo da trincheira, apresentaria maiores volumes infiltrados. Contudo, a diferença entre o volume infiltrado para cada uma das metodologias não decorre somente das diferentes áreas para infiltração considerada pelos modelos.

Há duas diferenças entre a modelagem empregada pelo FEFLOW e os demais modelos que podem contribuir para a variação entre os resultados. Primeiramente, o processo de molhamento do solo. No início do caso estudado, quando o solo circundante à trincheira se encontra seco e o dispositivo se encontra saturado, as forças que comandam o processo de infiltração, que ocorre do meio saturado para o não saturado, são as forças matriciais, consideradas, dentre os métodos aplicados no presente estudos, apenas na modelagem com o FEFLOW, que emprega a equação de Richards (eq. 3.5) para a solução dos problemas.

Quando a água do solo saturado entra em contato com o solo seco, a água se movimenta rapidamente para o solo seco dada a grande diferença de potencial matricial. A taxa de infiltração é inicialmente alta e diminui com o tempo conforme o solo umedece, reduzindo o gradiente matricial. Após a infiltração inicial, a água continua a mover-se através do solo por redistribuição, buscando um equilíbrio no potencial matricial. Durante a redistribuição,

a água se move de áreas de maior para menor potencial, tanto verticalmente quanto horizontalmente, com o aumento do bulbo úmido.

Uma vez alcançado o equilíbrio das forças matriciais entre o solo que circunda a trincheira e o solo saturado nas paredes da trincheira, a taxa de infiltração passa a apresentar valor próximo ao da condutividade hidráulica saturada. Contudo, além das tensões matriciais, outra tensão considerada na modelagem utilizando o FEFLOW também é relevante, o gradiente de pressão estática, que corresponde à coluna d'água que se encontra sobre a parcela de solo em que a água infiltra.

Atingido o ponto de operação do dispositivo em que o solo se encontra úmido, a água passa a infiltrar com característica mais próxima do fluxo saturado, como considerado pelos modelos simplificados, mas há de se levar em conta o impacto da profundidade dos dispositivos e o acréscimo de pressão, o que não é representado nas metodologias simplificadas. Trata-se da segunda diferença entre os métodos simplificados e a modelagem usando FEFLOW, que faz com que os patamares observados na figura 5.10 estejam em níveis diferentes.

O FEFLOW permite o monitoramento de diferentes áreas de interesse para a quantificação de volumes infiltrados. Assim, é possível delimitar áreas específicas do dispositivo de infiltração para que se quantifique o fluxo e o volume infiltrado nessas regiões. As figuras 5.11 e 5.12 apresentam os volumes e as vazões infiltrados para o caso geral especificando porções quantificadas nas áreas do fundo e das paredes laterais da trincheira de infiltração.

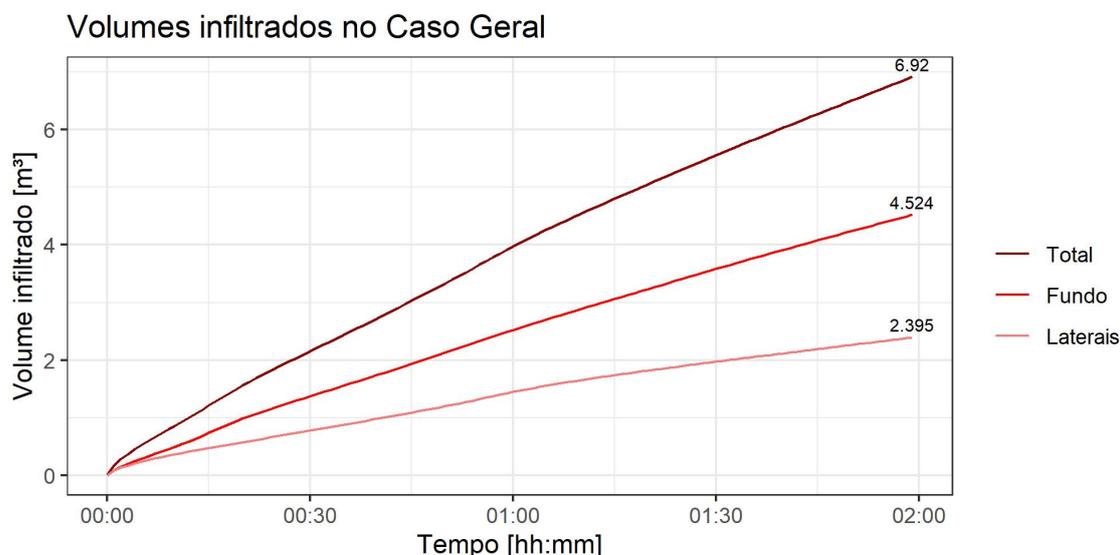


Figura 5.11: Volumes infiltrados pelas laterais e pelo fundo da trincheira para o Caso Geral aplicando o FEFLOW.

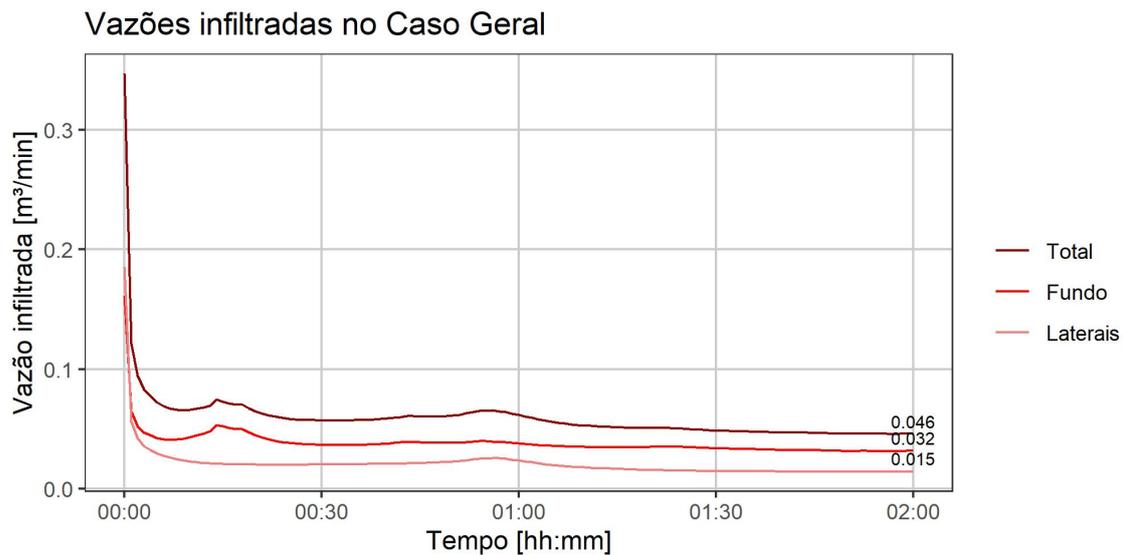


Figura 5.12: Volumes infiltrados pelas laterais e pelo fundo da trincheira para o Caso Geral aplicando o FEFLOW.

Observando a Figura 5.11 é possível verificar que o volume infiltrado pelo fundo da trincheira é o maior responsável pelo total infiltrado, mas verifica-se que cerca de 35% do volume total é infiltrado pelas laterais para o caso de infiltração contínua pelo período de 2 horas. O resultado aponta para a possibilidade de uma reduzida capacidade de operação de trincheiras e demais dispositivos de infiltração em situações de urbanização não consolidada, em que sedimentos podem provocar a colmatagem do fundo. Contudo, pode-se verificar a relevante participação das paredes no processo de infiltração. Essa discussão se aprofunda na seção 5.3.5.

A Figura 5.12 traz outros resultados importantes para a compreensão do funcionamento dos dispositivos de infiltração. Como já observado na Figura 5.10, as altas taxas de infiltração decorrentes do molhamento do solo ocorrem por poucos instantes. Aqui, o que se pode observar é a separação das influências exercidas por cada parte do dispositivo, laterais e fundo, que totalizam a taxa de infiltração. Nos instantes iniciais, o que se percebe é a elevada taxa de infiltração tanto pelas paredes quanto pelo fundo, decorrente do molhamento do solo seco em contato com a trincheira saturada. Em seguida, a tendência é a estabilização das taxas.

Tal resultado permite concluir que, de fato, a infiltração é um fenômeno que tende a alcançar a estabilidade rapidamente e, assim, poderia ser simplificado pela adoção de uma taxa constante. De fato, como se verifica na Figura 5.12, a vazão infiltrada passa a se aproximar de um patamar estável logo nos primeiros 30 minutos de operação do dispositivo, alcançando

maior estabilidade após 90 minutos de simulação. Contudo, fica claro que, caso seja adotada uma taxa constante para a representação do processo, a condutividade hidráulica não é um valor tão representativo do processo, principalmente pela subestimação do efeito de coluna d'água. Assim, dois diferentes patamares alcançados por laterais e fundo devem ser destacados.

O fundo da trincheira tende a um patamar de aproximadamente $0,032 \text{ m}^3/\text{min}$, que corresponde à taxa de infiltração total na área de fundo, de 10 m^2 . Já a vazão pelas laterais corresponde a $0,015 \text{ m}^3/\text{min}$, que ocorre em uma área de 22 m^2 . É possível alcançar uma estimativa de lâmina infiltrada para laterais e fundo. Adota-se um valor de vazão infiltrada constante equivalente àquele observado nos instantes finais de simulação. Dividem-se os valores de vazão infiltrada observados no final da simulação pela área. Desse modo, a lâmina infiltrada por minuto para as laterais seria de cerca de 41 mm/h e, para o fundo, seria de 192 mm/h . Percebe-se que a aproximação aplicada pelo SWMM parece funcionar bem para as paredes laterais, em que a lâmina infiltrada se aproxima da condutividade hidráulica saturada aplicada, de 45 mm/h . Já para o fundo, o comportamento é diferente, alcançando, no caso estudado, valor de infiltração por unidade de área cerca de 4,2 vezes superior à condutividade hidráulica saturada. A discussão sobre as diferentes lâminas infiltradas é feita na seção 5.3.8.

Observando a curva de taxa de infiltração do fundo, percebe-se uma oscilação por volta dos 15 minutos. As figuras 5.13b e 5.13c ajudam a verificar que o tempo destacado corresponde ao momento de saturação da camada imediatamente inferior ao fundo da trincheira, o que faz com que forças matriciais exerçam um gradiente adicional no processo de infiltração. Isto é, o processo de molhamento está sendo solucionado para cada camada, de modo que a instabilidade é decorrência do processo de resolução numérica. Assim, após a saturação da camada, a vazão infiltrada tende a se estabilizar. Com a redução da vazão infiltrada pelo fundo, e aumento das cargas de pressão nas laterais da trincheira, verifica-se uma oscilação na curva de vazão infiltrada nas laterais entre os 45 e os 75 minutos. De modo semelhante ao que foi verificado para o fundo, tal oscilação pode ser explicada pela saturação das camadas laterais contíguas ao dispositivo de infiltração, o que se pode verificar nas figuras 5.13e e 5.13f. O processo não corresponde ao que se observa no processo real de fluxo em meios porosos, de modo que um refinamento da malha resultaria em redução do efeito observado.

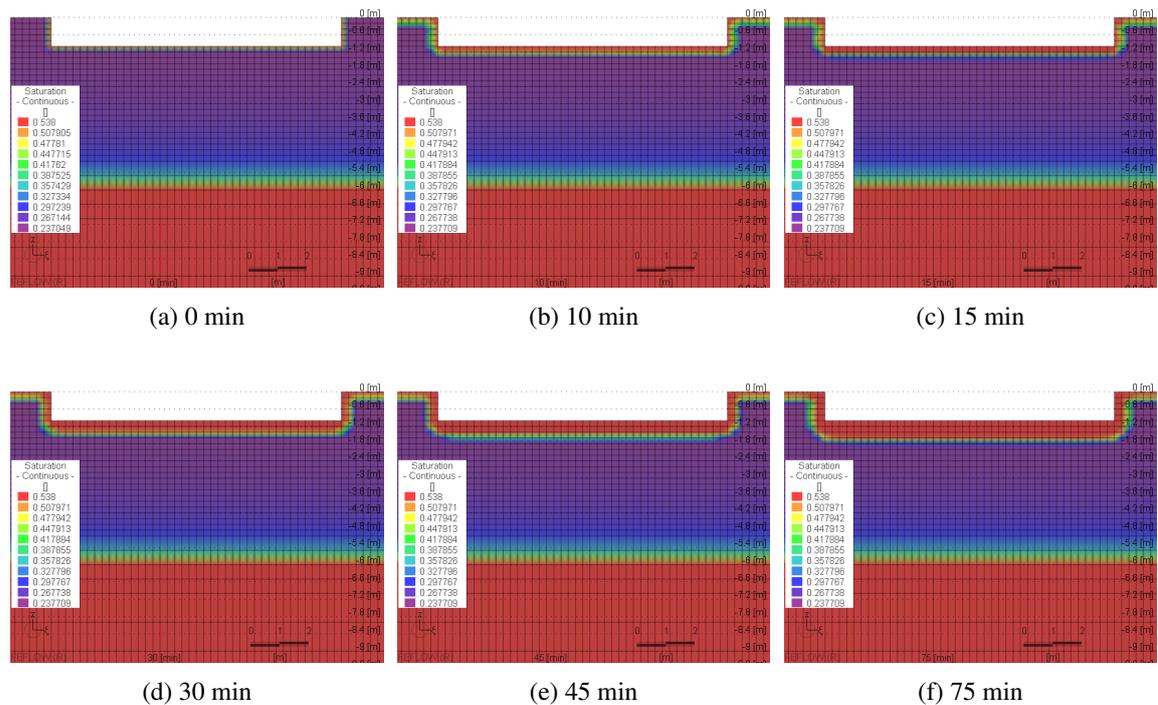


Figura 5.13: Processo de infiltração no Caso Geral usando o FEFLOW (corte AA).

5.3.2 Percolação pelo fundo (SWMM)

A configuração proposta para o grupo de cenários de Percolação pelo fundo (SWMM) busca a representação no FEFLOW da configuração física que se observa na forma de modelagem empregada no SWMM, em que a infiltração ocorre a taxa constante apenas pelo fundo do dispositivo. Nesse sentido, optou-se por impermeabilizar, no FEFLOW, as laterais da trincheira de infiltração. Permitindo a percolação da água apenas pelo fundo, como se entende que seja a operação do SWMM. Ainda que a simplificação seja empregada, observa-se um distanciamento entre os resultados do SWMM e do FEFLOW, como apresentado na Figura 5.14

Volumes infiltrados considerando apenas percolação de fundo usando FEFLOW e SWMM

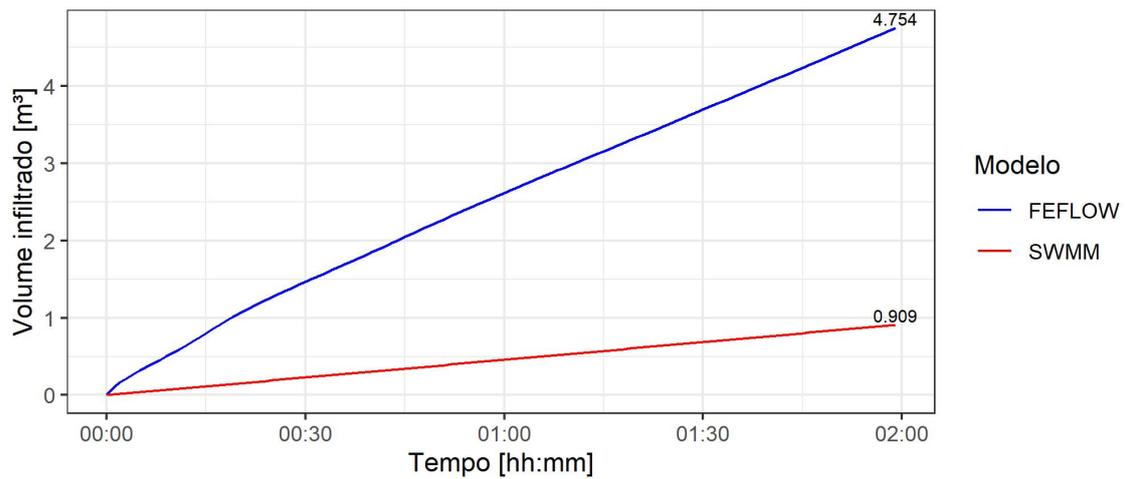


Figura 5.14: Comparação entre volumes infiltrados usando o modelo SWMM e o modelo FEFLOW com percolação apenas pelo fundo para o caso geral.

A diferença entre os resultados obtidos pode ser explicada pela ação das forças matriciais, que comandam o processo de molhamento do solo seco, e pela ação da pressão estática da coluna d'água no processo de infiltração em um dispositivo dotado de reservatório profundo. A fim de verificar o impacto que diferentes níveis de reservatório pode representar no processo de infiltração, diferentes profundidades foram testadas na modelagem usando o FEFLOW, como apresentado na Figura 5.15.

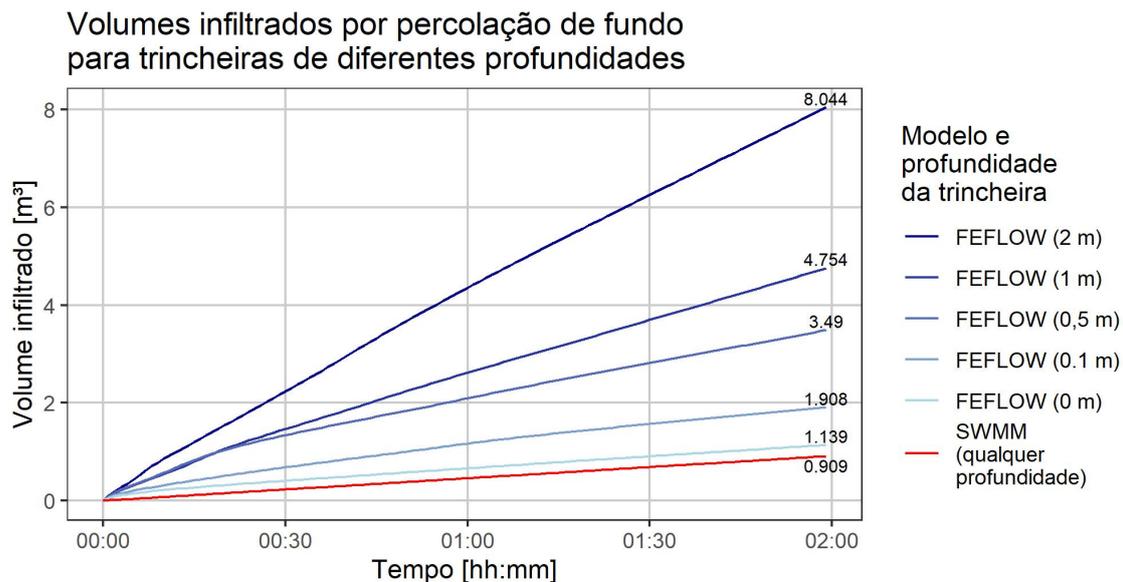


Figura 5.15: Trincheiras de mesma área superficial e diferentes profundidades com percolação apenas pelo fundo usando o FEFLOW e o SWMM.

O que se observa na Figura 5.15 é que variações na profundidade da trincheira podem representar ganhos significativos no processo de infiltração, dado o aumento da carga estática resultante da coluna d'água. A consequência desse fenômeno é observada, nesse caso, para o ganho na infiltração no fundo da trincheira, mas é importante lembrar que a carga de pressão exercida pela coluna d'água também atua nas paredes da trincheira aumentando as taxas de infiltração. Percebe-se que a variação dos volumes infiltrados aumenta conforme aumentam as profundidades, tornando-se cada vez mais relevante com o aumento da profundidade da trincheira.

O resultado próximo observado entre volumes infiltrados no cenário SWMM e no FEFLOW (0 m), que corresponde à infiltração no solo sem carga estática, confirma a suposição de que a modelagem empregando o SWMM aplica apenas a taxa constante de infiltração no solo, sem considerar pressões adicionais de carga. A pequena diferença observada entre os dois resultados pode ser explicada pelo processo de molhamento do solo, que faz com que a infiltração no cenário que a considera seja mais alta nos instantes iniciais de simulação e apresenta, ao que se pode verificar, pouca influência para uma superfície de infiltração de 10 m² em um período de infiltração contínua de 2 horas.

A Figura 5.16 apresenta as curvas para vazões infiltradas de cada cenário. Fica evidente a proximidade entre a forma de simulação adotada no FEFLOW e a adotada pelo SWMM para dispositivos de pequena profundidade e o distanciamento com o aumento da profundidade. Além da diminuição da área superficial em que se dá o processo de molhamento do solo,

tem-se também a diminuição da carga estática, o que faz com que as curvas alcançadas por SWMM e FEFLOW se aproximem em cenários de trincheiras de baixa profundidade, especialmente após o processo de molhamento, o que fica evidente na Figura 5.17.

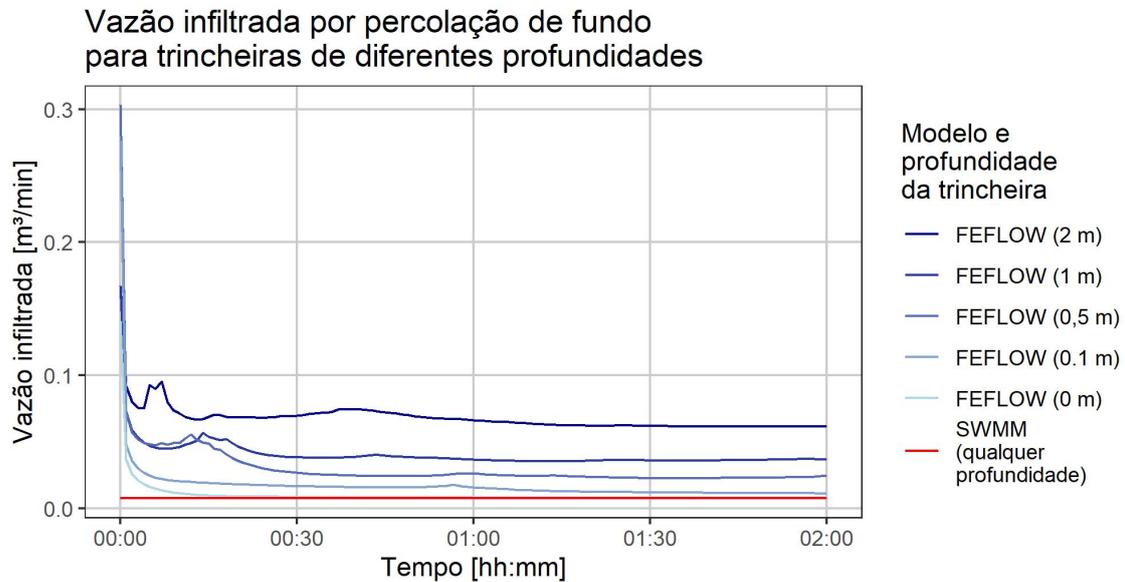


Figura 5.16: Vazão infiltrada por trincheiras de mesma área superficial e diferentes profundidades com percolação apenas pelo fundo usando o FEFLOW e o SWMM.

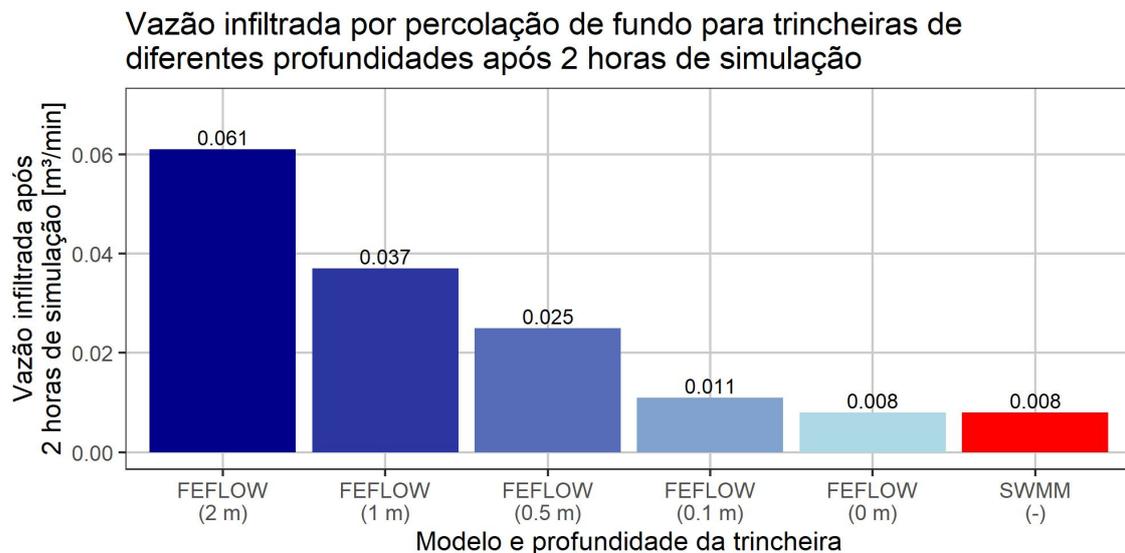


Figura 5.17: Vazão infiltrada por trincheiras de mesma área superficial e diferentes profundidades com percolação apenas pelo fundo usando o FEFLOW e o SWMM após 2 horas de simulação.

O que se pode concluir pelos resultados é que a simplificação realizada pelo método adotado pelo SWMM pode ser especialmente adequada para aquelas medidas em que não há carga hidráulica acumulada sob a forma de lâmina d'água, de modo que o processo de infiltração ocorre sem um adicional de carga potencial considerável. Nesses casos, o que se espera é que, realizado o processo de molhamento do solo, a taxa de infiltração se estabilize de fato em valor próximo ao da condutividade hidráulica saturada. A relevância do volume infiltrado no processo de molhamento do solo, desconsiderado na simplificação adotada pelo SWMM, gera uma diferença pouco relevante nos volumes infiltrados para o cenário estudado, o que se verifica nas curvas de volume infiltrado.

5.3.3 Umidade inicial do solo

Foram realizadas simulações com diferentes condições iniciais de umidade do solo. Aplicou-se valor aproximado da capacidade de campo para as faixas superiores da malha, de modo a fazer com que a simulação tivesse início em condição de solo úmido, uma tentativa de representar um solo úmido no início da simulação decorrente de águas superficiais, sem variar o nível do lençol freático. Tal condição foi testada em diferentes profundidades de solo, como apresentado na Figura 5.18

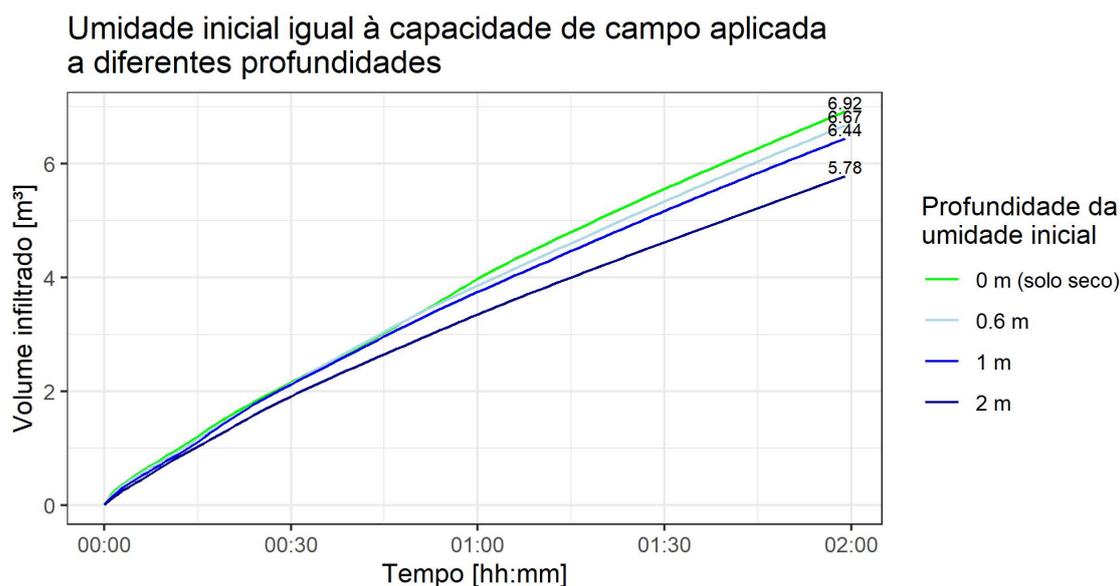


Figura 5.18: Volumes infiltrados após aplicando umidade inicial igual à capacidade de campo do solo a diferentes profundidades.

O que se pode observar é que a umidade aplicada às camadas mais superiores da malha quase não apresenta impacto nos volumes infiltrados pelo dispositivo. Uma maior variação

no volume infiltrado após duas horas de simulação pode ser observado no cenário em que todo o solo que envolve a trincheira apresenta condição inicial de umidade. Nesse, a variação no volume infiltrado é um pouco mais expressiva, chegando a um valor próximo a 17% menor com 2 horas de infiltração contínua.

A figura 5.19 traz as curvas de vazão infiltrada para os diferentes cenários estudados. O que se pode perceber a partir dos resultados é um mesmo processo de molhamento, mas com a antecipação do processo conforme a condição úmida inicial se posiciona em maior profundidade. Fica claro que a condição inicial de umidade pode variar a capacidade de operação dos dispositivos antecipando o processo de molhamento e, assim, reduzindo as taxas de infiltração. Contudo, a redução nas taxas não se deve a variações estruturais do dispositivo, de modo que, admitindo que o dispositivo irá operar continuamente, a variação nas condições iniciais não apresentará grande impacto na capacidade de operação.

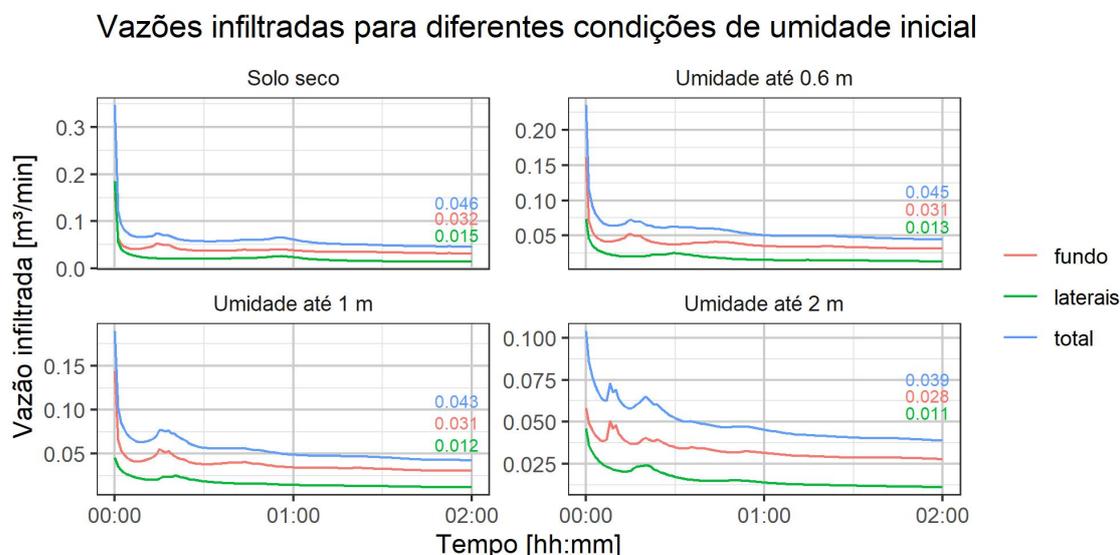


Figura 5.19: Volumes infiltrados aplicando umidade inicial igual à capacidade de campo do solo a diferentes profundidades.

Para melhor verificar a relação entre a condição inicial de umidade e a vazão de infiltração ao final da modelagem, foi realizado um ajuste linear, apresentado na Figura 5.20. Verifica-se a pequena variação nas taxas de infiltração após 2 horas de simulação, mesmo em situação de umidade inicial envolvendo todo o dispositivo. A curva de primeiro grau pareceu se ajustar bem aos conjuntos de dados. O pequeno coeficiente angular sugere baixa variação na capacidade de infiltração para variações na umidade inicial até a capacidade de campo.

Vazões infiltradas para diferentes condições de umidade inicial

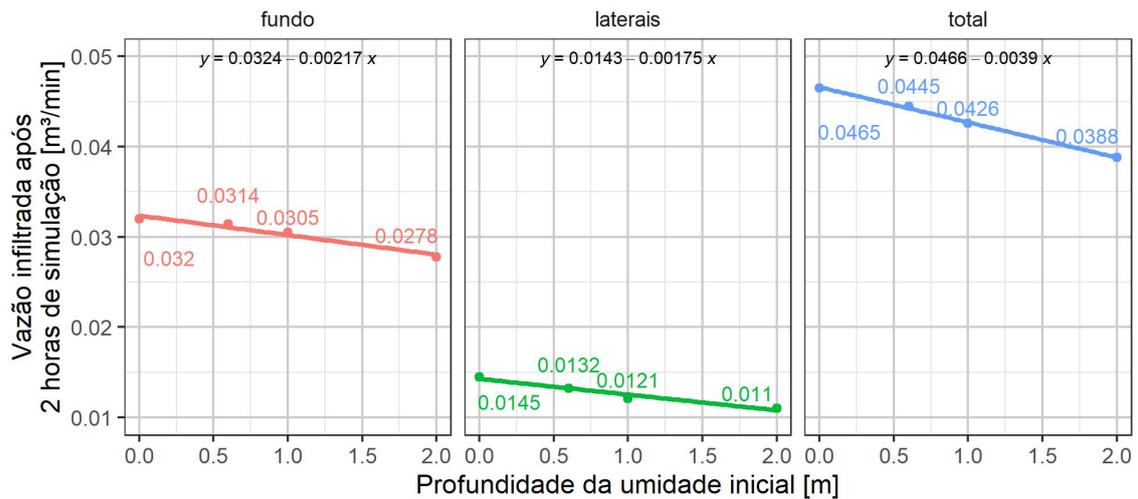


Figura 5.20: Vazão infiltrada após 2 horas de simulação aplicando umidade inicial igual à capacidade de campo do solo a diferentes profundidades.

Os resultados da presente seção corroboram com a suposição de que a grande variação no processo de infiltração observado entre as metodologias empregadas no SWMM e no FEFLOW, discutidas nas seções 5.3.1 e 5.3.2, ocorre majoritariamente pelo ganho de pressão estática e não apenas pelo processo de molhamento do solo. Mas indica também que, para dispositivos de maior porte, em que se observe interface entre solo seco e solo saturado de maior área, a condição de saturação inicial pode ser significativa para o volume infiltrado. Há ainda a preocupação da eficiência de dispositivos em condições de lençol freático elevado, em que a condição de umidade do solo em equilíbrio pode gerar uma perda na capacidade de infiltração mesmo em eventos de solo seco.

5.3.4 Nível do lençol freático

Os cenários estudados na presente seção visam à caracterização do impacto da posição do lençol freático, e consequente variação da umidade de equilíbrio do solo, no processo de infiltração. O grupo de cenários de diferentes profundidades, apresentado na seção 5.3.8, traz a diferença na operação de dispositivos para trincheiras de variadas profundidades. É importante notar que, conforme a profundidade do dispositivo aumenta, maior será a influência do nível do lençol freático subterrâneo. Assim, é importante conhecer o impacto da posição do lençol freático na operação dos dispositivos.

Os resultados de volume infiltrado da presente seção são apresentados na Figura 5.21. O que se observa é que a variação do nível do lençol freático apresenta pouco impacto na

capacidade de infiltração até dois metros de distância do fundo do dispositivo de infiltração (cenário de 3 m). No cenário de 2 m, em que o nível do lençol freático está a um metro do fundo da trincheira, observa-se uma redução mais relevante no volume infiltrado, que alcança, ao fim de 2 horas de operação, cerca de 75% do volume infiltrado pelo caso geral, de profundidade 6 m.

Os resultados apontam para um bom funcionamento dos dispositivos, mesmo com aquíferos altos, e poucos ganhos de desempenho para maiores profundidades do lençol freático, a não ser nos casos em que o lençol freático se aproxima muito do fundo do dispositivo. Para os casos em que o lençol freático está a mais de um metro de distância do fundo da trincheira, o volume infiltrado é pouco impactado em simulação de duas horas de infiltração contínua.

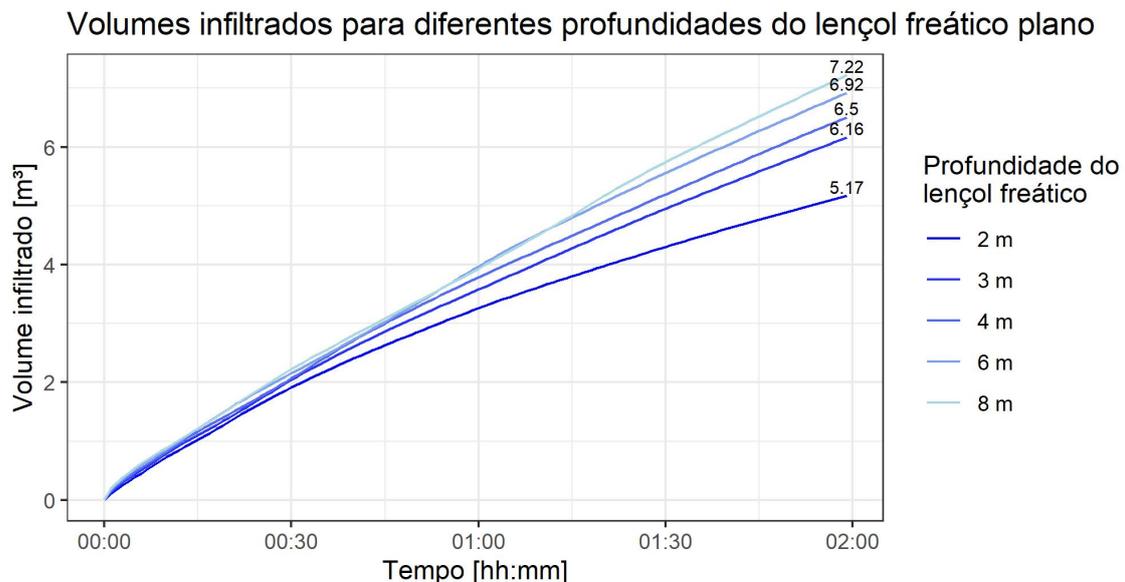


Figura 5.21: Volumes infiltrados aplicando diferentes níveis do lençol freático.

A Figura 5.22 traz resultados das vazões infiltradas. Pode-se perceber um comportamento semelhante das vazões infiltradas em todos os cenários, com variações apenas no momento em que a saturação das camadas adjacentes ao fundo e às laterais ocorre, o que é apontado pelos picos nas curvas. A redução observada nas vazões infiltradas comparando a situação em que o lençol freático está a 8 m e a situação em que o lençol freático fica a 1 metro da trincheira ('lençol freático a 2 m') chega a quase 50% ao final da simulação. Já para a situação em que o lençol freático está a dois metros do fundo da trincheira ('lençol freático a 3 m'), o patamar alcançado pela vazão infiltrada ao final da simulação é de 80% da vazão observada no caso do lençol freático mais baixo.

Vazões infiltradas para diferentes profundidades do lençol freático

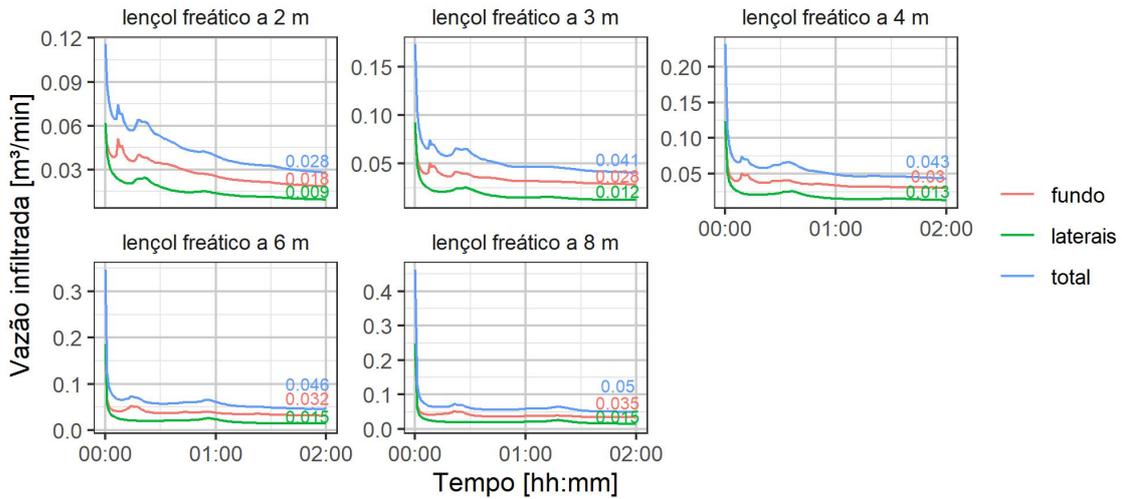


Figura 5.22: Vazões infiltradas aplicando diferentes níveis do lençol freático.

A relação entre posição do lençol freático e vazão infiltrada após 2 horas de simulação é apresentada na Figura 5.23. Para o ajuste, foi aplicado o método LOESS (*Local Polynomial Regression*) com *span* de 1,8. Pode-se verificar uma maior queda na capacidade de infiltração para profundidades do lençol freático menores que 3 metros.

Relação entre posição do lençol freático e vazão infiltrada

Ajuste de curva pelo método *locally estimated scatterplot smoothing* com *span* de 1,8

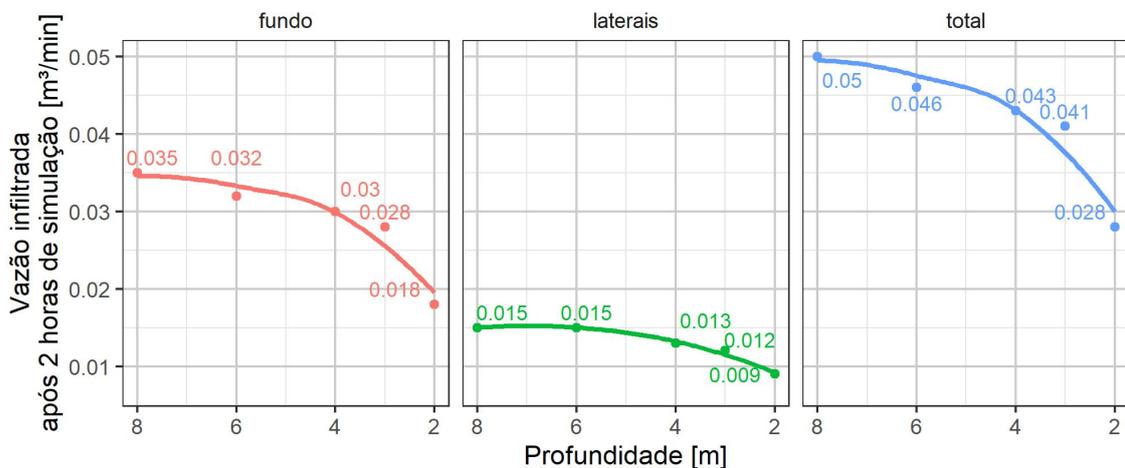


Figura 5.23: Ajuste de vazões infiltradas após 2 horas de simulação aplicando diferentes níveis do lençol freático.

Verificada a perda de eficiência de infiltração para situações em que o lençol freático

se encontra em posição elevada, investigou-se o impacto do gradiente do lençol freático. A Figura 5.24 apresenta resultados que comparam a operação de trincheiras de infiltração em cenários com lençóis freáticos planos e lençóis freáticos com gradiente decorrente de inclinação 1:100. Percebe-se um ganho em volume infiltrado em todos os cenários estudados. Ao final de 2 horas de simulação, o ganho do cenário de lençol freático a profundidade 2 m é de cerca de 20% do volume infiltrado. Para os cenários de lençol freático em profundidades 3 e 4 m, o ganho é de cerca de 25%. Pode-se supor que o volume adicional infiltrado decorre da maior capacidade de descarga de um lençol freático com gradiente, que gera um fluxo subterrâneo que permite a infiltração de maiores volumes.

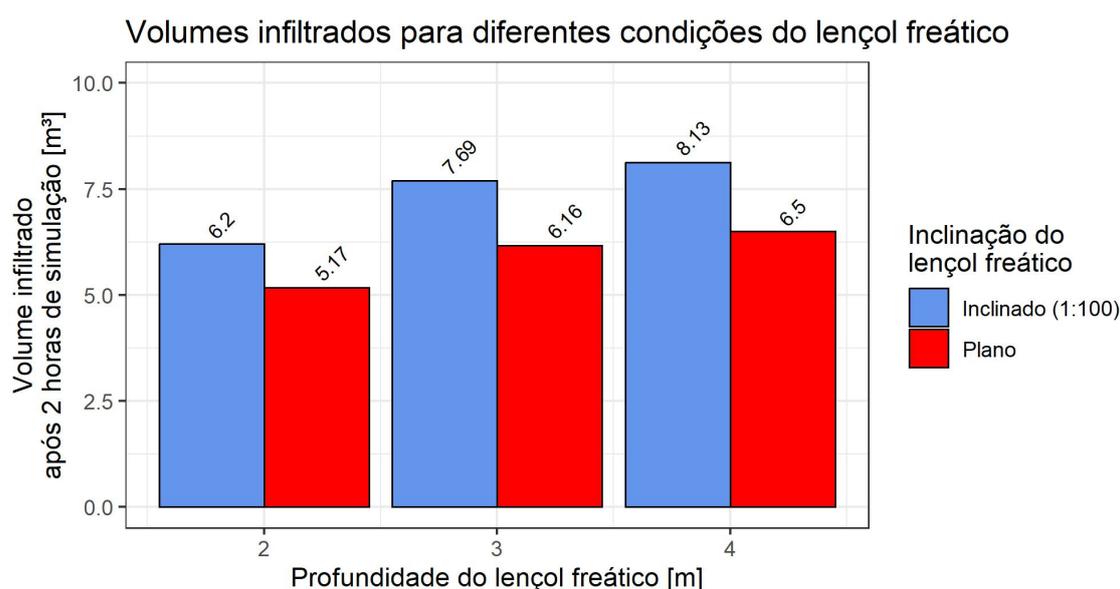


Figura 5.24: Volumes infiltrados após 2 horas de simulação aplicando diferentes gradientes ao lençol freático.

Os resultados das simulações para diferentes níveis do lençol freático plano e com gradiente apontam para a pouca variação da capacidade de infiltração dos dispositivos de controle de escoamento com a variação na posição do aquífero. Percebe-se que, para as características de solo aplicadas, a capacidade de infiltração apresenta bom desempenho mesmo para o caso de lençol freático a um metro do fundo do dispositivo, configuração que o manual de drenagem da Adasa não recomenda (ADASA, 2023a). Para os cenários de infiltração dentro do limite de nível do lençol freático recomendado pela agência, de até 1,5 m de profundidade, a variação na capacidade de infiltração não parece gerar grandes impactos que inviabilizam a adoção das medidas de controle. O resultado é coerente com o que apresenta Locatelli et al. (2015), que coloca limites entre 1,5 e 3 m para solos de alta permeabilidade.

5.3.5 Colmatação

O processo de colmatação foi avaliado no grupo de cenários Colmatação de fundo a fim de verificar a capacidade de operação de uma trincheira de infiltração em diferentes estágios de colmatação de fundo e verificar a capacidade remanescente de infiltração pela trincheira, tanto pelo fundo colmatado quanto pelas laterais, durante esse processo. A figura 5.25 traz os resultados da aplicação de diferentes valores de capacidade de infiltração no fundo do cenário de trincheira de infiltração estudado.

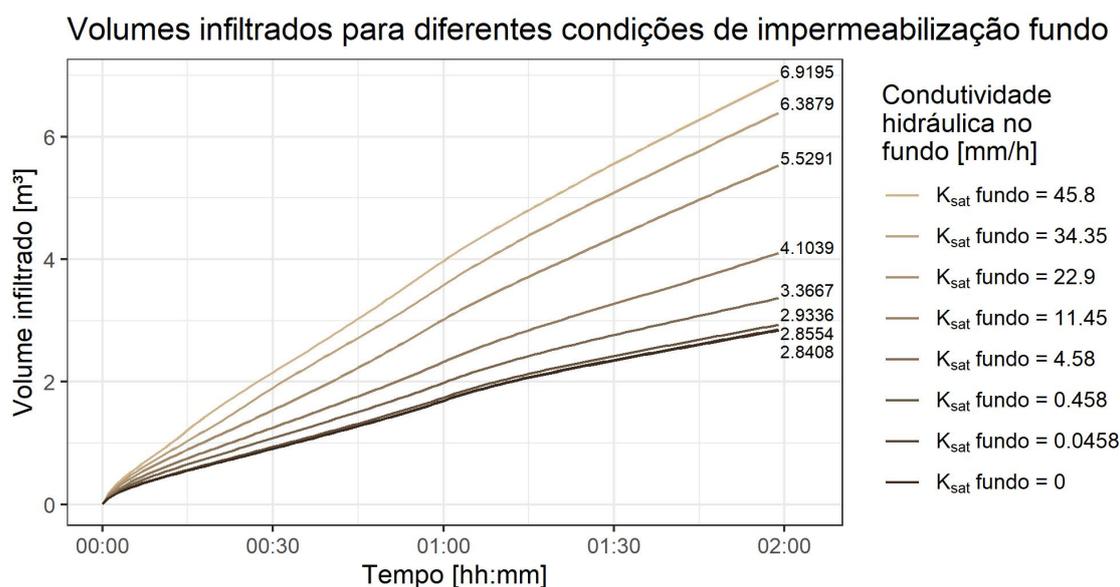


Figura 5.25: Volumes infiltrados aplicando diferentes níveis de impermeabilização no fundo da trincheira.

O que se pode observar pelos cenários de diferentes níveis de colmatação é que o processo pode gerar perdas significativas na capacidade de infiltração dos dispositivos. Com o avanço da impermeabilização de fundo, até o valor de K_{Sat} de 11,45 mm/h, percebe-se a redução de cerca de 40 % no volume infiltrado após 2 horas de operação. Quando o cenário observado é o de total impermeabilização de fundo, considerando K_{Sat} de 0 mm/h no fundo da trincheira, a redução da infiltração total é a maior do grupo de cenários, com volume infiltrado após 2 horas de operação em cerca de 40 % do volume na condição sem colmatação.

A Figura 5.26 apresenta as vazões infiltradas para os diferentes cenários de K_{Sat} no fundo do dispositivo. É clara a redução na capacidade de infiltração da região de fundo da trincheira com a diminuição da condutividade, o que é esperado. Quando a capacidade de infiltração no fundo é 75% da inicial (K_{Sat} fundo = 34,35 mm/h), a redução na vazão infiltrada é de

apenas 10%. Quando a capacidade de infiltração reduz para metade da inicial (K_{Sat} fundo = 22,9 mm/h), a redução da vazão infiltrada total é de 15%.

Os maiores impactos são observados a partir de K_{Sat} fundo de 25%, quando a redução da vazão infiltrada é de 35%. A redução completa da infiltração não é observada por conta da infiltração lateral da camada de fundo, que ocorre para as camadas laterais da trincheira, onde não foi aplicada reduzida condutividade hidráulica, mas a condutividade original.

Vazões infiltradas para diferentes condições de impermeabilização de fundo

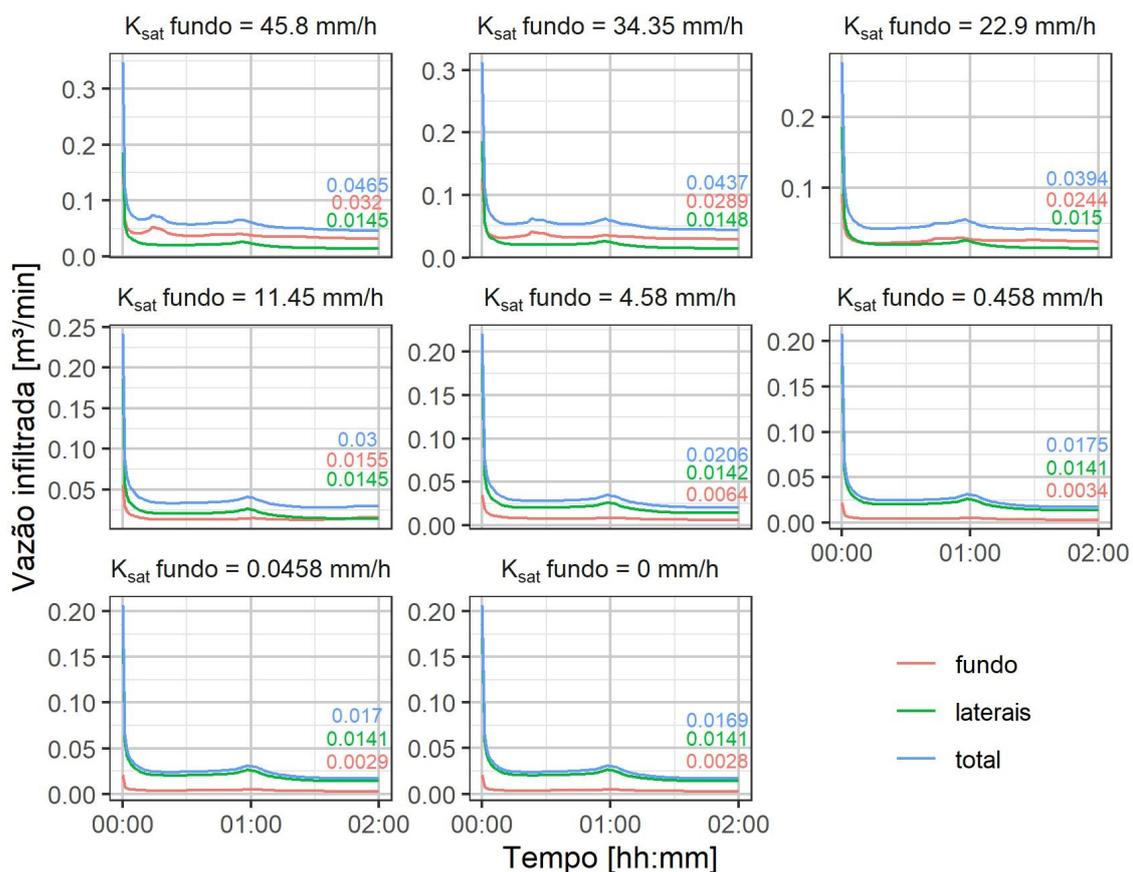


Figura 5.26: Vazões infiltradas aplicando diferentes níveis de colmatção no fundo da trincheira.

O ajuste dos valores de vazão de infiltração no momento final da simulação, apresentado na Figura 5.27, permite verificar o comportamento da redução das vazões com a impermeabilização do fundo. Percebe-se que as maiores reduções ocorrem para condutividade hidráulica de fundo menor que 20 mm/h no fundo. O ajuste polinomial de segundo grau apresentou boa relação com os resultados do cenário para a região do fundo. Já para as laterais, a redução

da condutividade do fundo não gerou grande impacto. Os valores de infiltração nas laterais reduziram pouco com o aumento da impermeabilização do fundo.

Vazões de infiltração para diferentes condições de impermeabilização de fundo

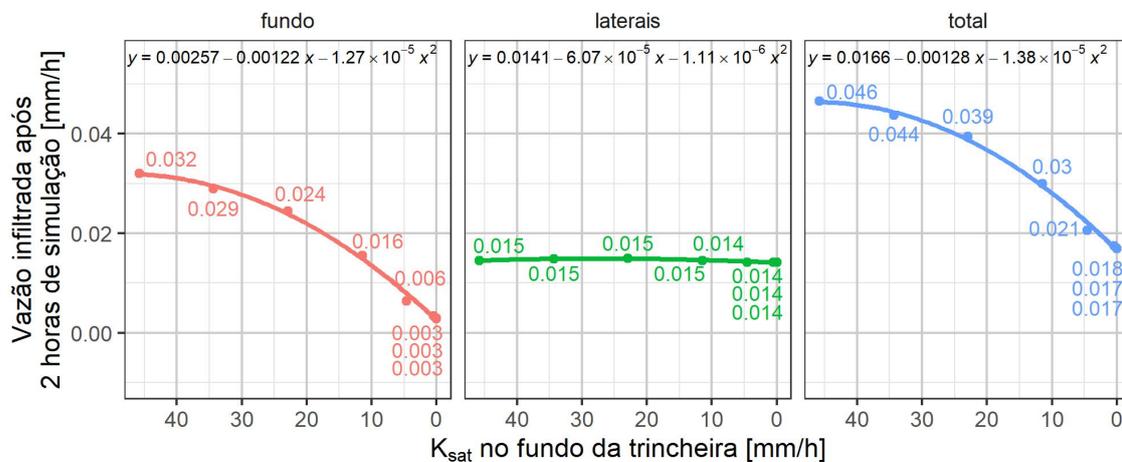


Figura 5.27: Ajuste de valores de vazão de infiltração após 2 horas de simulação para diferentes níveis de colmatção no fundo da trincheira.

O resultado do estudo do processo de colmatção aponta, naturalmente, para a perda de eficiência do dispositivo com o aumento da impermeabilização de fundo. Contudo, As simulações realizadas apontam para uma capacidade remanescente considerável mesmo no cenário de colmatção total do fundo, quando a vazão infiltrada passa a ser de cerca de 37% da inicial, o que corresponde à vazão que infiltra lateralmente no dispositivo. Contudo, o processo de colmatção pode se dar de maneiras variadas, envolvendo, inclusive, perdas na capacidade de infiltração nas laterais, que não foram consideradas na metodologia. Além disso, a colmatção é um processo que varia no tempo. Os resultados, portanto, são pontos de diferentes condições de impermeabilização que poderiam ser alcançados em diferentes momentos a depender de características físicas do local.

5.3.6 Características do solo

Observadas as diferenças no processo de modelagem das diferentes metodologias e compreendendo que o FEFLOW apresenta maior complexidade na caracterização dos fenômenos de infiltração no solo, decidiu-se estudar os parâmetros aplicados na sua modelagem. O grupo de cenários relacionado às características do solo objetivou estudar o processo de modelagem do FEFLOW, promovendo alterações nos valores de cada um dos parâmetros do solo para verificar seu impacto nos resultados das simulações.

A variação de cada parâmetro foi avaliada em simulação contínua de 2 horas de infiltração. Os valores adotados foram o mínimo e o máximo de cada parâmetro do conjunto de dados, bem como a mediana de cada um, empregada no Caso Geral (à exceção da condutividade hidráulica, que apresenta o valor encontrado experimentalmente no Caso Geral). Os resultados das simulações de 2 horas de duração são apresentados de maneira conjunta na Figura 5.28.

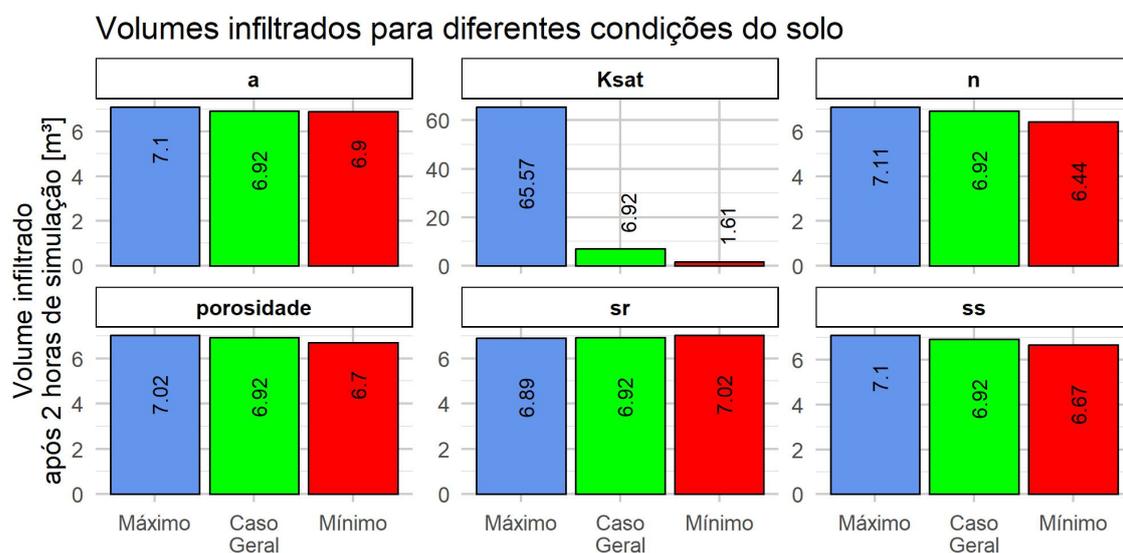


Figura 5.28: Variação dos parâmetros do solo na modelagem de trincheiras de infiltração no FEFLOW.

Dos parâmetros estudados, aquele cuja variação afeta mais os valores obtidos para o volume infiltrado após 2 horas de simulação é a condutividade hidráulica saturada (Ksat). Quando comparada com os demais parâmetros, a amplitude de resultados que sua variação proporciona leva a crer que esse é o parâmetro de maior sensibilidade do modelo e ao qual se deve prestar maior atenção em processos de calibração de modelos de infiltração. Tal resultado é coerente, uma vez que a condutividade hidráulica é o parâmetro que caracteriza a capacidade de movimentação da água no solo, enquanto os demais parâmetros estão associados à característica de retenção da água no solo.

Outra interpretação possível do resultado apresentado é que o grupo de dados utilizado é pouco variável para todos os parâmetros, à exceção da condutividade hidráulica saturada. Desse modo, para outras situações, em que a caracterização de solos encontrasse valores mais variados para tais parâmetros, seriam obtidas variações maiores nos volumes decorrentes de seu emprego na simulação. A hipótese não foi verificada, mas o que se pode afirmar é que a base de dados utilizada parece caracterizar bem o solo, que é relativamente homogêneo

para todos os parâmetros, à exceção da condutividade hidráulica saturada. Assim, a variação desses parâmetros na simulação parece não ter grande impacto nos volumes infiltrados em eventos de infiltração contínua de 2 horas.

5.3.7 Características físicas das trincheiras

A partir do estudo das diferentes condições de operação de dispositivos de infiltração para o controle do escoamento, surge a hipótese de que variações no formato dos dispositivos podem potencializar ou reduzir determinados fenômenos associados à infiltração. Para avaliar o impacto de variações na conformação da trincheira de infiltração estudada no Caso Geral em termos de volumes infiltrados após de 2 horas de infiltração, foram estudadas variações no comprimento, na largura e na profundidade do dispositivo. Foram testados o dobro e a metade de cada um dos parâmetros, e os resultados dos volumes infiltrados são apresentados na Figura 5.29.

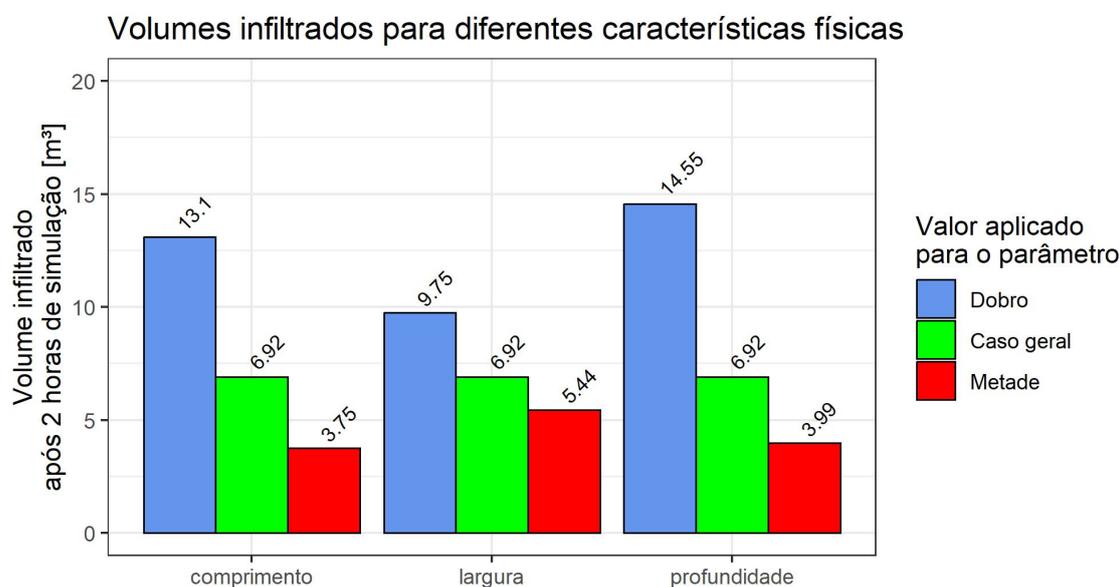


Figura 5.29: Volumes infiltrados após 2 horas de simulação variando as dimensões da trincheira.

O que se observa pela análise da Figura 5.29 é que o parâmetro mais sensível a variações para trincheiras de infiltração é a profundidade. O cenário que contou com trincheira com o dobro de profundidade apresentou o maior volume infiltrado após 2 horas de operação, superando o dobro do volume infiltrado no Caso Geral. Quanto ao menor volume, aquele que empregou a trincheira com metade do comprimento foi o que registrou o menor volume infiltrado, chegando a valor de volume infiltrado próximo à metade do que se verificou no

Caso Geral.

Para a variação da largura, menor impacto nos volumes infiltrados é verificado. Aplicando trincheira com o dobro da largura, obtém-se um ganho de 40%. Já para a trincheira com metade da largura, a perda do volume infiltrado após 2 horas de simulação é cerca de 20%. Ambos os resultados apresentam variações menos significativas no que diz respeito aos volumes infiltrados quando comparados com os resultados observados nas variações de comprimento da trincheira.

A compreensão da diferença entre os resultados obtidos para a variação do comprimento e da largura passa pela reflexão da forma do dispositivo. A trincheira de infiltração é um dispositivo linear, o que significa que o seu comprimento predomina sobre a largura. A variação de comprimento ou largura em valores absolutos gera uma mesma variação na área de fundo do dispositivo, o que faz com que os ganhos de infiltração pelo fundo sejam os mesmos para os dois grupos de cenários.

Contudo, a variação nas áreas laterais ocorre de maneira diferente para o grupo de cenários de comprimento e o de largura. Aplicar o dobro do comprimento significa aumentar as áreas de parede mais compridas do dispositivo, por onde grande parte da infiltração ocorre. Já o dobro da largura não gera ganhos tão significativos nas áreas em que a infiltração ocorre, uma vez que as paredes da largura são menores. Todavia, medidas de infiltração com uma relação mais próxima entre as dimensões de largura e comprimento podem potencializar outros fenômenos, como a evaporação, desconsiderada no presente estudo.

Com relação à profundidade, o que se observa é que o cenário que emprega trincheira com o dobro da profundidade apresenta volume infiltrado ligeiramente superior ao dobro do observado no Caso Geral após duas horas de simulação. Já no cenário em que se emprega trincheira com metade da profundidade, verifica-se uma redução de cerca de 40% do volume infiltrado. O resultado contribui para a compreensão de que a carga hidráulica adicional disponível pelo aumento da profundidade é relevante para a operação dos dispositivos e tem sua importância aumentada conforme aumenta a profundidade.

Os valores de lâmina infiltrada, apresentados na Figura 5.30, ratificam a suposição da relevância da carga hidráulica para a variação de volume infiltrado nos cenários de diferentes profundidades. Fazendo a divisão das vazões infiltradas ao final da simulação pela área disponível para infiltração, fica destacado o valor superior de infiltração para o cenário do dobro de profundidade e o reduzido valor de infiltração no cenário de menor profundidade. Já para os demais cenários, a lâmina infiltrada se mantém muito próxima de um mesmo valor.

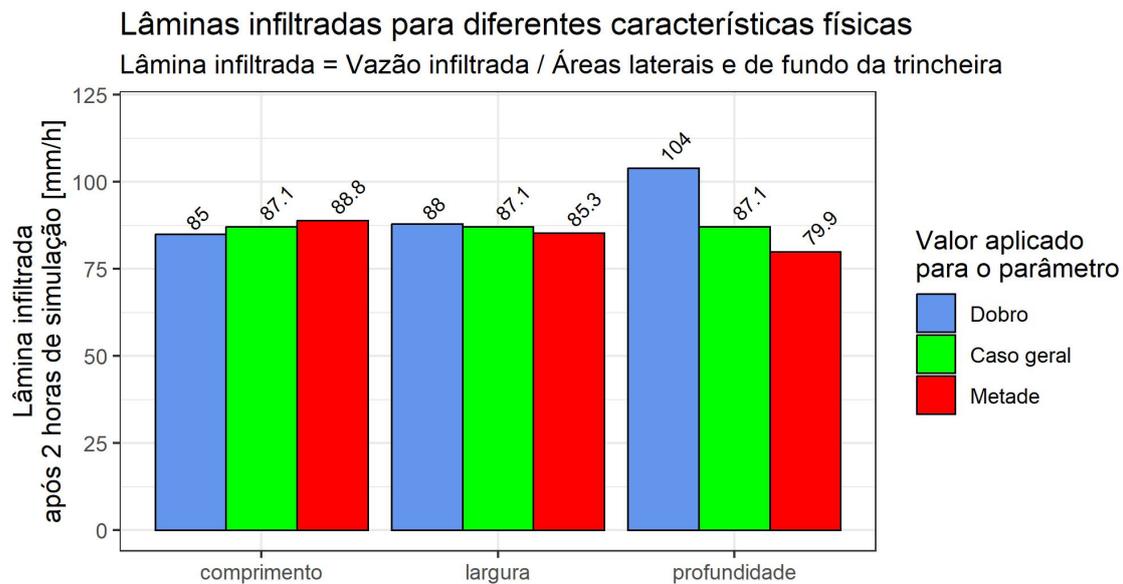


Figura 5.30: Lâminas infiltradas após 2 horas de simulação variando as dimensões da trincheira.

As pequenas variações observadas entre os grupos de cenários de diferentes comprimentos e larguras podem ser decorrentes do processo de molhamento. Um indicativo para tal suposição é o comportamento semelhante observado no cenário de metade do comprimento e no de dobro de largura, e também no de dobro de comprimento e metade da largura. Uma vez que tais variações resultam em formatos de trincheiras de mesmas proporções, o processo de molhamento pode influenciar de uma mesma maneira a redução da condutividade hidráulica, resultando em valores de lâmina infiltrada próximos.

Para empreendimentos urbanos, especialmente em regiões densamente ocupadas, há a preocupação com relação à área a ser destinada a dispositivos de drenagem. Assim, para analisar a eficiência dos dispositivos levando em consideração a área que ocupam no terreno, promoveu-se a divisão dos volumes infiltrados pela área em planta do dispositivo. A Figura 5.31 apresenta o resultado da operação. Os resultados são consideravelmente diferentes daqueles observados na Figura 5.29, especialmente para os casos de variações na largura e no comprimento. Isso ocorre por conta da variação na área superficial dos dispositivos. Assim, para a largura, fica evidente que, quando levada em consideração a área superficial, o mais indicado é a adoção de medidas de infiltração em que essa dimensão não seja predominante.

Lâminas infiltradas para diferentes características físicas

Lâmina infiltrada = Volume infiltrado / Área em planta da trincheira

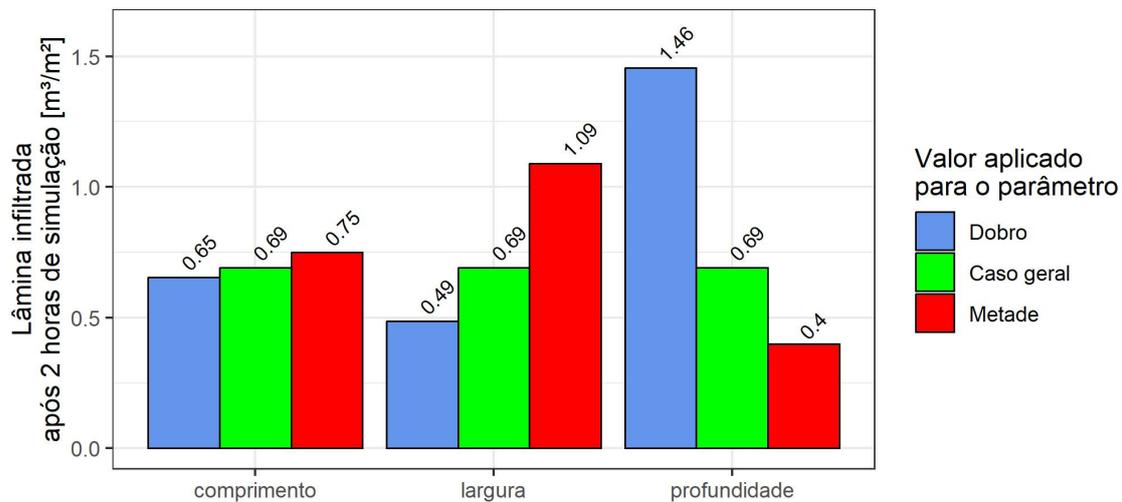


Figura 5.31: Lâmina infiltrada após 2 horas de simulação variando as dimensões da trincheira.

Para o caso das variações no comprimento, os resultados são diferentes. Há um aumento do desempenho no resultado do cenário em que a metade do comprimento é adotada e uma redução no desempenho no resultado do cenário em que o dobro do comprimento é adotado, o que aponta para a valorização da adoção de medidas com menor área superficial. Todavia, a variação entre os diferentes cenários é pequena. Assim, pode-se concluir que a predominância do comprimento em relação à largura é desejável no caso de se dispor de áreas para a implantação de medidas de controle de escoamento do ponto de vista da infiltração.

Para as variações na profundidade, quando comparamos a Figura 5.31 e a Figura 5.29, o que se observa é a manutenção das relações entre os casos estudados. Isso ocorre porque a penalização aplicada, da divisão dos volumes infiltrados pela área em planta, não afeta as variações na profundidade. Assim, para áreas de baixa disponibilidade de espaços para a implantação de medidas de infiltração, o aumento de profundidade pode ser interessante solução para ganhos de eficiência dos dispositivos. Tais resultados apontam para a importância de estudar um pouco mais os cenários de diferentes profundidades.

5.3.8 Diferentes profundidades

O grupo de cenários Diferentes profundidades foi estudado com o objetivo de verificar a variação na operação dos dispositivos no que diz respeito ao volume e às taxas de infiltração por laterais e fundo com a variação da profundidade do dispositivo. Pelos gráficos de vo-

lumes infiltrados, apresentados na Figura 5.32, pode-se verificar que, com o decréscimo da profundidade, tem-se uma maior relevância da infiltração pelo fundo na operação do dispositivo. Para a trincheira de 0,5 m de profundidade, o volume infiltrado pelo fundo corresponde a cerca de 78% do volume total infiltrado ao final da simulação de 2 horas. No Caso geral, o percentual infiltrado pelo fundo do dispositivo é de cerca de 65%, ainda se mostrando muito relevante para a operação do dispositivo.

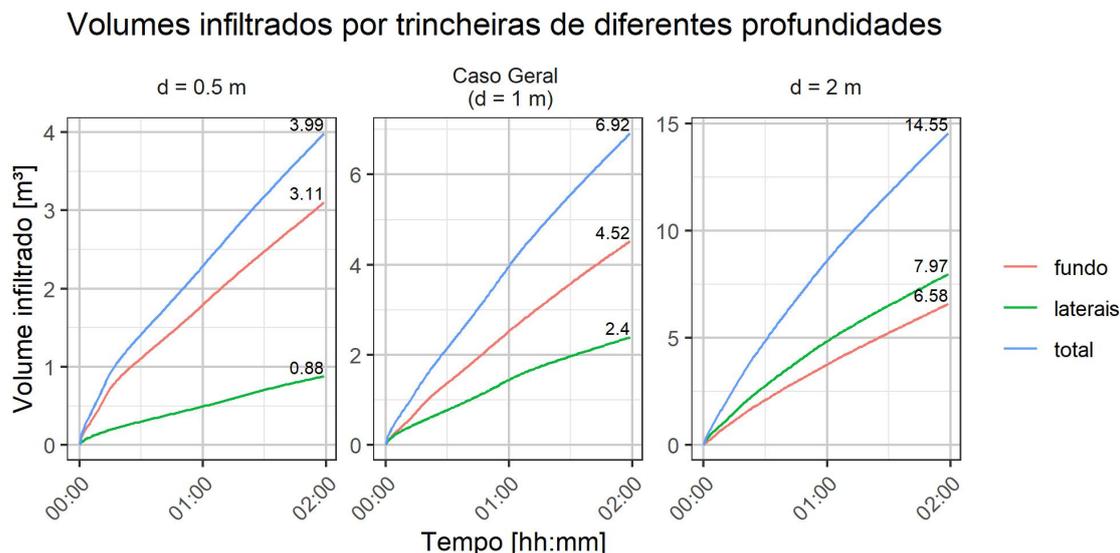


Figura 5.32: Comparação entre volumes infiltrados usando o modelo FEFLOW para trincheiras com diferentes profundidades.

O cenário que incorpora trincheira de 2 m de profundidade apresentou resultados diferentes dos demais. O que se observa é uma predominância da infiltração pelas laterais, que se tornam responsáveis pela maior quantidade de volume infiltrado. O percentual do volume infiltrado pelas laterais após 2 horas de simulação é de cerca de 55%. Tal comportamento pode ser explicado pela relevância que a pressão exercida pela coluna d'água passa a ter nas paredes conforme cresce a profundidade. Com o aumento da profundidade, a pressão estática passa a intensificar a infiltração nos pontos mais profundos das paredes laterais, assim como ocorre no fundo do dispositivo.

A Figura 5.33 traz os resultados de vazões infiltradas para os cenários de diferentes profundidades. É interessante notar os diferentes patamares alcançados por cada um dos cenários. No cenário com trincheira de 0,5 m de profundidade, a taxa de infiltração do fundo realmente comanda o processo. No Caso geral a relevância da infiltração pelas paredes laterais se intensifica. E, no cenário com trincheira de 2 metros de profundidade, paredes laterais e fundo apresentam vazões infiltradas em taxas muito próximas. É importante registrar que

os valores próximos de vazões infiltradas são referentes a áreas de diferentes magnitudes. No caso da trincheira de 2 metros de profundidade, o fundo da trincheira corresponde a uma área de 10 m^2 , enquanto as paredes laterais correspondem a uma área de 44 m^2 .

Vazões infiltradas por trincheiras de diferentes profundidades

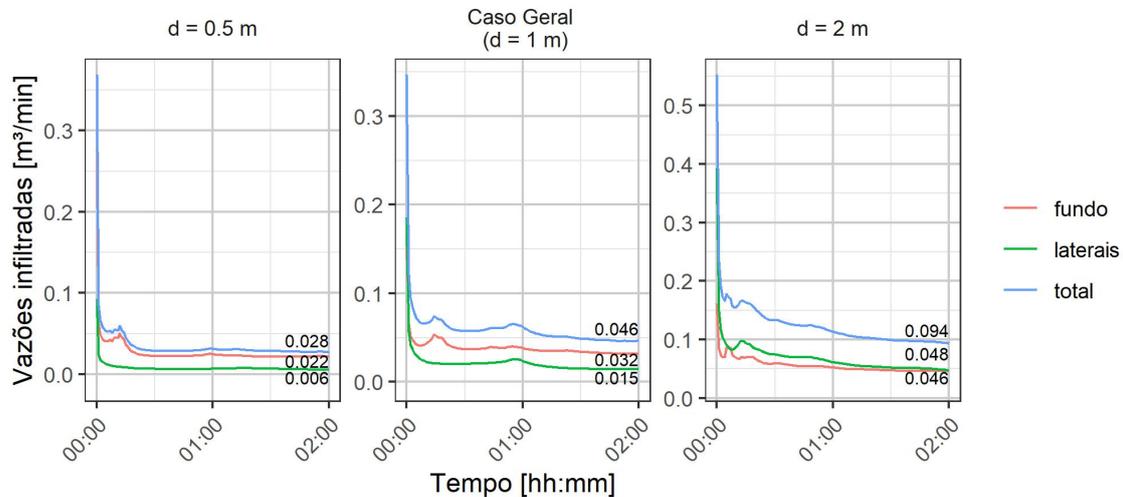


Figura 5.33: Comparação entre vazões infiltradas usando o modelo FEFLOW para trincheiras com diferentes profundidades.

A Figura 5.34 traz os resultados na forma de lâmina infiltrada, obtida a partir da divisão entre as vazões infiltradas observadas nas paredes laterais e no fundo de cada trincheira pelas suas respectivas áreas. As curvas apresentadas têm o mesmo formato observado nos resultados das vazões infiltradas, mas, aqui, pode-se comparar a capacidade de infiltração com a condutividade hidráulica em cada região do dispositivo. É possível alcançar tal relação admitindo que a lâmina infiltrada nos dispositivos é constante e equivale aos valores alcançados ao final da simulações.

Lâminas infiltradas por trincheiras de diferentes profundidades

Lâmina infiltrada = Vazão infiltrada / (Áreas laterais ou área de fundo)

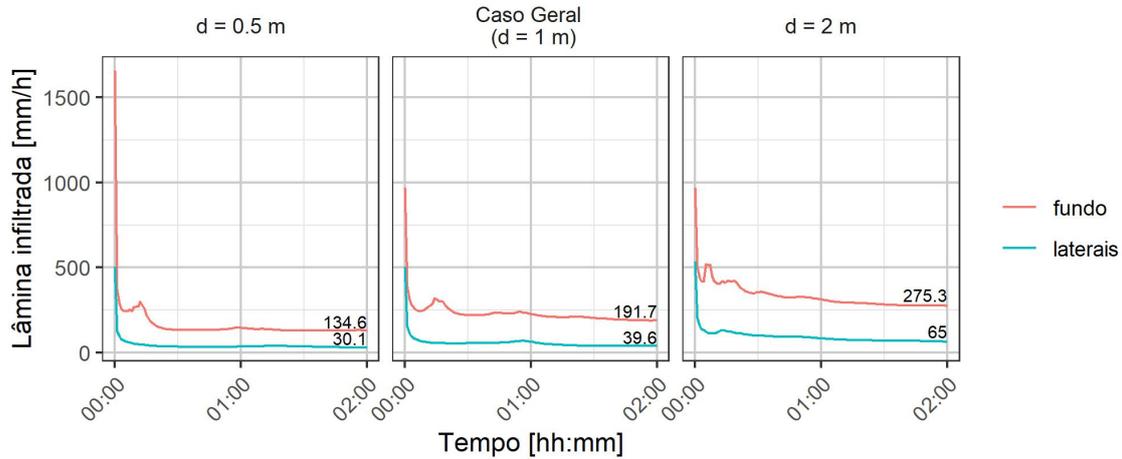


Figura 5.34: Comparação entre lâminas infiltradas usando o modelo FEFLOW para trincheiras com diferentes profundidades.

Assim, para o cenário que conta com trincheira de 0,5 m, a lâmina infiltrada pelas paredes corresponde a 30 mm/h, cerca de 70% do valor adotado para K_{Sat} , de 45,8 mm/h. Para o fundo, o valor de 134,6 corresponde a cerca de 3 vezes o de K_{Sat} . Para o Caso geral, a lâmina infiltrada pelas laterais, de 39,6 mm/h, se aproxima do valor de K_{Sat} , e o valor encontrado para o fundo do dispositivo é cerca de 4,2 vezes o de K_{Sat} . Para o cenário que incorpora a trincheira de 2 m, a lâmina infiltrada pelas laterais é de 65 mm/h, superando em cerca de 1,5 vezes o valor de K_{Sat} . Para o fundo, o valor de lâmina infiltrada é de 275,3 mm/h, que corresponde a cerca de 6 vezes o valor de K_{Sat} .

A tabela 5.1 apresenta as relações observadas entre taxas de infiltração e condutividade hidráulica saturada para as diferentes regiões e os diferentes cenários.

Tabela 5.1: Relação entre condutividade hidráulica e condutividade equivalente de cada região para diferentes profundidades do dispositivo.

Cenário	Região	Relação
Profundidade 0,5 m	Fundo	$K_{equivalente} = 2,9 \times K_{Sat}$
Caso Geral (Profundidade 1 m)	Fundo	$K_{equivalente} = 4,2 \times K_{Sat}$
Profundidade 2 m	Fundo	$K_{equivalente} = 6,0 \times K_{Sat}$
Profundidade 0,5 m	Laterais	$K_{equivalente} = 0,66 \times K_{Sat}$
Caso Geral (Profundidade 1 m)	Laterais	$K_{equivalente} = 0,86 \times K_{Sat}$
Profundidade 2 m	Laterais	$K_{equivalente} = 1,41 \times K_{Sat}$

Pode-se observar o crescimento dos valores de lâmina infiltrada com o aumento da profundidade dos dispositivos, tanto para a infiltração no fundo quanto para as laterais. Aproximando de uma maneira grosseira, o dobro da profundidade parece resultar em um K equivalente de dimensão aproximadamente 1,5 vez o K_{sat} . O ajuste de um polinômio aos dados apresenta uma função matemática simplificada para a tendência nos dados do caso estudado. Para a relação observada no fundo do dispositivo, podem ser utilizados, além dos três apresentados na tabela 5.1, a condição de infiltração a profundidade zero, que é igual à condutividade hidráulica saturada.

A fim de realizar considerações a respeito da capacidade de infiltração de dispositivos com dimensões intermediárias dentro do intervalo de profundidades estudado, foi ajustada uma reta aos pontos de condutividade equivalente e profundidade, como mostram as figuras 5.35 e 5.36.

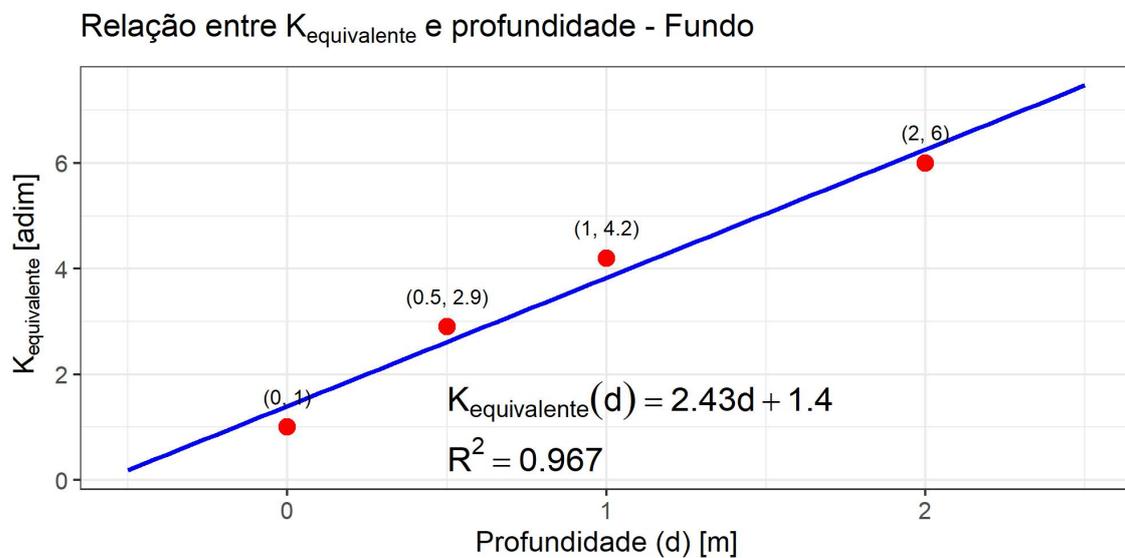


Figura 5.35: $K_{equivalente}$ do fundo em função da profundidade do dispositivo. Em que $K_{equivalente}$ é um fator multiplicador de K_{Sat} .

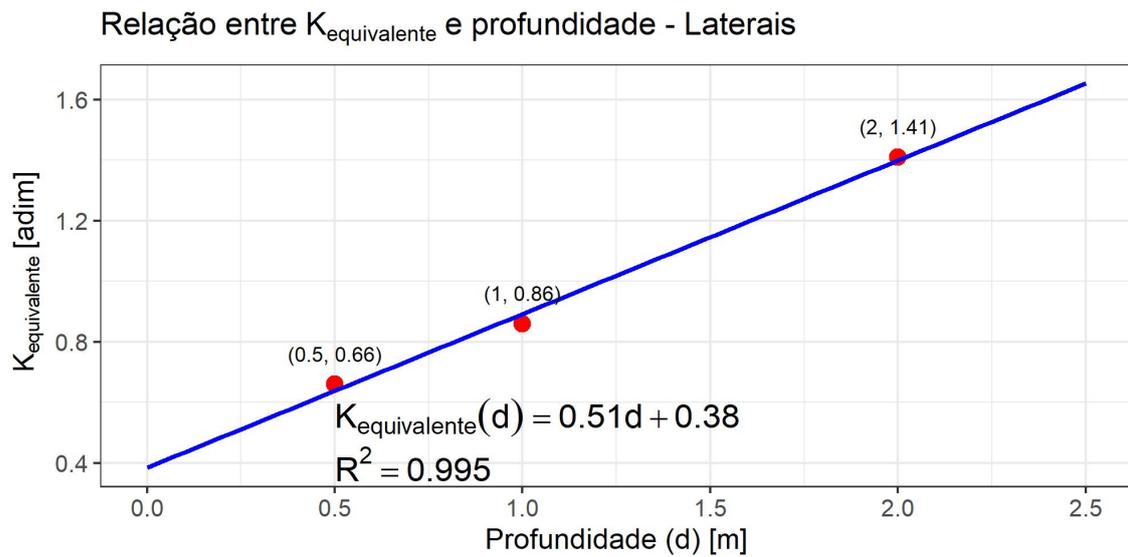


Figura 5.36: $K_{equivalente}$ das laterais em função da profundidade do dispositivo. Em que $K_{equivalente}$ é um fator multiplicador de K_{Sat} .

Aplicando as equações encontradas para a condutividade equivalente em diferentes profundidades (apresentadas nas figuras 5.35 e 5.36) e variando valores de profundidade, largura e comprimento dentro dos limites do que foi simulado, podem ser obtidas as curvas apresentadas na figura 5.37, que permitem propor configurações diferentes para alcançar determinado objetivo de infiltração.

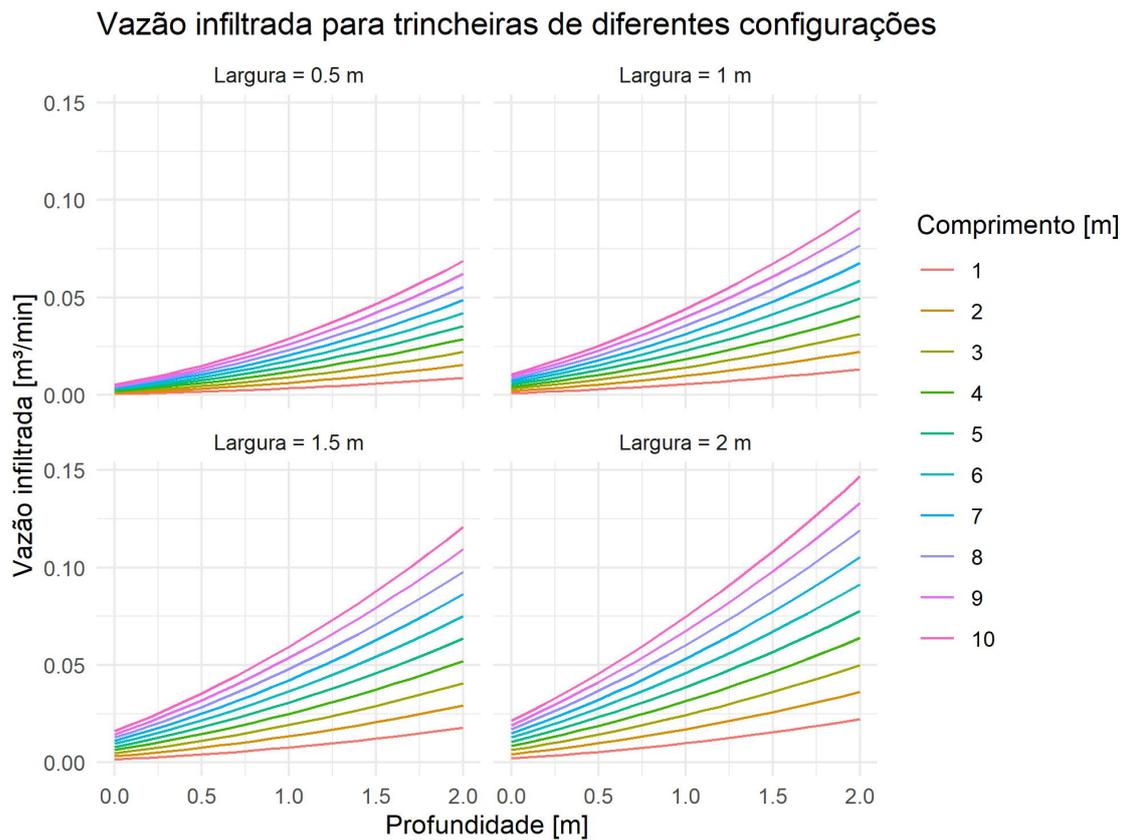


Figura 5.37: Vazão infiltrada para trincheiras de diferentes configurações geradas a partir dos resultados das simulações usando o FEFLOW.

5.4 CONSIDERAÇÕES GERAIS SOBRE OS RESULTADOS OBTIDOS PARA TRINCHEIRAS DE INFILTRAÇÃO

Esta seção do estudo teve como objetivo comparar três diferentes metodologias de representação de medidas de controle de escoamento com foco na infiltração: o método aplicando o SWMM, a metodologia sugerida por ADASA (2023a) e a abordagem empregando o FEFLOW. Cada uma das metodologias oferece perspectivas particulares para modelar processos de infiltração, com diferentes níveis de detalhamento e complexidade. A análise comparativa permitiu identificar as vantagens e limitações de cada abordagem, o que esclarece a aplicação prática em projetos de gestão de recursos hídricos e controle de escoamento.

Foi apresentado o processo de modelagem aplicando o SWMM na representação de medidas de controle de escoamento por mecanismos de infiltração. Verificou-se que a abordagem do modelo é simplificada e pode subestimar o impacto da infiltração em sistemas de

drenagem. O modelo representa o processo de infiltração como um fenômeno constante, que ocorre apenas pela área de fundo do dispositivo de drenagem, a uma taxa constante e igual à condutividade hidráulica saturada no solo. O modelo pode ser considerado conservador para o dimensionamento de dispositivos de controle que promovem infiltração e, assim, pode subestimar a importância das medidas de controle na fonte na quantificação de benefícios ecossistêmicos promovidos pela infiltração.

A aplicação da metodologia sugerida por ADASA (2023a) permitiu quantificar a infiltração na medida de controle. O método apresenta simplificações que facilitam o processo de dimensionamento, mas podem distanciar o volume infiltrado daquele que de fato ocorre nos dispositivos. O modelo aplica, assim como o SWMM, taxa de infiltração constante e igual à condutividade hidráulica saturada. A área considerada é, diferente do modelo SWMM, equivalente ao total da área de fundo somado à metade das áreas laterais. Verificou-se que, para o caso particular estudado, taxa de infiltração e volume infiltrado observados na quantificação sugerida por ADASA (2023a) são próximos do observado na modelagem empregando o SWMM, embora sejam resultantes de diferentes considerações. Ainda assim, a metodologia adota abordagem conservadora para a quantificação da infiltração, potencialmente subestimando a relevância das medidas de controle na fonte, assim como ocorre na modelagem usando o SWMM.

A modelagem empregando o FEFLOW apresentou resultados mais detalhados do processo de infiltração. O modelo, que conta com a possibilidade de modelar fluxos em meios porosos saturados e não saturados utilizando a equação de Richards (eq. 3.5), aplica métodos numéricos para solucionar os problemas, que podem ser configurados com base em variadas características físicas, condições iniciais e condições de contorno. As especificações mais detalhadas das características hidrológicas do problema permitiram o estudo de variadas condicionantes do processo de infiltração.

O estudo do caso geral possibilitou a comparação entre as diferentes metodologias aplicadas no trabalho. Foi possível observar o distanciamento entre os resultados obtidos para as metodologias simplificadas, que consideram a infiltração como um processo regido por uma taxa constante em área inferior à área de infiltração dos dispositivos, e o resultado da modelagem usando o FEFLOW. Verificou-se também que a taxa de infiltração tende a se estabilizar em curtos períodos de infiltração. Verificou-se que o valor de que a taxa de infiltração se aproxima não corresponde à condutividade hidráulica saturada. Isso acontece pois, além das forças matriciais, na modelagem utilizando o FEFLOW levou-se em consideração a carga hidráulica exercida pela coluna de água dentro do dispositivo de infiltração, como de fato ocorre no processo.

O grupo de cenários Percolação pelo fundo (SWMM) foi testado no FEFLOW com o ob-

jetivo de aproximar o cenário do modelo FEFLOW daquele que o SWMM considera em sua modelagem. Sabendo que o SWMM não considera a infiltração pelas paredes laterais e sim apenas pelo fundo, foram configurados cenários FEFLOW com tais condições de contorno, mas variando a profundidade do dispositivo. Ficou evidente a relevância da consideração da lâmina d'água na quantificação da infiltração de um dispositivo, que cresce com o aumento da profundidade. Foi verificada a proximidade entre a infiltração registrada pelo SWMM e pelo cenário de infiltração em dispositivo de 0 m de profundidade (infiltração direta no solo), o que aponta para a adequação da modelagem do SWMM quando a lâmina d'água no dispositivo é reduzida.

O grupo de cenários de diferentes condições de umidade inicial buscou caracterizar a relevância do processo de molhamento do solo no processo de infiltração dos dispositivos. Os resultados permitem concluir que a grande variação no processo de infiltração observado entre as metodologias simplificadas e a do FEFLOW ocorre majoritariamente pelo ganho de pressão estática e marginalmente pelo processo de molhamento do solo. Mas foi possível verificar que, para dispositivos de maior porte, em que se observe interface entre solo seco e solo saturado de maior área, a condição de saturação inicial pode ser significativa para o volume infiltrado.

Os cenários com variados níveis de lençol freático também levam a uma reflexão acerca da relevância do molhamento no processo de infiltração. O que se pode concluir é que, para as características de solo aplicadas, a capacidade de infiltração apresenta bom desempenho mesmo para casos de lençol freático acima do limite sugerido por ADASA (2023a). Para os cenários de infiltração dentro do limite de nível do lençol freático recomendado pela agência, de até 1,5 m de profundidade, a variação na capacidade de infiltração não pareceu gerar impactos que inviabilizam a adoção das medidas de controle.

O estudo da variação da condutividade hidráulica no fundo da trincheira de infiltração permitiu a simulação de diferentes estágios de colmatção do dispositivo. As simulações realizadas apontam para uma capacidade remanescente considerável mesmo no cenário de colmatção total do fundo, quando a vazão infiltrada passa a ser de cerca de 37% da observada no caso geral, o que corresponde à vazão que infiltra lateralmente no dispositivo. Contudo, o processo de colmatção pode se dar de maneiras variadas, envolvendo, inclusive, perdas na capacidade de infiltração nas laterais, que não foram consideradas na metodologia. Além disso, a colmatção é um processo que varia no tempo, sendo importante a consideração de variação temporal em estudos mais detalhados.

Os cenários que avaliaram as diferentes características do solo consideradas na modelagem que aplica a solução de Van Genuchten e Mualem (eq. 3.11) permitiram a conclusão de que o parâmetro cuja variação mais afeta os valores obtidos para infiltração, como esperado,

é a condutividade hidráulica saturada, quando comparada com os demais parâmetros. Dessa forma, é o parâmetro de maior importância a ser considerado nos processos de calibração de cenários de infiltração por modelagem com base na equação de Richards (eq. 3.5).

O estudo dos cenários de diferentes configurações físicas do dispositivo permitiu verificar que, para trincheiras de infiltração, é preferível o aumento de comprimento em relação à largura, por conta do ganho de infiltração em paredes laterais, e a profundidade em relação à largura e ao comprimento, pelo aumento da infiltração pelo aumento da taxa de infiltração devido à lâmina d'água. Considerando a limitação de espaço, enfrentada normalmente em áreas urbanizadas, a relação permanece, mostrando que a variação mais interessante é a da profundidade, seguida do comprimento.

O grupo de cenários de diferentes profundidades foi estudado a fim de investigar a influência do ganho de carga hidráulica no processo de infiltração. Observou-se o crescimento muito significativo dos valores de lâmina infiltrada com o aumento da profundidade dos dispositivos, tanto para a infiltração no fundo quanto para as laterais. Foi ajustado um polinômio aos dados da simulação de modo a criar uma função matemática simplificada para a tendência nos dados do caso estudado, o que permitiu a criação de ábacos para a descrição de trincheiras de variados comprimentos, larguras e profundidades.

5.5 MODELAGEM COMPUTACIONAL DE POÇO DE INFILTRAÇÃO USANDO O FEFLOW

Os resultados associados aos estudos do poço de infiltração do condomínio RK são registrados no presente capítulo. Tais resultados foram utilizados para a simulação de um cenário de operação de poço de infiltração no FEFLOW, o que permitiu a verificação da metodologia empregada. Foi possível, a partir do cenário estudado, realizar a calibração do cenário pelo ajuste da condutividade hidráulica saturada, que, em seguida, foi aplicada nas simulações de trincheira de infiltração do presente trabalho.

5.5.1 Procedimento experimental

O procedimento experimental foi realizado pela investigação da operação de um poço de infiltração com o objetivo de levantar dados para a calibração de modelagem de dispositivos de infiltração para um solo do DF. Para sua realização, foi utilizado um caminhão pipa e foi instalada uma régua linimétrica no poço de infiltração. O principal resultado do procedimento experimental são os registros de nível d'água e tempo de operação, apresentados na tabela 5.2 e que possibilitam a incorporação do cenário estudado no modelo computacional.

Tabela 5.2: Dados do experimento de enchimento do poço de infiltração - origem na superfície do solo

Tempo	Nível (m)						
00:00:00	-2,8	00:05:25	-0,8	01:10:19	-1,55	01:39:30	-0,8
00:00:13	-2,7	00:05:38	-0,75	01:17:25	-1,6	01:41:28	-0,85
00:00:22	-2,6	00:05:48	-0,7	01:24:00	-1,65	01:44:05	-0,9
00:00:36	-2,5	00:06:27	-0,75	01:33:26	-1,7	01:47:20	-0,95
00:00:57	-2,4	00:07:08	-0,8	01:34:50	-1,5	01:51:00	-1
00:01:00	-2,3	00:08:10	-0,85	01:34:58	-1,45	01:54:50	-1,05
00:01:22	-2,2	00:09:43	-0,9	01:35:04	-1,4	01:59:11	-1,1
00:01:36	-2,1	00:11:37	-0,95	01:35:14	-1,35	02:03:40	-1,15
00:01:50	-2	00:13:38	-1	01:35:20	-1,3	02:08:33	-1,2
00:02:05	-1,9	00:15:54	-1,05	01:35:28	-1,25	02:13:28	-1,25
00:02:22	-1,8	00:18:45	-1,1	01:35:40	-1,2	02:19:37	-1,3
00:02:36	-1,7	00:22:25	-1,15	01:35:46	-1,15	02:25:54	-1,35
00:02:48	-1,6	00:25:45	-1,2	01:35:54	-1,1	02:31:52	-1,4
00:03:08	-1,5	00:29:37	-1,25	01:36:04	-1,05	02:38:44	-1,45
00:03:27	-1,4	00:37:40	-1,29	01:36:12	-1	02:46:55	-1,5

00:03:45	-1,3	00:39:40	-1,3	01:36:24	-0,95	02:55:50	-1,55
00:04:08	-1,2	00:41:18	-1,31	01:36:31	-0,9	03:03:27	-1,6
00:04:22	-1,1	00:43:06	-1,32	01:36:43	-0,85	03:11:52	-1,65
00:04:42	-1	00:45:45	-1,35	01:36:55	-0,8	03:20:43	-1,7
00:04:55	-0,95	00:51:50	-1,4	01:37:05	-0,75		
00:05:04	-0,9	00:58:28	-1,45	01:37:16	-0,7		
00:05:12	-0,85	01:04:30	-1,5	01:38:00	-0,75		

O gráfico 5.38 apresenta os dados coletados em campo explicitando as fases de enchimento e esvaziamento do poço de infiltração. Pode-se observar com clareza que o enchimento, realizado por meio de bombeamento, é realizado em curto espaço de tempo, mas que pode ser bem descrito pelos dados de campo. Os dados de esvaziamento também são apresentados com clareza, mas se pode verificar facilmente o período de ocorrência da interferência no procedimento experimental. A figura 5.53 é um registro fotográfico do momento em que se verificou a ocorrência da interferência do ensaio. Trata-se de uma vazão afluyente no conduto de alimentação do poço de infiltração. Uma vez que não havia precipitação na bacia, e que a vazão foi baixa e por curto período de tempo, é possível que se inferir que se tratou de água proveniente de lavagem de calçadas coletadas pelo sistema de drenagem.

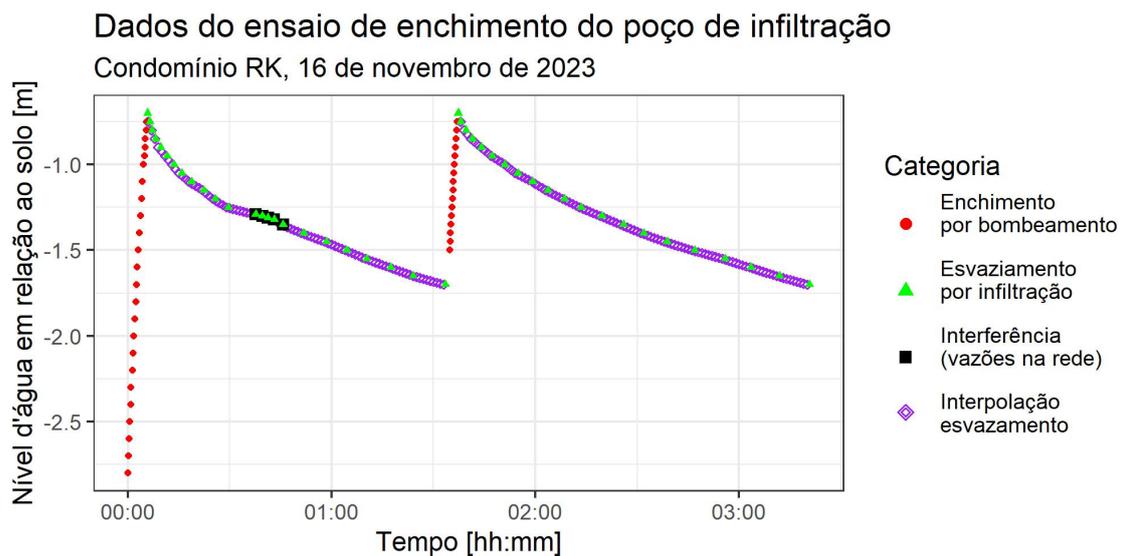


Figura 5.38: Dados do ensaio de enchimento do poço de infiltração.



Figura 5.39: Registro da ocorrência de vazões na rede durante o ensaio em campo.

Calculando taxa de infiltração e volume infiltrado no experimento para os dois eventos de esvaziamento por infiltração, são obtidos os valores apresentados nos gráficos das figuras 5.40 e 5.41.

Vazão infiltrada pelo poço de infiltração

Calculada a partir dos dados de campo

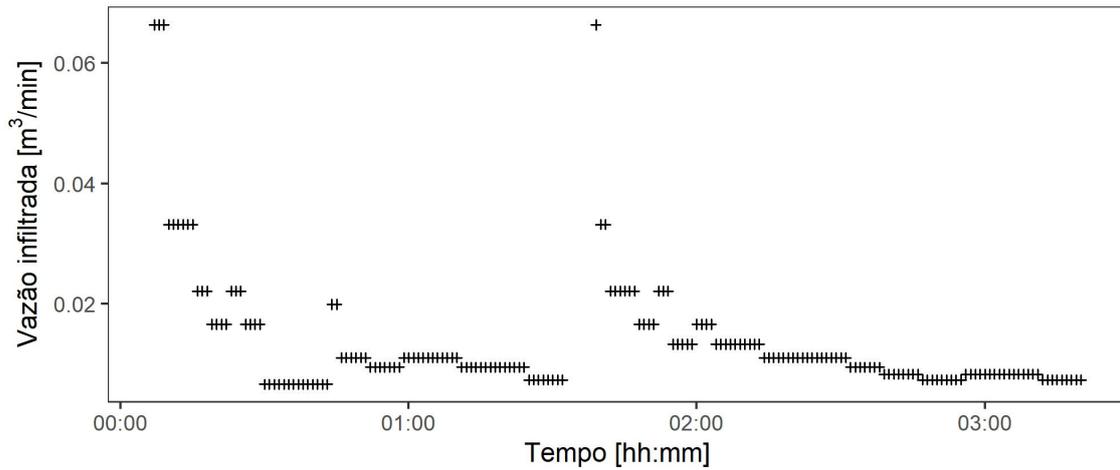


Figura 5.40: Vazões infiltradas calculadas a partir dos dados de esvaziamento de campo.

Volume infiltrado pelo poço de infiltração

Calculado a partir dos dados de campo

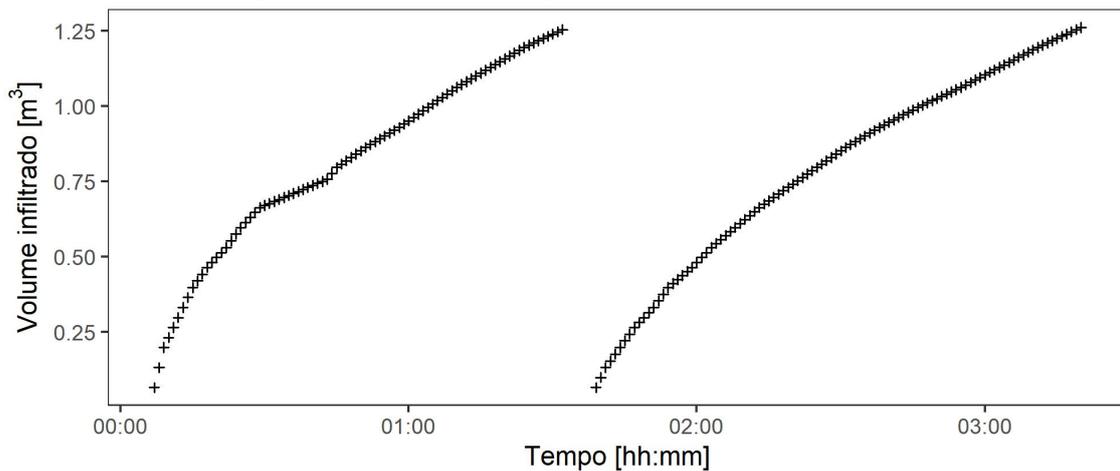


Figura 5.41: Volumes infiltrados calculados a partir das vazões infiltradas.

Pode-se verificar com clareza o impacto da interferência registrada no ensaio de campo, na primeira curva das figuras 5.40 e 5.41. Ainda assim, é possível verificar uma tendência semelhante entre os dois eventos de esvaziamento registrados, com valores próximos de taxa de infiltração e de volumes totais infiltrados.

5.5.2 Configuração dos cenários RK usando FEFLOW

Foram desenvolvidas duas configurações de malhas para a discretização do cenário RK utilizando o FEFLOW. Uma primeira configuração, simplificada e com menos elementos na malha, foi utilizada para a investigação preliminar de uma faixa de calibração da condutividade hidráulica saturada. A intenção foi a de realizar o mapeamento de uma faixa de valores para a calibração utilizando, inicialmente, menor exigência computacional. Encontrada a faixa de valores de interesse, foi utilizado um cenário com malha de elementos finitos mais detalhada, a fim de caracterizar com maior fidelidade os fenômenos de infiltração no solo.

A configuração da malha simplificada desenvolvida utilizando o FEFLOW para a representação do cenário RK é apresentada nas figuras 5.42, 5.43. A figura 5.42 apresenta a configuração da *supermesh* em diferentes áreas. O domínio da malha foi dividido em subdomínios com o interesse de se promover um maior refinamento da malha de elementos finitos nas regiões centrais da malha. A figura 5.43 traz a configuração da malha de elementos finitos para uma camada do cenário, com maior refinamento dos elementos nas áreas centrais da malha e já incorporando a cavidade no local do poço de infiltração, no ponto central da malha. A malha tridimensional simplificada contou com 81.856 elementos e 44.127 nós.

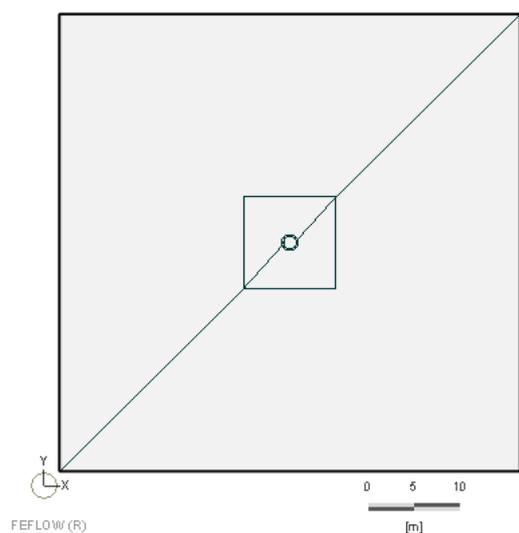


Figura 5.42: Cenário RK simplificado usando o FEFLOW - *Supermesh*

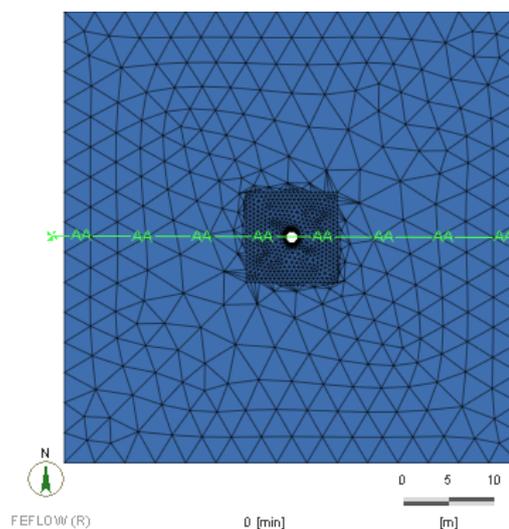


Figura 5.43: Cenário RK simplificado usando o FEFLOW - Malha de elementos finitos

O perfil do solo para as condições iniciais do cenário observado no poço RK é apresentado na figura 5.44. Os valores dos parâmetros do solo utilizados foram os detalhados na tabela 4.18. A distribuição de camadas seguiu a descrição da tabela 4.19. A variação da saturação no solo permite verificar a condição de solo saturado na profundidade de 2.8 m,

como observado em campo, e o equilíbrio entre o nível d'água e a superfície do solo.

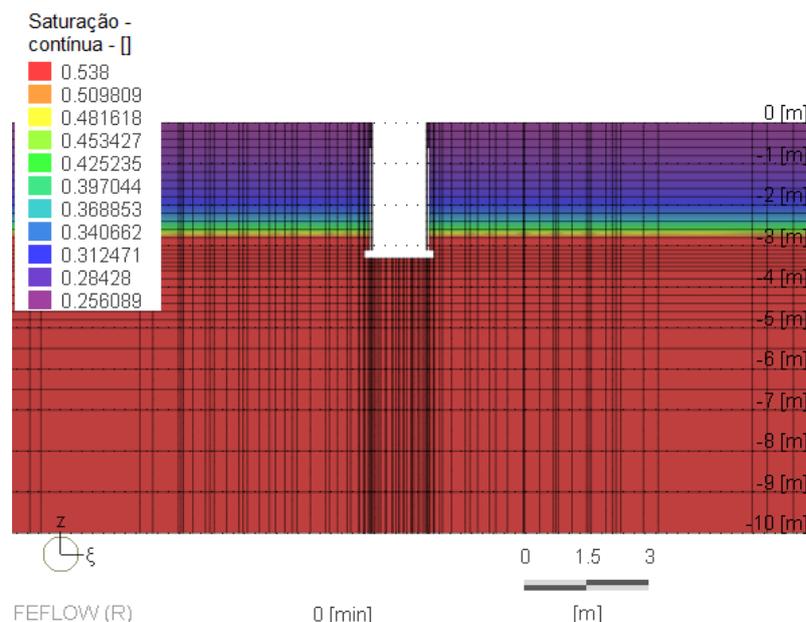


Figura 5.44: Cenário RK no FEFLOW - Corte AA do cenário com dados iniciais definidos

A fim de verificar a influência da discretização da malha nos resultados, uma vez definida a faixa de valores prováveis para a calibração do K_{Sat} , foi configurada uma discretização com malha mais refinada. A malha refinada, apresentada nas figuras 5.45, 5.46 e 5.47, foi utilizada para calibração e verificação. A configuração final da malha tridimensional foi composta por 1.246.488 elementos e 658.601 nós. Assim como na malha simplificada, a *supermesh*, apresentada na Figura 5.45 foi configurada com subdivisões no domínio da malha, de modo que fosse possível o maior refinamento em áreas mais centrais da malha. É possível perceber a maior densidade de elementos na malha do cenário refinado quando comparada com a malha do cenário simplificado, especialmente nas áreas centrais do domínio. A configuração das camadas de profundidade da malha tridimensional, observada na Figura 5.47, seguiu, como no cenário simplificado, os valores apresentados na tabela 4.19 e os valores de parâmetros iniciais utilizados foram os detalhados na tabela 4.18.

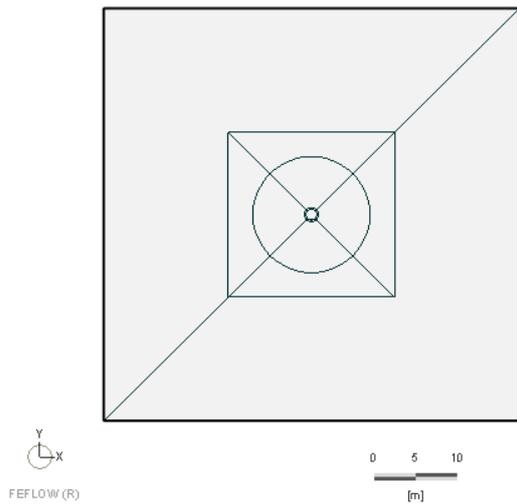


Figura 5.45: Cenário RK refinado no FEFLOW - *Supermesh*

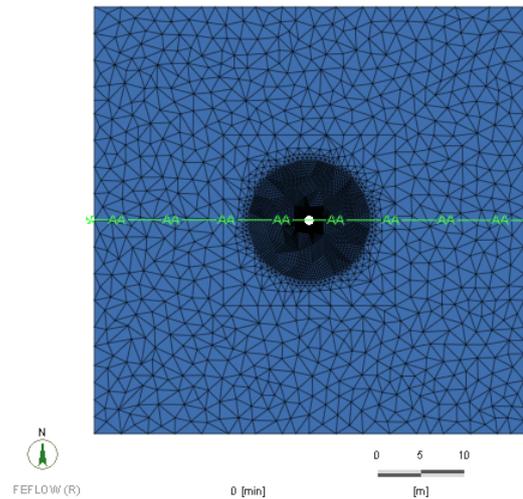


Figura 5.46: Cenário RK refinado no FEFLOW - Malha de elementos finitos

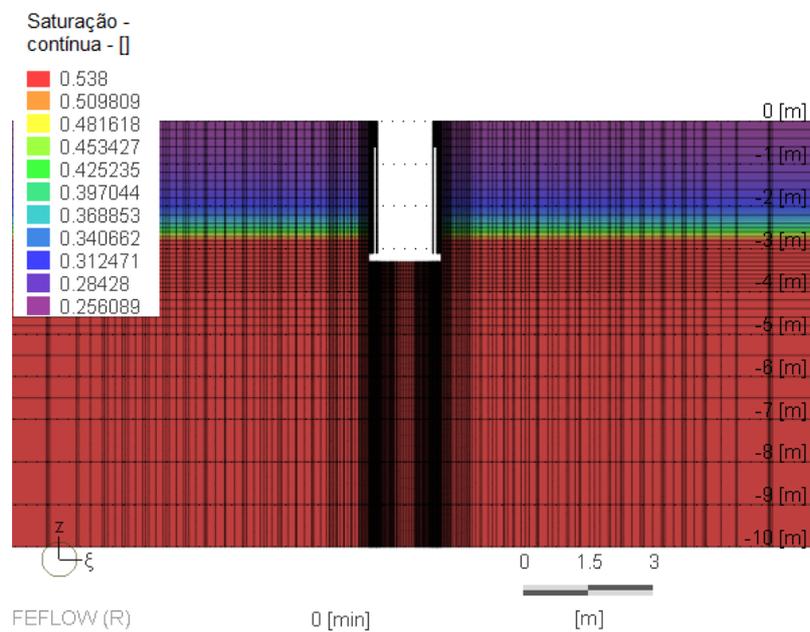


Figura 5.47: Cenário RK refinado no FEFLOW - Corte AA do cenário com dados iniciais definidos

5.5.3 Calibração e verificação do poço RK com malha simplificada

Os testes para calibração do cenário preliminar partiram do valor de 14 m/d para a condutividade hidráulica saturada, com base no trabalho de Lima (2010). Verificado que o cenário apresentava grande distância do comportamento observado em campo, foram testados valo-

res de 1,4 a 0,9 m/d, que apresentaram maior proximidade com o comportamento registrado em campo. Os valores estão, portanto, a uma ordem de grandeza do valor encontrado por Lima (2010). A imagem 5.48 traz resultados da aplicação de diferentes valores de K_{Sat} no cenário RK simplificado usando o FEFLOW. Para valores abaixo de 0,9 m/d, o ajuste passou a apresentar piores desempenhos em comparação com valores observados em campo, portanto não são apresentados.

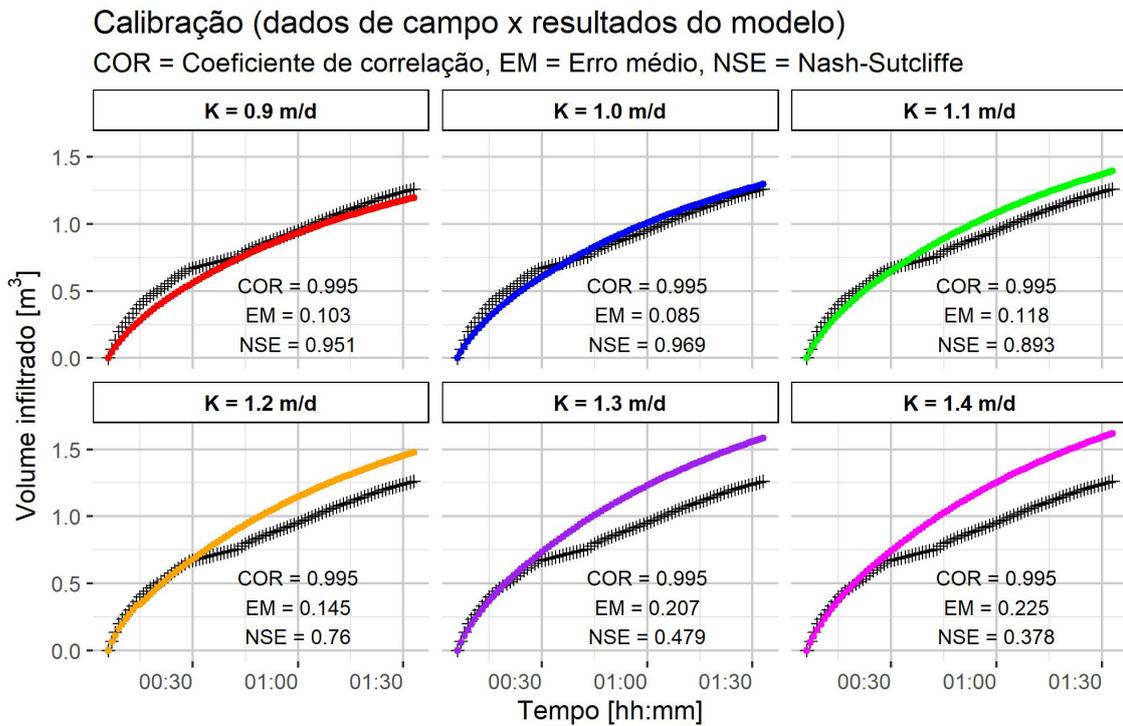


Figura 5.48: Cenário RK no FEFLOW - Calibração preliminar do volume infiltrado.

O comportamento observado nos resultados associados à vazão infiltrada são semelhantes aos observados nos volumes infiltrados, como se pode observar na figura 5.49. Valores de condutividade hidráulica saturada entre 0,9 e 1,4 m/d apresentaram bons desempenhos, com resultados próximos para os três coeficientes calculados na calibração.

Calibração (dados de campo x resultados do modelo)

COR = Coeficiente de correlação, EM = Erro médio, NSE = Nash-Sutcliffe

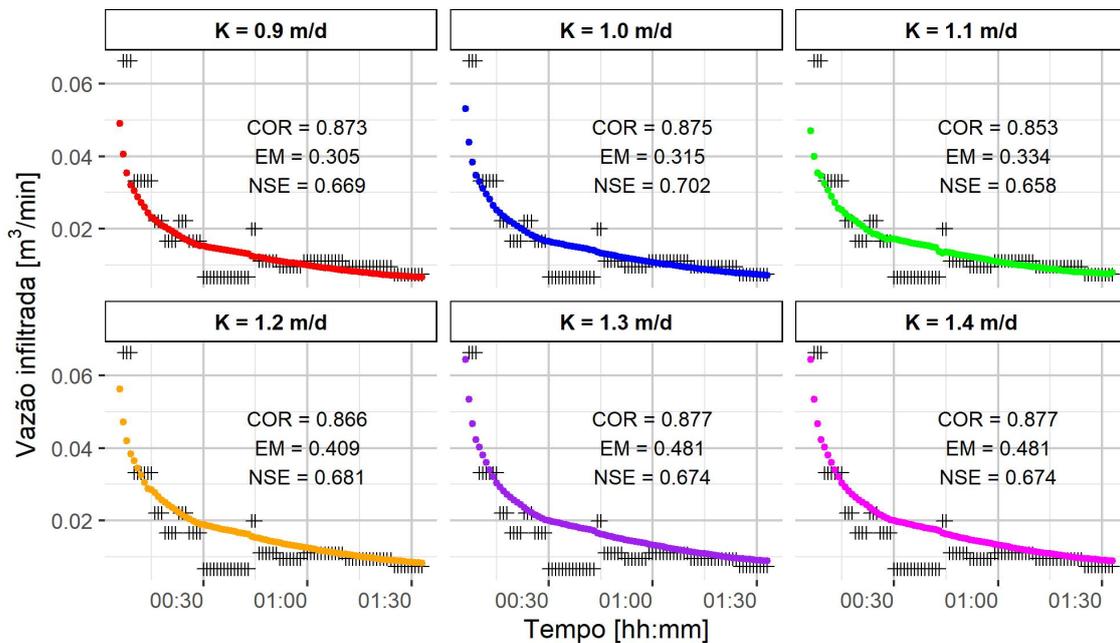


Figura 5.49: Cenário RK no FEFLOW - Calibração preliminar da vazão infiltrada.

Diante do observado nas figuras 5.48 e 5.49, foi possível verificar que o ajuste para valores entre 1.0 e 1.2 m/d apresentam melhores resultados quando comparados com os demais. O valor de 0,9 m/d também apresentou um bom ajuste, o que pode ser verificado em ambas figuras. Contudo, há de se considerar a interferência observada em campo e seu impacto na calibração. A inflexão observada na curva de campo, que se inicia por volta dos 30 minutos de experimento, faz com que o volume infiltrado acumulado sofra uma redução, mas tal comportamento é decorrente da interferência.

O mesmo comportamento, de redução de valores observados experimentalmente, pode ser observado na curva experimental das vazões infiltradas. As baixas vazões infiltradas entre 30 e 40 minutos de experimento não refletem o comportamento real da infiltração local, mas a ocorrência da vazão indesejada na rede. Tal interferência afeta o ajuste dos cenários. Assim, a curva de $K = 0,9$ m/d pode parecer adequada, mas provavelmente subestima a infiltração. Por conta dessa incerteza, optou-se por escolher, para a calibração do cenário preliminar, não apenas um valor de K , mas os valores entre 1.0 e 1.2 m/d, de modo que se pudesse escolher o melhor ajuste com base na curva de verificação, em que são registradas observações experimentais sem interferências.

O ajuste das curvas na verificação, que se pode observar nas figuras 5.50 e 5.51, aponta para a maior adequação do cenário que aplica $K = 1,1$ m/d quando comparado com os valores

registrados em campo. O ajuste apresenta alto valor de coeficiente de correlação, o que sugere que o modelo aplicado realiza uma boa representação da infiltração, principalmente quando avaliado o volume infiltrado. Os coeficientes Erro Médio e Nash-Sutcliffe permitem verificar que o valor de K que mais se aproxima do que se observou em campo é o de 1,1 m/d. O valor foi escolhido, portanto, para a calibração e verificação do cenário refinado.

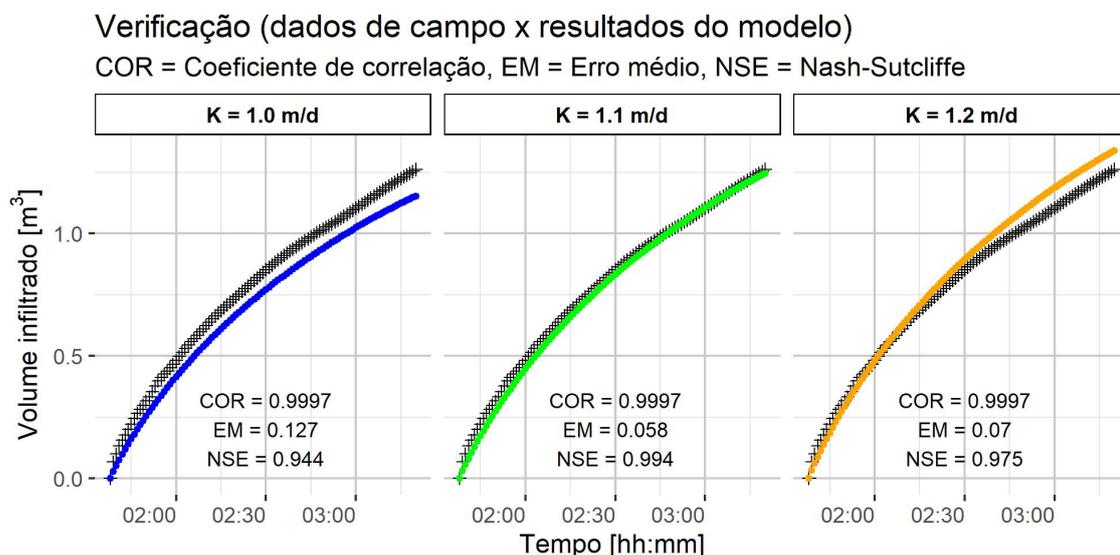


Figura 5.50: Cenário RK no FEFLOW - Verificação preliminar do volume infiltrado.

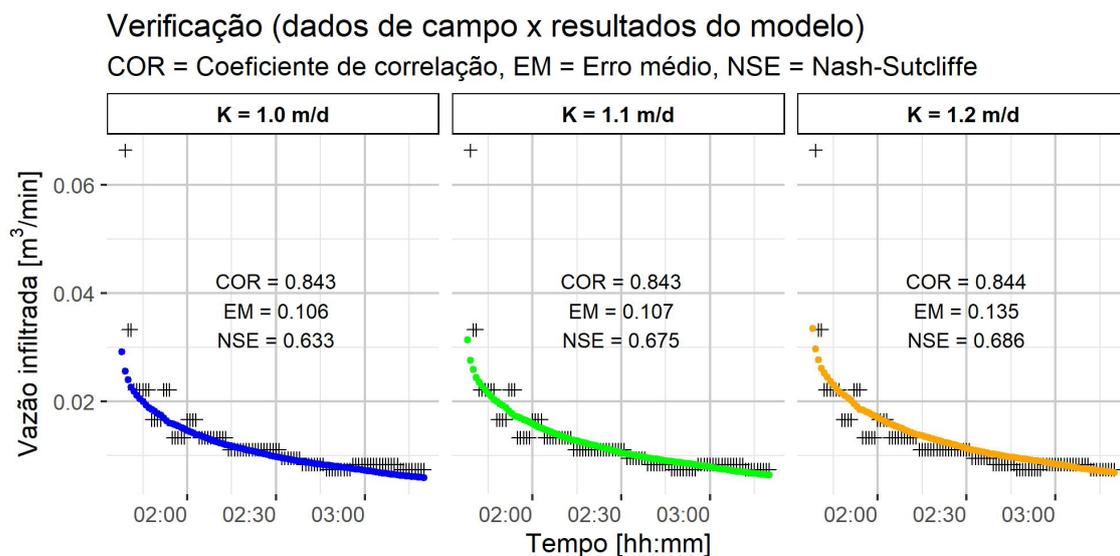


Figura 5.51: Cenário RK no FEFLOW - Verificação preliminar da vazão infiltrada.

5.5.4 Calibração e verificação do poço RK com malha refinada

Os resultados da modelagem da refinada com condutividade hidráulica saturada em 1,1 m/d, apresentados na Figura 5.52, têm comportamento semelhante ao observado no cenário simplificado. O cenário apresenta, na etapa de calibração, bom ajuste mas é possível verificar pontos de divergência com os dados experimentais, que apresentam interferência.

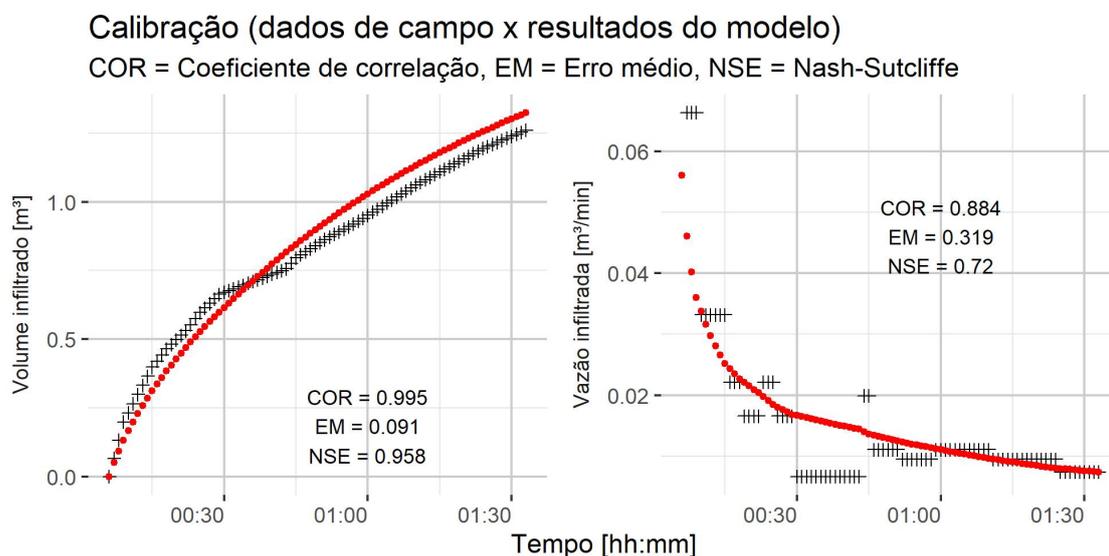


Figura 5.52: Cenário RK no FEFLOW - Calibração de volume e vazão aplicando o cenário refinado.

É importante observar que a medição em campo realizada foi o nível de água no poço. Dessa forma, o volume infiltrado acumulado calculado tem boa precisão. No entanto, as vazões infiltradas estimadas pelas diferenças de volume infiltrado e o tempo entre leituras levam a valores oscilantes e mais imprecisos. Esse fato é observado também no cálculo experimental da infiltração, em que a capacidade de infiltração é estimada a partir do volume total infiltrado. Nesse caso, Schulz (2012) recomenda que a capacidade de infiltração seja calculada pelas tangentes à curva de altura de infiltração acumulada ao invés de utilizar o método diferencial, como feito neste trabalho.

Já para a etapa de verificação, que conta com resultados experimentais sem interferências de vazões externas, o ajuste da curva de volumes infiltrados apresenta bons valores para os três coeficientes. Os resultados alcançados apontam para um bom desempenho da metodologia empregada na modelagem de processos de infiltração em medidas compensatórias. O coeficiente de correlação próximo de uma unidade sugere que há forte relação linear entre os valores observados em campo e os valores preditos pelo modelo. Com relação ao baixo erro médio observado, esse indica que, em média, as previsões do modelo estão próximas dos va-

lores observados nos dados de campo, o que aponta para a capacidade do modelo de prever corretamente novos dados. O alto valor de Nash-Sutcliffe também indica que o modelo pode apresentar bom desempenho para prever os fenômenos observados.

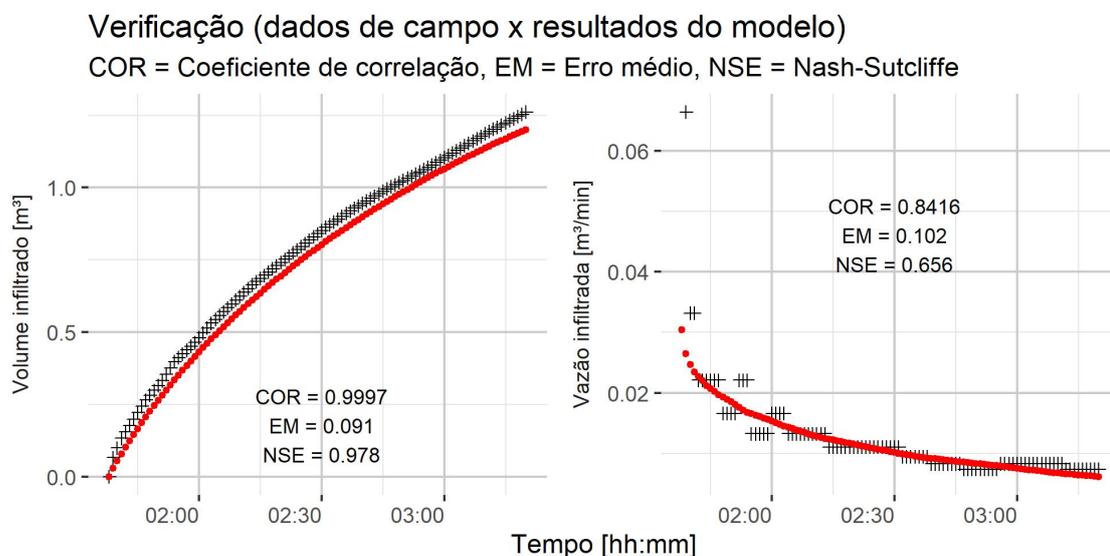


Figura 5.53: Cenário RK no FEFLOW - Verificação de volume e vazão aplicando o cenário refinado.

5.5.5 Comparação dos resultados utilizando as malhas simplificada e refinada

Foram realizadas simulações aplicando diferentes malhas, uma malha mais refinada e uma malha mais simplificada, com o objetivo de verificar o efeito do refinamento da malha na representação dos fenômenos. O que se observa na figura 5.54 é que os cenários simplificado e refinado produzem resultados muito semelhantes, o que é um indicativo de que a malha simplificada já apresenta discretização suficiente para a representação adequada do fenômeno.

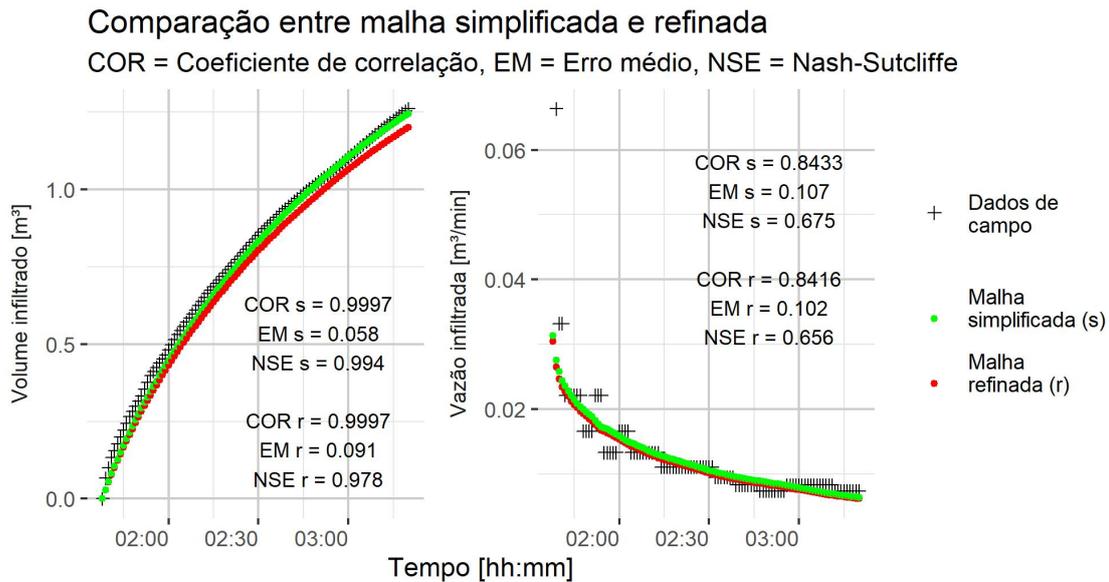


Figura 5.54: Comparação entre a verificação realizada pela malha simplificada e a refinada.

Para o volume infiltrado, COR para ambas as malhas é 0.9997, indicando uma correlação quase perfeita com os dados de campo. Para a vazão infiltrada, COR é aproximadamente 0.8433 para o cenário simplificado e 0.8416 para o refinado, mostrando uma alta correlação em ambos os casos, mas não tão próxima quanto no caso do volume infiltrado. Em função da forma como foi determinada a vazão experimental, o NSE para ambos os cenários também é muito próximo, com valores de 0.994 e 0.978 para o volume infiltrado, e 0.675 e 0.656 para a vazão infiltrada. Valores de NSE próximos de 1 indicam um bom ajuste do modelo aos dados de campo.

Assim, os resultados observados com as duas malhas sugerem que, para o conjunto de dados e a situação em questão, a malha simplificada é suficiente para representar o fenômeno. Isso justifica o uso do cenário simplificado em futuros estudos ou aplicações, economizando tempo e recursos sem comprometer a precisão dos resultados.

5.5.6 Diferentes configurações

O estudo das diferentes configurações para poços de infiltração teve como objetivo analisar a operação do poço RK e compará-la à operação de um poço convencional. O que se observa pela análise dos gráficos de volumes infiltrados na Figura 5.55 e de vazões infiltradas, na figura 5.56, é que as curvas dos dois poços são muito semelhantes. A base dos dispositivos é responsável pela infiltração de cerca de 24% do volume infiltrado no poço convencional e cerca de 22% no poço RK após duas horas de operação. O resultado aponta

para um interesse especial para a aplicação de poços de infiltração para situações em que a colmatação do fundo é um risco.

Volumes infiltrados por poços de diferentes configurações

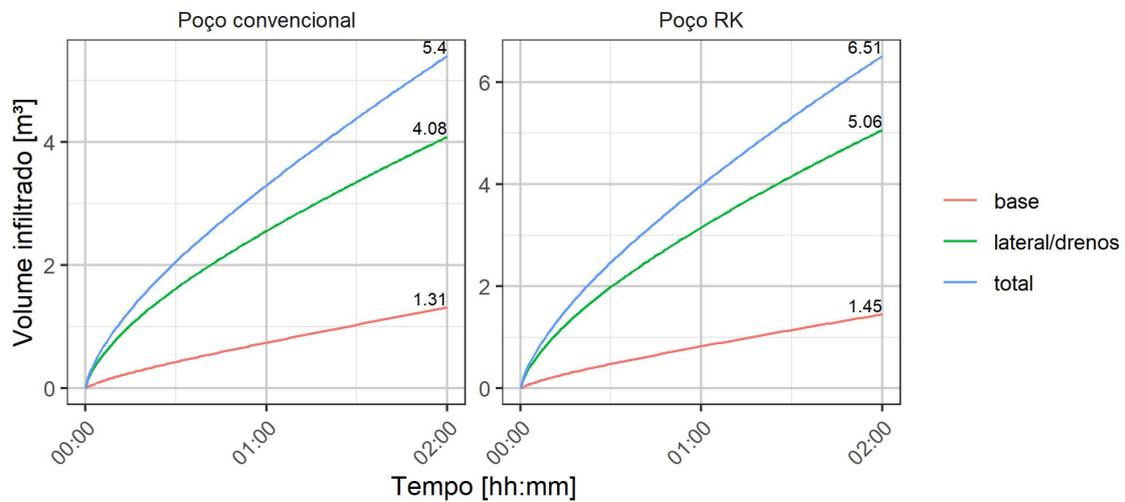


Figura 5.55: Comparação entre volumes infiltrados usando o modelo FEFLOW para poços com diferentes configurações.

Vazões infiltradas por poços de diferentes configurações

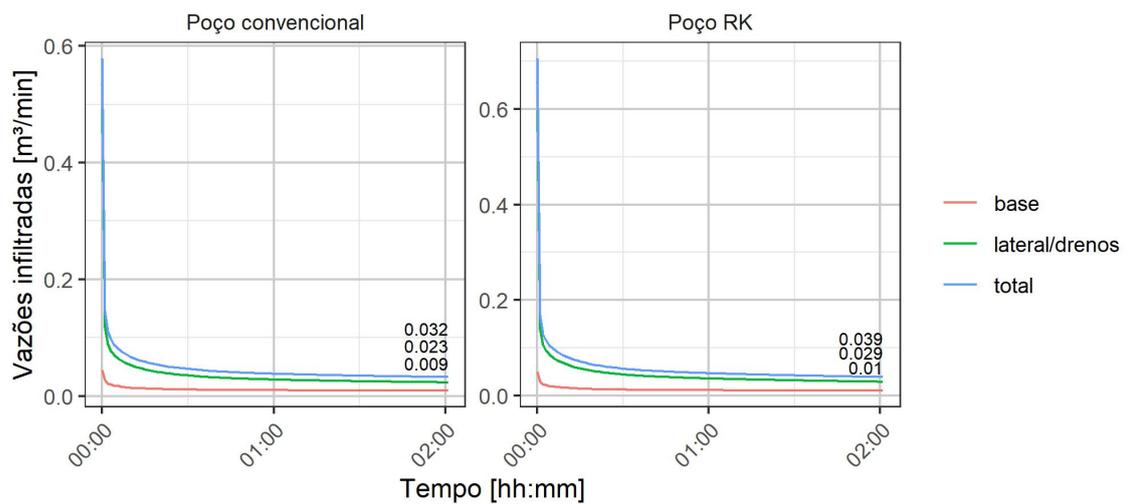


Figura 5.56: Comparação entre vazões infiltradas usando o modelo FEFLOW para poços com diferentes configurações.

A Figura 5.56 apresenta os resultados de infiltração para os diferentes tipos de poços, pode-se verificar que comportamentos semelhantes entre os dispositivos são observados.

Após 2 horas de simulação, a base do poço convencional é responsável pela infiltração de cerca de 28% da vazão. Já para o poço RK a base infiltra, no mesmo momento, cerca de 25% da vazão. Percebe-se que a importância da infiltração pela base aumenta com o decorrer do processo de operação. O comportamento se deve ao processo de molhamento do solo, que ocorre rapidamente na base, promovendo uma rápida estabilização da taxa de infiltração nessa região, e mais lentamente nas áreas que circundam o poço, uma vez que são áreas maiores e sob influência de variada carga de pressão hidrostática.

As figuras 5.55 e 5.56 mostram que o volume infiltrado e a vazão infiltrada do poço RK após 2 horas de operação são superiores aos valores observados no poço convencional. É importante perceber, contudo, que o poço RK conta com drenos laterais que aumentam a área disponível para infiltração no dispositivo e que, também, a base desse poço é maior do que a do poço convencional. Pela divisão entre a vazão de infiltração e a área disponível para infiltração, tem-se a lâmina infiltrada. A área lateral do poço convencional foi calculada em $10,21 \text{ m}^2$ e sua área da base é de $1,33 \text{ m}^2$. As áreas laterais dos 8 drenos do poço RK somam $6,3 \text{ m}^2$, e sua área da base é de $5,54 \text{ m}^2$. A Figura 5.57 traz os resultados na forma de lâmina infiltrada.

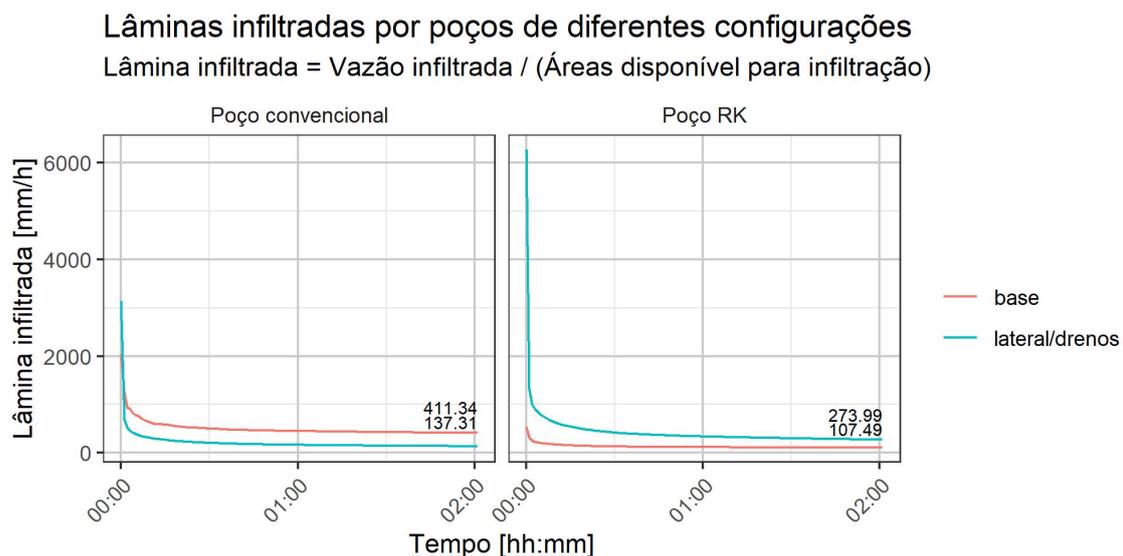


Figura 5.57: Comparação entre lâminas infiltradas usando o modelo FEFLOW para poços com diferentes configurações.

O poço convencional apresenta lâmina infiltrada cerca de 3 vezes mais alta para a base do dispositivo do que para a infiltração que ocorre na lateral. Isso se deve à pequena área da base, que, mesmo sendo responsável pela infiltração de menos de um quarto do volume infiltrado pelo dispositivo após 2 horas de operação, acaba alcançando um alto valor. Para o poço RK, a base de maior área disponível para infiltração não gera uma lâmina infiltrada tão alta. No

caso do poço RK, os drenos apresentam resultado interessante, que mostra que a menor área disponível para infiltração é capaz de gerar vazões elevadas. O comportamento pode estar relacionado à disposição espaçada dos drenos laterais do dispositivo, que potencializam o efeito do molhamento do solo que circunda o poço.

5.5.7 Diferentes profundidades do poço RK

O estudo das diferentes profundidades para poços de infiltração teve como objetivo analisar a variação na operação dos poços em relação ao volume e às taxas de infiltração pela base e pelos drenos laterais, considerando diferentes profundidades. Como mostrado nos gráficos de volumes infiltrados na Figura 5.58, observa-se que, assim como no caso das trincheiras de infiltração, com a diminuição da profundidade, a infiltração pela base se torna mais significativa na operação do poço de infiltração. Para um poço com 1 m de profundidade, o volume infiltrado pela base representa aproximadamente 85% do volume total infiltrado ao final da simulação de 2 horas. Para o poço de 3 m de profundidade, o volume infiltrado pela base ao final das 2 horas de simulação é muito próximo daquele infiltrado pelos drenos. Já para o poço de 5 m de profundidade, os drenos apresentam maior relevância quanto aos volumes infiltrados, passando a representar cerca de 65%.

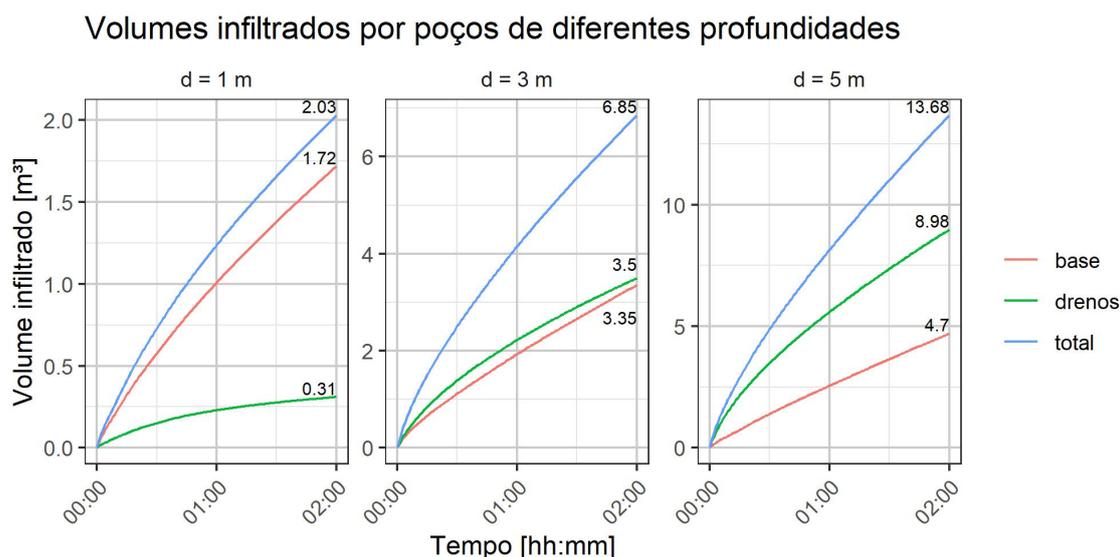


Figura 5.58: Comparação entre volumes infiltrados usando o modelo FEFLOW para poços com diferentes profundidades.

O comportamento observado na operação dos poços de diferentes profundidades apresenta o mesmo comportamento daquele registrado para as trincheiras. O aumento da importância dos drenos na operação do dispositivo pode ser explicado pela relevância que a pressão

exercida pela coluna d'água passa a ter nas paredes conforme cresce a profundidade. Com o aumento da profundidade, a pressão estática passa a intensificar a infiltração nos pontos mais profundos dos drenos, assim como ocorre na base do dispositivo. Além disso, tem-se também o aumento da área de infiltração nos drenos laterais, o que não acontece com a área da base.

A Figura 5.59 apresenta os resultados de vazões infiltradas para os cenários de diferentes profundidades. É possível verificar os diferentes patamares alcançados por cada um dos cenários. No cenário com poço de 1 m de profundidade, a taxa de infiltração da base comanda o processo de infiltração. No cenário com poço de 3 m de profundidade, drenos laterais e base apresentam vazões infiltradas em taxas muito próximas. É importante registrar que os valores próximos de vazões infiltradas são referentes a áreas de diferentes magnitudes. No caso do poço de 3 metros de profundidade, a base do poço corresponde a uma área de aproximadamente $3,44 \text{ m}^2$, enquanto a área total de parede dos drenos laterais corresponde a cerca de $7,5 \text{ m}^2$.

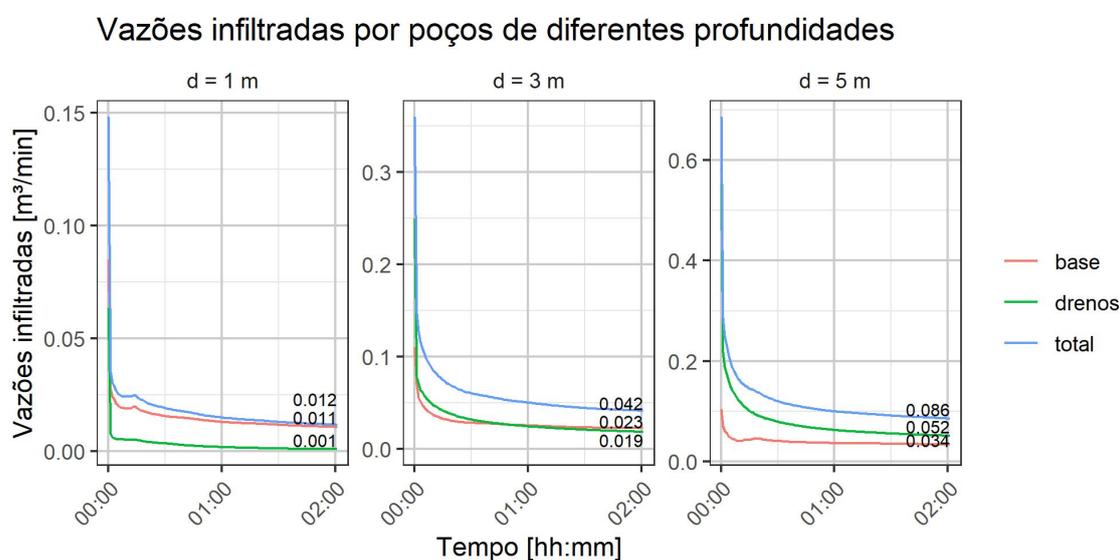


Figura 5.59: Comparação entre vazões infiltradas usando o modelo FEFLOW para poços com diferentes profundidades.

A Figura 5.60 traz os resultados na forma de lâmina infiltrada, obtida a partir da divisão entre as vazões infiltradas observadas nos drenos laterais e na base de cada poço pelas suas respectivas áreas. Pode-se, por meio das curvas, comparar a capacidade de infiltração com a condutividade hidráulica em cada região do dispositivo. Para alcançar tal relação, admite-se que a lâmina infiltrada nos dispositivos é constante e equivale aos valores alcançados ao final das simulações.

Lâminas infiltradas por poços de diferentes profundidades

Lâmina infiltrada = Vazão infiltrada / (Áreas da base ou área dos drenos)

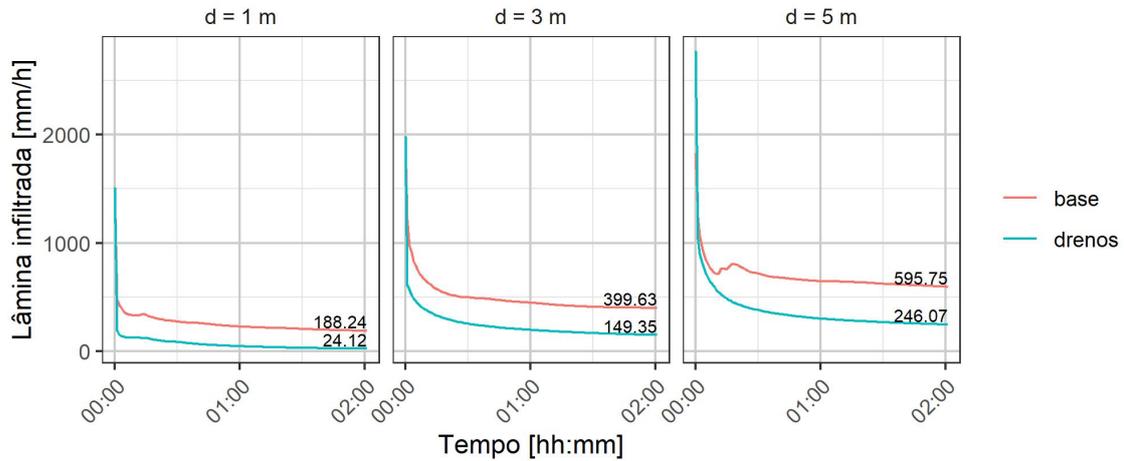


Figura 5.60: Comparação entre lâminas infiltradas usando o modelo FEFLOW para poços com diferentes profundidades.

A tabela 5.3 apresenta as relações observadas entre taxas de infiltração e condutividade hidráulica saturada para as diferentes regiões e os diferentes cenários.

Tabela 5.3: Relação entre condutividade hidráulica e condutividade equivalente de cada região para diferentes profundidades do dispositivo.

Cenário	Região	Relação
Profundidade 1 m	Base	$K_{equivalente} = 4,11 \times K_{Sat}$
Profundidade 3 m	Base	$K_{equivalente} = 8,73 \times K_{Sat}$
Profundidade 5 m	Base	$K_{equivalente} = 13,01 \times K_{Sat}$
Profundidade 1 m	Drenos	$K_{equivalente} = 0,53 \times K_{Sat}$
Profundidade 3 m	Drenos	$K_{equivalente} = 3,26 \times K_{Sat}$
Profundidade 5 m	Drenos	$K_{equivalente} = 5,37 \times K_{Sat}$

Pode-se observar o crescimento dos valores de lâmina infiltrada com o aumento da profundidade dos dispositivos, tanto para a infiltração na base quanto para os drenos, assim como no caso das trincheiras de infiltração, como mostrado nas figuras 5.61 e 5.62.

Relação entre $K_{equivalente}$ e profundidade - Base

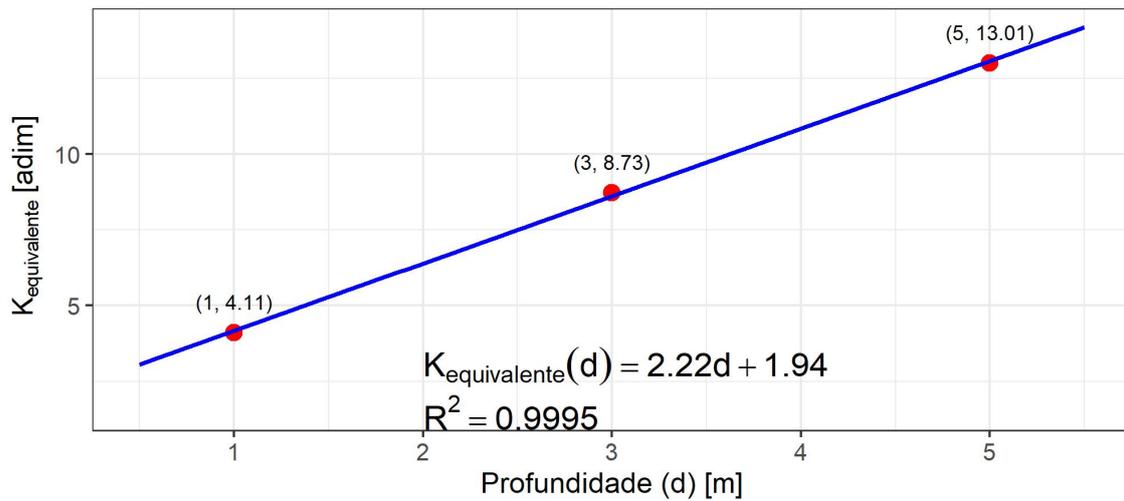


Figura 5.61: $K_{equivalente}$ do fundo em função da profundidade do dispositivo. Em que $K_{equivalente}$ é um fator multiplicador de K_{Sat} .

Relação entre $K_{equivalente}$ e profundidade - Drenos

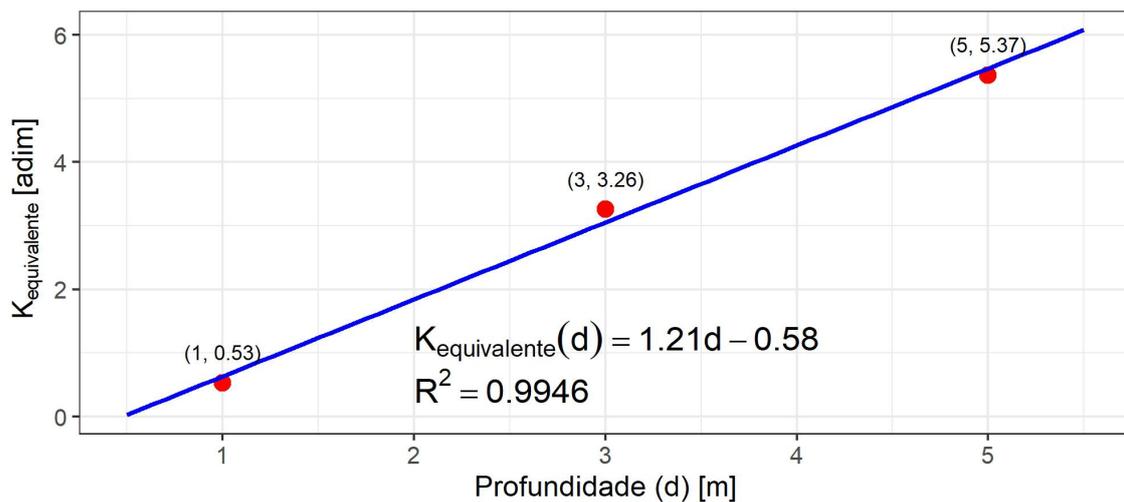


Figura 5.62: $K_{equivalente}$ das laterais em função da profundidade do dispositivo. Em que $K_{equivalente}$ é um fator multiplicador de K_{Sat} .

Aplicando ajuste linear aos pontos, é possível estimar a capacidade de infiltração para dispositivos de diferentes formatos. A curva resultante dessa operação é apresentada na Figura 5.63.

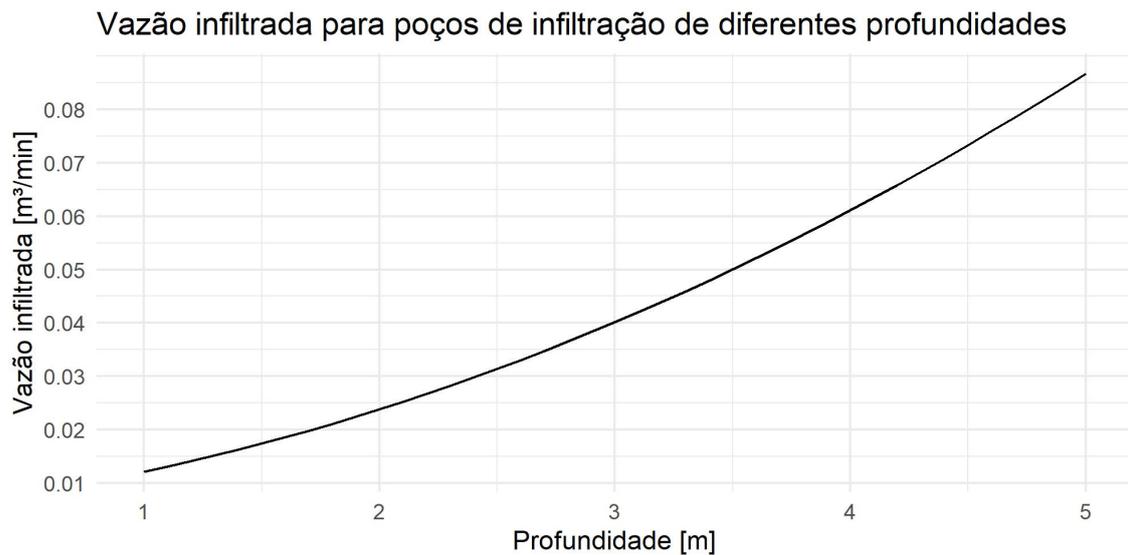


Figura 5.63: Curva de vazão infiltrada para poços de diferentes profundidades com base nas relações de $K_{equivalente}$.

Conhecer a capacidade de infiltração de poços de infiltração em função da profundidade pode ser interessante para a gestão de recursos hídricos e para o melhor conhecimento dos benefícios associados ao uso dos dispositivos. Poços de infiltração podem ser usados na recarga de aquíferos, reduzindo o escoamento superficial em áreas urbanas. A infiltração de água através do solo atua como um filtro natural, melhorando a qualidade da água recarregada e sustentando ecossistemas dependentes da água subterrânea. As informações podem servir ainda para atender a políticas ambientais, obter permissões regulatórias, e integrar poços de infiltração no planejamento urbano para criar ocupações mais resilientes aos efeitos da urbanização. No entanto, em terrenos com declividade acentuada, é importante analisar as condições do solo e sua susceptibilidade à erosão subterrânea.

5.6 RELAÇÕES ENTRE ÁREA CONSTRUÍDA E ÁREA OCUPADA POR MEDIDAS DE CONTROLE POR INFILTRAÇÃO

A determinação da área necessária para medidas de controle de escoamento, como trincheiras de infiltração, pode ser alcançada correlacionando a taxa de infiltração dessas medidas com o volume de escoamento gerado por áreas impermeáveis. Para isso, deve-se calcular o volume escoado, o que pode ser feito aplicando o método racional. Em seguida, a área superficial necessária da medida de infiltração (A_i) pode ser determinada com base nas relações encontradas entre condutividade hidráulica e profundidade.

Para ilustrar a metodologia, toma-se uma área impermeável de 100 m^2 . Aplicando o tempo de retorno de 2 anos e a duração de 5 minutos, pode-se calcular a intensidade crítica de uma chuva pela curva intensidade-duração-frequência (idf) de Brasília, apresentada na equação 3.1. A intensidade resultante é de $156,7 \text{ mm/h}$.

$$I = \frac{1574,70 \cdot T_R^{0,207}}{(d + 11)^{0,884}}$$

$$I = \frac{1574,70 \cdot (2)^{0,207}}{(5 + 11)^{0,884}} = 156,7 \text{ mm/h}$$

Aplicando o método racional com C de 0,95, que corresponde a alta impermeabilização, podemos estimar a vazão resultante.

$$Q = \frac{c \cdot i(\text{mm/h}) \cdot A(\text{ha})}{360}$$

$$Q = \frac{0,95 \cdot 156,7 \cdot 0,01}{360} = 4,13 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s}$$

Sabendo que a vazão de restrição do DF é de $24,4 \text{ l/s/ha}$, tem-se que a vazão de restrição para uma área de 100 m^2 seria de $2,44 \cdot 10^{-4} \text{ m}^3/\text{s}$. Assim, pode-se obter a vazão adicional da área impermeabilizada no pico de cheia pela diferença entre a vazão total e a vazão de restrição.

$$Q_{\text{adicional}} = Q_{\text{tot}} - Q_{\text{restr}}$$

$$Q_{\text{adicional}} = 4,13 \cdot 10^{-3} - 2,44 \cdot 10^{-4} = 3,9 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s}$$

Fixando o objetivo de realizar a infiltração total da vazão adicional promovida pela cheia

podem ser propostas configurações em função da taxa de infiltração máxima desejada, de $3,9 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s}$, que corresponde a $0,234 \text{ m}^3/\text{min}$. No capítulo 4.4.2 foi calculada a taxa de infiltração em trincheiras apenas pelo fundo. No caso de infiltração no solo natural, verificou-se que a taxa se aproxima da condutividade hidráulica saturada, com a pequena variação correspondente ao processo molhamento do solo. A taxa de infiltração em uma área de 10m^2 foi de $0,008 \text{ m}^3/\text{min}$. Estendendo pela simples multiplicação essa área para 100m^2 , alcançamos uma vazão de $0,08 \text{ m}^3/\text{min}$. Interessante notar que o valor é consideravelmente menor do que a taxa de infiltração alcançada pelo cálculo de vazão adicional pela vazão de restrição.

Para promover a infiltração da vazão adicional podem ser empregadas medidas de controle com diferentes configurações. A fim de comparar as metodologias estudadas, propõe-se a adoção de trincheiras de 10 m de comprimento, 1 m de largura e 1 m de profundidade.

Pela metodologia empregada pelo SWMM, a vazão de infiltração do dispositivo é de $0,0076 \text{ m}^3/\text{min}$. Assim, para igualar a vazão adicional máxima calculada para o problema, de $0,234 \text{ m}^3/\text{min}$, seriam necessárias 31 trincheiras de infiltração, que ocupariam uma área em planta de 310 m^2 . Aplicando a taxa considerada pela Adasa, de $0,0080 \text{ m}^3/\text{min}$, seriam necessárias 30 trincheiras, ocupando uma área em planta de 300 m^2 . Percebe-se que não é viável pensar nas tecnologias do ponto de vista da infiltração quando se aplicam os conceitos adotados pelas duas metodologias, já que, para a compensação da impermeabilização de 100 m^2 , seriam necessárias áreas de cerca de três vezes o seu valor.

Aplicando a metodologia apresentada usando a trincheira calculada pelo FEFLOW na condição de trincheiras permeáveis de 1 metro de profundidade, seria necessária a implantação de seis trincheiras para igualar a vazão adicional provocada pela impermeabilização do terreno, todas operando com a taxa destacada na Figura 5.64. A área requerida seria, portanto, de 60 m^2 . Trata-se de área considerável, já que corresponde a 60% da área impermeabilizada. Diferentes composições poderiam ser formuladas para somar a vazão de infiltração desejada, com a redução da necessidade de área superficial com o aumento da profundidade do dispositivo.



Figura 5.64: Curva de vazão infiltrada para trincheiras de 1 m de profundidade com base nas relações de $K_{equivalente}$.

Se fossem escolhidos poços de infiltração em vez de trincheiras, a mesma taxa de infiltração, de $0,044 m^3/min$, seria obtida pela adoção de poços de 3,2 m de profundidade, como mostra a Figura 5.65. Assim, 6 dispositivos seriam capazes de absorver toda a vazão excedente do cenário estudado.

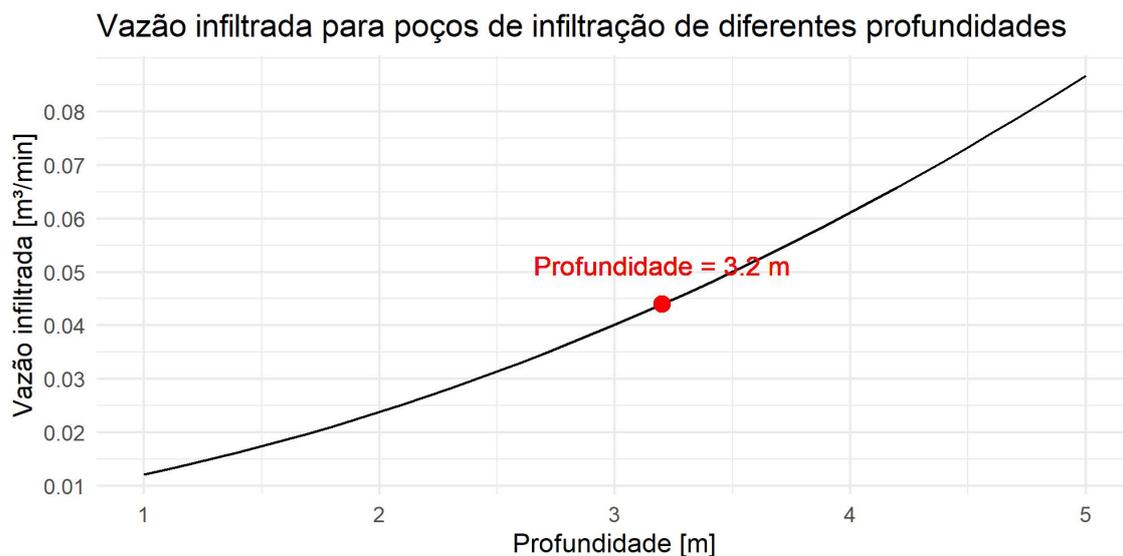


Figura 5.65: Curva de vazão infiltrada para poços de diferentes profundidades com base nas relações de $K_{equivalente}$. Destaque para a profundidade cuja vazão infiltrada é $0,044 m^3/min$.

As quatro soluções apresentadas foram calculadas buscando igualar, em termos de infil-

tração, as vazões adicionais decorrentes da impermeabilização. Percebe-se que a abordagem considerada pelo SWMM e por ADASA (2023a) leva a grandes áreas necessárias para a infiltração. Já os resultados apresentados pela aplicação da modelagem com o FEFLOW mostram valores de área consideravelmente menores. A diferença entre as propostas reside principalmente nas diferentes formas de implantação e nas diferentes áreas ocupadas. As trincheiras de infiltração de 1 m de profundidade e 1 m de largura são relativamente simples de implementar. A movimentação de terra, em pouca profundidade, seria um desafio menor do que o enfrentado na implantação dos poços, que contaria com a escavação de mais de 3 m de profundidade. Por outro lado, a área ocupada pelas 6 trincheiras seria de $60 m^2$, enquanto os 6 poços de 1,3 m de diâmetro ocupariam apenas $8 m^2$ de área em planta, que pode ser um diferencial relevante para áreas urbanas.

É importante notar as considerações adotadas. Foram desconsiderados o molhamento do solo, uma vez que seu efeito é pequeno frente à grande influência na variação na capacidade de infiltração, que se deve à carga obtida pela profundidade do dispositivo, conforme mostrado pelos resultados da seção 5.3.2. As equações de relação entre condutividade hidráulica equivalente em função da profundidade apresentadas nas seções 5.3.8 e 5.5.7 foram desenvolvidas a partir dos valores de condutividade ao final da simulação, que tendem à condutividade hidráulica saturada. Trata-se de simplificação conservadora, uma vez que o processo de molhamento incrementa a vazão dos dispositivos e potencializa sua operação.

A solução apresentada para a impermeabilização proposta é conservadora também no sentido de não apenas amortecer o pico de cheia, mas restituir a capacidade de infiltração da região a partir da máxima vazão adicional calculada a partir do método racional. Em situações de projeto de amortecimento de vazões, a atenuação da cheia poderia ser realizada considerando o volume útil do dispositivo de infiltração, que atua promovendo a retenção da água e, assim, atenuando o pico de cheia.

O resultado leva também a refletir sobre a vazão de restrição fixada para o Distrito Federal por ADASA (2023b). Pela formulação proposta, a área necessária para a infiltração da vazão excedente é de $60 m^2$ para as trincheiras de infiltração em uma situação de impermeabilização de $100 m^2$. Isso corresponde a uma área de 60% da área impermeabilizada. Aplicando trincheiras de 1 m de largura, 0,5 m de profundidade e 10 m de comprimento, teríamos uma vazão infiltrada de $0,025 m^3/min$, como aponta a figura 5.66.

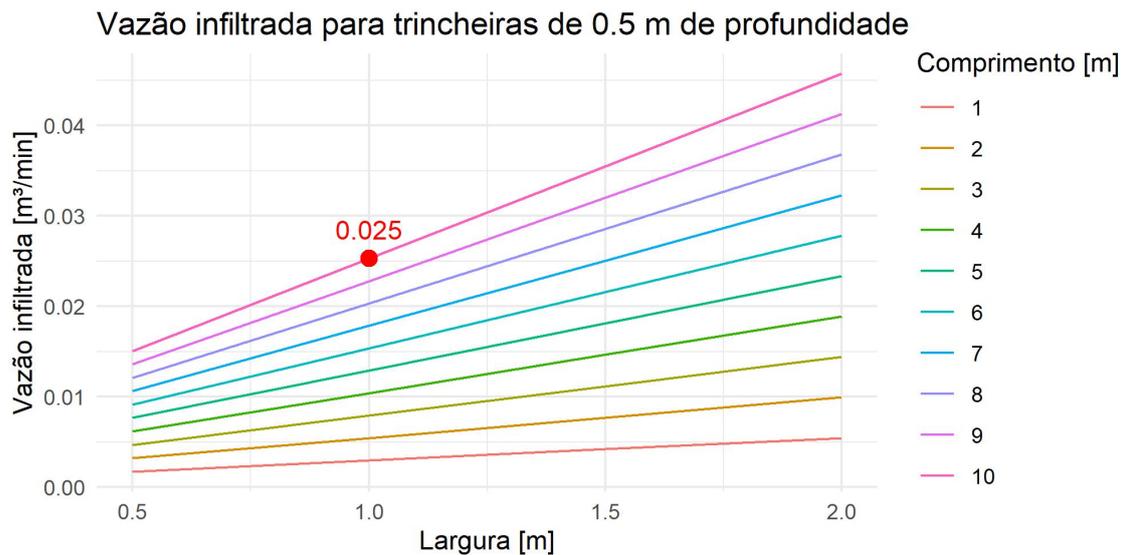


Figura 5.66: Curva de vazão infiltrada para trincheiras de 0.5 m de profundidade com base nas relações de $K_{equivalente}$.

Para essa configuração, o número de dispositivos necessário seria de 10 trincheiras de infiltração, o que equivale a uma área em planta de 100 m^2 , área igual àquela que foi impermeabilizada. O resultado aponta para a exigência da vazão de restrição para solos menos permeáveis, como são os cambissolos. A vazão adicional calculada a partir da restrição demanda áreas maiores do que a impermeabilizada para que seja compensada, mesmo com a adoção de medidas de controle que potencializam a infiltração por meio de adicional de cargas e aumento de superfície de contato para infiltração.

Verifica-se que poços de infiltração apresentam uma vantagem significativa em relação às trincheiras de infiltração quando o objetivo é a compensação da vazão de restrição. Isso ocorre porque os poços operam potencializando a carga hidrostática, o que resulta em maiores vazões de infiltração, além de requererem uma menor área superficial para instalação. No entanto, o uso de poços de infiltração possui restrições importantes. Em áreas com lençóis freáticos próximos à superfície, solos colapsíveis ou com risco de piping, e em regiões de grande declividade onde o solo pode estar estratificado, gerando fluxos laterais preferenciais, a utilização de poços pode não ser recomendada devido aos riscos associados e à possibilidade de ineficiência na infiltração.

5.7 CONSIDERAÇÕES GERAIS SOBRE OS RESULTADOS OBTIDOS PARA POÇOS DE INFILTRAÇÃO

Os resultados experimentais do ensaio realizado em poço de infiltração foram utilizados para a calibração de um cenário de infiltração por meio do ajuste da condutividade hidráulica saturada. O bom ajuste sugere a adequação da modelagem utilizando a equação de Richards (eq. 3.5) para a descrição do processo de infiltração de medidas de controle. Foram realizadas simulações aplicando duas diferentes discretizações do domínio, uma com malha mais refinada e uma com malha menos refinada, com o objetivo de verificar sua influência na representação dos fenômenos. Verificou-se que os cenários simplificado e refinado produzem resultados muito semelhantes, o que é um indicativo de que a malha utilizada na discretização simplificada é adequada.

O estudo das diferentes configurações de poços de infiltração permitiu a comparação entre um poço convencional e a configuração adotada nos poços do condomínio RK. Verificou-se um bom funcionamento do dispositivo, em que a aplicação de drenos laterais permite que a área disponível para infiltração, ainda que menor que a área lateral de um poço convencional, seja capaz de gerar as mesmas vazões de infiltração.

O estudo de poços de diferentes profundidades foi realizado motivado pela verificação da relevância do ganho de profundidade no processo de infiltração nos cenários de trincheiras. O comportamento observado na operação dos poços de diferentes profundidades apresentou o mesmo comportamento daquele registrado para as trincheiras. Além do ganho referente à carga hidráulica, tem-se também o aumento da área de infiltração nos drenos laterais, o que potencializou a infiltração nos dispositivos. Um polinômio foi ajustado aos dados da simulação para criar uma função matemática simplificada que descreve a tendência nos dados do estudo de caso. Esse ajuste possibilitou a geração de uma curva para representar poços com diferentes profundidades.

A aplicação dos resultados em um estudo de caso permitiu a visualização da relevância da quantificação da infiltração no processo de modelagem. Verificou-se que, para um mesmo problema, diversas configurações de trincheiras e poços podem ser empregadas, sendo determinante o conhecimento de limitações técnicas, financeiras e espaciais para a decisão da melhor solução. Além disso, verificou-se que, para o solo estudado, a vazão de restrição definida pela Adasa pode ser demasiadamente exigente.

6

CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

Neste estudo foi realizada uma análise detalhada do processo de infiltração a partir de trincheiras de infiltração retangulares e poços de infiltração circulares por meio de simulação do fluxo saturado-não saturado pela equação de Richards utilizando o programa FEFLOW. Foram realizadas ainda comparações com os métodos utilizados pelo programa SWMM e com a metodologia sugerida por ADASA (2023a),

O método implementado no SWMM, embora amplamente utilizado, demonstrou uma abordagem conservadora, especialmente ao tratar a infiltração como uma taxa constante que ocorre somente na área de fundo dos dispositivos de drenagem. Essa simplificação pode resultar na subestimação dos benefícios reais de infiltração proporcionados pelas medidas de controle na fonte. A metodologia proposta por ADASA (2023a) compartilha dessa abordagem conservadora, simplificando o processo de infiltração para facilitar o dimensionamento, o que pode não capturar a variabilidade e complexidade reais das condições de campo.

Por outro lado, a modelagem utilizando a equação de Richards, implementada no programa FEFLOW, ofereceu a possibilidade de realização de uma análise mais detalhada e precisa do processo de infiltração, levando em consideração fatores importantes, como forças matriciais e o gradiente de pressão estática. Essa abordagem permitiu uma compreensão mais completa das variáveis que afetam a infiltração, como a lâmina d'água e a influência do nível do lençol freático, permitindo que se estudasse mais a fundo a relevância dessas variáveis na modelagem de dispositivos de infiltração.

Dois grupos de cenários que apresentaram resultados interessantes foram o de trincheiras de diferentes profundidades e o de diferentes níveis do lençol freático. A lâmina d'água se mostrou um fator importante na capacidade de infiltração dos dispositivos de drenagem, fazendo com que a vazão infiltrada alcançasse valores de até 6 vezes a condutividade hidráulica saturada no fundo de trincheiras de 2 metros de profundidade. Desse modo, a adoção da condutividade hidráulica saturada como representativa simplificação do processo de infiltração pode ser mais conservadora conforme se tem um aumento da profundidade do dispositivo. Já o nível do lençol freático se mostrou mais relevante para condições em que a infiltração já não é muito favorável, sendo, para cambissolos, mais impactante a partir de 3 metros de distância do fundo do dispositivo de infiltração.

A variação das propriedades dos solos e as características físicas dos dispositivos, quando modeladas em diferentes cenários, demonstraram o impacto significativo desses fatores nas taxas de infiltração. A profundidade e a área de infiltração lateral, em particular, mostraram-

se mais eficientes em maximizar a infiltração para diferentes configurações de dispositivos. Quanto às propriedades dos solos, os resultados apontaram uma maior relevância da condutividade hidráulica saturada na capacidade de infiltração dos dispositivos. Para o caso de simulação contínua, com a consideração dos processos de redistribuição e evapotranspiração, é possível que outros parâmetros se mostrem relevantes.

Com base nos resultados obtidos, é possível concluir que, embora as metodologias simplificadas, como as do SWMM e ADASA (2023a), ofereçam vantagens em termos de praticidade e rapidez, a modelagem mais detalhada do fluxo saturado-não saturado é essencial para obter resultados mais precisos e confiáveis. Isso é especialmente verdadeiro em contextos onde a infiltração desempenha um papel crítico.

Para o avanço na compreensão das metodologias de modelagem de infiltração, recomenda-se que estudos futuros explorem a modelagem contínua, levando em consideração o regime de chuvas regional. Essa abordagem permitiria avaliar a eficiência das medidas de controle de escoamento ao longo do tempo, em condições de precipitação variáveis, o que é fundamental para a verificação da sustentabilidade e eficácia dessas medidas em longo prazo, considerando seu funcionamento completo, com enchimento e esvaziamento, e as variáveis hidrológicas associadas. A calibração de modelos com dados de campo, particularmente em diferentes condições sazonais, também pode contribuir com informações para um correto dimensionamento de medidas de controle de escoamento.

O estudo da variabilidade dos tipos de solo no Distrito Federal e o impacto que essa variabilidade pode ter no processo de infiltração é também relevante. Além do estudo da infiltração na diversidade de solos do DF, a variabilidade dos valores de condutividade hidráulica em regiões próximas e de mesmo tipo de solo pode também ser uma questão a ser investigada. A compreensão dessa variabilidade é relevante para a implementação de medidas de controle de escoamento mais eficazes e que consideram o processo de infiltração.

Por fim, estudos futuros poderiam investigar a aplicação dessas metodologias em diferentes tipos de solo e em condições de uso e ocupação do solo diversificadas. Isso ajudaria a desenvolver diretrizes mais abrangentes e adaptáveis para a implementação de medidas de controle de escoamento, maximizando os benefícios ambientais e minimizando os riscos associados a eventos extremos de precipitação. Essas recomendações têm o potencial de não apenas aprimorar a eficácia das medidas de controle de escoamento, mas também contribuir para a formulação de políticas públicas.

Referências Bibliográficas

ADASA. *Manual de drenagem e manejo de águas pluviais urbanas do Distrito Federal*. Edição revisada e atualizada. Brasília, DF, 2018.

ADASA. *Manual de drenagem e manejo de águas pluviais urbanas do Distrito Federal*. 2. ed. Brasília, DF, 2023.

ADASA. Resolução nº 26, de 17 de agosto de 2023. *Agência Reguladora de Águas, Energia e Saneamento Básico do Distrito Federal*, 2023.

AHMED, K. et al. Effective design and planning specification of low impact development practices using water management analysis module (WMAM): Case of malaysia. *Water*, MDPI AG, v. 9, n. 3, p. 173, fev. 2017. Disponível em: <<https://doi.org/10.3390/w9030173>>.

ANDERSON, M. G.; MCDONNELL, J. J. *Encyclopedia of hydrological sciences Anderson hydro*. [S.l.]: John Wiley & Sons, 2005.

BAPTISTA, M. *Técnicas compensatórias em drenagem urbana*. 1. ed. Porto Alegre: Associação Brasileira de Recursos Hídricos - ABRH, 2005. ISBN 8588686155.

BARBASSA, A. P.; SOBRINHA, L. A.; MORUZZI, R. B. Poço de infiltração para controle de enchentes na fonte: avaliação das condições de operação e manutenção. *Ambiente Construído*, FapUNIFESP (SciELO), v. 14, n. 2, p. 91–107, jun. 2014. Disponível em: <<https://doi.org/10.1590/s1678-86212014000200007>>.

BARBU, I. A.; BALLESTERO, T. P. Unsaturated flow functions for filter media used in low-impact development—stormwater management systems. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, American Society of Civil Engineers (ASCE), v. 141, n. 1, jan. 2015. ISSN 1943-4774. Disponível em: <[http://dx.doi.org/10.1061/\(ASCE\)IR.1943-4774.0000766](http://dx.doi.org/10.1061/(ASCE)IR.1943-4774.0000766)>.

BEVEN, K. J. *Rainfall-runoff modelling*. 2. ed. Hoboken, NJ: Wiley-Blackwell, 2012.

BEZERRA, M. d. C. D. L. et al. Simulação de técnicas de infraestrutura verde de drenagem urbana para captação do escoamento superficial. *Revista Tecnologia e Sociedade*, Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR), v. 16, n. 40, p. 1, abr. 2020. ISSN 1809-0044. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.3895/rts.v16n40.9430>>.

BEZERRA, M. do Carmo de L.; NUNES, O. V. R. Soluções baseadas na natureza para drenagem: Retrofit das áreas verdes públicas do paranoá. *Grupo de Pesquisa em Gestão Ambiental Urbana (g-GAU) do Laboratório da Paisagem (Labpaisagem) na Faculdade de Arquitetura e Urbanismo (FAU) da Universidade de Brasília (UnB)*, FAU - UnB, 2024.

BIGONHA, M. B. et al. Lid control and management of stormwater in the federal district of brazil. In: *International Low Impact Development Conference 2023*. American Society of Civil Engineers, 2023. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1061/9780784485002.012>>.

BRITO, L. K. S. *Avaliação do Impacto das Características Geomorfológicas e Padrões de Uso e Ocupação do Solo Urbano no Distrito Federal no Manejo de Águas Pluviais*. Dissertação (Mestrado) — Universidade de Brasília, Programa de Pós Graduação em Tecnologia Ambiental e Recursos Hídricos, Brasília, 2020.

BROWNE, D. et al. A new saturated/unsaturated model for stormwater infiltration systems. *Hydrological Processes*, Wiley, v. 22, n. 25, p. 4838–4849, set. 2008. ISSN 1099-1085. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1002/hyp.7100>>.

BROWNE, D. et al. A two-dimensional model of hydraulic performance of stormwater infiltration systems. *Hydrological Processes*, Wiley, v. 27, n. 19, p. 2785–2799, jun. 2012. ISSN 1099-1085. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1002/hyp.9373>>.

CADAMURO, A. L. D. M.; CAMPOS, J. E. G. Recarga artificial de aquíferos fraturados no distrito federal: Uma ferramenta para a gestão dos recursos hídricos. *Revista Brasileira de Geociências*, Sociedade Brasileira de Geologia, v. 35, n. 1, p. 89–98, mar. 2005. ISSN 0375-7536. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.25249/0375-7536.20053518998>>.

CAMPOS, J. E. G.; GONÇALVES, T. D. Diretrizes para o desenvolvimento de recarga artificial de aquíferos no distrito federal. *Relatório de consulta técnica*, Agência Reguladora de Águas, Energia e Saneamento Básico do Distrito Federal, out. 2015. Disponível em: <https://www.adasa.df.gov.br/images/storage/area_de_atuacao/recursos_hidricos/regulacao/resolucoes_estudos/recarga_artificial_aquiferos_df.pdf>.

CAMPOS, J. E. G. et al. Diretrizes para implantação de recarga artificial de aquíferos no domínio dos cerrados do Brasil. *Anuário do Instituto de Geociências*, Universidade Federal do Rio de Janeiro, v. 44, fev. 2021. ISSN 0101-9759. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.11137/1982-3908_2021_44_35827>.

CAMUZI, V. T. M. *Análise da drenagem urbana no Riacho Fundo*. 85 p. Dissertação (Trabalho de conclusão de curso) — Universidade de Brasília, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Brasília, DF, 2017.

CANHOLI, A. *Drenagem urbana e controle de enchentes*. Oficina de Textos, 2015. ISBN 9788579751813. Disponível em: <<https://books.google.com.br/books?id=BPAAtCQAAQBAJ>>.

CARVALHO, D. et al. Modelling water quantity in low impact development solution for stormwater management in residential area: a case study. *Conference: 11th World Congress on Water Resources and Environment (EWRA 2019)*, 06 2019.

CARVALHO, E. T. L. *Avaliação geotécnica de poços de infiltração de águas pluviais*. Tese (Doutorado) — Programa de Pós-Graduação em Geotecnia - Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Brasília, 2013.

CIRIA. *The SuDS Manual*. London, England: Construction Industry Research and Information Association, 2015.

COSTA, I. R. d. A. et al. Sensitivity of hydrodynamic parameters in the simulation of water transfer processes in a permeable pavement. *RBRH*, FapUNIFESP (SciELO), v. 25, 2020. ISSN 1414-381X. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1590/2318-0331.252020190188>>.

COSTA, M. E.; KOIDE, S. Monitoring and modeling of the urban water drainage basin of lake paranoá. In: . [S.l.: s.n.], 2014.

COSTA, M. E. L. *Poluição difusa na Bacia do Lago Paranoá*. Tese (Doutorado) — Programa de Pós-Graduação em Tecnologia Ambiental e Recursos Hídricos - Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Brasília, 2022.

COUTINHO, A. P. et al. Hydraulic characterization and hydrological behaviour of a pilot permeable pavement in an urban centre, brazil. *Hydrological Processes*, Wiley, v. 30, n. 23, p. 4242–4254, set. 2016. ISSN 1099-1085. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1002/hyp.10985>>.

COUTINHO, A. P. et al. Vadose zone heterogeneity effect on unsaturated water flow modeling at meso-scale. *Journal of Water Resource and Protection*, Scientific Research Publishing, Inc., v. 07, n. 04, p. 353–368, 2015. ISSN 1945-3108. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.4236/jwarp.2015.74028>>.

de Vito, C. S. *Análise hidrológica do assentamento 26 de setembro considerando ocupação ordenada com implantação de medidas compensatórias*. 82 p. Dissertação (Trabalho de conclusão de curso) — Universidade de Brasília, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Brasília, DF, 2021.

Dos Santos, M. F. N. et al. Stormwater management for highly urbanized areas in the tropics: Life cycle assessment of low impact development practices. *Journal of Hydrology*, v. 598, p. 126409, 2021. ISSN 0022-1694. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S002216942100456X>>.

FERREIRA, T. S.; BARBASSA, A. P.; MORUZZI, R. B. Controle de enchentes no lote por poço de infiltração de água pluvial sob nova concepção. *Engenharia Sanitaria e Ambiental*, scielo, v. 23, p. 437 – 446, 06 2018. ISSN 1413-4152. Disponível em: <http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1413-41522018000300437&nrm=iso>.

FILENI, F. de M.; COSTA, M. E. L.; ALVES, C. de M. A. The application of LIDs in savanna region for mitigation of flooded areas. *RBRH*, FapUNIFESP (SciELO), v. 24, 2019. Disponível em: <<https://doi.org/10.1590/2318-0331.241920180177>>.

FILHO, J. S. V. et al. *IPHS1 - Manual do usuário*. versão 2.11. IPH – UFRGS, 2004.

FIORI, J. P. de O.; CAMPOS, J. E. G.; ALMEIDA, L. Variabilidade da condutividade hidráulica das principais classes de solos do estado de goiás. *UNESP, Geociências*, v. 29, 2010.

GDF. Plano diretor de drenagem urbana do distrito federal. *Secretaria de Estado de Obras; Governo do Distrito Federal; Brasília, DF.*, 2009.

GENOVEZ, A.; NETO, F.; SARTORI, A. Classificação hidrológica de solos brasileiros para a estimativa da chuva excedente com o método do serviço de conservação do solo dos estados unidos parte 1: Classificação. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, FapUNIFESP (SciELO), v. 10, n. 4, p. 5–18, 2005. Disponível em: <<https://doi.org/10.21168/rbrh.v10n4.p5-18>>.

GONÇALVES, L.; RIBEIRO, R.; BAPTISTA, L. O uso de técnicas compensatórias de drenagem para controle dos impactos da urbanização. In: . [S.l.: s.n.], 2016.

GRACIOSA, M.; MENDIONDO, E.; CHAUDHRY, F. imulação hidráulica de trincheiras de infiltração de Águas pluviais. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, FapUNIFESP (SciELO), v. 13, n. 2, p. 89–99, 2008. ISSN 2318-0331. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.21168/rbrh.v13n2.p89-99>>.

GRACIOSA, M.; MENDIONDO, E.; CHAUDHRY, F. Metodologia para o dimensionamento de trincheiras de infiltração para o controle do escoamento superficial na origem. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, FapUNIFESP (SciELO), v. 13, n. 2, p. 207–214, 2008. ISSN 2318-0331. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.21168/rbrh.v13n2.p207-214>>.

GUO, J. C. Y.; LUU, T. M. Hydrologic model developed for stormwater infiltration practices. *Journal of Hydrologic Engineering*, American Society of Civil Engineers (ASCE), v. 20, n. 9, set. 2015. ISSN 1943-5584. Disponível em: <[http://dx.doi.org/10.1061/\(ASCE\)HE.1943-5584.0001161](http://dx.doi.org/10.1061/(ASCE)HE.1943-5584.0001161)>.

HILLEL, D. Environmental soil physics. In: . [S.l.]: Academic press, 1998. p. xvii–xviii.

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 (Distrito Federal)*. Tese (Doutorado) — Programa de Pós-Graduação em Tecnologia Ambiental e Recursos Hídricos - Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Brasília, 2010.

LIMA, J. E. F. W. et al. Desenvolvimento de base de dados de solos para a aplicação do modelo swatem bacia do bioma cerrado. In: *XX Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos*. [s.n.], 2013. Disponível em: <<https://anais.abrhidro.org.br/>>.

LOCATELLI, L. et al. Determining the extent of groundwater interference on the performance of infiltration trenches. *Journal of Hydrology*, Elsevier BV, v. 529, p. 1360–1372, out. 2015. ISSN 0022-1694. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.jhydrol.2015.08.047>>.

LUCAS, W. C. Continuous simulation of integrated bioretention-infiltration systems for urban retrofits. In: *Low Impact Development for Urban Ecosystem and Habitat Protection*. American Society of Civil Engineers, 2008. p. 1–10. Disponível em: <[http://dx.doi.org/10.1061/41009\(333\)55](http://dx.doi.org/10.1061/41009(333)55)>.

LUCAS, W. C. Design of integrated bioinfiltration-detention urban retrofits with design storm and continuous simulation methods. *Journal of Hydrologic Engineering*, American Society of Civil Engineers (ASCE), v. 15, n. 6, p. 486–498, jun. 2010. ISSN 1943-5584. Disponível em: <[http://dx.doi.org/10.1061/\(ASCE\)HE.1943-5584.0000137](http://dx.doi.org/10.1061/(ASCE)HE.1943-5584.0000137)>.

NOVACAP. *Termo de Referência e Especificações para elaboração de projetos de sistema de drenagem pluvial no Distrito Federal*. Brasília, DF: Secretaria de Estado de Obras, Novacap, GDF., 2019.

NUNES, G. *Aplicação do modelo swat no estudo hidrológico e de qualidade da água da bacia do Lago Paranoá – DF*. Dissertação (Dissertação de mestrado) — Universidade de Brasília, Programa de Pós Graduação em Tecnologia Ambiental e Recursos Hídricos, Brasília, DF, 2016.

NUNES, M. D. X.; CAMPOS, J. E. G. Estudo da capacidade de infiltração em sistemas de recarga artificial de aquíferos contaminados no distrito federal. *Geosciences = Geociências*, UNESP - Universidade Estadual Paulista, v. 39, n. 1, p. 127–137, maio 2020. ISSN 1980-900X. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.5016/geociencias.v39i1.12221>>.

OLIVEIRA, A. da N. et al. Avaliação de usos de técnicas compensatórias em sub-bacia do lago paranoá - brasília-df. In: *XXII Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos*. Associação Brasileira de Recursos Hídricos, 2017. Disponível em: <<https://anais.abrhydro.org.br/job.php?Job=3276>>.

PAULA, A. C. V. d. *Estudo experimental e modelagem da lagoa de retenção do Guará – DF : comportamento no amortecimento de cheias e na alteração da qualidade da água*. Tese (Doutorado) — Programa de Pós-Graduação em Tecnologia Ambiental e Recursos Hídricos - Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Brasília, 2019.

PEPLAU, G.; NEVES, M. Análise de critérios para a determinação da vazão de restrição ao escoamento superficial urbano. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, FapUNIFESP (SciELO), v. 19, n. 4, p. 97–106, 2014. Disponível em: <<https://doi.org/10.21168/rbrh.v19n4.p97-106>>.

REATTO, A. et al. *Mapa Pedológico Digital - SIG Atualizado do Distrito Federal Escala 1:100.000 e uma Síntese do Texto Explicativo*. Planaltina, DF: Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento, 2004.

RIGHETTO, A. M. *Manejo de Águas Pluviais Urbanas*. 1. ed. Rio de Janeiro: ABES, 2009. ISBN 9788570221629.

ROSSMAN, L. A. *STORM WATER MANAGEMENT MODEL – USER’S MANUAL Version 5.0*. CINCINNATI, OH 45268, U.S.A.: National Risk Management Research Laboratory, Office of Research and Development, U.S. Environmental Protection Agency, 2010. Traduzido para a língua portuguesa (versão brasileira) por Laboratório de Eficiência Energética e Hidráulica em Saneamento Universidade Federal da Paraíba, UFPB, BRASIL.

ROSSMAN, L. A. *STORM WATER MANAGEMENT MODEL REFERENCE MANUAL VOLUME III - WATER QUALITY*. CINCINNATI, OH 45268, U.S.A.: National Risk Management Research Laboratory, Office of Research and Development, U.S. Environmental Protection Agency, 2016.

SAGE, J.; BERTHIER, E.; GROMAIRE, M.-C. Modeling soil moisture redistribution and infiltration dynamics in urban drainage systems. *Journal of Hydrologic Engineering*, American Society of Civil Engineers (ASCE), v. 25, n. 9, set. 2020. ISSN 1943-5584. Disponível em: <[http://dx.doi.org/10.1061/\(ASCE\)HE.1943-5584.0001978](http://dx.doi.org/10.1061/(ASCE)HE.1943-5584.0001978)>.

SALES, A. C. M. N. *Metodologia para definição de projeto para um sistema de drenagem pluvial urbana sustentável com estudo de caso*. Dissertação (Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Civil) — Faculdade de Tecnologia e Ciências Sociais Aplicadas, Centro Universitário de Brasília, Brasília, DF, 2018.

SCHULZ, E. F. *Problems in applied hydrology*. [S.l.]: Water Resources Publications, 2012.

SEMCOG. *Low Impact Development Manual for Michigan: A Design Guide for Implementers and Reviewers*. [S.l.]: Southeastern Michigan Council of Governments, 2008.

SILVA, J. P. da. *Estudos Preliminares para a implantação de trincheiras de infiltração*. Dissertação (Mestrado) — Programa de Pós-Graduação em Geotecnia - Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Brasília, 2007.

SILVA, J. P. da. *Estruturas de Infiltração com Utilização de Materiais Alternativos no Controle de Alagamentos, Inundações e Prevenção de Processos Erosivos*. Tese (Doutorado) — Programa de Pós-Graduação em Geotecnia - Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Brasília, 2012.

SILVEIRA, A.; GOLDENFUM, J. Metodologia generalizada para pré-dimensionamento de dispositivos de controle pluvial na fonte. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, FapUNIFESP (SciELO), v. 12, n. 2, p. 157–168, 2007. ISSN 2318-0331. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.21168/rbrh.v12n2.p157-168>>.

SOUZA, F. P. d. *Monitoramento e modelagem hidrológica da sub-bacia do Lago Paranoá - Brasília/DF - e avaliação de bacias de retenção*. Tese (Doutorado) — Programa de Pós-Graduação em Tecnologia Ambiental e Recursos Hídricos - Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Brasília, 2014.

SUDERHSA. *Manual de Drenagem Urbana*. 1.0. ed. Curitiba, PR, 2002.

TUCCI, C. E. M. *Hidrologia: Ciência e Aplicação*. 2. ed. Porto Alegre: Associação Brasileira de Recursos Hídricos - ABRH, 2001. ISBN 8570252986.

URBONAS, B.; STAHR, P. *Stormwater*. 3. ed. Englewood Cliffs, New Jersey: Prentice-Hall, 1993.

VISSMAN, J. W.; LEWIS, G. L. *Introduction to Hydrology - International Edition*. 5. ed. Upper Saddle River, NJ 07458: Pearson Education, 2012. ISBN 0132763605.