

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA MARIA
CENTRO DE CIÊNCIAS RURAIS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIA DO SOLO

Carlos Alberto Melo de Almeida

**PADRÃO DE UMEDECIMENTO E MOVIMENTO DA ÁGUA NO SOLO
SOB UMA FONTE PONTUAL DE IRRIGAÇÃO NO GOTEJAMENTO
SUBSUPERFICIAL**

Santa Maria, RS
2018

Carlos Alberto Melo de Almeida

**PADRÃO DE UMEDECIMENTO E MOVIMENTO DA ÁGUA NO SOLO SOB UMA
FONTE PONTUAL DE IRRIGAÇÃO NO GOTEJAMENTO SUBSUPERFICIAL**

Dissertação apresentada ao Curso de Mestrado do Programa de Pós Graduação em Ciência do Solo, área de Concentração em Processos Físicos e Morfogenéticos do Solo, da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM, RS), como requisito parcial para obtenção do grau de **Mestre em Ciência do Solo**.

Orientador: Prof. Ph.D. Reimar Carlesso

Santa Maria, RS
2018

Almeida, Carlos Alberto Melo de
Padrão de umedecimento e movimento da água no solo
sob uma fonte pontual de irrigação no gotejamento
subsuperficial / Carlos Alberto Melo de Almeida.- 2018.
60 p.; 30 cm

Orientador: Reimar Carlesso
Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Santa
Maria, Centro de Ciências Rurais, Programa de Pós
Graduação em Ciência do Solo, RS, 2018

1. HYDRUS-2D 2. Distribuição da água (wetting front)
3. Modelação da água no solo I. Carlesso, Reimar II.
Título.

Sistema de geração automática de ficha catalográfica da UFSM. Dados fornecidos pelo autor(a). Sob supervisão da Direção da Divisão de Processos Técnicos da Biblioteca Central. Bibliotecária responsável Paula Schoenfeldt Patta CRB 10/1728.

© 2018

Todos os direitos autorais reservados a Carlos Alberto Melo de Almeida. A reprodução de partes ou do todo deste trabalho só poderá ser feita mediante a citação da fonte.

E-mail: carlosgeas@yahoo.com.br

Carlos Alberto Melo de Almeida

**PADRÃO DE UMEDECIMENTO E MOVIMENTO DA ÁGUA NO SOLO SOB UMA
FONTE PONTUAL DE IRRIGAÇÃO NO GOTEJAMENTO SUBSUPERFICIAL**

Dissertação apresentada ao Curso de Mestrado do Programa de Pós Graduação em Ciência do Solo, área de Concentração em Processos Físicos e Morfogenéticos do Solo, da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM, RS), como requisito parcial para obtenção do grau de **Mestre em Ciência do Solo**.

Aprovado em 09 de novembro de 2018:

Reimar Carlesso, Ph.D (UFSM)
(Presidente/Orientador)

Mirta Teresinha Petry, Dra. (UFSM)

Cleudson José Michelin, Dr. (UFSM)

Santa Maria, RS
2018

AGRADECIMENTOS

A Deus, pela vida, pela saúde e por iluminar meu caminho e minhas decisões.

À Universidade Federal de Santa Maria, pública e gratuita, ao Centro de Ciências Rurais, ao Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo e ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico - CNPq, pela possibilidade de realização deste curso e pela bolsa de estudos concedida.

Ao professor Reimar Carlesso e a professora Mirta Petry, pela orientação, amizade e paciência, muito importantes para a minha formação científica.

Aos membros da banca examinadora, Cleudson Michelin pelas sugestões dadas e considerações feitas, e aos professores que ministraram as aulas no decorrer do Curso, pelos ensinamentos e disponibilidade de tempo sempre que necessário.

Agradeço de maneira especial aos amigos (as) de pesquisa do mestrado e doutorado que apoiaram em todas etapas e ajudaram nas discussões dessa pesquisa: Bruno Mantovanelli, Lueni Terra, Leonardo Chechi, Robson Giacomeli, Laudenir Basso, e aos demais amigos (as) da pós - graduação Cassiane Rosário, Max Dantas, Marília Antonello, Lethícia Neto, Maicon Sérgio do Nascimento e ao Júnior Kunz.

Aos bolsistas e voluntários da graduação, pelo auxílio e amizade nos bons e maus momentos: Gabriel Spolaor, Bernardo Cherobin, Bruno Trindade, Diego Londero, Jessica Maiara Iensen.

A vocês meu muito obrigado, pois cada número apresentado nesta dissertação também foi fruto de seu trabalho e dedicação.

Aos meus familiares, principalmente aos meus pais João Hugo De Almeida e Maria Das Dores Melo de Almeida aos meus irmãos João Eduardo Melo de Almeida, João Hugo de Almeida Filho, José Francisco Melo de Almeida, Ana Carolina Melo de Almeida e Daniel Francisco Melo de Almeida, pelo carinho, incentivo, apoio e confiança. A minha noiva Carmen Reisdorfer.

A todos aqueles que, de uma ou outra maneira, ajudaram na realização deste trabalho.

RESUMO

PADRÃO DE UMEDECIMENTO E MOVIMENTO DA ÁGUA NO SOLO SOB UMA FONTE PONTUAL DE IRRIGAÇÃO NO GOTEJAMENTO SUBSUPERFICIAL

AUTOR: Carlos Alberto Melo de Almeida
ORIENTADOR: Prof. PhD. Reimar Carlesso

A irrigação por gotejamento subsuperficial (SDI) tem sido utilizada com frequência cada vez maior, como meio de fornecer água às plantas, fertilizantes e pesticidas de forma mais eficiente. Aumentar a eficiência do uso da água é uma das premissas do manejo da irrigação, visto que a demanda pela água por setores municipais e industriais deverá crescer significativamente num futuro próximo. A percepção de todo o potencial do gotejamento subsuperficial requer a otimização dos parâmetros operacionais, como a frequência e o tempo de rega, vazão do gotejador, profundidade de instalação e espaçamentos, bem como, o conhecimento do padrão de distribuição da água. O padrão de distribuição e o movimento da água podem ser obtidos por medida direta ou mediante modelação. Assim, o objetivo desse trabalho foi medir e simular o movimento da água num solo franco arenoso, com duas vazões, em emissores instalados em diferentes profundidades, em um sistema de irrigação por gotejamento subsuperficial. Dois experimentos foram conduzidos em laboratório, em área experimental do Departamento de Engenharia Rural, da Universidade Federal de Santa Maria, durante os anos de 2017 e 2018. Containers de polietileno, com diâmetro de 380 mm e altura de 630 mm, preenchidos com solo de textura franco arenosa (Argissolo Vermelho Distrófico arênico). As fontes de variação consistiram em: profundidade de instalação dos tubos gotejadores (12, 24, e 36 cm), manejo da irrigação (8 horas de irrigação contínua e 12 horas de irrigação intermitente), e vazão dos emissores (0.9 e 1.8 litros/hora). A irrigação foi realizada através de tubos gotejadores auto-compensantes de 16 mm, com espaçamento entre emissores de 20 cm. Um conjunto de sensores FDR, modelo CS616, foi utilizado para mensurar o conteúdo de água no solo. Os sensores foram instalados nas profundidades de 8, 18, 28, 38, 48 e 58 cm, dentro dos containers com solo. O modelo numérico Hydrus-2D foi utilizado para analisar os dados do conteúdo de água observado e simular a frente de avanço sob cada emissor. Os dados observados do conteúdo de água no solo foram comparados com os simulados através dos índices estatísticos erro quadrático médio (RMSE), do coeficiente de regressão forçado à origem (b_0), do coeficiente de determinação (R^2) e da eficiência de modelagem entre os dados observados e simulados (EF). O RMSE, para as diferentes distâncias do emissor, variou de 0.01 a 0.06 $\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$, indicando boa a muito boa concordância entre os dados observados e simulados pelo modelo. O tempo de irrigação influenciou mais o processo de infiltração e formação da frente de umedecimento que a vazão do emissor. Os resultados simulados pelo modelo Hydrus-2D demonstraram relação de linearidade de mais de 65% com os dados observados, viabilizando seu uso para modelar o movimento da água na irrigação por gotejamento subsuperficial. As diferenças verificadas entre os dados observados e simulados, ainda que não sejam significativas, ocorreram nas primeiras duas horas de infiltração e, provavelmente sejam devido ao efeito da histerese ou de medidas imperfeitas na condutividade hidráulica do solo.

Palavras-chave: HYDRUS-2D. Distribuição da água (wetting front). Modelação da água no solo.

ABSTRACT

WETTING PATTERN AND SOIL WATER MOVEMENT UNDER A POINT SOURCE SUBSURFACE DRIP IRRIGATION

AUTOR: Carlos Alberto Melo de Almeida
ORIENTADOR: Prof. PhD. Reimar Carlesso

The use of subsurface drip irrigation (SDI) has been increasing as a mean to deliver water, fertilizers and pesticides to plants, being more effective. Increasing the water use efficiency is one of the goals of irrigation management, since the water demand by human use and industry is expected to grow significantly in the near future. To achieve all the subsurface drip potential, some operational parameters optimization is required such as frequency and irrigation time, dripper flow, installation depth and spacing, as well as knowledge of the water distribution pattern. The distribution pattern and water movement can be accessed by direct measurement or by modeling. In this way, the objective of this study was to measure and simulate the water movement in a sandy loam soil, with two flows, in drip emitters installed at different depths, of a subsurface drip irrigation system. Two experiments were carried out at the experimental laboratory, located on Departamento de Engenharia Rural of Universidade Federal de Santa Maria, during 2017 and 2018 years. It was used polyethylene containers with a 380 mm diameter by a 630 mm height, filled with soil of a sandy loam texture (Rhodic Paleudalf). The sources of variation consisted of : the drip emitters installation depth (12, 24 and 36 cm deep), the irrigation management (8 hours of continuous irrigation and 12 hours intermittent irrigation), the emitters flow (0.9 and 1.8 liters hour⁻¹). The Irrigation was performed through 16 mm self-compensating drippers, with 20 cm spacing between emitters. A set of FDR sensors, model CS616, was used to measure soil water content. The sensors were installed in the depths of 8, 18, 28, 38, 48 and 58 cm, inside the containers with soil. The Hydrus-2D numerical model was used to analyze the observed water content data and to simulate the wetting front under each emitter. The observed soil water content data were compared with those simulated using the root mean square error (RMSE), linear regression coefficient forced to the origin (b_0), determination coefficient (R^2) and modeling efficiency (EF) as statistical indices. The RMSE, for the emitter different depths, ranged from 0.01 to 0.06 cm³ cm⁻³, indicating good to very good agreement between the data observed and simulated by the model. Irrigation time influenced the infiltration and formation of the wetting front more than the emitter flow. The results simulated by the Hydrus-2D model demonstrated a linear relationship of more than 65% with the observed data, making possible its use to model water movement in subsurface drip irrigation. The observed differences between the observed and simulated data, although not significant, occurred during the first two hours of infiltration and are probably due to the effect of hysteresis or imperfect measures in the soil hydraulic conductivity.

Keywords: HYDRUS-2D. Wetting front. Soil water modeling.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Detalhamento do container com solo, emissores e conjunto de sensores conectados a um módulo de leitura e armazenamento de umidade.....	29
Figura 2 – Taxa de aplicação e tempo de irrigação usado no experimento em laboratório, em 2017 e 2018, respectivamente, para a vazão de 0.9 L h ⁻¹ (a e b) e 1.8 L h ⁻¹	30
Figura 3 – Variação temporal do conteúdo de água no solo observado (a, b, c) e simulado (d, e, f) para a vazão de 0.9 L h ⁻¹ , em fluxo contínuo de 480 minutos de irrigação, e emissores instalados em diferentes profundidades (12, 24 e 36 cm), o conteúdo de água foi observado nos sensores TDR instalados nas seguintes profundidades 8 cm, 18 cm, 28 cm 38 cm, 48 cm e 58 cm.....	36
Figura 4 – Variação temporal do conteúdo de água no solo observado (a, b, c) e simulado (d, e, f) para a vazão de 1.8 L h ⁻¹ , em fluxo contínuo de 480 minutos de irrigação e emissores em diferentes profundidades (12, 24 e 36 cm).....	37
Figura 5 – Conteúdo de água no solo observado (símbolos) e simulado (linhas) para diferentes distâncias do emissor, ao longo de 480 minutos de observação (médias de 30 minutos), para vazões de 0.9 (a) e 1.8 L h ⁻¹ (b). Sendo raio 6 a distância do emissor a 12 cm até o sensor TDR a 18 cm, e raio 16 cm a distância do emissor a 12 cm até o sensor TDR a 28 cm de profundidade.....	41
Figura 6 – Conteúdo de água no solo observado (símbolos) e simulado (linhas) ao longo de 480 minutos de observação (médias de 30 minutos), para vazões de 0.9 (a) e 1.8 L h ⁻¹ (b). Sendo raio 4 a distância do emissor a 12 cm até o sensor TDR a 8 cm, raio 6 a distância do emissor a 24 cm até o sensor TDR a 18 cm, raio 8 a distância do emissor a 36 cm até o sensor TDR a 28 cm, tais raios medem a ascensão capilar.....	43
Figura 7 – Evolução da frente de umedecimento num solo franco arenoso, para diferentes tempos de observação, em irrigação intermitente, para vazões de 0.9 (a) e 1.8 L h ⁻¹ (b).....	45
Figura 8 – Evolução da frente de molhamento em um sistema de irrigação por gotejamento subsuperficial em fluxo contínuo de oito horas de irrigação, para emissores instalado a 12, 24 e 36 cm de profundidade, com vazão de 0.9 L h ⁻¹	47
Figura 9 – Padrão espacial de umedecimento no fluxo bidimensional assimétrico simulado usando HYDRUS para vazão de 1.8 L h ⁻¹ . (A) Emissor instalado a 12 cm; (B) Emissor instalado a 24 cm; (C) Emissor instalado a 36 cm.....	48
Figura 10 – Fluxo cumulativo de percolação em função da condição de contorno de drenagem livre simulada pelo HYDRUS.....	50
Figura 11 – Diâmetro médio das frentes de umedecimento nos eixos x e z após 8 horas de irrigação continua para vazão de 1.8 L h ⁻¹	52

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Caracterização físico-hídrica e textural de Argissolo Vermelho Distrófico arênico, textura arenosa	28
Tabela 2 – Parâmetros hidráulicos de Argissolo Vermelho Distrófico arênico aplicados como critérios de entrada de modelagem numérica no HYDRUS-2D.....	32
Tabela 3 – Indicadores estatísticos entre os dados observados e simulados do conteúdo volumétrico de água no solo (médias de 5 em 5 minutos), para a vazão de 0.9 L h ⁻¹ , com fluxo contínuo, em 480 minutos de observação	39
Tabela 4 – Indicadores estatísticos entre os dados observados e simulados do conteúdo volumétrico de água no solo (médias de 5 em 5 minutos), para a vazão de 1.8 L h ⁻¹ , com fluxo contínuo, em 480 minutos de observação	40

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	10
2	OBJETIVOS	13
2.1	OBJETIVO GERAL.....	13
2.2	OBJETIVOS ESPECÍFICOS	13
3	REVISÃO DE LITERATURA.....	14
3.1	SISTEMA DE IRRIGAÇÃO LOCALIZADA SUBSUPERFICIAL.....	14
3.2	CONTEÚDO DE ÁGUA E PADRÃO DE DISTRIBUIÇÃO DA UMIDADE NO SOLO	16
3.3	MODELAÇÃO DA DISTRIBUIÇÃO DO CONTEÚDO DE ÁGUA NO SOLO EM SDI	19
3.3.1	Modelos empíricos ou semi-empíricos.....	20
3.3.2	Modelos analíticos.....	22
3.3.3	Modelos numéricos	23
4	MATERIAL E MÉTODOS.....	27
4.1	CARACTERIZAÇÃO DO LOCAL DO EXPERIMENTO	27
4.2	AMOSTRAGEM DE SOLO E CARACTERIZAÇÃO.....	27
4.3	SOLO EM CONTAINER - EXPERIMENTO DE LABORATÓRIO	28
4.4	SIMULAÇÕES USANDO O HYDRUS 2D	30
4.4.1	Teoria da modelagem numérica.....	30
4.4.2	Modelagem de geometria e condições de limite.....	31
4.4.3	Propriedades hidráulicas.....	32
4.5	ANÁLISE ESTATÍSTICA	32
5	RESULTADOS E DISCUSSÃO	34
5.1	DISTRIBUIÇÃO DO CONTEÚDO DE ÁGUA NO SOLO: INFLUÊNCIA DA VAZÃO	34
5.2	DISTRIBUIÇÃO DO CONTEÚDO DE ÁGUA NO SOLO: EFEITO DA CAPILARIDADE	41
5.3	DISTRIBUIÇÃO DO CONTEÚDO DE ÁGUA NO SOLO: EFEITO DO TEMPO DE IRRIGAÇÃO (CONTÍNUO OU INTERMITENTE).....	43
5.4	PADRÃO DE UMEDECIMENTO: SIMULAÇÃO DA DISTRIBUIÇÃO ESPACIAL DO CONTEÚDO DE ÁGUA	46
6	CONCLUSÕES	53
	REFERÊNCIAS.....	54

1 INTRODUÇÃO

A irrigação é essencial para aumentar a capacidade produtiva dos solos e suprir a demanda por alimentos, tanto em nível mundial, como regional ou local. No entanto, quando conduzida sem o devido cuidado com o solo, a planta ou o clima, pode tornar-se uma prática de degradação aos solos e ao ambiente. Na prática, a melhoria na eficiência de uso da água na agricultura só será possível com a adoção de um adequado manejo da irrigação, para evitar desperdícios de água e/ou redução na produção pela irrigação em demasia e perdas na produção devido à subirrigação.

A irrigação por gotejamento subsuperficial (SDI) vem a ser a mais alta tecnologia para melhorar a eficiência de uso da água na agricultura, muitas vezes resultando em 25-50% de economia de água em comparação à irrigação por sulcos. De acordo com o Atlas de Irrigação (ANA, 2017), a irrigação localizada (gotejamento e microaspersão) ocupou cerca de 140 mil hectares no Brasil, com um incremento médio anual de 3% entre os anos de 2010-2016. A irrigação por gotejamento subsuperficial representa apenas uma pequena parcela dessa área, uma vez que, trata-se de uma tecnologia relativamente nova no Brasil.

O sistema de irrigação por gotejamento subsuperficial se baseia na distribuição de água, gota a gota, próximo ao sistema radicular das plantas, em profundidade, proveniente de tubulações fixas, às quais estão acoplados os gotejadores ou emissores. Embora seja um dos sistemas de irrigação mais antigos que se conhece, apenas os avanços mais recentes na tecnologia das tubulações plásticas (PVC e polietileno) e equipamentos de instalação desse sistema, permitiram que seu uso fosse propagado para áreas maiores e mais culturas, não apenas as de alto valor comercial.

Para que os sistemas de irrigação por gotejamento subsuperficial cumpram sua promessa de entregar mais eficientemente a água e nutrientes à zona radicular das plantas, deve-se levar em consideração as propriedades hidráulicas do solo e o dimensionamento do sistema. Embora a textura do solo possa ser um preditor bastante confiável do padrão de distribuição da água infiltrada no solo, informações específicas do local sobre os padrões de umedecimento são necessárias para projetar SDI eficientes. A água que flui através de um emissor enterrado move-se vertical e lateralmente, em resposta a um gradiente de potencial matricial do solo.

Em estudo conduzido por Hao et al. (2007), com quatro diferentes texturas de solo (arenoso, franco arenoso, franco e argiloso), os autores observaram que, no solo arenoso, o fluxo horizontal de água rapidamente alcançou o raio máximo de molhamento, enquanto o fluxo vertical atingiu 60 cm de profundidade, após 4 horas de irrigação contínua, com vazão de 1 L h^{-1} . No solo franco arenoso e franco, foi observado um molhamento constante na horizontal e vertical, enquanto o solo argiloso apresentou maior fluxo na horizontal.

Na irrigação por gotejamento, a água é aplicada em pequenas quantidades, em taxas constantes, fazendo com que a infiltração de água ocorra na região próxima ao emissor, a qual é pequena comparada com o volume total do solo da área irrigada. Como resultado, uma zona de transição tridimensional de infiltração ocorre. De acordo com Schwartzman e Zur (1986), o formato do bulbo molhado na irrigação por gotejamento pode ser descrito como uma elipse cortada, cujo diâmetro (D) e profundidade (z) dependem das propriedades hidráulicas, espaçamento e profundidade do emissor, vazão e tempo de irrigação (KANDELOUS; SIMUNEK, 2010a). Assim, parece claro que o conhecimento da dinâmica da água na periferia do emissor representa um pré-requisito tanto para dimensionamento do sistema, como para o manejo da irrigação e aplicação de nutrientes no solo.

O padrão de umedecimento do solo no gotejamento subsuperficial pode ser obtido via medida direta a campo (que é específico do local) ou através de modelos de simulação. Há uma série de modelos (numéricos, analíticos e empíricos) que descrevem a infiltração de água a partir de uma fonte pontual ou linhas de gotejadores (como na SDI) e que podem ser utilizados para fins de projetos de dimensionamento e manejo do sistema. Os modelos numéricos e analíticos são baseados na equação de Richards para descrever a distribuição do conteúdo de água ou do potencial matricial no solo em condições não saturadas, enquanto os modelos empíricos tipicamente usam análises de regressão dos dados de campo.

Tanto os modelos empíricos, quanto os analíticos podem ser usados para simular o avanço da frente de umedecimento no gotejamento subsuperficial, entretanto, o modelo numérico HYDRUS (1, 2 ou 3-D), descrito por Simunek et al. (1999), é o mais utilizado, por ser em ambiente Windows, e por simular os fluxos de água, calor e solutos em uma, duas ou três dimensões. Vários pesquisadores (SIYAL; SKAGGS, 2009; COTE et al., 2003; KANDELOUS; SIMUNEK, 2010a, b)

verificaram a performance do HYDRUS para simular a frente de molhamento em SDI, encontrando boa concordância entre os dados observados e simulados.

Uma das imperfeições dos modelos analíticos e empíricos, por outro lado, está no fato de simularem que o movimento ascendente, na horizontal e na vertical ocorre em igual magnitude, enquanto que, em condições naturais de campo, o movimento vertical é muito mais rápido, sobretudo depois que se cria uma zona de saturação na periferia do emissor. Assim, o principal objetivo desse trabalho foi medir e simular o movimento da água num solo franco arenoso, com duas vazões, em emissores instalados em diferentes profundidades, em um sistema de irrigação por gotejamento subsuperficial.

2 OBJETIVOS

2.1 OBJETIVO GERAL

O principal objetivo desse trabalho foi mensurar e simular o movimento da água num solo franco arenoso e entender a frente de avanço até a superfície, com duas vazões, em emissores instalados em diferentes profundidades, em um sistema de irrigação por gotejamento subsuperficial.

2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Avaliar e simular as diferenças na dinâmica da água sob uma fonte pontual de irrigação, no SDI (sistema de irrigação em sub superfície);

Avaliar o padrão de distribuição e o movimento da água no solo para diferentes vazões, na irrigação contínua e intermitente.

3 REVISÃO DE LITERATURA

3.1 SISTEMA DE IRRIGAÇÃO LOCALIZADA SUBSUPERFICIAL

A primeira referência que se tem de irrigação subsuperficial vem da China, há mais de 2000 anos, através de pequenos tubos de argila enterrados no solo e preenchidos com água (BAINBRIDGE, 2001). O formato que conhecemos hoje foi desenvolvido na Califórnia (USA) em 1959, e sua maior aceitação ocorreu a partir do surgimento dos tubos de polietileno (PE) e policloreto de vinila (PVC) (RODRÍGUES-SINOBAS; RODRÍGUEZ, 2012).

No Brasil, sistema de irrigação por gotejamento subsuperficial (SDI) é relativamente novo (estima-se que se iniciou em 1996), tendo sido introduzido pela Netafim (NetafimTM), com o propósito de promover a difusão da tecnologia. Os primeiros trabalhos foram desenvolvidos na Usina Sucroalcooleira São Martinho, no município de Pradópolis, SP (AGUIAR, 2002).

O princípio básico da operação da SDI é a ascensão da água por capilaridade (FERRAREZI et al., 2015), podendo ser utilizado em nível de campo ou cultivos protegidos. Consiste em pequenos emissores, localizados abaixo da superfície do solo, com controle da taxa de descarga de água. Sua utilização, de acordo com Cote et al. (2003), propagou-se para culturas além daquelas realizadas em sistemas protegidos, em várias partes do mundo, por ser considerado um meio para alcançar práticas sustentáveis de manejo da irrigação. Há uma variedade de plantas irrigadas por esse sistema, desde as herbáceas (hortaliças em geral), lenhosas (pomares e árvores em áreas verdes) e outras como milho, algodão, cana-de-açúcar, batata, tomate, etc., (RODRÍGUES-SINOBAS; RODRÍGUEZ, 2012).

O SDI é considerado o mais eficiente sistema de irrigação, podendo alcançar uma eficiência de aplicação superior a 95% (PAYERO, 2002), devido às reduzidas perdas por evaporação e percolação profunda (PATEL; RAJPUT, 2008). Além disso, o SDI melhora a sanidade da planta e a gestão das operações agrícolas (ELMALOGLU; DIAMANTOPOULOS, 2009) pela aplicação pontual da água próximo ao sistema radicular das plantas, minimizando o contato direto da água com a parte aérea das plantas e frutos, melhorando a sanidade, além de possibilitar o uso de águas residuais ou salinas.

Evet et al. (1995) levantaram a hipótese de que a melhora no rendimento das culturas em SDI é mais provável devido à maior disponibilidade de água para as plantas, em comparação com um sistema de gotejamento superficial, devido à menor evaporação em um sistema de gotejamento subsuperficial. Entretanto, a uniformidade de aplicação pode ser reduzida, segundo Provenzano (2007), devido ao entupimento dos emissores, fazendo com que um sistema adequado de filtragem seja instalado, visando manter um nível adequado de uniformidade (PROVENZANO et al., 2005).

Dados experimentais sobre as vantagens da SDI sobre outros métodos de irrigação, incluindo o gotejamento superficial, são vastos. Lamm (2002) e Payero (2002) enumeram como vantagens: (i) redução da evaporação do solo, escoamento superficial e percolação (reduzindo o movimento de fertilizantes e outros compostos químicos para os aquíferos), aumentando a eficiência do uso da água; (ii) permite o uso de águas residuais, o que reduz a deriva de patógenos, do contato de pessoas e animais com essas águas; (iii) fertilizantes e pesticidas são aplicados de forma localizada, aumentando a precisão na aplicação e uso; (iv) o solo seco entre as linhas aumenta a trafegabilidade e reduz a compactação do solo, além de facilitar o trabalho manual, devido ao não umedecimento da superfície do solo; (v) redução na incidência de invasoras e; (vi) incrementa a produtividade e a qualidade da produção.

Por outro lado, Testezlaf (2002) e Darusman et al. (1997), além dos autores acima citados, elencam como desvantagens: i) o elevado custo de implantação e manutenção; ii) o perfil de molhamento da água não pode ser visualizado, dificultando a avaliação da operação do sistema e da uniformidade de aplicação; iii) é suscetível a entupimento de emissores por intrusão de raízes e emissores podem ingerir solo no desligamento do sistema pela ocorrência de vácuo, aumentando a necessidade de se ter válvulas antivácuo; iv) necessita maior controle da irrigação, como o uso de hidrômetros, válvulas de drenagem e antivácuo.

A instalação dos emissores em profundidade pode aumentar as perdas de água por percolação e reduzir a disponibilidade de água para as culturas (DUKES; SCHOLBERG, 2005). Além disso, no SDI pode haver implicações no estabelecimento inicial da cultura. Por não umedecer a superfície do solo, esse sistema não proporciona condições satisfatórias de umidade para a germinação de sementes ou pegamento de mudas. Portanto, em locais secos ou com distribuição

irregular de chuvas, seria necessário usar um segundo sistema de irrigação na fase inicial, frequentemente por aspersão, o que aumenta consideravelmente os custos e reduz de instalação e obviamente o retorno econômico (CAMP, 1998; PAYERO, 2002; GUSHIKEN, 1995). Em áreas secas, a adoção deste sistema é desvantajoso, pois eleva a necessidade de mão de obra, maior custo de operação e, principalmente, necessita de um volume de água grande para criar a zona de umidade próxima às raízes das plantas, o que pode elevar a percolação. Esse sistema se mostra vantajoso para locais onde a restrição hídrica é severa ou onde o custo de água é elevado e para irrigar pequenas áreas ou talhões, e para produção de culturas com alto valor agregado.

3.2 CONTEÚDO DE ÁGUA E PADRÃO DE DISTRIBUIÇÃO DA UMIDADE NO SOLO

O dimensionamento de um sistema de irrigação por gotejamento (superficial ou subsuperficial) envolve a combinação entre a vazão dos emissores, o espaçamento entre esses para determinados tipos de solo, culturas e condições meteorológicas. A água e os nutrientes devem ser distribuídos na zona ativa da raiz, de maneira uniforme, em toda a área irrigada. Assim, segundo Cote et al. (2003) e Arbat et al. (2013), o projeto e o gerenciamento de sistemas de irrigação por gotejamento requerem uma compreensão dos padrões de distribuição de água e solutos no solo.

Um SDI bem dimensionado deve resultar numa distribuição de água o mais uniforme possível entre os emissores. A distribuição e o movimento da água é fortemente influenciada pelas propriedades hidráulicas do solo (EL-HENDAWY et al., 2008), espaçamento e profundidade de instalação dos emissores e das linhas laterais, vazão do emissor (KANDELOUS; SIMUNEK, 2010a, b) e configuração do sistema de gotejamento (superficial, subsuperficial, gotejador pontual ou linha de gotejadores). Além desses, a distribuição espacial das propriedades físicas do solo (ELMALOGLU, DIAMANTOPOULOS; DERCAS, 2010), condições iniciais de umidade, frequência e tempo de irrigação, características do sistema radicular, evaporação do solo e transpiração das culturas (LAZAROVICH et al. 2007) também afetam o movimento e distribuição da água no solo. A taxa de fluxo a partir de um

emissor, usualmente, é de 1 a 8 L h⁻¹ e pode ocorrer em gotículas (gotas muito finas) ou num fio de água, em fluxo muito lento (COTE et al., 2003).

Experimentos de campo são úteis para a determinação do padrão de distribuição da água no solo. De acordo com Battam et al. (2003), a escavação de uma trincheira ou cova para medir a extensão e profundidade do volume de solo umedecido sob um emissor provavelmente seja o método mais confiável para determinar os espaçamentos entre emissores, vazão e tempo de rega. Uma forma tradicional de visualizar a distribuição espacial e temporal da água no solo inclui a mensuração do conteúdo de água no solo na periferia do emissor, com informações da estimativa da posição e do formato do bulbo úmido (DASBERG; OR, 1999; LAZAROVICH et al., 2007).

Em uma síntese de teorias, Thorburn et al. (2003) demonstraram com clareza que pode haver uma gama de padrões de distribuição da água em diferentes solos e que as noções convencionais relacionando o comportamento médio padrão da frente de umedecimento à textura do solo podem não se sustentar quando se estiver trabalhando em solos específicos e condições peculiares. O fato é que a textura talvez não seja o preditor mais confiável do avanço da frente de molhamento e informações específicas do local e dos padrões de umedecimento podem ser necessárias, principalmente para melhor dimensionar os sistemas.

Na irrigação subsuperficial, a infiltração de água no solo forma uma zona de umedecimento com formato similar a uma elipse cortada (ZUR, 1996; AL-OGAIDI et al., 2016), sendo dependente da vazão do emissor, do total de água aplicado e propriedades hidráulicas. Vários pesquisadores (SCHWARTZMAN; ZUR, 1986; ZUR, 1996; COOK et al., 2003, ZHANG et al., 2012) fizeram descrições da extensão do umedecimento, incluindo o diâmetro molhado na superfície, a profundidade e o volume de solo molhado. O volume de solo umedecido representa o total de água armazenado na zona de distribuição do sistema radicular. O aprofundamento da frente de umedecimento, segundo Zur (1996), deve ser consistente com a profundidade efetiva do sistema radicular, enquanto o formato radial está relacionado com o espaçamento entre os emissores e a linha de gotejadores.

As dimensões do volume de solo molhado sob uma fonte pontual de descarregamento de água, como é o caso da irrigação por gotejamento, são relativamente uniformes em largura e profundidade, dependendo das características hidráulicas do solo e vazão do gotejador. Os limites do bulbo molhado, segundo Zur

(1996), Revol et al. (1997) e Elmaloglou e Diamantopoulos (2007), são razoavelmente bem definidos e cercados por camadas de solo mais secas. Entretanto, a distribuição do conteúdo de água dentro do volume úmido de solo não é uniforme, diminuindo à medida que aumenta a distância radial do emissor. Esse comportamento, ainda de acordo com Zur (1996), contrasta frontalmente com o padrão de infiltração de água da chuva ou da irrigação por aspersão. Quando se utiliza um tubo gotejador com emissores igualmente espaçados entre eles para irrigar culturas plantadas em linha, normalmente o espaçamento entre os emissores é projetado para que o volume molhado seja superposto pelo outro, garantindo maior uniformidade. De um modo geral, o perfil de distribuição da água no SDI obedece à teoria do estado estacionário (REVOL et al., 1997). Entretanto, experimentos de campo e laboratório tem demonstrado que existe um movimento transiente da frente de umedecimento, a qual ocorre longe da fonte de descarga de água. Sob uma fonte pontual de descarga (um emissor) o movimento da água normalmente é tri-dimensional, tornando-se bidimensional sob tubos gotejadores colocados em linha (ELMALOGLOU; DIAMANTOPOULOS, 2009).

Baseados em dados experimentais relacionados ao tipo de solo, profundidade de raízes e graus de homogeneidade no perfil do solo, Keller e Bliesner (1990), apresentaram uma tabela mostrando o espaçamento entre emissores e linhas laterais como uma função do volume aplicado, para uma vazão de 4 L h^{-1} . Schwartzman e Zur (1986) estudaram a geometria do volume do solo molhado e desenvolveram uma série de equações empíricas relacionando a altura da água aplicada e a condutividade hidráulica saturada do solo com a largura e a profundidade do volume do solo molhado.

Na irrigação por gotejamento, a zona de saturação formada ao redor do emissor está diretamente relacionada às propriedades hidráulicas e taxa de aplicação de água (vazão do emissor, aplicação contínua ou intermitente). A maior parte dos estudos envolvendo a infiltração de água sob uma fonte pontual de descarga lidou com medidas da umidade durante ou logo após a aplicação contínua de água (ELMALOGLOU; DIAMANTOPOULOS, 2009).

Cote et al. (2003) estudaram o efeito do fluxo intermitente no avanço da frente de molhamento no gotejamento subsuperficial e demonstraram que, tanto a maior frequência de irrigação, como o uso de “pulsos” incrementa o fluxo lateral de água, ao mesmo tempo em que diminuem as perdas por percolação. Elmaloglou e

Diamantopoulos (2009) estudaram duas vazões (2 e 4 L h⁻¹) e duas texturas de solo (franco arenoso e franco siltoso), enquanto mantiveram a lâmina de irrigação em 30 mm, para o gotejamento superficial. Inicialmente, o fluxo vertical foi acentuado no solo franco arenoso, independente da vazão. Entretanto, ao final do tempo de escoamento (≈80 horas), as perdas por percolação foram levemente inferiores na irrigação por pulsos, em relação ao fluxo contínuo, para ambos os solos e vazões testadas.

Embora as propriedades hidráulicas desempenhem um papel fundamental no padrão de distribuição de água nesse sistema de irrigação, muitas vezes esse critério é desconsiderado no dimensionamento de sistemas em detrimento de um dimensionamento ótimo do ponto de vista econômico, o que pode não representar a melhor alternativa do ponto de vista de uma melhora na eficiência de uso da água. Isso porque, o sistema opera em baixas pressões de serviço, fato que resulta num menor custo de operação do sistema, de forma que, um tempo maior de operação pode corrigir as eventuais falhas no dimensionamento dos espaçamentos entre linhas e entre emissores.

3.3 MODELAÇÃO DA DISTRIBUIÇÃO DO CONTEÚDO DE ÁGUA NO SOLO EM SDI

O tipo de solo e suas propriedades hidráulicas são os principais fatores a serem considerados no planejamento da irrigação subsuperficial. Na década de 1990, Keller e Bliesner (1990) atestaram que a seleção da taxa de aplicação e espaçamento entre emissores e linhas deve ser feita a partir de testes de campo medindo-se a extensão e profundidade do volume de solo umedecido sob um único emissor ou de tubos gotejadores dispostos em linha. Contudo, testes de campo são difíceis de realizar, por serem onerosos, devido ao tempo necessário e instrumentação exigida para adequadamente distinguir a frente de avanço da umidade no solo. Assim, a aplicação de modelos empíricos, analíticos ou numéricos para descrever o padrão de distribuição do conteúdo de água ou o avanço da frente de umedecimento pode ser usada.

3.3.1 Modelos empíricos ou semi-empíricos

As equações empíricas tipicamente usam análises de regressão dos dados observados do conteúdo de água no solo para descrever o avanço da frente de umedecimento. Há muitos fatores, de acordo com Al-Ogaidi et al. (2016) que afetam o padrão de distribuição da água sob um emissor, alguns associados às características hidráulicas, como: condutividade hidráulica saturada, conteúdo inicial de água, densidade do solo e homogeneidade do perfil. Enquanto a outra parte dos fatores está relacionada ao sistema de irrigação (vazão e localização do emissor, espaçamento) e o método de irrigação (contínuo ou intermitente).

Schwartzman e Zur (1986) foram os primeiros a sugerir equações semi-empíricas que facilmente estimam a largura (D) e a profundidade (Z) da frente de molhamento, baseado nas leis físicas que governam o movimento de água a partir de um emissor. Assim, a geometria do volume de solo umedecido ao final da irrigação seria uma função da vazão “ q ” do emissor, do volume total de água aplicado (V) e da condutividade hidráulica saturada (K_s) do solo (Eq. 1 e 2). Esses modelos foram desenvolvidos a partir de experimentos de campo, usando duas vazões de emissores e dois solos distintos: um franco e um arenoso.

$$d = 1.82(V_w)^{0.22} \left(\frac{k_s}{q} \right)^{-0.017} \quad (1)$$

$$z = 2.54(V_w)^{0.63} \left(\frac{k_s}{q} \right)^{-0.45} \quad (2)$$

Onde: V_w é o volume total de água aplicada (m^3), K_s é a condutividade hidráulica do solo ($m\ s^{-1}$) e q é a vazão nde do emissor ($m^3\ s^{-1}$).

Amin e Ekhmaj (2006) desenvolveram equação para estimar a dimensão horizontal e vertical da frente de umedecimento para a irrigação por gotejamento superficial usando regressões não lineares (Eq. 3 e 4), a partir de vários bancos de dados experimentais (TAGHAVI et al., 1984; ANGELAKIS et al., 1993; MONCEF et al., 2002; LI et al., 2004):

$$r = 0.2476\Delta\theta^{-0.5626}V_w^{0.2686}q^{-0.0028}k_s^{-0.0344} \quad (3)$$

$$z = 2.0336\Delta\theta^{-0.383}V_w^{0.365}q^{-0.101}k_s^{0.195} \quad (4)$$

Onde: r e z são as dimensões horizontais e verticais do padrão de umedecimento (m), $\Delta\theta$ é a média do conteúdo de água atrás da frente de umedecimento, V_w , q e k_s foram definidos anteriormente. Quando nenhuma orientação sobre o conteúdo de água estiver disponível, a $\Delta\theta$ é igual à metade da umidade de saturação.

Ainechee et al (2009) usaram o modelo de Schwartzman e Zur (1986) para estudar o movimento de água sob um emissor superficial, para três tipos de solo e três vazões, encontrando boa relação entre os dados observados e simulados. Entretanto, de acordo com Keller e Bliesner (1990), as estimativas da geometria do volume de solo umedecido a partir das pressuposições de Schwartzman e Zur (1986) são pouco precisas, devido à variabilidade das propriedades hidráulicas dos solos. Assim, Malek e Peters (2011), propuseram uma nova equação empírica para prever as dimensões do bulbo úmido sob um emissor, adicionando o efeito da densidade do solo na equação, encontrando resultados mais acurados que os dos modelos de Schwartzman e Zur (1986) e Amin e Ekhmaj (2006). Al-Ogaidi et al. (2015) adicionaram o efeito da percentagem de areia, silte e argila a todos os parâmetros anteriormente citados e propuseram um modelo empírico modificado. Esse modelo foi usado para estimar o padrão de distribuição da água em perfis estratificados quanto à textura.

Kandelous et al. (2008) propuseram equações para estimar as distâncias horizontais, a ascensão capilar e o movimento vertical da água a partir de um emissor em subsuperfície, usando uma análise bidimensional (Eq. 5, 6 e 7). Essas equações foram desenvolvidas a partir de dados experimentais do SDI, usando um solo franco argiloso seco ao ar, e um emissor com vazão de 1 L h^{-1} , monitorando a frente de umedecimento no tempo.

$$w = 4.244V_w^{0.526} \left(\frac{k_s}{qZ} \right)^{0.026} \quad (5)$$

$$z_+ = 0.72V_w^{0.344} \left(\frac{k_s}{qZ} \right)^{-0.156} \quad (6)$$

$$z_w = 0.66V_w^{0.333} \left(\frac{k_s}{qZ} \right)^{-0.167} \quad (7)$$

Onde: Z é a profundidade de instalação do emissor (m).

3.3.2 Modelos analíticos

Os modelos analíticos, assim como os numéricos, são baseados na solução da equação que governa o fluxo de água no solo, a equação de Richard's, sob condições iniciais e de contorno específicas. De acordo com Cook et al (2003a), os modelos analíticos podem ser uma ferramenta rápida e fácil para determinar a localização da frente de umedecimento. Tais modelos baseiam-se no pressuposto de uma fonte localizada de descarga de água e formas especiais das propriedades físicas do solo. As equações analíticas lidam com fluxo de água de estado estacionário axialmente simétrico. Eles descrevem bem os estágios iniciais da infiltração e fornecem uma estimativa do teor de água atrás da frente molhada (CLOTHIER; SCOTTER, 1982).

Cook et al. (2003b) desenvolveram uma ferramenta computacional amigável, o WetUp, para a predição do padrão de umedecimento do solo no gotejamento superficial e subsuperficial, para solos homogêneos, com base em soluções analíticas. Mais recentemente, Hammami e Zayani (2016) desenvolveram um método analítico para descrever a zona de solo umedecido em gotejamento superficial. Esse método estima o bulbo umedecido (V_b) a partir de um emissor único localizado na superfície, para várias texturas de solo, e baseia-se na combinação da equação da continuidade, com o modelo de infiltração de Green e Ampt, da teoria de um formato semi-elíptico do volume molhado, cujas diagonais são combinadas com o raio molhado na superfície do solo e um fluxo axial simétrico. Essa aproximação assume que o fluxo de água no solo é tipo pistão, formando um bulbo semielíptico, podendo ser usado tanto em condições de fluxo transiente, como estacionário (HAMMAMI; ZAYANI, 2016).

O WetUp, modelo proposto por Cook et al. (2003b), utiliza a solução analítica de Philip (1984) para fluxos a partir de emissores dispostos na superfície ou subsuperfície para estimar o perímetro de solo umedecido. O software contém um banco de dados pré-calculado para várias taxas de aplicação, tempos de aplicação, conteúdo de água inicial e localização do emissor. Ao se inserir parâmetros

específicos do usuário, o software apenas interpola esses parâmetros com os do banco de dados. De acordo com Kandelous e Simunek (2010a), como o padrão de umedecimento calculado pelo WetUp é sempre elíptico, os diâmetros da elipse estimada foram selecionados para representar as dimensões da zona de molhamento.

Cote et al (2003) observaram limitações nas equações analíticas, principalmente devido a essas se basearam muito na localização das fontes de água, à linearização da equação de fluxo de água e por assumiram que as propriedades hidráulicas são homogêneas no perfil do solo, podendo, entretanto, serem úteis para avaliar a dinâmica da água no solo na irrigação por pulsos (COELHO e OR, 1997).

3.3.3 Modelos numéricos

Devido ao aumento da velocidade do computador e a disponibilidade de modelos numéricos mais abrangentes para simular o fluxo de água em solos saturados de forma mais variável, abordagens numéricas estão sendo cada vez mais usadas para avaliar fluxo em sistemas SDI (TAGHAVI et al., 1984; ANGELAKIS et al., 1993; COTE et al., 2003, LAZAROVITCH et al., 2007, PROVEZANO, 2007; KANDELOUS; SIMUNEK, 2010a,b). Assim, o pacote de programas de computador HYDRUS (SIMUNEK et al. 1999, 2006), em plataforma Windows, foi desenvolvido. O HYDRUS-2D/3D se utiliza de técnicas numéricas para simular o fluxo de água, calor e solutos em duas ou três dimensões, em meios porosos. Muitos estudos simularam o fluxo de água em SDI para uma linha lateral (SKAGGS et al., 2004; BEN-GAL et al., 2004), enquanto outros simularam o SDI usando uma fonte pontual de descarga de água ou um emissor individual (PROVENZANO, 2007; LAZAROVITCH et al., 2007; KANDELOUS; SIMUNEK, 2010a,b). Todas essas aproximações foram realizadas usando tanto modelos bidimensionais planos ou de eixo simétrico, enquanto o SDI pode ser visto como um problema de fluxo totalmente tridimensional (KANDELOUS, 2011).

Skaggs et al. (2010) utilizaram a combinação de simulações numéricas com HYDRUS-2D e experimentos de campo para investigar o efeito de taxa de aplicação, conteúdo inicial de água no solo antes da aplicação de água na água na evolução horizontal da frente de molhamento para tubos gotejadores enterrados de forma

rasa, num SDI. De uma maneira geral, descobriram que as propriedades hidráulicas do solo e o teor inicial de umidade tiveram grande influência na distribuição de água, não observando efeito significativo na taxa de descarga do emissor e aplicação de água por pulsos. Entretanto, esses resultados são contrários aos encontrados por Li et al (2003), que detectaram que a vazão do emissor teve maior influência no tamanho e no padrão de distribuição da umidade no SDI. É provável que esta discrepância seja devida ao enterramento superficial da tubulação, usada em muitas regiões para proteger a tubulação (mantê-la no lugar), fator que pode gerar uma pressão positiva ao redor do emissor e, em algumas circunstâncias, causar um decréscimo na vazão do emissor (LAZAROVICTH; SIMUNEK; SHANI, 2005).

Muitos progressos têm sido observados na compreensão e descrição matemática dos fluxos de água em solos não saturados (SKAGGS et al., 2004; KANDELOUS; ŠIMŮNEK, 2010b). Recentemente, Šimůnek et al. (2016) descreveram uma aplicação desenvolvida no programa HYDRUS, na versão 3D, capaz de modelar a variabilidade dos movimentos da água em solos saturados e da absorção pelas raízes, baseado na equação numérica de elementos finitos da equação de fluxos. Siyal e Skaggs (2009), Liga e Slack (2004), Cote et al. (2003) e Kandelous e Šimůnek (2010b) verificaram o desempenho do modelo HYDRUS na simulação da frente de umedecimento sob irrigação por gotejamento superficial e subsuperficial. Kandelous e Šimůnek (2010a) simularam o transporte e a distribuição de calor, solutos e umidade ao redor de um emissor em solo franco-argiloso pelo modelo HYDRUS. Os resultados da modelagem foram comparados com observações laboratoriais e de campo, encontrando boa concordância entre os dados observados e os dados simulados.

O desempenho do modelo HYDRUS em simular o movimento da frente de umedecimento e/ou a distribuição do conteúdo de água na irrigação por gotejamento subsuperficial pode estar relacionado ao tipo de tubagem ou emissor utilizado. Roberts et al., (2008) encontraram melhor desempenho da fita gotejadora em relação ao tubo gotejador devido a criação de uma frente de avanço em forma de túnel, o qual cresce conforme aumenta o tempo de rega. De acordo com Honari et al., (2017), devido às complexidades inerentes à heterogeneidade de solos em condições de campo, a maioria dos estudos foi feita em escala de laboratório e em condições estáveis, enquanto poucos estudos investigaram e simularam a frente de avanço em condições de campo.

Naglic et al. (2014) usaram o HYDRUS-2D/3D para investigar numericamente a influência da textura, vazão do emissor e condições iniciais de umidade no padrão de distribuição da água sob uma fonte pontual de irrigação por gotejamento. Tanques com a parte frontal em vidro temperado, em dimensões de 40.3x30x2.5 (largura, altura e espessura), com dois tipos de solo (arenoso e franco argilo siltoso) foram usados para obter numericamente as dimensões da frente de umedecimento sob várias taxas de fluxo, encontrando que, para uma mesma taxa de aplicação, a frente de umedecimento cresce em ambas as direções, encontrando excelente relação com as simulações providas pelo HYDRUS-2D. Os autores sugerem também que observações dessa natureza podem ser utilizadas para melhorar a performance dos modelos empíricos de Schwatzmann e Zur (1986).

A equação de Richard's descreve que o movimento de água em meio não saturado ocorre devido a ação conjunta da gravidade e capilaridade, entretanto, negligencia o fluxo de água na fase não úmida, normalmente porque nesse fase os poros estão com proporção maior de ar. Soluções analíticas para a equação de Richards existem apenas para casos mais simples, exigindo, segundo Farthing e Ogden (2017), soluções numéricas em duas ou três dimensões, dependendo do problema e da complexidade do fluxo. Apesar do primeiro método numérico razoavelmente completo ter sido publicado no início da década de 1990, a solução numérica da Equação de Richards permanece computacionalmente cara e, muitas vezes, pouco confiável. Assim, uma metodologia robusta e universalmente acurada, que inclua uma larga gama de solos e condições iniciais e de contorno ainda não foi desenvolvida (VERECKEN et al., 2016).

Em condições ideais, simulações deveriam ser combinadas e comparadas com dados de campo ou laboratório, porém, modelos numéricos como o HYDRUS também podem ser usados somente para simular estudos, como uma aproximação real de cenários, quando os dados não estão disponíveis ou forem difíceis de obter (PONTEDEIRO et al. 2010). A precisão e acurácia das simulações envolvendo o HYDRUS dependem do tipo de problema a ser simulado (calor, água ou transporte de solutos), do tipo de simulação (inversa ou direta) e da escolha e discretização dos parâmetros estatísticos, de tempo, condições iniciais de contorno e escolha dos modelos disponíveis no programa HYDRUS para cada tipo de simulação (ŠIMŮNEK et al., 2005; LEAO; GENTRY, 2010). As condições de contorno adotadas no HYDRUS-2D/3D, a partir de 2011, envolvem a avaliação da distribuição espacial da taxa de descarga de um emissor, comprovando a importância das propriedades

hidráulicas, condições iniciais de umidade, presença de camadas retardadoras ao fluxo, assim como, irrigação contínua e intermitente, na evolução da frente de umedecimento em diferentes solos (SKAGGS et al., 2010).

4 MATERIAL E MÉTODOS

4.1 CARACTERIZAÇÃO DO LOCAL DO EXPERIMENTO

O experimento foi conduzido em laboratório da área experimental do Departamento de Engenharia Rural da Universidade Federal de Santa Maria, nos anos de 2017 e 2018. Os containers foram alocados em um espaço fechado para evitar a influência de precipitações e qualquer outro fator intrínseco que pudesse alterar as condições propostas.

4.2 AMOSTRAGEM DE SOLO E CARACTERIZAÇÃO

O solo coletado para a descrição físico-hídrica e condução do experimento é classificado como Argissolo Vermelho-amarelo Distrófico arênico (Embrapa 1999), de textura franco-arenosa. A amostra foi retirada da camada de 0,0-0,2 m, utilizando cilindros volumétricos de aproximadamente 71 cm³, para a determinação dos seguintes atributos físico-hídricos: densidade do solo (Ds), macroporosidade (Ma), microporosidade (Mi), porosidade total (P_T) os quais seguiram método proposto por Donagema et al. (2017).

A densidade do solo (Ds) foi realizada conforme descrito em Grossman e Reinsch (2002), solo contido em um anel volumétrico foi seco em estufa à 105°C, até peso constante. A determinação do volume de macroporos (cm³ cm⁻³) foi realizada a partir da saturação da amostra e aplicação de potencial matricial a -1 kPa, em mesa de areia, até que houvesse equilíbrio do conjunto, sendo então calculada a macroporosidade, a partir da relação entre o peso do conjunto saturado e equilibrado a -1 kPa pelo respectivo volume de solo. A Microporosidade foi determinada entre a relação de umidade a -6 kPa e o respectivo peso equilibrado a 105°C. Com base na proporção de macroporosidade e microporosidade, foi definida a porosidade total. As frações texturais (areia, silte e argila) e densidade de partículas foram determinadas conforme Donagema et al. (2017). A caracterização físico-hídrica do solo utilizado para a realização do experimento é apresentada na Tabela 1.

Tabela 1 – Caracterização físico-hídrica e textural de Argissolo Vermelho Distrófico arênico, textura arenosa

Profundidade	Ds	Dp	Macro	Micro	Pt	Areia	Silte	Argila
m	Mg m ⁻³		cm ³ cm ⁻³			g kg ⁻¹		
0,0-0,2	1,35	2,60	0,12	0,31	0,43	488,7	440,0	72,3

Ds = densidade do solo; Dp = densidade de partículas; Macro = macroporosidade; Micro = microporosidade; P_T = porosidade total.

4.3 SOLO EM CONTAINER - EXPERIMENTO DE LABORATÓRIO

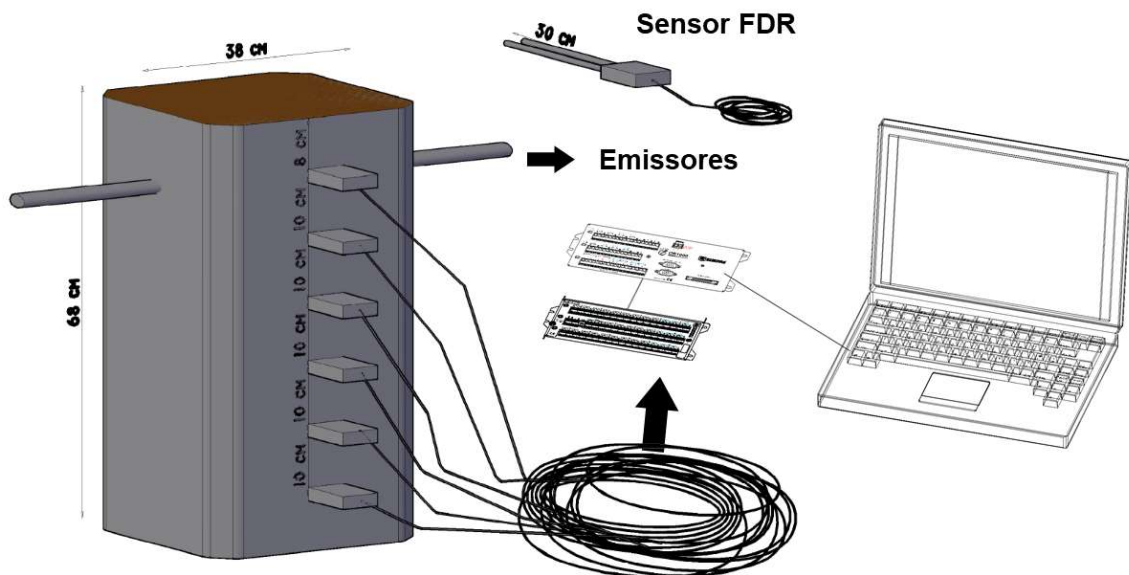
Os experimentos de laboratório foram realizados utilizando containers de 0.098 m³ (0,38 x 0,38 x 0,68 m) preenchido com solo homogêneo (o solo foi coletado na camada superficial do solo, em área experimental do Sistema Irriga. O volume de solo utilizado foi previamente seco ao ar, durante um período de 30 dias, até alcançar umidade constante de 0,036 cm³ cm⁻³ (conteúdo de água próximo ao ponto de murcha permanente) e peneirado em peneira de 2 mm. Posteriormente, o solo foi acondicionado dentro dos containers, estabelecendo-se critério de manter a densidade próxima a sua condição de campo (1,30-1,35 Mg m³). Uma camada de brita nº 1 foi instalada ao fundo dos recipientes para a drenagem da água percolada, evitando o acúmulo de água no fundo dos reservatórios, e ainda, sobre essa camada de brita foi colocada uma manta geotêxtil Bidim, de forma a deixar passar apenas a água.

A irrigação foi realizada através de tubos gotejadores autorreguláveis de 16 mm de diâmetro, com orifício gotejador (emissor) instalado em cada container, sendo três container com emissor a 12 cm de profundidade, três container com emissor a 24 cm de profundidade e três container com emissor 36 cm de profundidade. A pressão de serviço utilizada foi de 10 mca. No primeiro teste, realizado em 2017, usou-se um emissor por recipiente, com uma vazão de 0.9 l/hora, resultando numa taxa de aplicação de 6.2 mm/hora. Em 2018, a vazão foi duplicada, utilizando-se dois emissores por recipiente (dois tubos gotejadores foram sobrepostos, de forma que, a vazão final resultasse em 1.8 l/hora).

Sensores FDR (Frequência no Domínio de Tempo), modelo CS616, foram usados para monitorar as alterações no conteúdo de água no solo dentro do container (Figura 1). Os sensores foram instalados na horizontal, nas profundidades

de 0,08; 0,18; 0,28; 0,38; 0,48 e 0,58 m. Os sensores foram atachados a um multiplexador analógico de canais, modelo AM 16/32b e um módulo de leitura e armazenamento de dados (CR 1000) todos da Campbell Scientific, Inc. (Logan, UT, USA). As medidas foram armazenadas em intervalos de tempo de um minuto. Ao final do teste, fez-se um total de 12 médias por hora do conteúdo de água (de 5 em 5 minutos) totalizando 96 e 144 registros de umidade, respectivamente, para 8 horas de irrigação contínua e 12 horas de irrigação intermitente.

Figura 1 – Detalhamento do container com solo, emissores e conjunto de sensores conectados a um módulo de leitura e armazenamento de umidade

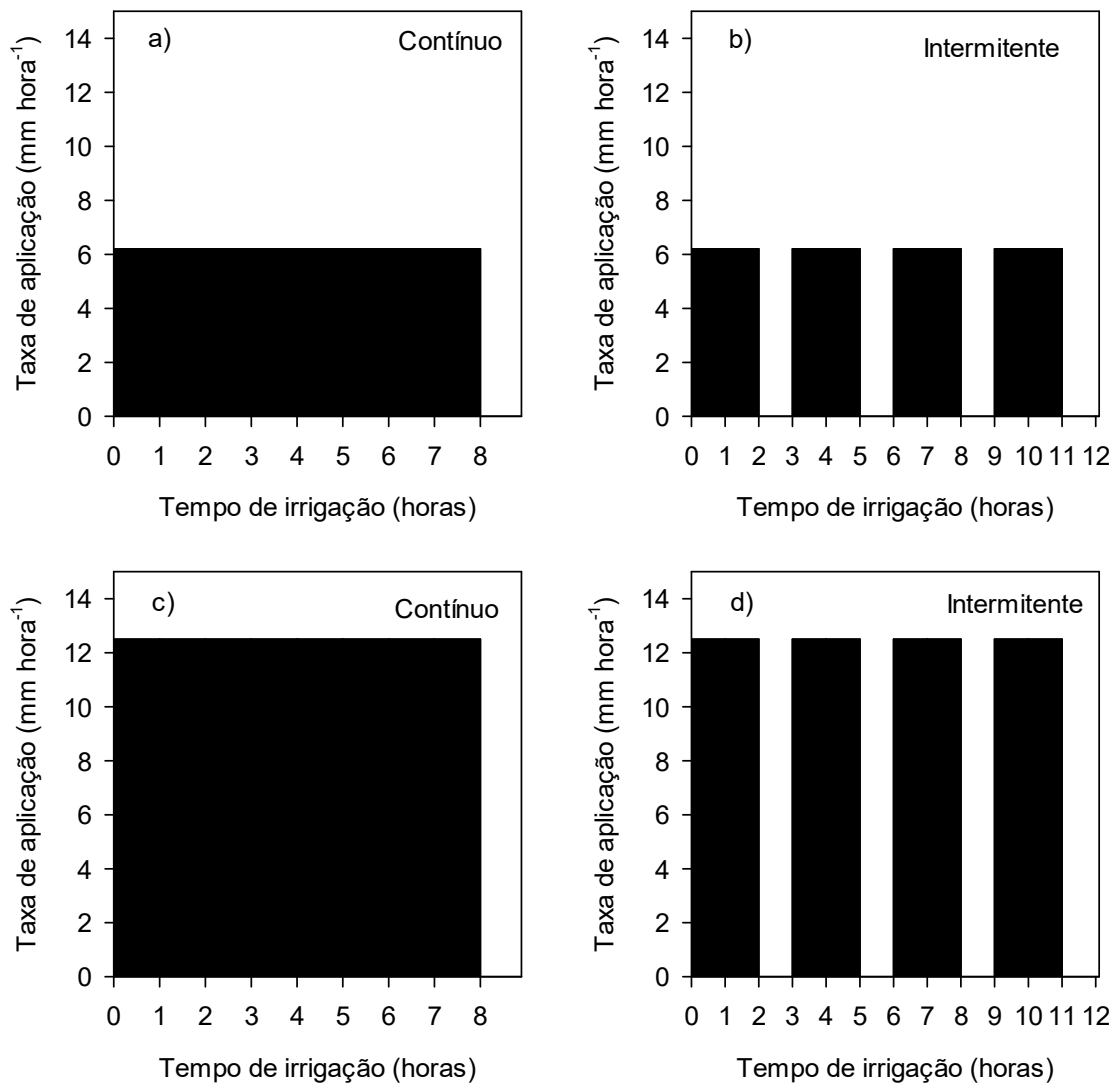


Como pode ser verificado na Figura 2, os testes foram divididos em 8 horas de irrigação contínua, resultando em uma lâmina de irrigação de aproximadamente 50 mm. Na irrigação intermitente (ou por pulsos), a rega foi mantida por duas horas, com intervalos de uma hora, totalizando 12 horas de irrigação.

A frente de umedecimento foi avaliada em função do raio (r) molhado a partir da posição dos emissores. Assim, para o emissor posicionado em 12 cm, $r = 6$ cm corresponde ao conteúdo de água medido entre o emissor e o sensor instalado a 18 cm, $r = 16$, $r = 26$, $r = 36$ e $r = 46$ cm, representam o conteúdo de água verificado entre o emissor e os sensores posicionados em 28, 38, 48 e 58 cm, respectivamente. Da mesma maneira, sempre em relação a distância de posicionamento dos sensores,

seguiu-se a análise de avanço da formação de bulbo úmido, para os emissores localizados em 24 e 36 cm.

Figura 2 – Taxa de aplicação e tempo de irrigação usado no experimento em laboratório, em 2017 e 2018, respectivamente, para a vazão de 0.9 L h⁻¹ (a e b) e 1.8 L h⁻¹



4.4 SIMULAÇÕES USANDO O HYDRUS 2D

4.4.1 Teoria da modelagem numérica

A distribuição de água a partir do emissor foi simulada usando o pacote de software HYDRUS-2D (versão 2.03) (ŠIMŮNEK et al., 2006, ŠIMŮNEK et al., 2016). Esse pacote de software pode fazer análises precisas e eficientes do fluxo de água e

transporte de solutos em meios porosos saturados, como irrigação subsuperficial e irrigação por aspersão.

Assumindo um solo homogêneo e isotrópico, a equação de fluxo bidimensional governante é descrita pela equação de Richards (RICHARDS, 1931) (Eq. 8).

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

em que: θ = conteúdo volumétrico de água [$L^3 L^{-3}$]; t = tempo [horas]; x = coordenada horizontal [L]; z = coordenada vertical, que é positiva quando o fluxo é ascendente [L]; h = ponto de pressão [L]; $K(h)$ = condutividade hidráulica não saturada [L/T^{-1}].

A retenção de água no solo, $\theta(h)$, e a condutividade hidráulica, $K_{sat}(h)$, foram descritas aplicando as funções analíticas de Van Genuchten (1980), conforme destacado nas Eq. 9 e 10.

$$S_e = \frac{\theta(h) - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} = \frac{1}{(1 + |\alpha h|^n)^m} \quad (m = 1 - 1/n) \quad (9)$$

$$K(h) = K_{sat} S_e^{0,5} [1 - (1 - S_e^{1/m})^m]^2 \quad (10)$$

em que: S_e = saturação relativa; K_{sat} = condutividade hidráulica saturada; θ_r e θ_s = conteúdos de água residual e saturada [$cm^3 cm^{-3}$], respectivamente; α = parâmetro empírico inversamente relacionada com o valor de entrada de ar; n e m = são todos os parâmetros de forma de van Genuchten-Mualem.

4.4.2 Modelagem de geometria e condições de limite

As entradas de dados no modelo HYDRUS para a simulação do fluxo de água incluíram a geometria do domínio de fluxo, parâmetros hidráulicos do solo e condições iniciais e de contorno. A geometria (Figura 1) e demais condições de contorno para definir o problema físico deste estudo foram apresentados no item 4.3.

Na situação atual, o espaçamento entre os emissores corresponde a 12 cm, portanto o domínio simulado para o fluxo de água era retangular, 38 cm de largura e 68 cm de profundidade, ou seja, grande o suficiente para que os perfis de conteúdo de água dos emissores vizinhos não precisem ser desconsiderados nos procedimentos de simulação. O emissor encontrava-se localizado na parte central do domínio.

Os nós de contorno do emissor foram atribuídos a uma pressão e vazão constante (0.9 L h^{-1} ou 1.8 L h^{-1} e pressão de 10 mca). O limite esquerdo e direito foi definido como uma condição de “sem fluxo ou fluxo zero”. O limite inferior foi definido como uma condição de contorno de “drenagem livre”. A condição de contorno da superfície foi definida como condição de contorno de “pressão constante” quando comparados os resultados de medição e simulação; a taxa de evaporação de água foi considerada como 0 mm d^{-1} , pois os testes foram realizados em condições controladas.

4.4.3 Propriedades hidráulicas

Com o critério de definição dos parâmetros hidráulicos, foi aplicado o modelo de função de pedotransferência de Roseta (SHAAP et al., 2001), o qual é acoplado ao software HYDRUS. Os parâmetros hidráulicos de entrada para o solo em estudo foram determinados a partir da textura (areia, silte e argila) e densidade do solo, e o modelo de Van Genuchten-Mualem foi equipado com os parâmetros de modelo para calcular os parâmetros da curva de retenção de água (θ_r , θ_s , α , n e K_{sat}). Os parâmetros hidráulicos são apresentados na Tabela 2.

Tabela 2 – Parâmetros hidráulicos de Argissolo Vermelho Distrófico arênico aplicados como critérios de entrada de modelagem numérica no HYDRUS-2D

Profundidade Emissor (cm)	θ_r ($\text{cm}^3 \text{ cm}^{-3}$)	θ_s ($\text{cm}^3 \text{ cm}^{-3}$)	A	N	K_{sat} (cm h^{-1})	I	Vazão (L/h^{-1})
12 - FC	0,03	0,35	0,10	1,89	0,09	0,5	0,9
24 – FC	0,03	0,35	0,10	1,89	0,09	0,5	0,9
36 – FC	0,03	0,35	0,10	1,89	0,09	0,5	0,9
12 – FC	0,036	0,3	0,075	1,89	2,8	1,0	1,8
24 – FC	0,036	0,3	0,075	1,89	3,0	1,0	1,8
36 - FC	0,036	0,3	0,075	1,89	3,2	1,0	1,8

FC = Fluxo contínuo; K_{sat} = Condutividade hidráulica saturada; I = Tortuosidade de poros.

4.5 ANÁLISE ESTATÍSTICA

Para averiguar o desempenho do modelo, foi realizada uma análise estatística através dos seguintes parâmetros: o coeficiente de regressão forçado à origem (b_0),

o coeficiente de determinação (R^2), e a raiz quadrada do erro médio (RMSE), conforme equações 11, 12 e 13, respectivamente. Para o RMSE, que é uma medida de precisão, pois eleva ao quadrado, a diferença entre os valores estimados e observados é mais sensível a erros, será sempre um valor positivo, o valor zero indica uma previsão perfeita e este valor aumenta conforme aumenta a diferença entre valores de previsão e observação.

$$b = \frac{\sum_{i=1}^n O_i P_i}{\sum_{i=1}^n O_i^2} \quad (11)$$

$$R^2 = \left\{ \frac{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})(P_i - \bar{P})}{\left[\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})^2 \right]^{0.5} \left[\sum_{i=1}^n (P_i - \bar{P})^2 \right]^{0.5}} \right\}^2 \quad (12)$$

$$RMSE = \left[\frac{\sum_{i=1}^n (P_i - O_i)^2}{n} \right]^{0.5} \quad (13)$$

A qualidade da modelagem foi avaliada através do índice de eficiência (EF) proposto por Nash e Sutcliffe (1970) e apresentado na equação 14. Esse parâmetro avalia a magnitude relativa da variância residual em comparação com a variância dos dados medidos. De acordo com Moriasi et al. (2007), valores de EF entre 0,0 e 1,0 são vistos como níveis aceitáveis de desempenho, enquanto valores menores que zero indicam que o valor médio observado é um melhor preditor do que o valor simulado, indicando desempenho inaceitável.

$$EF = 1,0 - \frac{\sum_{i=1}^n (O_i - P_i)^2}{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})^2} \quad (14)$$

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1 DISTRIBUIÇÃO DO CONTEÚDO DE ÁGUA NO SOLO: INFLUÊNCIA DA VAZÃO

O conteúdo médio inicial (θ_i) de umidade observada nos containers foi de $0.036 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$ (± 0.011), em ambos os anos, considerada como umidade residual, ligeiramente inferior ao ponto de murcha permanente. A ascensão da frente de umedecimento até a superfície do container foi visualizada após 120 minutos de irrigação contínua, para o emissor localizado a 12 cm de profundidade e com vazão de 0.9 L h^{-1} , conteúdo de água observado no emissor a 8 cm de profundidade (Figura 3). Entretanto, para a vazão de 1.8 L h^{-1} , a frente de umedecimento atingiu a superfície do solo após 60 minutos de irrigação, conteúdo de água observado no sensor a 8 cm de profundidade (Figura 4). Para o emissor localizado a 36 cm de profundidade, não se observou ascensão da água até a superfície. Em experimento conduzido por Kandelous e Šimůnek (2010b), em laboratório (lisímetros), usando um solo franco-argiloso, a máxima ascensão capilar observada foi de 18 cm, para uma vazão de 1.3 L h^{-1} , após 15 horas de irrigação. Vale ressaltar que, para as condições do experimento, o movimento vertical, horizontal e ascendente de água foi similar, encontrando um R^2 de 0,99 e um RMSE, em cm, de 0,98, 2,11 e 2,81 cm (ascendente, horizontal e vertical, respectivamente), para simulações da frente de avanço usando o HYDRUS-2D.

Nas Figuras 3 e 4 são apresentados os resultados do conteúdo de água observado e simulado pelo HYDRUS-2D, para emissores localizados a 12, 24 e 36 cm, com fluxo contínuo e vazões 0.9 L h^{-1} e 1.8 L h^{-1} . Observa-se que a frente de umedecimento se propagou rapidamente na vertical, com um raio molhado de 6 cm a partir do emissor, a partir dos 30 minutos de irrigação, para a vazão de 0.9 L h^{-1} , atingindo a umidade próxima à capacidade de campo nessa região com aproximadamente 120 minutos de irrigação. A comparação entre os dados observados e numericamente simulados para o avanço da frente de umedecimento até 6 cm de raio a partir do emissor resultou em um RMSE de $0.03 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$ e um R^2 de 0.94 (Tabela 3), indicando pequena variância dos erros. A eficiência de modelagem, avaliada pelo índice de Nash-Sutcliffe foi de 0.89, considerado muito bom, segundo Moriasi et al. (2007). Quando se aumentou a vazão para 1.8 L h^{-1} , a

propagação da frente de umedecimento foi mais rápida, criando uma zona de saturando da área próximo ao emissor. Neste caso, o RMSE foi de apenas 0.02 $\text{cm}^3\text{cm}^{-3}$, com um R^2 ligeiramente inferior ao anterior (0.87), ainda assim, indicando boa concordância entre os dados observados e preditos pelo modelo. Esses resultados estão de acordo com os Skaggs et al. (2004). Cook et al. (2003) e Schwartzman e Zur (1986), cujos modelos empíricos e analíticos apresentaram relação direta da profundidade “z” da frente de molhamento com a vazão do gotejador.

A Figura 3 mostra claramente que, para um mesmo tempo de irrigação ($t=120$ minutos), o conteúdo de água medido no raio de 6 cm foi igual ($\sim 0,25 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$), para as duas vazões testadas. Estes resultados são semelhantes aos encontrados por Elmaloglou e Diamantopoulos (2007), que testaram a infiltração vertical e horizontal da água em diferentes vazões e texturas de solo, encontrando que, para solos de textura grosseira, há uma tendência de a água avançar mais rapidamente no sentido vertical que na horizontal

Figura 3 – Variação temporal do conteúdo de água no solo observado (a, b, c) e simulado (d, e, f) para a vazão de 0.9 L h^{-1} , em fluxo contínuo de 480 minutos de irrigação, e emissores instalados em diferentes profundidades (12, 24 e 36 cm), o conteúdo de água foi observado nos sensores TDR instalados nas seguintes profundidades 8 cm, 18 cm, 28 cm 38 cm, 48 cm e 58 cm

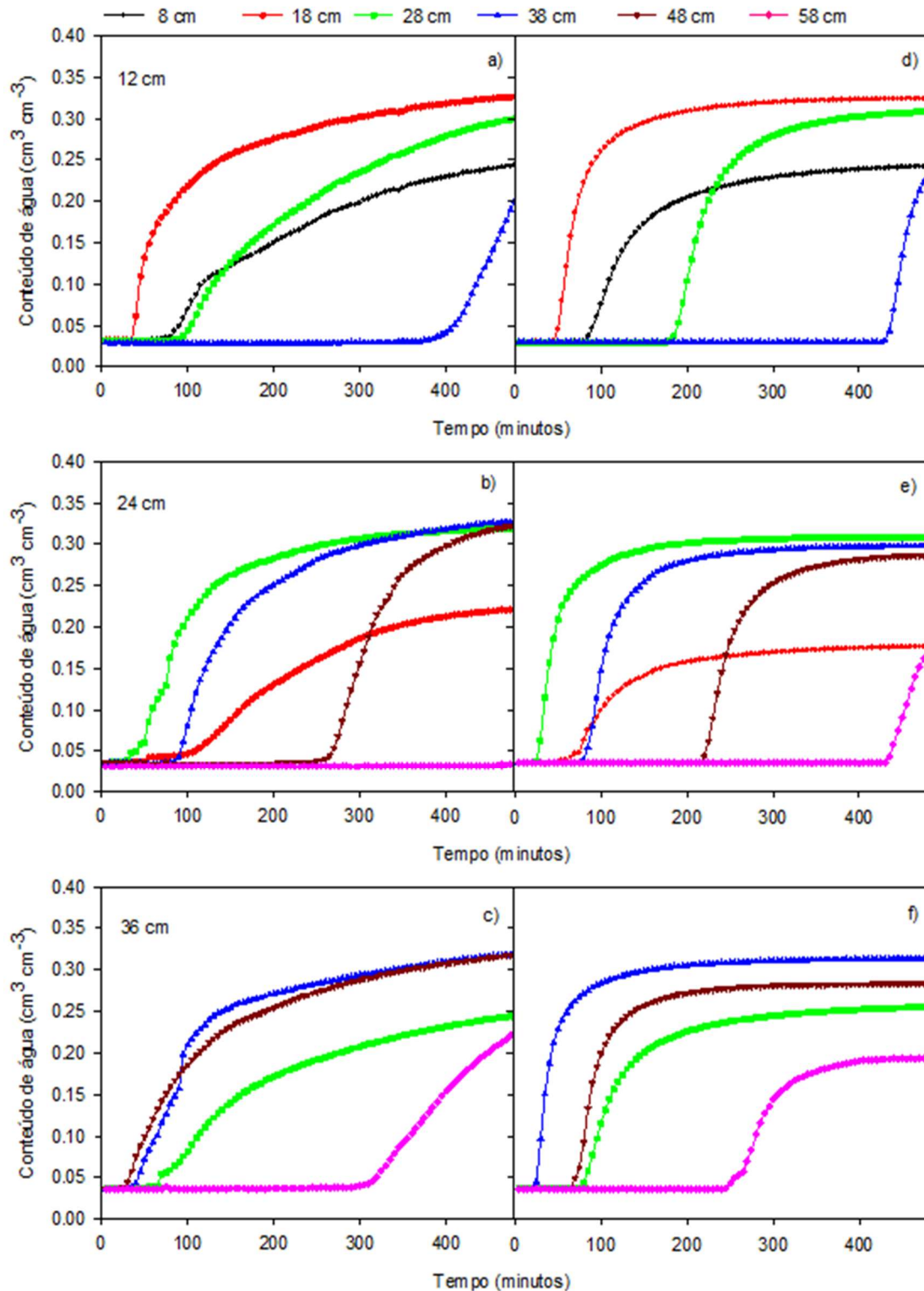
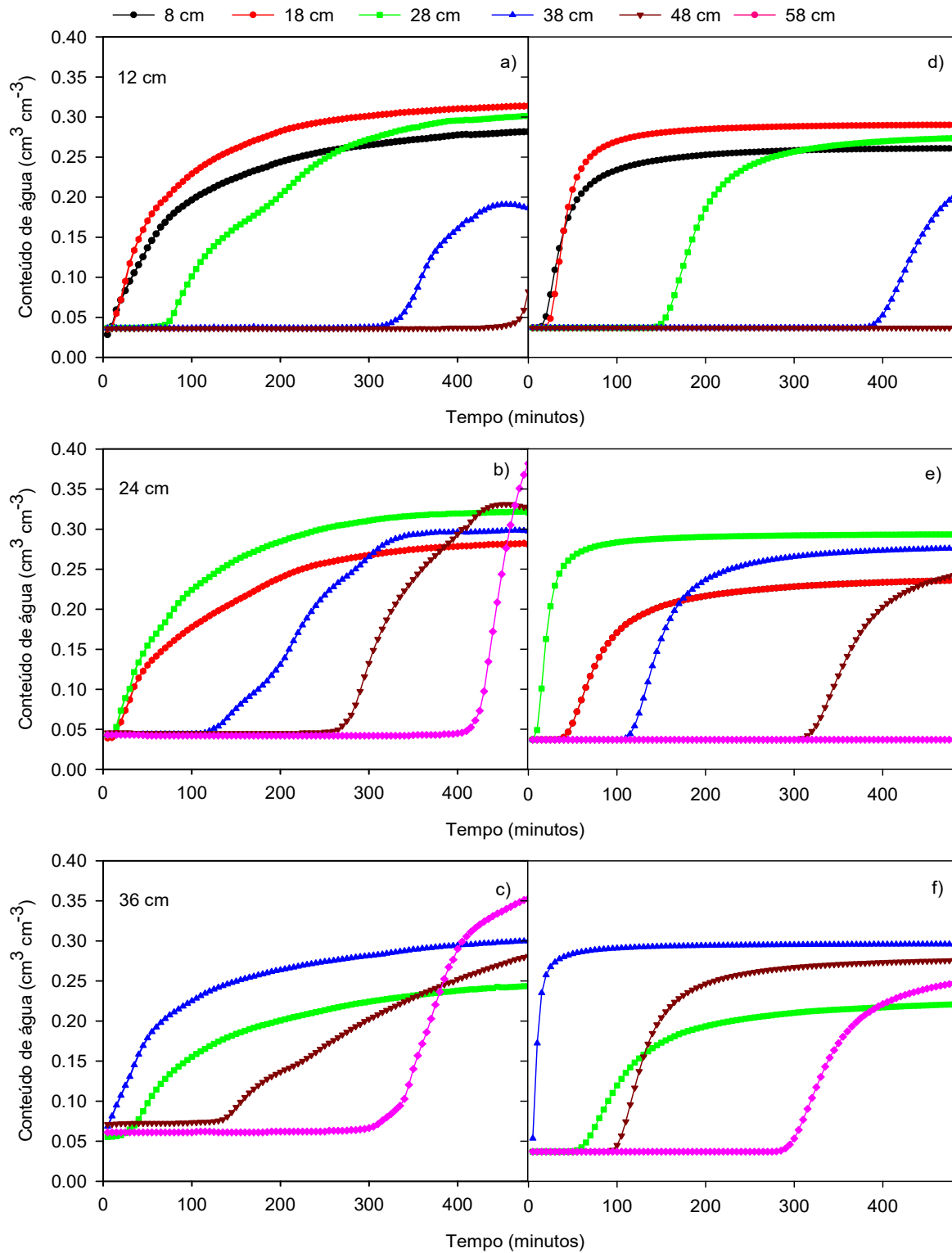


Figura 4 – Variação temporal do conteúdo de água no solo observado (a, b, c) e simulado (d, e, f) para a vazão de 1.8 L h^{-1} , em fluxo contínuo de 480 minutos de irrigação e emissores em diferentes profundidades (12, 24 e 36 cm)



O avanço vertical da umidade do solo, apresentada nas Figuras 3 e 4, mostra que, para primeira hora de irrigação, não se observou diferença na frente de umedecimento, para o sensor localizado a 16 cm do emissor, independente de vazão. A partir de 80 e 100 minutos de irrigação, para $q=0.9$ e 1.8 L h^{-1} , respectivamente, houve um rápido incremento da umidade do solo. Entretanto, a umidade próxima a capacidade de campo somente foi verificada após 300 minutos de irrigação, para ambas as vazões. Zhang et al (2012) observaram efeito significativo da vazão do gotejador e do tempo de irrigação no aprofundamento vertical da umidade do solo, que encontraram um raio umedecido de 15-17 cm, para vazões do emissor de 0.8 a 1.7 L hora^{-1} . O RMSE, que caracteriza as diferenças entre o conteúdo de água observado e estimado para essa profundidade, variou de 0.05 e $0.04 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$, enquanto o R^2 variou de 0.92 a 0.96, para $q=0.9$ e 1.8 L h^{-1} (Tabela 3 e Tabela 4) respectivamente. Esses valores maiores do RMSE, para essa profundidade, podem estar relacionados ao fato do modelo ter retardado o avanço da frente de umedecimento, em relação aos dados observados.

Na Figura 5 são apresentados os resultados do conteúdo volumétrico de água observado e simulado, para diferentes raios umedecidos a partir do emissor instalado a 12 cm de profundidade e duas vazões (0.9 e 1.8 L h^{-1} , respectivamente), durante 8 horas de irrigação contínua. As diferenças entre os valores observados e simulados podem ser parcialmente explicados pelo método de medição da umidade (com sensores FDR de 30 cm instalados na horizontal), o que pode ter impedido a identificação do volume total umedecido dentro do container. Mesmo assim, percebe-se claramente a influência da maior vazão (q) no raio molhado pelo emissor (Figura 5b).

Arbat et al. (2013) usaram um modelo numérico simples, o Drip-Irrigator, para simular a frente de avanço da umidade e o compararam ao HYDRUS-2D. Para uma vazão de 4 L h^{-1} e tempo de irrigação de aproximadamente 3 horas, os autores concluíram que o HYDRUS-2D foi mais realista em simular o avanço da frente de umedecimento, embora tenha subestimado e superestimado o avanço horizontal e vertical da frente de umedecimento, respectivamente. Essas sub e superestimações podem ter ocorrido devido às condições de contorno utilizadas pelo HYDRUS, o qual não considera o efeito de inundação causado por uma fonte pontual de irrigação, a qual causa uma saturação próximo ao emissor. No estudo em questão, observou-se, para a vazão de 0.9 L h^{-1} , uma subestimação da progressão da frente de

umedecimento, com um retardamento de aproximadamente 100 minutos e posterior superestimação da frente de avanço da umidade, a partir de 240 minutos de irrigação (Figura 5a), enquanto que, para a vazão de 1.8 L h⁻¹, verificou-se uma subestimação inicial (entre 60 e 200 minutos), tendo melhor ajuste a partir desse tempo, com um RMSE de 0.04 cm³ cm⁻³ e R² de 0.96.

Tabela 3 – Indicadores estatísticos entre os dados observados e simulados do conteúdo volumétrico de água no solo (médias de 5 em 5 minutos), para a vazão de 0.9 L h⁻¹, com fluxo contínuo, em 480 minutos de observação

Profundidade do sensor	b₀	R²	RMSE (cm ³ cm ⁻³)	EF
Profundidade do emissor = 12 cm				
08 cm	1.12	0.93	0.03	0,83
18 cm	1.06	0.94	0.03	0.89
28 cm	1.12	0.92	0.05	0.76
38 cm	1.04	0.92	0.01	0.88
48 cm	-	-	-	-
58 cm	-	-	-	-
Profundidade do emissor = 24 cm				
08 cm	-	-	-	-
18 cm	0.92	0.79	0.03	0.76
28 cm	1.04	0.81	0.05	0.73
38 cm	1.00	0.93	0.03	0.93
48 cm	1.02	0.81	0.06	0.78
58 cm	1.44	0.65	0.03	0.37
Profundidade do emissor = 36 cm				
08 cm	-	-	-	-
18 cm	-	-	-	-
28 cm	1.16	0.93	0.04	0.73
38 cm	1.09	0.75	0.06	0.56
48 cm	0.96	0.90	0.03	0.86
58 cm	1.15	0.69	0.04	0.49

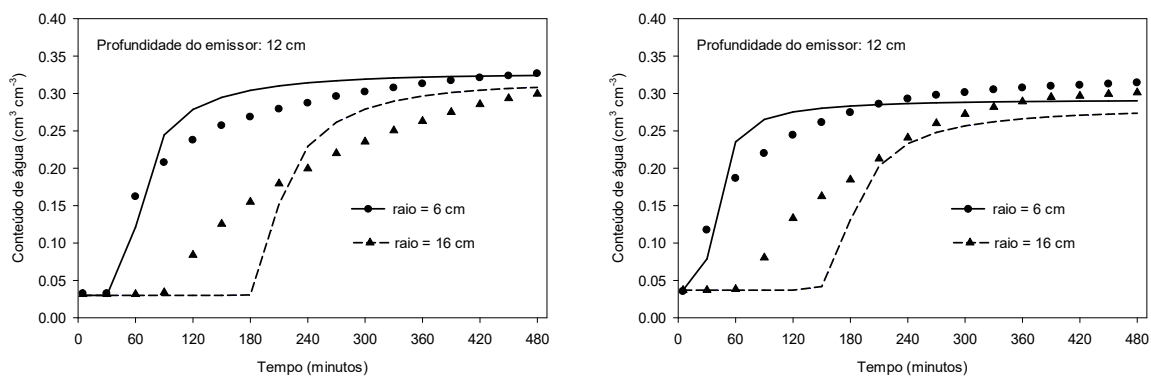
Tabela 4 – Indicadores estatísticos entre os dados observados e simulados do conteúdo volumétrico de água no solo (médias de 5 em 5 minutos), para a vazão de 1.8 L h⁻¹, com fluxo contínuo, em 480 minutos de observação

Profundidade do sensor	b ₀	R ²	RMSE (cm ³ cm ⁻³)	EF
Profundidade do emissor = 12 cm				
08 cm	1.01	0.87	0.02	0.86
18 cm	0.99	0.87	0.02	0.87
28 cm	0.87	0.96	0.04	0.85
38 cm	0.70	0.66	0.04	0.56
48 cm	-	-	-	-
58 cm	-	-	-	-
Profundidade do emissor = 24 cm				
08 cm	-	-	-	-
18 cm	0.86	0.93	0.04	0.66
28 cm	1.01	0.63	0.05	0.57
38 cm	1.02	0.83	0.05	0.81
48 cm	0.64	0.90	0.07	0.65
58 cm	0.46	0.34	0.11	-0.01
Profundidade do emissor = 36 cm				
08 cm	-	-	-	-
18 cm	-	-	-	-
28 cm	0.91	0.94	0.02	0.86
38 cm	1.11	0.46	0.05	0.00
48 cm	1.23	0.78	0.06	0.42
58 cm	0.78	0.94	0.04	0.86

Arbat et al. (2013) usaram um modelo numérico simples, o Drip-Irrigator, para simular a frente de avanço da umidade e o compararam ao HYDRUS-2D. Para uma vazão de 4 L hora⁻¹ e tempo de irrigação de aproximadamente 3 horas, os autores concluíram que o HYDRUS-2D foi mais realista em simular o avanço da frente de umedecimento, embora tenha subestimado e superestimado o avanço horizontal e vertical da frente de umedecimento, respectivamente. Essas sub e superestimações podem ter ocorrido devido às condições de contorno utilizadas pelo HYDRUS, o qual não considera o efeito de inundação causado por uma fonte pontual de irrigação, a qual causa uma saturação próximo ao emissor. No estudo em questão, observou-se, para a vazão de 0.9 L h⁻¹, uma subestimação da progressão da frente de umedecimento, com um retardamento de aproximadamente 100 minutos e posterior superestimação da frente de avanço da umidade, a partir de 240 minutos de

irrigação (Figura 5a), enquanto que, para a vazão de 1.8 L h^{-1} verificou-se uma subestimação inicial (entre 60 e 200 minutos), tendo melhor ajuste a partir desse tempo, com um RMSE de $0.04 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$ e R^2 de 0.96 (Tabela 4).

Figura 5 – Conteúdo de água no solo observado (símbolos) e simulado (linhas) para diferentes distâncias do emissor, ao longo de 480 minutos de observação (médias de 30 minutos), para vazões de 0.9 (a) e 1.8 L h^{-1} (b). Sendo raio 6 a distância do emissor a 12 cm até o sensor TDR a 18 cm, e raio 16 cm a distância do emissor a 12 cm até o sensor TDR a 28 cm de profundidade



(a)

(b)

5.2 DISTRIBUIÇÃO DO CONTEÚDO DE ÁGUA NO SOLO: EFEITO DA CAPILARIDADE

Na Figura 6 são apresentados os resultados (observados e simulados) do movimento ascendente da frente de umedecimento a partir de diferentes profundidades de instalação dos emissores e duas vazões. A primeira observação possível de se fazer é que o conteúdo inicial de umidade foi idêntico para todos os pontos observados. Como esperado, apenas para o emissor a 12 cm de profundidade houve ascensão capilar até a superfície, após 120 e 60 minutos de irrigação, para as $q=0.9$ e 1.8 L h^{-1} , respectivamente, observados no sensor TDR a 8 cm de profundidade. Para o emissor instalado a 24 cm e 36 cm, não se observou umedecimento até a superfície do solo. Embora tenha havido um certo desajuste entre os dados observados e simulados pelo modelo, para os diferentes raios de distância do emissor, principalmente na primeira hora de irrigação, em geral, houve uma boa capacidade do modelo em prever o processo de distribuição da água no solo, no sentido ascendente. Entretanto, o modelo sinaliza que houve uma rápida

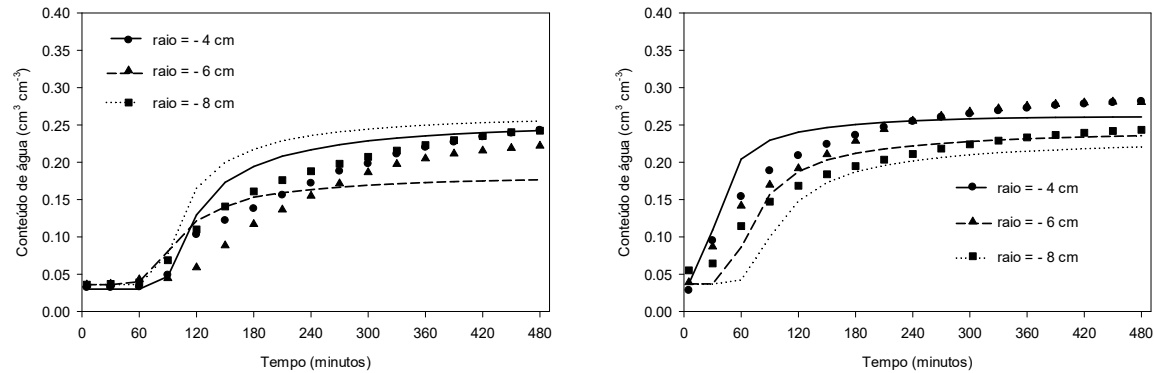
aceleração no movimento ascendente da água, tão logo a umidade do solo ao redor do emissor tenha atingido umidade igual ou superior a capacidade de campo, o que não foi verificado nos dados observados. Melhores ajustes entre os dados observados e simulados foram encontrados a partir de 180 minutos de irrigação, com menores erros para a vazão de 1.8 L h^{-1} (Figura 6b), o que era esperado, uma vez que, a vazão do emissor tem grande influência sobre a formação do bulbo molhado (horizontal, vertical e ascendente), no gotejamento subsuperficial.

Skaggs et al. (2004) utilizaram o modelo HYDRUS-2D para simular a distribuição da água a partir de um emissor instalada a 6 cm de profundidade e vazão de $4 \text{ L h}^{-1} \text{ m}^{-1}$, encontrando boa acurácia entre os dados observados e simulados ($\text{RMSE}=0.02$ a $0.04 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$) para amostras de umidade coletadas logo após 10 horas de irrigação. Kandelous e Simunek (2010b) mediram o avanço da frente de umedecimento em três direções, num solo franco argiloso e aplicando diferentes vazões, encontrando um perfil similar de umedecimento (nas três direções). Entretanto, esses autores não simularam o avanço ascendente da água para emissores instalados até 15 cm de profundidade, porque o HYDRUS prediz que a umidade alcança a superfície do solo, após certo tempo de irrigação, independentemente do tipo de solo e vazões aplicadas.

A maior parte dos trabalhos na literatura que adotaram o modelo HYDRUS-2D para avaliar o processo de redistribuição de água na irrigação por gotejamento subsuperficial foi feita com medições do conteúdo de água logo após o término da irrigação ou ao final do processo de infiltração, diferente desse trabalho, que avalia o processo de infiltração e redistribuição da água durante todo o tempo de infiltração. Assim, a comparação com resultados de literatura deve ser feita com certo resguardo, para aquele tempo específico de irrigação, e não o processo completo de fluxo transitório envolvido na obtenção desses estados finais (KANDELOUS et al., 2011).

Em solos arenosos e altamente permeáveis, o padrão de distribuição de água geralmente é elíptico, com um raio molhado maior na vertical do que na horizontal. Cote et al. (2003a) trabalharam com um emissor a 30 cm de profundidade e vazão de 1.65 L h^{-1} , e atestaram que 94% da água aplicada ficou concentrada logo abaixo do emissor. Os autores observaram pequeno movimento ascendente da água, sendo que, na camada superficial (15 cm acima do emissor), a umidade do solo permaneceu similar à umidade inicial.

Figura 6 – Conteúdo de água no solo observado (símbolos) e simulado (linhas) ao longo de 480 minutos de observação (médias de 30 minutos), para vazões de 0.9 (a) e 1.8 L h⁻¹ (b). Sendo raio 4 a distância do emissor a 12 cm até o sensor TDR a 8 cm, raio 6 a distância do emissor a 24 cm até o sensor TDR a 18 cm, raio 8 a distância do emissor a 36 cm até o sensor TDR a 28 cm, tais raios medem a ascensão capilar



(a)

(b)

5.3 DISTRIBUIÇÃO DO CONTEÚDO DE ÁGUA NO SOLO: EFEITO DO TEMPO DE IRRIGAÇÃO (CONTÍNUO OU INTERMITENTE)

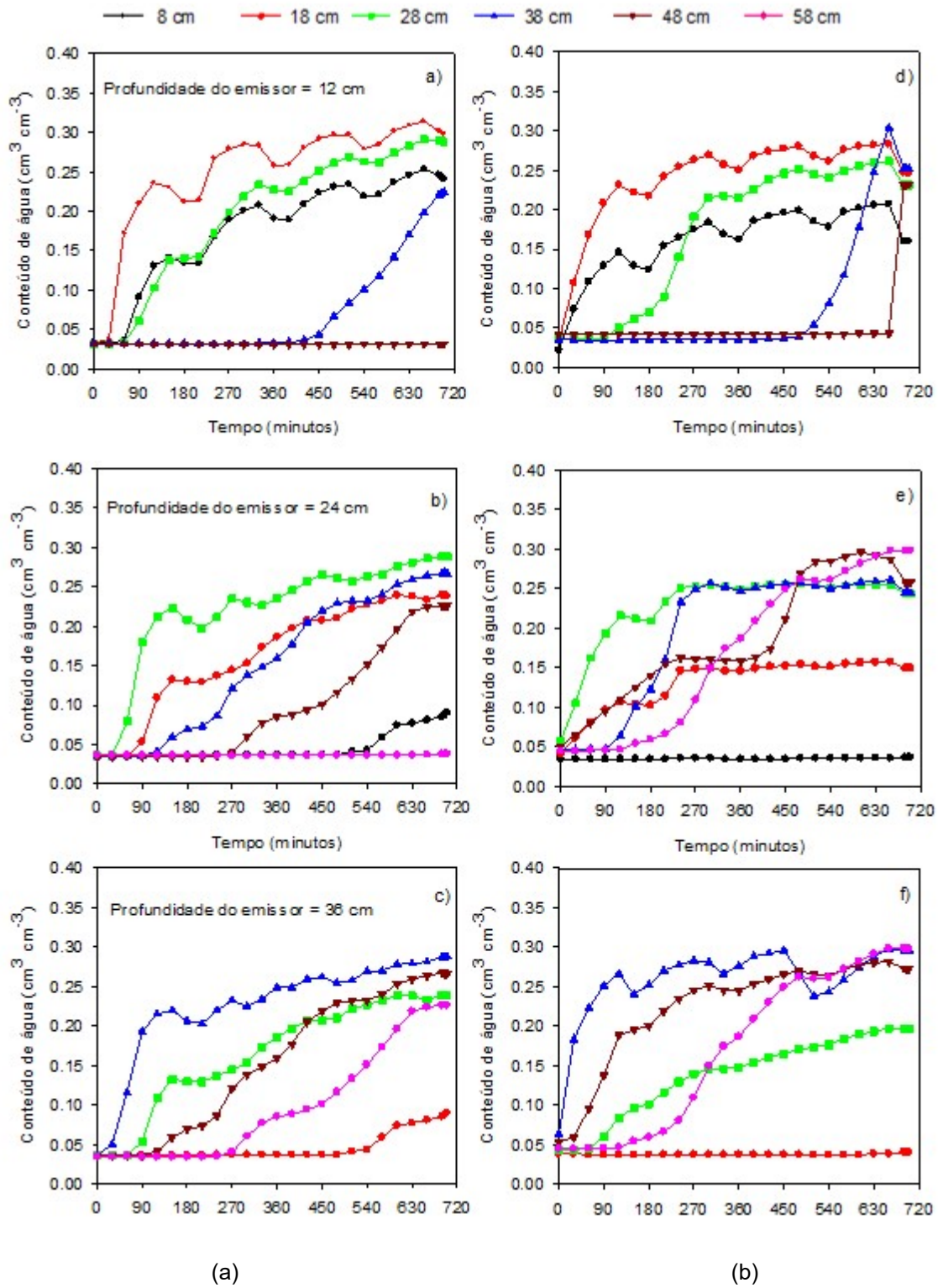
Na Figura 7 são apresentados os resultados da distribuição de água para o gotejamento subsuperficial com aplicação de fluxo intermitente (pulsos) para diferentes tempos de observação e duas vazões (0.9 e 1.8 L h⁻¹). Observou-se comportamento similar à irrigação contínua, na parte inicial do processo de redistribuição de água, independente da vazão utilizada. Conforme demonstrado na Figura, nos emissores localizados a 12 e 24 cm (Figura 7 a e b), houve um rápido movimento vertical da frente de umedecimento na vazão menor, fato que não se repetiu para o emissor localizado a 36 cm (7c). Esses resultados são semelhantes aos encontrados por Elmaloglou e Diamantopoulos (2007), que testaram vazões de 2 e 4 L hora⁻¹, em irrigação contínua e intermitente, para solos franco arenosos e franco siltosos, respectivamente. A Figura 7f, entretanto, apresenta maior movimento vertical da frente de umedecimento para a vazão de 1.8 L h⁻¹, em relação a vazão de 0.9 L h⁻¹. Os resultados demonstram, também que, à medida que aumenta o tempo de irrigação (a partir de 180 minutos, por exemplo), as diferenças entre o conteúdo de água observado para as diferentes vazões são praticamente inexistentes, concordando com os dados de Elmaloglou e Malamos (2006).

A água que infiltra no solo se move em resposta a um potencial matricial, que está diretamente relacionado ao conteúdo de água no solo, e ao potencial gravitacional, que é a tendência de movimento vertical. Assim, quanto maior o volume de água aplicado, maior é a influência do potencial gravitacional e mais estreito é o raio do bulbo molhado (Subbaiah; Mashru, 2013). A máxima profundidade da frente de avanço é uma função do tempo de irrigação e do máximo tempo de oportunidade, sendo este último definido como pela subtração do tempo de avanço do tempo total de irrigação. Ou seja, os pontos mais distantes do emissor terão menor tempo de oportunidade que as zonas mais próximas. Assim, é esperado que na irrigação contínua, a infiltração vertical seja mais acelerada que na horizontal, ao passo que, na irrigação por pulsos, ocorre menor saturação do solo próximo ao emissor, resultando em menor potencial gravitacional e menor percolação (Cote et al., 2003).

Há um entendimento de que aumentando a frequência de irrigação, associado à adoção de fluxo intermitente, aumenta a extensão lateral e ascendente da frente de umedecimento. Comparando os resultados do conteúdo de água observado, na irrigação por fluxo intermitente e em duas vazões (7a e 7b), com os resultados apresentados nas Figuras 3 e 4 (fluxo contínuo), percebe-se claramente que, quando se aplicou o mesmo volume de água de forma intermitente, não houve a formação de zonas de saturação, o que favoreceu a redistribuição da água no perfil.

Os valores máximos do conteúdo de água observado nas diferentes profundidades de instalação dos sensores foram sempre inferiores aqueles observados na irrigação em fluxo contínuo. Esses resultados corroboram os de Elmaloglou e Diamantopoulos (2007), que observaram maior avanço horizontal da frente de molhamento em gotejamento subsuperficial, para duas vazões e diferentes tempos de irrigação. Entretanto, Cote et al. (2003), contrariando percepções correntes, encontraram maior extensão do umedecimento na vertical na irrigação por pulsos, em relação à contínua. Na simulação com o HYDRUS, os autores usaram um tempo de 100 horas após o final da irrigação, ao que chamaram de tempo de redistribuição. Ao final dessas 100 horas de redistribuição, as perdas por percolação foram muito menores na irrigação por pulsos do que na contínua, e isso deve ser considerado quando se planeja sistemas de irrigação por gotejamento, sobretudo em solos mais arenosos.

Figura 7 – Evolução da frente de umedecimento num solo franco arenoso, para diferentes tempos de observação, em irrigação intermitente, para vazões de 0.9 (a) e 1.8 L h⁻¹ (b)



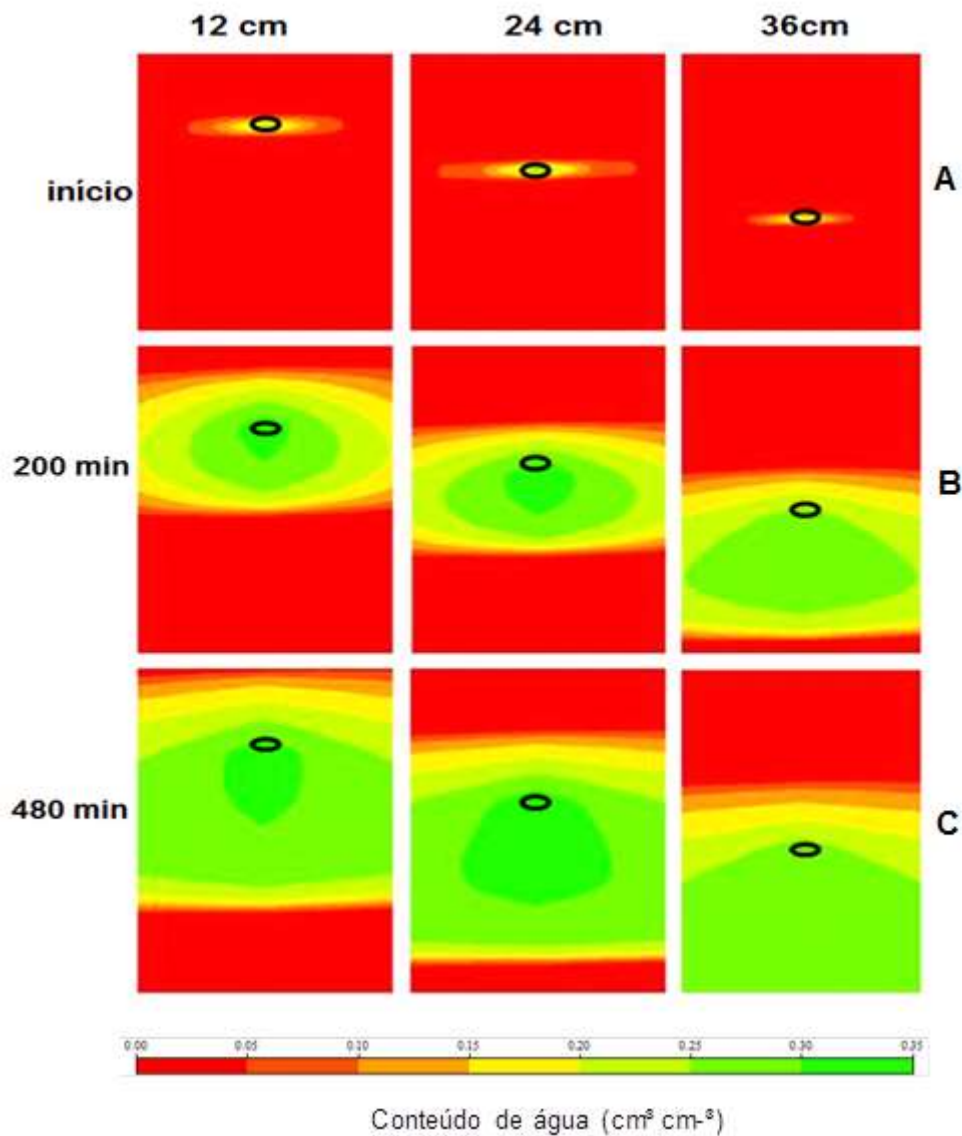
5.4 PADRÃO DE UMEDECIMENTO: SIMULAÇÃO DA DISTRIBUIÇÃO ESPACIAL DO CONTEÚDO DE ÁGUA

Nas Figuras 8 e 9 são apresentadas as simulações dos padrões de distribuição áreas molhadas ao redor do emissor (domínio bidimensional assimétrico) para diferentes tempos de irrigação (8 horas de irrigação contínua), através da aplicando dos parâmetros hidráulicos do solo listados na Tabela 2, nas vazões de 0.9 e 1.8 L⁻¹. Os resultados da simulação inferem que há uma zona de saturação logo abaixo do emissor, após 60 minutos de irrigação. Essa zona de saturação faz com que ocorra um movimento lateral da frente de umedecimento. Naglic et al (2014) simularam a frente de avanço em diferentes texturas de solo, com vazão de 2 L h⁻¹; para um solo com as características semelhantes ao estudo em questão. Esses autores encontraram um raio molhado na horizontal (eixo X) de 34.7 cm, contra 56 cm de molhamento máximo na vertical (eixo Y), ou seja, relação Y/X de 1.61, indicando a maior ação das forças da gravidade nesse solo. Para um solo argiloso, em contrapartida, essa relação ficou em 1.33, indicando a influência da textura, com clara dominância das forças capilares.

Observa-se que a ascensão da água à superfície, para o gotejador instalado a 12 cm, ocorreu somente próximo ao final das 8 horas de irrigação contínua. Martinez (2014) observou que a variação do conteúdo de água nas camadas superficiais é pequena, quando comparadas às camadas mais profundas. Isto confirma que a água que ascende no perfil é significativamente menor que a água que infiltra em profundidade. Isto se deve a força da gravidade, cuja influência é maior nos solos com características arenosas.

O padrão de distribuição espacial formado pelos bulbos de molhamento é semelhante nos três segmentos para os emissores instalados a 12, 24 e 36 cm (Figura 9 a, b, c), ocorrendo um movimento descendente e horizontal em proporções semelhantes. O principal parâmetro de controle do padrão de molhamento sob o emissor foi a profundidade de instalação do emissor. Na simulação, a velocidade de movimento da frente de molhamento foi lenta no início, aumentando gradualmente com o tempo de irrigação, ao contrário do que foi verificado nas observações do conteúdo de água. Devido à força da gravidade, em solos franco arenosos, a frente de molhamento horizontal foi menor do que a frente de molhamento vertical nas profundidades de instalação dos emissores.

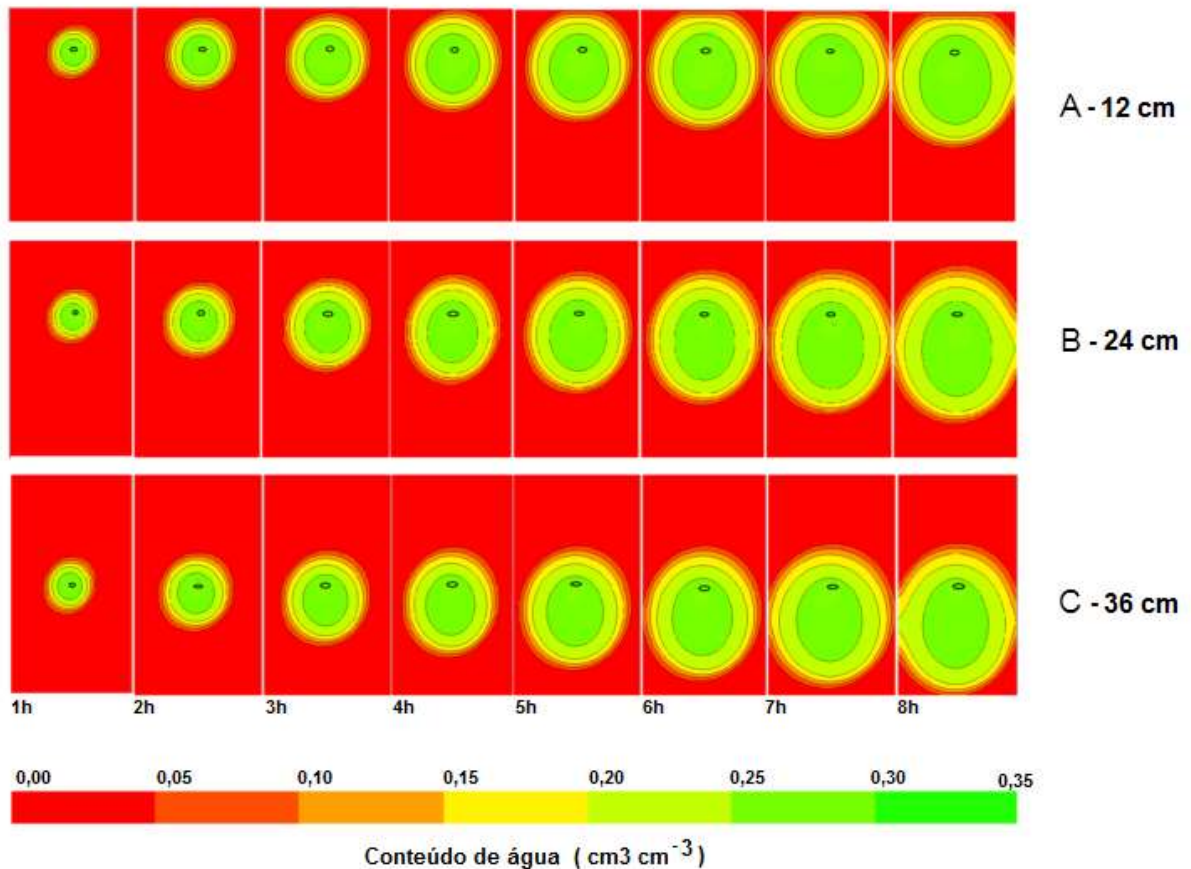
Figura 8 – Evolução da frente de molhamento em um sistema de irrigação por gotejamento subsuperficial em fluxo contínuo de oito horas de irrigação, para emissores instalados a 12, 24 e 36 cm de profundidade, com vazão de 0.9 L h⁻¹



A frente de molhamento vertical foi semelhante nas diferentes profundidades de instalação. Quando o emissor foi instalado aos 12 cm (Figura 9, A), a frente de molhamento horizontal foi inferior aos emissores instalados a 24 e 36 cm (Figura 9, B e C), pois a ascensão da água à superfície evitou o espalhamento vertical, resultando em um aumento significativo de umedecimento horizontal de 15 cm. Condição inversa aos demais emissores instalados a 24 e 36 cm, no qual não ocorreu ascensão capilar e este espalhamento ocorreu de forma gradativa vertical e horizontalmente, evidenciando o efeito acentuado da textura em profundidade. Em

profundidades próximas à superfície, a água de irrigação se moveria para a superfície do solo, como observado no emissor instalado a 12 cm, e a manutenção do umedecimento do solo pode aumentar as perdas por evaporação. Cai et al. (2017) encontraram comportamento semelhante ao do presente estudo, evidenciando a importância da profundidade de instalação, estrutura e textura dos solos.

Figura 9 – Padrão espacial de umedecimento no fluxo bidimensional assimétrico simulado usando HYDRUS para vazão de 1.8 L h⁻¹. (A) Emissor instalado a 12 cm; (B) Emissor instalado a 24 cm; (C) Emissor instalado a 36 cm



Considerando uma condição inversa ao do presente estudo, em solos de textura mais argilosa, em razão da menor taxa de infiltração, a tendência é que ocorra a formação de bulbo com maior dimensão horizontal, explicado pela maior influência da capilaridade sobre a gravidade, entretanto, no presente trabalho, a condição de solo franco arenoso, evidencia nesta condição o efeito da mínima proporção da fração argila e do silte nos efeitos matriciais que acarretaram na

condição de movimento radial do bulbo de molhamento após as 8 h de avaliação. Em solos de textura franco arenosa, esta condição verificada do bulbo de molhamento, é um indício da possível formação de caminhos de fluxo preferenciais formados pelas partículas grosseiras da areia, no qual contribui para que o solo se torne fortemente molhável, aumentando sua capacidade de conduzir água horizontal e verticalmente através destes caminhos.

Portanto, na simulação observada, fica evidente que, para as condições do presente estudo, a possível associação com culturas fica restrito às características do sistema radicular associadas às profundidades de instalação dos emissores, no qual a profundidade efetiva de instalação de 24 cm de profundidade serviria para culturas de sistema radicular mais profundo (mas não no início do ciclo), no qual as perdas de evaporação não seriam ignoradas, mas poderia economizar custos de instalação. Um profundidade enterrada de 36 cm de profundidade serviria para irrigar frutíferas, favorecendo diretamente o crescimento radicular, mas também as perdas por evaporação seriam insignificantes devido a não ascensão capilar observada em profundidade.

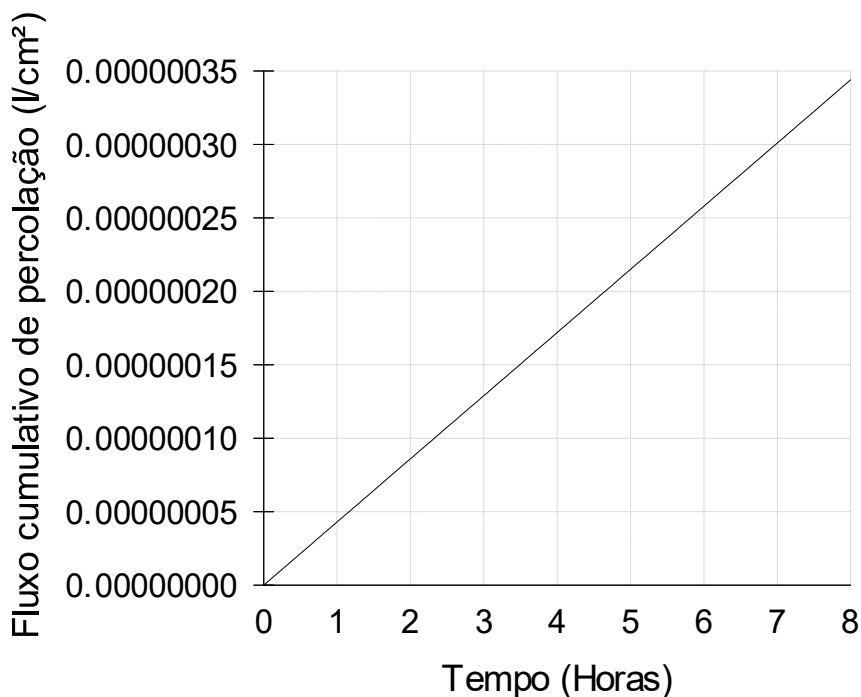
Em outra lógica, o efeito do comprimento capilar macroscópico descrito por Radcliffe e Simunek (2010), tendem a fornecer indícios desta relação de comportamento radial observada na formação dos padrões de umedecimento. Os efeitos associados de silte e areia fina atuariam para um comportamento semelhante ao das argilas, fazendo com que o padrão capilar macroscópico se agrupe na faixa de 7 cm. Como a fração areia apresenta um comprimento capilar macroscópico muito menor do que outros solos, a água que flui de uma fonte se moverá muito menos lateralmente ou para cima do que para baixo, fator este que não foi evidenciado neste trabalho, apesar da maior proporção da fração areia. Saefuddin et al. (2019) observaram este mesmo comportamento comparando solos com diferentes texturas e relação capilar macroscópica em irrigação subsuperficial.

A percolação de água a partir do fluxo de drenagem cumulativa verificada pelo modelo HYDRUS, foi constatada a partir do emissor instalado a 36 cm (Figura 10), no qual o modelo associou uma percolação de $35e^{-7}$ l/cm² (Figura 9), no qual a formação da frente de umedecimento atingiu a zona final do container aos 68 cm de profundidade. Para esta mesma condição, observa-se que quando o teor de água inicial aumentou, a distribuição do conteúdo de água no solo se tornou uniforme, mas favorecendo a um aumento na percolação em profundidade, mesmo que em

mínimas proporções. Conforme constatado e relatado por Wang et al. (2016), isto provavelmente se deve ao efeito da capacidade de armazenamento de água, que foi altamente dependente da diferença entre o teor de água saturada e o conteúdo inicial de água no solo, favorecendo então a um maior risco de percolação.

Nestas condições fica evidente que, para solos com textura franco arenosa, a vazão aplicada de 1.8 L h^{-1} e 8 horas de irrigação ou menos, é adequada, para profundidade efetiva variando entre 24 e 36 cm de profundidade, no qual 99% da água aplicada manter-se-ia na zona do sistema radicular beneficiando o rendimento das lavouras. Cai et al. (2017) constataram percolação muito superior a observada neste estudo com vazões de 5.9 L h^{-1} , no qual aproximadamente 26% da água aplicada foi percolada.

Figura 10 – Fluxo cumulativo de percolação em função da condição de contorno de drenagem livre simulada pelo HYDRUS



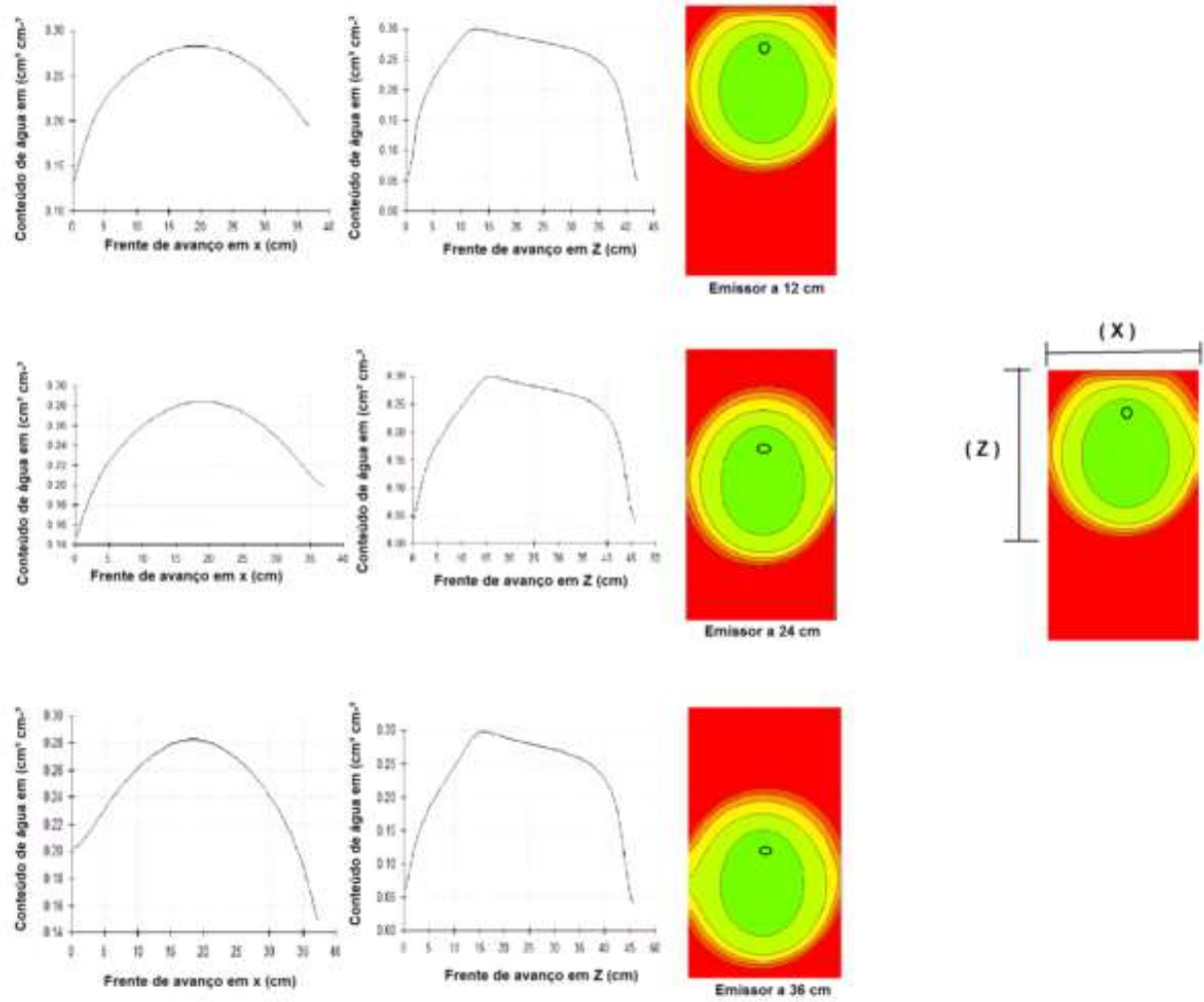
O diâmetro médio das frentes de umedecimento após 8 horas podem ser verificadas a partir da (Figura 11). Conforme destacado por Elmaloglou e Diamantopoulos (2009), o padrão de molhamento do solo em torno de uma fonte subsuperficial de aplicação de água depende principalmente das propriedades

hidráulicas do solo, da taxa de aplicação, tempo de aplicação, profundidade de instalação e da absorção de água pela raiz.

Neste trabalho, observou-se comportamento semelhante no padrão de formação dos bulbos em função de suas medidas, no qual foram semelhantes para os três emissores nas profundidades de instalação, ficando evidente o efeito da profundidade nas dimensões e forma do bulbo, constatado no emissor instalado a 12 cm, com dimensões de 38 cm (x) e 43 cm (z), entretanto, a manutenção da umidade atingiu um patamar rapidamente e manteve alcance constante radialmente, ficando evidente o efeito da ascensão capilar e molhamento superficial. Levien et al (2010) constataram um padrão semelhante da formação da frente de umedecimento para uma vazão de 2 l/hora em solos de textura média. Estes resultados vão de acordo com Souza et al. (2009), destacando que a aplicação contínua de água via irrigação por gotejamento tende a promover aumento no diâmetro superficial horizontal do bulbo molhado em superfície. Entretanto conforme já destacado, o efeito das perdas por evaporação podem ser maiores, e possivelmente a condição de escoamento dependendo da vazão de aplicação pode ser evidenciada, negligenciando assim os preceitos de racionalização dos recursos hídricos.

Para os emissores instalados a 24 e 36 cm o comportamento vertical de formação da frente de umedecimento é notório com avanço em profundidade de 45 cm (z), apesar que as dimensões horizontais sejam semelhantes ao que foi constatado no emissor instalado a 12 cm. Entretanto, a maior variação vertical, acarretam em menor alcance de distribuição da faixa úmida do bulbo, conforme já verificado, evidenciando assim que o padrão de distribuição espacial da umidade, é altamente influenciado pelo comprimento capilar macroscópico nesta profundidade de instalação, sendo o efeito do agrupamento de areia grossa mais acentuado sobre as demais frações texturais, apesar da textura ser homogênea.

Figura 11 – Diâmetro médio das frentes de umedecimento nos eixos x e z após 8 horas de irrigação contínua para vazão de 1.8 L h⁻¹



6 CONCLUSÕES

Diante dos resultados apresentados é possível concluir que o HYDRUS- 2D foi capaz de simular com eficiência o processo de infiltração e redistribuição de água para o SDI para emissores instalados em diferentes profundidades.

O movimento da água foi preferencialmente vertical, independentemente da vazão, entretanto, as proporções de areia fina e silte, influenciaram no maior movimento horizontal evidenciando assim, a influência da textura franco arenosa na frente de umedecimento. Na irrigação em fluxo intermitente, houve melhor redistribuição da umidade, minimizando os efeitos das zonas saturadas e perdas de água por percolação.

O conteúdo de água atingiu a superfície independente da vazão testada no emissor instalado a 12 cm de profundidade, o que não ocorreu nos emissores a 24 e 36 cm de profundidade.

REFERÊNCIAS

- AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS (ANA). **Atlas irrigação: uso da água na agricultura irrigada**. Brasília: ANA, 2017, 85 p.
- AGUIAR, F. Gotejamento enterrado é novidade na irrigação da cana. **Agrianual**, São Paulo, p. 256-2577, 2002.
- AINECHEE, G.; BOROOMAND-NASAB, S.; BEHZAD, M. Simulation of Soil Wetting Pattern Under Point Source Trickle Irrigation. **Journal of Applied Sciences**, v. 9, n. 6, p. 1170-1174, 2009.
- AL-OGAIDI, A. A. M.; WAYAYOK, A. A.; ROWSHON, M. K.; ABDULLAH, A. F. Wetting patterns estimation under drip irrigation systems using an enhanced empirical model. **Agricultural Water Management**, v. 176, p. 203–213, 2016.
- AMIN, M. S. M.; EKHMAJ; A. I. M. **DIPAC-drip irrigation water distribution pattern calculator**. In: 7th International Micro Irrigation Congress, 10–16 Sept., PWTC Kuala Lumpur, Malaysia, 2006.
- ANGELAKIS, A. N.; KADIR, T. N; ROLSTON, D. E. Time-dependent soil-water distribution under a circular trickle source. **Water Resources Management**, v. 7, n. 3, p. 225-235, 1993.
- ARBAT, G.; PUIG-BARGUÉS, J.; DURON-ROS, M.; BARRAGÁN, J., RAMÍRESE DE CARTAGENA, F. Drip-irriwater: computer software to simulate soil wetting patterns under surface drip irrigation. **Computers and Electronics in Agriculture**, v. 98, p. 183–192, 2013.
- BAINBRIDGE, D. A. Buried clay pot irrigation: a little known but very efficient traditional method of irrigation. **Agricultural Water Management**, v. 48, n. 2, p.79-88, 2001.
- BATTAM, M. A., SUTTON, B. G., BOUGHTON, D. G. Soil pit as a simple design aid for subsurface drip irrigation systems. **Irrigation Science**, v. 22, p. 135–141, 2003.
- BEN-GAL, A.; LAZAROVITCH, N.; SHANI, U. Subsurface drip irrigation in gravel-filled cavities. **Vadose Zone Journal**, v. 3, p. 1407–1413, 2004.
- CAI, Y.; WU, P.; ZHANG, L.; ZHU, D.; CHEN, J.; WU, S.; ZHAO, X. Simulation of soil water movement under subsurface irrigation with porous ceramic emitter. **Agricultural Water Management**, v. 192, p. 244-256, 2017.
- CAMP, C. R. Subsurface drip irrigation: a review. Transactions of the ASAE, **St. Joseph**, v. 41, n. 5, p. 1353-1367, 1998.
- CLOTHIER, B. E.; SCOTTER, D. R. Constant flux infiltrations from a hemispherical cavity. **Soil Science Society America Journal**, v. 46, p. 696–700, 1982.

COELHO, F. E.; OR, D. Applicability of analytical solutions for flow from point sources to drip irrigation management. **Soil Sci. Soc. Am. J.**, v. 61, p. 1331–1341, 1997.

COOK, F. J.; THORBURN, P. J.; FITCH, P.; BRISTOW, K. L. WetUp: a software tool to display approximate wetting patterns from drippers. **Irrigation Science**, v. 22, p. 129–134, 2003a.

COOK F. J.; THORBURN, P. J.; BRISTOW, K. L.; COTE, C. M. Infiltration from surface and buried point sources: the average wetting water content. **Water Resour Res**, v. 39, p. 1364–1369, 2003b.

COTE, C. M.; BRISTOW, K. L.; CHARLESWORTH, P. B.; COOK, F. J. Analysis of soil wetting and solute transport in sub-surface trickle irrigation. **Irrigation Science**, v. 22, n. (3-4), p. 143-156, 2003.

DARUSMAN KHAN, A. H; STONE, L. R; LAMM, F. R. Water flux below the root zone vs. drip-line spacing in drip-irrigated corn. **Soil Science Society of America Journal**, v. 61, p. 1755–1760, 1997.

DASBERG, S.; OR, D. **Drip Irrigation**. Berlin: Springer, 1999. 162p.

DONAGEMA, G. K.; CAMPOS, D. V. B.; CALDERANO, S. B.; TEIXEIRA, W. G.; VIANA J. H. M. **Manual de métodos de análise de solo**. Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 2017.

DUKES, M. D.; SCHOLBERG, J. M. Soil moisture controlled subsurface drip irrigation on sandy soils. **Appl. Eng. Agric.**, v. 21, n. 1, p. 89–101, 2005.

EL-HENDAWY, S. E.; ABD EL-LATTIEF, E. A.; AHMED, A. S.; SCHMIDHALTER, U. Irrigation rate and plant density effects on yield and water use efficiency of drip-irrigated corn. **Agric. Water Manage**, v. 95, p. 836–844, 2008.

ELMALOGLOU, S.; DIAMANTOPOULOS, D.; DERCAS, N. Comparing soil moisture under trickle irrigation modeled as a point and line source. **Agric. Water Manage**, v. 97, p. 426-432, 2010.

ELMALOGLOU, S.; DIAMANTOPOULOS, E. Simulation of soil water dynamics under subsurface drip irrigation from line sources. **Agricultural Water Management**, v. 96, p. 1587-1595, 2009.

ELMALOGLOU, S.; DIAMANTOPOULOS, E. Soil water dynamics under surface trickle irrigation as affected by soil hydraulic properties, discharge rate, dripper spacing and irrigation duration. **Journal of Irrigation Drainage Engineering**, ASCE, v. 59, n. 3, p. 254-263, 2010.

ELMALOGLOU, S; DIAMANTOPOULOS, E. Wetting front advance patterns and water losses by deep percolation under the root zone as influenced by pulsed drip irrigation. **Agricultural Water Management**, Amsterdam, v. 90, p. 160-163, 2007.

ELMALOGLU, S.; MALAMOS, N. A methodology for determining the surface and vertical Components of the wetting front under a surface point Source, with root water uptake and evaporation. **Irrigation and Drainage**, v. 55, p. 99–111, 2006.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA-EMBRAPA. **Centro Nacional de Pesquisa de Solos. Sistema brasileiro de classificação de solos.** Rio de Janeiro, 1999. 412p.

EVETT, S. R.; HOWELL, T. A.; SCHNEIDER, A. D. **Energy and water balances for surface and subsurface drip irrigated corn.** In: Proceedings of the Fifth International Microirrigation Congress, April 2–6, Orlando, FL, USA, p. 135–140, 1995.

FARTHING, M. W.; OGDEN, F. L. Numerical solution of Richards' equation: a review of advances and challenges. **Soil Science Society America Journal**, v. 81, p. 1257–1269, 2017.

FERRAREZI, R. S.; WEAVER, G. M.; VAN IERSEL, M. W.; TESTEZLAF, R. Subirrigation: Historical overview, challenges, and future prospects. **HortTechnology**, v. 25, n. 3, p. 262-276, 2015.

GUSHIKEN, E. C. Irrigating with reclaimed water through permanent subsurface drip irrigation systems. In: INTERNATIONAL MICROIRRIGATION CONGRESS, 5., St. Joseph. **Proceedings...** St. Joseph: ASAE, 1995. p. 269-274.

GROSSMANN, R. B; REINSCH, T. G. **Bulk density and linear extensibility**, in: Methods of Soil Analysis, Part 4, Physical Methods. SSSA Book Series, no. 5, Soil Science Society American Madison, Wisconsin, p. 201-228, 2002.

HAMMAMI, M.; ZAYANI, K. An analytical approach to predict the moistened bulb volume beneath a surface point source. **Agricultural Water Management**, v. 166, p. 123-129, 2016.

HAO, A. et al. Estimation of wet bulb formation in various soil during drip irrigation. **Journal of the Faculty of Agriculture**, Kyushu University, v. 01, n. 52, p. 187-193, 2007.

KANDELOUS, M. M; LIAGHAT, A.; ABBASI, F. Estimation of soil moisture pattern in subsurface drip irrigation using dimensional analysis method. **Journal Agricultural Science**, v. 39, n. 2, p. 371–378, 2008.

HONARI, M.; ASHRAFZADEH, A.; KHALEDIAN, M.; VAZIFEDOUST, M.; MAILHOL, J. C. Comparison of HYDRUS-3D soil moisture simulations of subsurface drip irrigation with experimental observations in the South of France. **Journal of Irrigation and Drainage Engineering**, v. 143, n. 7, 2017.

KANDELOUS M. M., ŠIMŮNEK J. Comparison of numerical, analytical and empirical models to estimate wetting pattern for surface and subsurface drip irrigation. **Irrigation Science**, v. 28, p.435-444, 2010a.

KANDELOUS M. M., ŠIMŮNEK J. Numerical simulations of water movement in a subsurface drip irrigation system under field and laboratory conditions using HYDRUS-2D. **Agricultural Water Management**, v. 97, n. 4, p. 1070-1076, 2010b.

KELLER, J.; BLIESNER, D. R. **Sprinkler and trickle irrigation**. New York: von Nostrand Reinhold, 1990, 652p.

LAMM, F. R. **Advantages and disadvantages of subsurface drip irrigation**. In: Proceedings of International Meeting on Advances in Drip/Micro Irrigation. Puerto de La Cruz, Tenerife, Canary Islands, Instituto Canario de Investigaciones Agrarias, Canary Islands. p. 13, 2002.

LAZAROVITCH, N.; SIMUNEK, J.; SHANI, U. System-dependent boundary condition for water flow from subsurface source. **Soil Science Society America Journal**, v. 69, n. 1, p. 46–50, 2007.

LAZAROVITCH, N.; SHANI, U.; THOMPSON, T. L.; WARRICK, A. W. **Propriedades hidráulicas do solo afetando a uniformidade de descarga de sistemas de irrigação por gotejamento subsuperficiais alimentados por gravidade**. **Journal of Irrigation and Drainage Engineering**, v. 132, p. 531–536, 2007.

LEÃO, T. P.; GENTRY, R. Numerical modeling of the effect of variation of boundary conditions on vadose zone hydraulic properties. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 35, p. 263-272, 2011.

LEVIEN, S. L. A.; SILVA, C. A.; MAIA, C. E.; MEDEIROS, J. F. Estimativa de largura e profundidade de bulbo molhado em solos de textura média sob irrigação por gotejamento superficial. **Enciclopédia Biosfera**, v. 6, p. 1-10, 2010.

LI, J.; ZHANG, J.; REN, L. Water and nitrogen distribution as affected by fertigation of ammonium nitrate from a point source. **Irrigation Science**, v. 22, n. 1, p.19–30, 2003.

MALEK, K.; PETERS, R. T. Wetting pattern models for drip irrigation: new empirical model. **Irrigation and Drainage**, v. 137, p. 530–536, 2011.

MARTÍNEZ, J.; RECA, J. Water Use Efficiency of Surface Drip Irrigation versus an Alternative Subsurface Drip Irrigation Method. **Journal of Irrigation and Drainage Engineering**, v.114, n. 10, 2014.

MONCEF, H.; HEDI, D.; JELLOUL, B.; MOHAMED, M. Approach for predicting the wetting front depth beneath a surface point source: theory and numerical aspect. **Irrigation and Drainage**, v. 51, p. 347–360, 2012.

MORIASI, D. N.; ARNOLD, J. G.; VAN LIEW, M. W.; BINGNER, R. L.; HARMEL, R. D.; VEITH, T. L. Model evaluation guidelines for systematic quantification of accuracy in watershed simulations. **Transactions of the ASABE**, v. 50, p. 885-900, 2007.

NAGLIC, B.; KECHAVARZI, C.; COULON, F.; PINTAR, M. Numerical investigation of the influence of texture, surface drip emitter discharge rate and initial soil moisture condition on wetting pattern size. **Irrigation Science**, v. 32, p. 421–436, 2014.

NASH, J. E.; SUTCLUFFE, J.V. River flow forecasting through conceptual models: Part 1. A discussion of principles. **Journal of Hydrology**, v. 10, n. 3, p. 282-290. 1970.

PATEL, N.; RAJPUT, T. B. S. Dynamics and modeling of soil water under subsurface drip irrigated onion. **Agricultural Water Management**, v. 95, p. 1335–1349, 2008.

PAYERO, J. “**Is subsurface drip irrigation right for your operations?**” Crop watch new service web page, Univ. of Nebraska, Institute of Agriculture and Natural Resources Cooperative Extension, 2002.

PHILIP J. R. Travel-Times from Buried and Surface Infiltration Point Sources. **Water Resources Research**, v. 20, n. 7, p. 990-994, 1984.

PONTEDEIRO, E.; VAN GENUCHTEN, M. T.; COTTA, R.; SIMUNEK, J. Os efeitos do fluxo preferencial e textura do solo em avaliações de risco de um local de disposição de resíduos NORM. **J. Hazard. Mater**, v. 174, p. 648 – 655, 2010.

PROVENZANO, G. Using HYDRUS-2D Simulation Model to Evaluate Wetted Soil Volume in Subsurface Drip Irrigation Systems. **Journal of Irrigation and Drainage Engineering**, v. 133, n. 4, p. 342–349, 2007.

PROVENZANO, G.; PUMO, D.; DI DIO, P. “**Effetti dell’uso irriguo di acque reflue urbane depurate sugli apparecchi erogatori.**” Atti dell’ Associazione Italiana di Ingegneria Agraria, Catania in Italian, 2005.

RADCLIFFE, D.; ŠIMŮNEK, J. **Soil Physics With HYDRUS: Modeling and Applications**. CRC Press. Taylor and Francis Group, 2010.

REVOL, P.; CLOTHIER, B. E.; MAILHOL, J-C.; VACHAUD, G.; VAUCLIN, M. Infiltration from a surface point source and drip irrigation 2. An approximate time-dependent solution for wet-front position P. **Water Resources Research**, v. 33, n. 8, p. 1869-1874, 1997.

RICHARDS, L. A. Physical conditions of water in soil. In: BLACK, C. A.; EVANS, D. D.; WHITE, J. L.; ENSMINGE, L. E.; CLARK, F. E. **Methods of soil analysis - Physical and mineralogical properties, including statistics of measurements and sampling**. Madison: ASASSSA, 1931. p. 128-152.

RICHARDS, L. A. Capillary conduction through porous mediums. **Physics**, v. 1, n. 5, p. 313-318, 1931.

ROBERTS, T. L.; WHITE, S.; WARRICK, A. W.; THOMPSON, T.L. Tape depth and germination method influence patterns of salt accumulation with subsurface drip irrigation. **Agricultural Water Management**, v. 8, n. 7, p. 850-854, 2008.

RODRÍGUEZ SINOBAS, L.; RODRÍGUEZ, M.G. **A Review of Subsurface Drip Irrigation and Its Management.** In: Water Quality, Soil and Managing Irrigation of Crops. Dr. Teang Shui Lee (Ed.), InTECH, 2012.

SAEFUDDIN, R.; SAITO, H.; ŠIMŮNEK, J. Experimental and numerical evaluation of a ring-shaped emitter for subsurface irrigation. **Agricultural Water Management**, v. 211, p. 111-122, 2019.

SCHWARTZMASS. M.; ZUR, B. Emitter spacing and geometry of wetted soil volume. **Journal of Irrigation and Drainage Engineering**, v. 3, p. 242-253, 1986.

SHAAP, M. G.; LEIJI, F. J.; van GENUCHTEN, M. T. ROSETTA: a computer program for estimating soil hydraulic parameters with hierarchical pedotransfer functions. **Journal of Hydrology**, v. 251, p. 163-176, 2001.

SIMUNEK, J.; SEJNA, M.; VAN GENUCHTEN, M.T. **The HYDRUS-2D software package for simulating two- and three-dimensional movement of water, heat, and multiple solutes in variably saturated media Version 1.0 PC**, 2006.

SIMUNEK, J.; SEJNA, M.; VAN GENUCHTEN, M.T. **The HYDRUS-2D software package for simulating the two-dimensional movement of water, heat, and multiple solutes in variably-saturated media. IGWMC-TPS 53, Version 2.0**, International Ground Water Modeling Center, Colorado School of Mines, Golden, CO, 1999.

SIMUNEK, J.; VAN GENUCHTEN, M. T.; SEJNA, M. Development and applications of the HYDRUS and STANMOD software packages, and related codes. **Vadose Zone Journal**, v. 7, n. 2, p. 587–600, 2008.

SIYAL, A. A; SKAGGS, T. H. Measured and simulated soil wetting patterns under porous clay pipe sub-surface irrigation **Agricultural Water Management.**, v. 96, p. 893-904, 2009.

SKAGGS, T. H.; TROUT, T. J.; ŠIMŮNEK, J.; SHOUSE, P. J. Comparison of HYDRUS-2D simulations of drip irrigation with experimental observations. **Journal of Irrigation and Drainage Engineering**, v. 130, p. 304–310, 2004.

SKAGGS, T. H.; TROUT, T. J.; ROTHFUSS, Y. Drip irrigation water distribution pattern: Effects of emitter rate, pulsing and ante-cedent water. **Soil Science Society America Journal**, v. 74, 2010.

SOUZA, C. F.; FOLEGATTI, M. V.; OR, D. Distribution and storage characterization of soil solution for drip irrigation. **Irrigation Science**, v. 27, p. 277-288, 2009.

SUBBAIAH, R.; MASHRU, H. H. Modeling for predicting soil wetting radius under point source surface trickle irrigation. **Agric Eng Int: CIGR Journal**, v. 15, n. 3, p. 1-10, 2013.

TAGHAVI, S. A.; MARINO, M. A.; ROLSTON, D. E. Infiltration from trickle-irrigation source. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*. **America Society of Civil Engineering**; v. 110, n. 4, p. 331-341, 1984.

TESTEZLAF, R. **FA876. técnicas de irrigação. irrigação: técnicas, usos e impactos**. Unicamp, 2002. 1 CD-ROM (notas de aula).

WANG, Z.; LI, J.; LI, Y. Assessing the effects of drip irrigation system uniformity and spatial variability in soil on nitrate leaching through simulation. **Transactions of the ASABE**, v. 59, p. 279–290, 2016.

THORBURN, P, DART, I, BIGGS, I et al. The fate of nitrogen applied to sugarcane by trickle irrigation. **Journal of Irrigation Science**, v. 22, n. 3, p. 201–209, 2003.

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

VERECKEN, H. et al. Modeling Soil Processes: Review, Key Challenges, and New Perspectives. **Vadose Zone Journal**, v. 15, n. 5, 2016.

ZHANG, R.; CHENG, Z.; ZHANG, J.; JI, X. Sandy Loam Soil Wetting Patterns of Drip Irrigation: a Comparison of Point and Line Sources. **Procedia Engineering**, v. 28, p. 506 – 511, 2012.

ZUR, B. Wetted soil volume as a design objective in trickle irrigation. **Irrigation Science**, v. 16, p. 101–105, 1996.