



**UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ**  
**CENTRO DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS**  
**DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA AGRÍCOLA**  
**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA AGRÍCOLA**

**MAYARA OLIVEIRA ROCHA**

**UTILIZAÇÃO DE MODELAGEM NUMÉRICA NA AVALIAÇÃO DO BULBO  
ÚMIDO NO SOLO EM IRRIGAÇÃO SUBSUPERFICIAL**

**FORTALEZA**

**2019**

MAYARA OLIVEIRA ROCHA

UTILIZAÇÃO DA MODELAGEM NUMÉRICA NA AVALIAÇÃO DO BULBO ÚMIDO  
NO SOLO EM IRRIGAÇÃO SUBSUPERFICIAL

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Engenharia Agrícola. Área de concentração: Irrigação e Drenagem.

Orientador: Prof. Adunias dos Santos Teixeira, PhD.

Coorientador: Prof. Dr. Francisco das Chagas da Silva Filho.

FORTALEZA

2019

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação  
Universidade Federal do Ceará  
Biblioteca Universitária  
Gerada automaticamente pelo módulo Catalog, mediante os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

---

R574u Rocha, Mayara Oliveira.  
Utilização da modelagem numérica na avaliação do bulbo úmido no solo em irrigação subsuperficial /  
Mayara Oliveira Rocha. – 2019.  
216 f. : il. color.

Dissertação (mestrado) – Universidade Federal do Ceará, Centro de Ciências Agrárias, Programa de  
Pós-Graduação em Engenharia Agrícola, Fortaleza, 2019.

Orientação: Prof. Dr. Adunias dos Santos Teixeira.

Coorientação: Prof. Dr. Francisco das Chagas da Silva Filho .

1. Modelagem numérica. 2. Caracterização física do solo. 3. Irrigação subsuperficial. I. Título.

CDD 630

---

MAYARA OLIVEIRA ROCHA

UTILIZAÇÃO DA MODELAGEM NUMÉRICA NA AVALIAÇÃO DO BULBO ÚMIDO  
NO SOLO EM IRRIGAÇÃO SUBSUPERFICIAL

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Engenharia Agrícola. Área de concentração: Irrigação e Drenagem.

Aprovada em: \_\_\_/\_\_\_/2019.

BANCA EXAMINADORA

---

PhD. Adunias dos Santos Teixeira (Orientador)  
Universidade Federal do Ceará (UFC)

---

Prof. Dr. Francisco das Chagas da Silva Filho (Coorientador)  
Universidade Federal do Ceará (UFC)

---

Dr. Rubens Sonsol Gondim  
Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (Embrapa)

---

Prof. Dr. Alan Bernard Oliveira de Sousa  
Universidade Federal do Ceará (UFC)

A Deus.

Aos meus pais e irmã.

## AGRADECIMENTOS

A Deus, por estar sempre presente em minha vida, não me desamparando nos momentos em que preciso, minha fonte de força, sabedoria e proteção. Aos meus pais que são minha base e sempre me apoiaram e incentivaram durante todo o meu caminho. À minha irmã por ser minha amiga e companhia de todos os dias.

Aos meus avós, principalmente a minha avó Vilma que sempre diz ter muito orgulho de mim e da minha caminhada. As minhas tias Solange, Jane, Lourdinha e Rejane e tios Fred e Jean, minha prima Rayssa por sempre comemorarem minhas conquistas.

À Universidade Federal do Ceará e ao Programa de Pós-Graduação e Engenharia Agrícola pela oportunidade de realização do curso. E ao CNPq, pela concessão da bolsa de estudo. Ao Prof. Adunias do Santos Teixeira, pela sua orientação, pelas suas contribuições e pelos conhecimentos a mim transmitidos durante a pós-graduação. Aos membros da banca examinadora, por aceitarem fazer parte dela e pelas contribuições para melhorar a qualidade deste trabalho.

Aos colegas e irmãos de orientação por todo conhecimento compartilhado e ajuda: Marcio Regys, Thales Rafael, Davi Queiroz, Lucas Albuquerque, Pedro Almeida, Bruno Castelo, Claudio dos Santos, Eurileny Lucas, Lia Caetano, Marcos Alves.

Aos amigos de Departamento e Universidade, por deixarem a vida mais leve, me fazerem esquecer muitos dos problemas e ajudarem em tudo que pudessem. Juntos somos mais fortes: Juarez Junior, Pedro Victor, Beatriz Abreu, Camila Souza, Willame Cândido, Rennan Salviano, Nicole Carvalho, Valéria Noronha, Bruna Aires, Raí Rebouças, Emanuel Firmino, Wesley Livio, José Bandeira, Valeria Aguiar, Higor Ximenes, Marina Monteiro.

Aos meus amigos de fora da Universidade que sempre entendiam quando tinha que sacrificar momentos juntos para me dedicar ao trabalho: Lya Serpa, Julia Nobre, Rennan Lemos, Priscila Rios, Ariane Nogueira, Tayná Domingues, Camila Lamas, Luis Carlos e Ayrton Borges.

E o céu será tua casa, voará com tuas asas. Não se abalará por pouco, amaremos feito loucos. Será livre como nunca e sorrirá como sempre. Reinaremos por direito e que assim seja feito. (Delacruz)

## RESUMO

O estudo do solo e suas propriedades físico-hídricas é de extrema importância para o projeto e manejo de sistemas de irrigação. A determinação e utilização de propriedades como densidade, porosidade, condutividade hidráulica do solo saturado e não-saturado, curva de retenção de água no solo é essencial, pois intervém nas interações solo-água e tem influência em diversos processos no sistema solo-água-planta-atmosfera, como a capacidade do solo em armazenar e disponibilizar água para as plantas, além do movimento da água no solo. A dinâmica da água no solo não-saturado é um processo complexo explicado pela equação de Richards, e por se tratar de uma equação diferencial não linear, não possui uma solução analítica requerendo o uso do método dos elementos finitos, por exemplo, para obtenção de soluções. Portanto, como uma solução mais rápida e precisa, opta-se pela utilização de softwares numéricos que resolvam a equação de Richards através do método dos elementos finitos, dando suporte a técnicos e irrigantes ao simular diferentes modelos de distribuição da água no solo de acordo com as condições estipuladas por eles. Este trabalho foi dividido em três capítulos cujos objetivos foram de realizar uma modelagem numérica de irrigação subsuperficial, utilizando propriedades físico-hídricas do solo (densidade, porosidade, condutividade hidráulica do solo saturado e curva de retenção de água do solo) e parâmetros do sistema de irrigação (diferentes profundidades de instalação do tubo gotejador e diferentes espaçamentos entre emissores) com posterior validação do modelo utilizando dados obtidos em experimento de campo montado na Universidade Federal do Ceará, Campus do Pici com híbrido de milho AG 1051 através de análises de regressão com dados de umidade do solo, obtidos com método termogravimétrico, com cálculo do coeficiente de determinação ( $R^2$ ) e raiz do erro médio quadrático (RMSE). Além do comportamento agrônomico e produtivo da cultura, analisado com auxílio de estatística descritiva e análise de variância. As características físico-hídricas foram determinadas e utilizadas para criação do modelo e este mostrou-se aplicável para o projeto e manejo de sistemas de irrigação subsuperficial, variando a profundidade de instalação do tubo gotejador, o espaçamento entre emissores e a umidade do solo, com bons resultados para os diferentes cenários simulados. Além disso, foi possível concluir que a irrigação subsuperficial é uma alternativa viável com bons resultados agrônomicos e produtivos para a cultura do milho híbrido AG 1051, recomendando uma melhor profundidade de instalação do tubo gotejador e um melhor espaçamento entre emissores para a cultura.

**Palavras-chave:** Caracterização física do solo. Modelagem numérica. Irrigação Subsuperficial.

## ABSTRACT

The study of the soil and its physical-hydric properties is extremely important for the design and management of irrigation systems. The determination and use of properties such as density, porosity, hydraulic conductivity of saturated and unsaturated soil, soil water retention curve is essential, as it intervenes in soil-water interactions and influences various processes in the soil-water-plant-atmosphere system, such as the capacity of the soil to store and make water available to plants, in addition to the movement of water in the soil. The dynamics of water in unsaturated soil is a complex process explained by the Richards equation, and because it is a non-linear differential equation, it does not have an analytical solution requiring the use of the finite element method, for example, to obtain solutions. Therefore, as a faster and more accurate solution, the option is to use numerical software that solves the Richards equation through the finite element method, supporting technicians and irrigators by simulating different models of water distribution in the soil according to the conditions stipulated by them. This work was divided into three chapters whose objectives were to perform a numerical modeling of subsurface irrigation, using physical-hydric properties of the soil (density, porosity, hydraulic conductivity of the saturated soil and soil water retention curve) and parameters of the water system irrigation (different drip tube installation depths and different spacing between emitters) with later model validation using data obtained in a field experiment set up at the Federal University of Ceará, Campus do Pici with AG 1051 corn hybrid through regression analysis with soil moisture data, obtained with thermogravimetric method, with calculation of the coefficient of determination ( $R^2$ ) and root of the mean square error (RMSE). In addition to the agronomic and productive behavior of the crop, analyzed with the aid of descriptive statistics and analysis of variance. The physical-hydric characteristics were determined and used to create the model and this proved to be applicable for the design and management of subsurface irrigation systems, varying the depth of installation of the drip tube, the spacing between emitters and the soil moisture, with good results for the different simulated scenarios. In addition, it was possible to conclude that subsurface irrigation is a viable alternative with good agronomic and productive results for the hybrid corn crop AG 1051, recommending a better drip tube installation depth and a better spacing between emitters for the crop.

**Keywords:** Physical characterization of the soil. Numerical modeling. Subsurface irrigation.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Modelos típicos de curvas de retenção de água no solo com diferentes texturas.....	30
Figura 2 - Permeâmetro de carga constante.....	34
Figura 3 - Figura 3A: Amostrador do tipo Uhland; Figura 3B: Coleta das amostras.....	36
Figura 4 - Figura 4A: Secagem do material; Figura 4B: Revolvimento do material; Figura 4C: Destorroamento do solo; D: Peneira com malha de 2mm.....	37
Figura 5 - Figura 5A: 20 gramas de TFSE em balão volumétrico; Figura 5B: acréscimo de álcool etílico para completar 50 ml.....	37
Figura 6 - Técnica do papel filtro na medida do potencial matricial.....	38
Figura 7 - Método do papel filtro: Figura 7A – amostras saturando; Figura 7B - amostra pronta para ser envolvida com papel filme; Figura 7C – amostra identificada e envolvida com papel alumínio.....	39
Figura 8 - Método do permeâmetro de carga constante.....	40
Figura 9 - Método do perfil instantâneo.....	41
Figura 10 - Curva de retenção obtida através do método do papel filtro.....	44
Figura 11 - Curva de retenção obtida no software SLIDE.....	45
Figura 12 - Curvas de ajuste da umidade volumétrica em função do tempo de redistribuição de água no solo.....	48
Figura 13 - Condutividade K em função da umidade $\theta$ a 10 cm de profundidade.....	51
Figura 14 - Condutividade K em função da umidade $\theta$ a 20 cm de profundidade.....	51
Figura 15 - Condutividade K em função da umidade $\theta$ a 30 cm de profundidade.....	52
Figura 16 - Condutividade K em função da umidade $\theta$ a 10, 20 e 30 cm de profundidade.....	52
Figura 17 - Curva característica SLIDE 6.0 vs. curva de secagem perfil instantâneo para as profundidades 10, 20 e 30 cm.....	53
Figura 18 - Distribuição de água de um gotejador em solos de diferentes texturas.....	63
Figura 19 - Desenho da malha no software SLIDE 6.0, detalhe para os pontos representando os emissores a 25 cm, o tubo gotejador na profundidade de 10 cm, a malha de elementos e as propriedades hidráulicas do material.....	69

Figura 20 - Desenho da malha no software SLIDE 6.0, após a discretização do modelo e inclusão das propriedades hidráulicas do solo.....	69
Figura 21 - Desenho da malha no software SLIDE 6.0 no modulo do regime transiente, com os emissores configurados com condições de contorno transiente.....	70
Figura 22 - Módulo para ajuste das condições pontuais de contorno transientes.....	70
Figura 23 - Croqui do experimento em campo.....	71
Figura 24 - Coleta do solo na direção horizontal ao ponto onde as plantas estavam localizadas com trado de rosca.....	72
Figura 25 - Resultado da simulação durante a irrigação com profundidade do tubo gotejador a 10 cm, 25 cm entre emissores e 30 cm entre plantas. Figura 25A:inicial; Figura 25B: 10 min; Figura 25C: 15 min; Figura 25D: 20 min; Figura 25E: 25 min; Figura 25F: 30 min; Figura 25G: 35 min; Figura 25H: 40 min; Figura 25I: 45 min; Figura 25J: 50 min; Figura 25L: 55 min; Figura 25M: 60 min.....	76
Figura 26 - Resultado da simulação durante a irrigação com profundidade do tubo gotejador a 10 cm, 50 cm entre emissores e 30 cm entre plantas. Figura 26A:inicial; Figura 26B: 10 min; Figura 26C: 15 min; Figura 26D: 20 min; Figura 26E: 25 min; Figura 26F: 30 min; Figura 26G: 35 min; Figura 26H: 40 min; Figura 26I: 45 min; Figura 26J: 50 min; Figura 26L: 55 min; Figura 26M: 60 min.....	81
Figura 27 - Resultado da simulação durante a irrigação com profundidade do tubo gotejador a 10 cm, 75 cm entre emissores e 30 cm entre plantas. Figura 27A:inicial; Figura 27B: 10 min; Figura 27C: 15 min; Figura 27D: 20 min; Figura 27E: 25 min; Figura 27F: 30 min; Figura 27G: 35 min; Figura 27H: 40 min; Figura 27I: 45 min; Figura 27J: 50 min; Figura 27L: 55 min; Figura 27M: 60 min.....	85
Figura 28 - Resultado da simulação durante a irrigação com profundidade do tubo gotejador a 10 cm, 100 cm entre emissores e 30 cm entre plantas. Figura 28A:inicial; Figura 28B: 10 min; Figura 28C: 15 min; Figura 28D: 20 min; Figura 28E: 25 min; Figura 28F: 30 min; Figura 28G: 35 min; Figura 28H: 40 min; Figura 28I: 45 min; Figura 28J: 50 min; Figura 28L: 55 min; Figura 28M: 60 min.....	89

Figura 29 -	Resultado da simulação durante a irrigação com profundidade do tubo gotejador a 20 cm, 25 cm entre emissores e 30 cm entre plantas. Figura 29A:inicial; Figura 29B: 10 min; Figura 29C: 15 min; Figura 29D: 20 min; Figura 29E: 25 min; Figura 29F: 30 min; Figura 29G: 35 min; Figura 29H: 40 min; Figura 29I: 45 min; Figura 29J: 50 min; Figura 29L: 55 min; Figura 29M: 60 min.....	94
Figura 30 -	Resultado da simulação durante a irrigação com profundidade do tubo gotejador a 20 cm, 50 cm entre emissores e 30 cm entre plantas. Figura 30A:inicial; Figura 30B: 10 min; Figura 30C: 15 min; Figura 30D: 20 min; Figura 30E: 25 min; Figura 30F: 30 min; Figura 30G: 35 min; Figura 30H: 40 min; Figura 30I: 45 min; Figura 30J: 50 min; Figura 30L: 55 min; Figura 30M: 60 min.....	98
Figura 31 -	Resultado da simulação durante a irrigação com profundidade do tubo gotejador a 20 cm, 75 cm entre emissores e 30 cm entre plantas. Figura 31A:inicial; Figura 31B: 10 min; Figura 31C: 15 min; Figura 31D: 20 min; Figura 31E: 25 min; Figura 31F: 30 min; Figura 31G: 35 min; Figura 31H: 40 min; Figura 31I: 45 min; Figura 31J: 50 min; Figura 31L: 55 min; Figura 31M: 60 min.....	102
Figura 32 -	Resultado da simulação durante a irrigação com profundidade do tubo gotejador a 20 cm, 100 cm entre emissores e 30 cm entre plantas. Figura 32A:inicial; Figura 32B: 10 min; Figura 32C: 15 min; Figura 32D: 20 min; Figura 32E: 25 min; Figura 32F: 30 min; Figura 32G: 35 min; Figura 32H: 40 min; Figura 32I: 45 min; Figura 32J: 50 min; Figura 32L: 55 min; Figura 32M: 60 min.....	106
Figura 33 -	Resultado da simulação durante a irrigação com profundidade do tubo gotejador a 30 cm, 25 cm entre emissores e 30 cm entre plantas. Figura 33A:inicial; Figura 33B: 10 min; Figura 33C: 15 min; Figura 33D: 20 min; Figura 33E: 25 min; Figura 33F: 30 min; Figura 33G: 35 min; Figura 33H: 40 min; Figura 33I: 45 min; Figura 33J: 50 min; Figura 33L: 55 min; Figura 33M: 60 min.....	110
Figura 34 -	Resultado da simulação durante a irrigação com profundidade do tubo gotejador a 30 cm, 50 cm entre emissores e 30 cm entre plantas. Figura 34A:inicial; Figura 34B: 10 min; Figura 34C: 15 min; Figura 34D: 20 min;	

	Figura 34E: 25 min; Figura 34F: 30 min; Figura 34G: 35 min; Figura 34H: 40 min; Figura 34I: 45 min; Figura 34J: 50 min; Figura 34L: 55 min; Figura 34M: 60 min.....	114
Figura 35 -	Resultado da simulação durante a irrigação com profundidade do tubo gotejador a 30 cm, 75 cm entre emissores e 30 cm entre plantas. Figura 35A: inicial; Figura 35B: 10 min; Figura 35C: 15 min; Figura 35D: 20 min; Figura 35E: 25 min; Figura 35F: 30 min; Figura 35G: 35 min; Figura 35H: 40 min; Figura 35I: 45 min; Figura 35J: 50 min; Figura 35L: 55 min; Figura 35M: 60 min.....	118
Figura 36 -	Resultado da simulação durante a irrigação com profundidade do tubo gotejador a 30 cm, 100 cm entre emissores e 30 cm entre plantas. Figura 36A: inicial; Figura 36B: 10 min; Figura 36C: 15 min; Figura 36D: 20 min; Figura 36E: 25 min; Figura 36F: 30 min; Figura 36G: 35 min; Figura 36H: 40 min; Figura 36I: 45 min; Figura 36J: 50 min; Figura 36L: 55 min; Figura 36M: 60 min.....	122
Figura 37 -	Resultado da simulação após a irrigação com profundidade do tubo gotejador a 10 cm, 25 cm entre emissores e 30 cm entre plantas. Figura 37A: inicial (60 min); Figura 37B: 70 min; Figura 37C: 80 min; Figura 37D: 90 min; Figura 37E: 100 min; Figura 37F: 120 min; Figura 37G: 150 min....	133
Figura 38 -	Resultado da simulação após a irrigação com profundidade do tubo gotejador a 10 cm, 50 cm entre emissores e 30 cm entre plantas. Figura 38A: inicial (60 min); Figura 38B: 70 min; Figura 38C: 80 min; Figura 38D: 90 min; Figura 38E: 100 min; Figura 38F: 120 min; Figura 38G: 150 min....	135
Figura 39 -	Resultado da simulação após a irrigação com profundidade do tubo gotejador a 10 cm, 75 cm entre emissores e 30 cm entre plantas. Figura 39A: inicial (60 min); Figura 39B: 70 min; Figura 39C: 80 min; Figura 39D: 90 min; Figura 39E: 100 min; Figura 39F: 120 min; Figura 39G: 150 min....	138
Figura 40 -	Resultado da simulação após a irrigação com profundidade do tubo gotejador a 10 cm, 100 cm entre emissores e 30 cm entre plantas. Figura 40A: inicial (60 min); Figura 40B: 70 min; Figura 40C: 80 min; Figura 40D: 90 min; Figura 40E: 100 min; Figura 40F: 120 min; Figura 40G: 150 min....	140
Figura 41 -	Resultado da simulação após a irrigação com profundidade do tubo gotejador a 20 cm, 25 cm entre emissores e 30 cm entre plantas. Figura	

	41A:inicial (60 min); Figura 41B: 70 min; Figura 41C: 80 min; Figura 41D: 90 min; Figura 41E: 100 min; Figura 41F: 120 min; Figura 41G: 150 min....	143
Figura 42 -	Resultado da simulação após a irrigação com profundidade do tubo gotejador a 20 cm, 50 cm entre emissores e 30 cm entre plantas. Figura 42A:inicial (60 min); Figura 42B: 70 min; Figura 42C: 80 min; Figura 42D: 90 min; Figura 42E: 100 min; Figura 42F: 120 min; Figura 42G: 150 min....	145
Figura 43 -	Resultado da simulação após a irrigação com profundidade do tubo gotejador a 20 cm, 75 cm entre emissores e 30 cm entre plantas. Figura 43A:inicial (60 min); Figura 43B: 70 min; Figura 43C: 80 min; Figura 43D: 90 min; Figura 43E: 100 min; Figura 43F: 120 min; Figura 43G: 150 min....	148
Figura 44 -	Resultado da simulação após a irrigação com profundidade do tubo gotejador a 20 cm, 100 cm entre emissores e 30 cm entre plantas. Figura 44A:inicial (60 min); Figura 44B: 70 min; Figura 44C: 80 min; Figura 44D: 90 min; Figura 44E: 100 min; Figura 44F: 120 min; Figura 44G: 150 min....	150
Figura 45 -	Resultado da simulação após a irrigação com profundidade do tubo gotejador a 30 cm, 25 cm entre emissores e 30 cm entre plantas. Figura 45A:inicial (60 min); Figura 45B: 70 min; Figura 45C: 80 min; Figura 45D: 90 min; Figura 45E: 100 min; Figura 45F: 120 min; Figura 45G: 150 min....	153
Figura 46 -	Resultado da simulação após a irrigação com profundidade do tubo gotejador a 30 cm, 50 cm entre emissores e 30 cm entre plantas. Figura 46A:inicial (60 min); Figura 46B: 70 min; Figura 46C: 80 min; Figura 46D: 90 min; Figura 46E: 100 min; Figura 46F: 120 min; Figura 46G: 150 min....	155
Figura 47 -	Resultado da simulação após a irrigação com profundidade do tubo gotejador a 30 cm, 75 cm entre emissores e 30 cm entre plantas. Figura 47A:inicial (60 min); Figura 47B: 70 min; Figura 47C: 80 min; Figura 47D: 90 min; Figura 47E: 100 min; Figura 47F: 120 min; Figura 47G: 150 min....	158
Figura 48 -	Resultado da simulação após a irrigação com profundidade do tubo gotejador a 30 cm, 100 cm entre emissores e 30 cm entre plantas. Figura 48A:inicial (60 min); Figura 48B: 70 min; Figura 48C: 80 min; Figura 48D: 90 min; Figura 48E: 100 min; Figura 48F: 120 min; Figura 48G: 150 min....	160
Figura 49 -	Validação dos resultados de umidade estimados com os medidos em campo durante a irrigação. Figuras 49A: profundidade do tubo gotejador a 10 cm,	

	Figura 49B: profundidade de instalação do tubo gotejador a 20 cm e Figura 49C: profundidade de instalação do tubo gotejador a 30 cm.....	165
Figura 50 -	Validação dos resultados de umidade estimados com os medidos em campo durante a irrigação para o tratamento com profundidade de instalação do tubo gotejador a 10 cm, espaçamento entre emissores de 25 cm e tempo de irrigação de 30 min.....	166
Figura 51 -	Validação dos resultados de umidade estimados com os medidos em campo durante a irrigação para o tratamento com profundidade de instalação do tubo gotejador a 10 cm, espaçamento entre emissores de 25 cm e tempo de irrigação de 30 min.....	168
Figura 52 -	Validação dos resultados de umidade estimados com os medidos em campo após o evento de irrigação para o tratamento com profundidade de instalação do tubo gotejador a 20 cm, espaçamento entre emissores de 50 cm e tempo de irrigação de 30 min.....	168
Figura 53 -	Medida da altura e do diâmetro das plantas.....	178
Figura 54 -	Colheita.....	179
Figura 55 -	Figura 55A: pesagem das espigas com palha; Figura 55B: medida do diâmetro; Figura 55C: medida do comprimento.....	179
Figura 56 -	Pesagem da massa fresca.....	180

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 -	Equações das curvas de calibração do papel filtro Whatman N° 42.....	32
Tabela 2 -	Medidas estatísticas descritivas de densidade e porosidade.....	43
Tabela 3 -	Parâmetros de ajuste das curvas características de retenção de água no solo utilizando o modelo de van Genuchten.....	45
Tabela 4 -	Medidas estatísticas descritivas de condutividade hidráulica do solo saturado.....	46
Tabela 5 -	Classificação da condutividade hidráulica do solo saturado, $\text{cm h}^{-1}$ .....	47
Tabela 6 -	Valores de densidade de fluxo de água em cada profundidade de interesse (10, 20 e 30 cm) para cada tempo.....	48
Tabela 7 -	Equações ajustadas para cada profundidade de interesse (10, 20 e 30 cm) pelo modelo potencial com seus respectivos coeficientes de determinação.....	49
Tabela 8 -	Valores de gradiente de potencial total ( $\delta\psi/\delta z$ ) e de condutividade hidráulica do solo não-saturado ( $K_{\theta}$ ) para as profundidades de 10, 20 e 30 centímetros.....	50
Tabela 9 -	Medidas estatísticas descritivas da umidade medida em campo em relação a profundidade de instalação do tubo gotejador.....	73
Tabela 10 -	Medidas estatísticas descritivas da umidade medida em campo em relação ao espaçamento entre os emissores.....	73
Tabela 11 -	Medidas estatísticas descritivas da umidade medida em campo em relação ao tempo de irrigação.....	74
Tabela 12 -	Análise de variância da umidade como variável dependente da profundidade de instalação do tubo gotejador, espaçamento entre os emissores, tempo e a interação entre estes.....	74
Tabela 13 -	Resultados do Teste de Tukey a 5% de significância para as variáveis profundidade de instalação do tubo gotejador, espaçamento entre emissores e tempo em relação a umidade medida em campo.....	75
Tabela 14 -	Profundidade da frente de molhamento na capacidade de campo de acordo com a profundidade de instalação do tubo gotejador e espaçamento entre emissores durante a irrigação.....	127

Tabela 15 -	Quadro-resumo coeficiente de determinação ( $R^2$ ) e raiz média do erro quadrado entre os teores de água do solo medidos e simulados para os tratamentos.....	128
Tabela 16 -	Classificação dos valores do coeficiente de determinação ( $R^2$ ).....	129
Tabela 17 -	Medidas estatísticas descritivas da umidade medida em campo em relação a profundidade de instalação do tubo gotejador após o corte da irrigação...	129
Tabela 18 -	Medidas estatísticas descritivas da umidade medida em campo após o corte da irrigação em relação ao espaçamento entre os emissores.....	130
Tabela 19 -	Medidas estatísticas descritivas da umidade medida em campo em relação ao tempo após o corte da irrigação.....	130
Tabela 20 -	Análise de variância da umidade como variável dependente da profundidade de instalação do tubo gotejador, espaçamento entre os emissores, tempo após o corte da irrigação e a interação entre estes.....	131
Tabela 21 -	Resultados do Teste de Tukey a 5% de significância para as variáveis profundidade de instalação do tubo gotejador, espaçamento entre emissores e tempo em relação a umidade.....	131
Tabela 22 -	Quadro-resumo coeficiente de determinação ( $R^2$ ) e raiz média do erro quadrado para os tratamentos para valores de umidade medidos e simulados.....	164
Tabela 23 -	Tratamentos analisados.....	176
Tabela 24 -	Quantidades e datas de aplicação dos adubos utilizados.....	177
Tabela 25 -	Medidas estatísticas descritivas do peso da espiga com palha (gramas) em relação a profundidade de instalação do tubo gotejador.....	180
Tabela 26 -	Medidas estatísticas descritivas do peso da espiga com palha (gramas) em relação ao espaçamento entre emissores.....	181
Tabela 27 -	Análise de variância do peso da espiga com palha (gramas) como variável dependente da profundidade de instalação do tubo gotejador, espaçamento entre os emissores e a interação entre estes.....	181
Tabela 28 -	Resultados do Teste de Tukey a 5% de significância para a variável espaçamento entre emissores em relação ao peso das espigas (gramas).....	182
Tabela 29 -	Medidas estatísticas descritivas do diâmetro da espiga (cm) sem palha em relação a profundidade de instalação do tubo gotejador.....	182

Tabela 30 -	Medidas estatísticas descritivas do diâmetro da espiga (cm) sem palha em relação ao espaçamento entre emissores.....	183
Tabela 31 -	Análise de variância do diâmetro da espiga sem palha (cm) como variável dependente da profundidade de instalação do tubo gotejador, espaçamento entre os emissores e a interação entre estes.....	183
Tabela 32 -	Resultados do Teste de Tukey a 5% de significância para as variáveis profundidade de instalação do tubo gotejador e espaçamento entre emissores em relação ao diâmetro das espigas (cm).....	184
Tabela 33 -	Medidas estatísticas descritivas do comprimento da espiga (cm) sem palha em relação a profundidade de instalação do tubo gotejador.....	184
Tabela 34 -	Medidas estatísticas descritivas do comprimento da espiga (cm) sem palha em relação ao espaçamento entre os emissores.....	185
Tabela 35 -	Análise de variância do comprimento da espiga sem palha (cm) como variável dependente da profundidade de instalação do tubo gotejador, espaçamento entre os emissores e a interação entre estes.....	185
Tabela 36 -	Resultados do Teste de Tukey a 5% de significância para a variável espaçamento entre emissores em relação ao comprimento das espigas (cm).....	186
Tabela 37 -	Medidas estatísticas descritivas da massa fresca das plantas (gramas) em relação a profundidade de instalação do tubo gotejador.....	186
Tabela 38 -	Medidas estatísticas descritivas da massa fresca das plantas (gramas) em relação ao espaçamento entre emissores.....	187
Tabela 39 -	Análise de variância da massa fresca (gramas) como variável dependente da profundidade de instalação do tubo gotejador, espaçamento entre os emissores e a interação entre estes.....	187
Tabela 40 -	Resultados do Teste de Tukey a 5% de significância para a variável espaçamento entre emissores em relação a massa fresca das plantas (gramas).....	188
Tabela 41 -	Medidas estatísticas descritivas da altura das plantas (cm) em relação a profundidade de instalação do tubo gotejador.....	188
Tabela 42 -	Medidas estatísticas descritivas da altura das plantas (cm) em relação ao espaçamento entre emissores.....	189

Tabela 43 -	Análise de variância da altura das plantas (cm) como variável dependente da profundidade de instalação do tubo gotejador, espaçamento entre os emissores e a interação entre estes.....	189
Tabela 44 -	Resultados do Teste de Tukey a 5% de significância para a variável espaçamento entre emissores em relação à altura das plantas (cm).....	190
Tabela 45 -	Medidas estatísticas descritivas do diâmetro do colmo (cm) em relação a profundidade de instalação do tubo gotejador.....	190
Tabela 46 -	Medidas estatísticas descritivas do diâmetro do colmo (cm) em relação ao espaçamento entre emissores.....	191
Tabela 47 -	Análise de variância do diâmetro do colmo (cm) como variável dependente da profundidade de instalação do tubo gotejador, espaçamento entre os emissores e a interação entre estes.....	191
Tabela 48 -	Resultados do Teste de Tukey a 5% de significância para as variáveis profundidade de instalação do tubo gotejador e espaçamento entre emissores em relação ao diâmetro do colmo (cm).....	192
Tabela 49 -	Peso médio das espigas com palha (gramas) e produtividade total de espigas com palha ( $\text{kg ha}^{-1}$ ) para cada tratamento (profundidade tubo gotejador x espaçamento entre emissores).....	192
Tabela 50 -	Peso médio das espigas comerciais com palha (gramas) e produtividade total de espigas comerciais com palha ( $\text{kg ha}^{-1}$ ) para cada tratamento (profundidade tubo gotejador x espaçamento entre emissores).....	193
Tabela 51 -	Análise de variância da produtividade total de espigas ( $\text{kg ha}^{-1}$ ) como variável dependente da profundidade de instalação do tubo gotejador, espaçamento entre os emissores e a interação entre estes.....	194
Tabela 52 -	Resultados do Teste de Tukey a 5% de significância para as variáveis profundidade de instalação do tubo gotejador e espaçamento entre emissores em relação a produtividade total de espigas com palha ( $\text{kg ha}^{-1}$ ).....	194

## SUMÁRIO

1	<b>INTRODUÇÃO GERAL.....</b>	21
2	<b>CAPÍTULO 1 – ATRIBUTOS FÍSICOS E DINÂMICA DA ÁGUA NO SOLO.....</b>	23
3	<b>INTRODUÇÃO.....</b>	24
4	<b>REVISÃO DE LITERATURA.....</b>	25
4.1	<b>Densidade do solo.....</b>	25
4.2	<b>Densidade de partículas.....</b>	27
4.3	<b>Porosidade.....</b>	28
4.4	<b>Curva de retenção de água no solo.....</b>	29
4.4.1	<i>Método do papel filtro.....</i>	31
4.4.2	<i>Modelo de van Genuchten.....</i>	32
4.5	<b>Condutividade hidráulica do solo.....</b>	33
5	<b>MATERIAL E MÉTODOS.....</b>	35
5.1	<b>Densidade do solo.....</b>	35
5.2	<b>Densidade de partículas.....</b>	36
5.3	<b>Porosidade total.....</b>	38
5.4	<b>Curva de retenção de água no solo.....</b>	38
5.5	<b>Condutividade hidráulica do solo saturado e não saturado.....</b>	40
6	<b>RESULTADOS E DISCUSSÃO.....</b>	42
6.1	<b>Densidade do solo, densidade de partículas e porosidade total.....</b>	42
6.2	<b>Curva de retenção de água no solo.....</b>	44
6.3	<b>Condutividade hidráulica do solo.....</b>	45
6.3.1	<i>Condutividade hidráulica do solo saturado.....</i>	45
6.3.2	<i>Condutividade hidráulica do solo não saturado.....</i>	47
7	<b>CONCLUSÕES.....</b>	53
8	<b>CAPÍTULO 2 – UTILIZACAO DE MODELAGEM NUMÉRICA NA AVALIAÇÃO DO BULBO ÚMIDO NO SOLO EM IRRIGAÇÃO SUBSUPERFICIAL.....</b>	54
9	<b>INTRODUÇÃO.....</b>	55
9.1	<b>Objetivo geral.....</b>	56
9.2	<b>Objetivos específicos.....</b>	56

<b>10</b>	<b>REVISÃO DE LITERATURA.....</b>	<b>56</b>
<b>10.1</b>	<b>Água no solo.....</b>	<b>56</b>
<b>10.2</b>	<b>Irrigação subsuperficial.....</b>	<b>60</b>
<b>10.2.1</b>	<b><i>Forma e dimensões do bulbo úmido.....</i></b>	<b>61</b>
<b>10.2.2</b>	<b><i>Modelagem numérica.....</i></b>	<b>66</b>
<b>10.2.2.1</b>	<b><i>Softwares para modelagem numérica.....</i></b>	<b>66</b>
<b>11</b>	<b>MATERIAL E MÉTODOS.....</b>	<b>67</b>
<b>11.1</b>	<b>Modelagem computacional 2D.....</b>	<b>67</b>
<b>11.2</b>	<b>Coleta de dados em campo.....</b>	<b>71</b>
<b>12</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÃO.....</b>	<b>73</b>
<b>13</b>	<b>CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES.....</b>	<b>168</b>
<b>14</b>	<b>CAPÍTULO 3 – RESPOSTAS AGRNÔMICAS DO MILHO À IRRIGAÇÃO SUBSUPERFICIAL.....</b>	<b>171</b>
<b>15</b>	<b>INTRODUÇÃO.....</b>	<b>171</b>
<b>16</b>	<b>REVISÃO DE LITERATURA.....</b>	<b>172</b>
<b>16.1</b>	<b>A cultura do milho.....</b>	<b>172</b>
<b>16.1.1</b>	<b><i>Produção de milho verde.....</i></b>	<b>173</b>
<b>16.1.2</b>	<b><i>Produção de silagem.....</i></b>	<b>174</b>
<b>16.2</b>	<b>Demanda hídrica e irrigação da cultura do milho.....</b>	<b>174</b>
<b>17</b>	<b>MATERIAL E MÉTODOS.....</b>	<b>176</b>
<b>18</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÃO.....</b>	<b>180</b>
<b>19</b>	<b>CONCLUSÕES.....</b>	<b>194</b>
<b>20</b>	<b>CONCLUSÃO GERAL.....</b>	<b>196</b>
	<b>REFERÊNCIAS.....</b>	<b>197</b>
	<b>APÊNDICE A – DADOS MEDIDOS E ESTIMADOS DURANTE A IRRIGAÇÃO.....</b>	<b>212</b>
	<b>APÊNDICE B – DADOS MEDIDOS E ESTIMADOS APÓS A IRRIGAÇÃO.....</b>	<b>215</b>

## 1 INTRODUÇÃO GERAL

O projeto e manejo de sistemas de irrigação necessita cada vez mais do conhecimento aprofundado do solo e suas propriedades físico-hídricas, pois necessita-se de que o técnico seja capaz de projetar um sistema que utilize a água da forma mais eficiente possível atendendo a demanda da cultura e obtendo o maior retorno econômico sem prejuízo para o ambiente. A determinação e utilização destas propriedades é essencial, para os estudos anteriores a implantação do projeto, pois tem influência em diversos processos no sistema solo-água-planta-atmosfera, como a capacidade do solo em armazenar e disponibilizar água para as plantas, além do movimento da água no solo.

O conhecimento e compreensão da distribuição da umidade no solo temporal e espacialmente é um processo complexo pois o solo é um ambiente heterogêneo, o que abre espaço para os modelos matemáticos como uma solução mais rápida e precisa para este problema. A dinâmica da água no solo é explicada pela equação de Richards e se tratando de uma equação diferencial não linear, não possui uma solução analítica requerendo o uso do método dos elementos finitos, por exemplo, para obtenção de soluções. Deste modo, softwares numéricos que resolvam a equação de Richards através do método dos elementos finitos, dão suporte a técnicos e irrigantes para simular diferentes modelos de distribuição da água no solo de acordo com as condições estipuladas por eles.

O sistema de irrigação subsuperficial está em expansão, pois é um sistema que aplica a água diretamente no sistema radicular, resultando em menos perdas por evaporação. É um sistema bastante promissor, porém ainda faltam estudos quanto a profundidade de instalação dos tubos gotejadores e espaçamento entre emissores para as diversas culturas que atendam a demanda hídrica destas e seja viável economicamente para o produtor.

Diante do exposto, este trabalho foi dividido em três capítulos cujo objetivo geral foi gerar um modelo de fluxo de água no solo para simular a distribuição de água e forma do bulbo úmido em irrigação subsuperficial com base em dados físico-hídricos do solo (densidade, porosidade, condutividade hidráulica do solo saturado e curva de retenção de água no solo) e parâmetros do sistema de irrigação (diferentes profundidades de instalação do tubo gotejador e diferentes espaçamentos entre emissores). Posteriormente, foi feita a validação do modelo gerado com dados obtidos em experimento instalado em campo com milho híbrido AG 1051 através de análises de regressão com dados de umidade do solo e comportamento agrônômico e produtivo da cultura.

O capítulo 1 traz a caracterização física do solo com análises de densidade do solo, densidade de partículas, porosidade, curva de retenção de água no solo pelo método do papel filtro, condutividade hidráulica do solo saturado e não-saturado. O capítulo 2 refere-se a modelagem numérica para caracterização do bulbo úmido em irrigação subsuperficial e posterior validação dos dados através de experimento instalado em campo na Universidade Federal do Ceará, Campus do Pici. E por fim, o capítulo 3 aborda as respostas agronômicas e produtivas do milho híbrido AG 1051 à utilização de irrigação subsuperficial quanto a melhor profundidade de instalação do tubo gotejador e o melhor espaçamento entre emissores.

## 2 CAPÍTULO 1 – ATRIBUTOS FÍSICOS E DINÂMICA DA ÁGUA NO SOLO

### RESUMO

O solo funciona como suporte físico, reservatório de água para as plantas e fornecedor dos principais nutrientes necessários à produção. É considerado um sistema trifásico e heterogêneo do ponto de vista físico, com três fases assim representadas: a fase sólida constitui a matriz do solo; a fase líquida que consiste na água do solo, devendo ser chamada de solução do solo e a fase gasosa que é atmosfera do solo. Esse arranjo afeta as interações solo-água no sistema solo-água-planta-atmosfera que, expressa em termos de estado de energia da água na forma de potencial, controla inúmeros processos, entre os quais, o movimento de substâncias químicas para os lençóis subterrâneos e de substâncias químicas e partículas erodidas para rios e lagos, a taxa de água perdida através da lixiviação e evapotranspiração, o balanço entre ar e água nos poros do solo, a taxa de variação na temperatura do solo e a capacidade do solo em armazenar e disponibilizar água para as plantas. Visando o estudo da dinâmica da água na modelagem do bulbo úmido e manejo da irrigação localizada subsuperficialmente, foram determinadas e caracterizadas as propriedades físico-hídricas do solo: densidade, porosidade, condutividade hidráulica do solo saturado e não-saturado e curva de retenção de água no solo. As análises realizadas indicaram que os atributos físico-hídricos obtidos foram adequados à identificação e modelagem da dinâmica da água no bulbo úmido na irrigação subsuperficial.

**Palavras-chave:** Caracterização física do solo. Dinâmica da água. Curva de retenção.

### ABSTRACT

The soil works as a physical support, a water reservoir for plants and a supplier of the main nutrients needed for production. It is considered a three-phase and physically heterogeneous system, with three phases as represented: the solid phase constitutes the soil matrix; the liquid phase that consists of the soil water, which should be called the soil solution and the gas phase that is the soil atmosphere. This arrangement affects the soil-water interactions in the soil-water-plant-atmosphere system which, expressed in terms of the water's energy state in the form of potential, controls numerous processes, among which, the movement of chemical substances to the underground sheets and of chemical substances and eroded particles to rivers and lakes, the rate of water lost through leaching and evapotranspiration, the balance between air and water in the soil pores, the rate of change in soil temperature and the capacity of the soil to store and

make water available to plants. Aiming to study the dynamics of water in the modeling of the wet bulb and management of irrigation located subsurface, soil physical-hydric properties were determined and characterized: density, porosity, hydraulic conductivity of saturated and unsaturated soil and water retention curve in the soil. The analyzes indicated that the physical-hydric attributes obtained were adequate for the identification and modeling of water dynamics in the wet bulb in underground irrigation.

**Keywords:** Physical characterization of the soil. Water dynamics. Retention curve.

### 3 INTRODUÇÃO

Do ponto de vista físico, o solo é considerado um sistema trifásico muito heterogêneo. As três fases são representadas pela fase sólida constituída da matriz do solo; da fase líquida que consiste na água do solo na qual existem substâncias dissolvidas, devendo ser chamada então de solução do solo, e da fase gasosa formada pelos gases que circulam entre as partículas do solo (FERREIRA, 2010).

A física do solo estuda as propriedades físicas, bem como sua medição, predição e controle, com o objetivo principal de entender os mecanismos que governam a funcionalidade dos solos e seu papel na biosfera. A importância prática de se entender o comportamento físico do solo está associada ao seu uso e manejo apropriado, ou seja, orientar irrigação, drenagem, preparo e conservação de solo e água (REINERT; REICHERT, 2006).

Os solos agrícolas funcionam como um sistema complexo que retém e transmite água, ar, nutrientes e calor às sementes e plantas, de maneira que é fundamental um ambiente físico favorável ao crescimento radicular, para maximizar a produção das culturas (LETEY, 1985). Dependendo do solo, do clima, da cultura e de seu manejo, os solos podem ser degradados, com restrições ao crescimento radicular e ao movimento de água no solo (KLUTE, 1982).

Em relação a dinâmica da água no solo, algumas propriedades ganham certo destaque. A densidade tem sido usada como medida da qualidade do solo devido às suas relações com outros atributos, como porosidade, umidade do solo, condutividade hidráulica, infiltração e retenção de água no solo, sendo muito utilizada na avaliação da compactação dos solos (GUARIZ *et al.*, 2009; COSTA *et al.*, 2007).

A porosidade do solo interfere na aeração, condução e retenção de água, resistência à penetração e à ramificação das raízes no solo e, conseqüentemente, no aproveitamento de água e nutrientes disponíveis (TOGNON, 1991). Sua relação com a condutividade hidráulica é

tema de muitas discussões e estudos, a fim de melhorar a compreensão do comportamento físico do solo (SASAL; ANDRIULO; TABOADA, 2006). Para a Agronomia, a porosidade é um índice que permite estimar a lâmina de água necessária a irrigação de uma área, é necessária no cálculo de projetos de drenagem, é um importante parâmetro na avaliação da estrutura e influencia na temperatura do solo (AMARO FILHO; ASSIS JUNIOR; MOTA, 2008).

A curva de retenção de água no solo tem sido utilizada para entender a dinâmica da água no solo (DEXTER; BIRD, 2001). É parte fundamental da caracterização das propriedades hidráulicas do solo (CICHOTA; JONG VAN LIER, 2004), especialmente em estudos de balanço e disponibilidade de água às plantas, de dinâmica da água e solutos no solo, de infiltração e no manejo da irrigação (TORMENA; SILVA, 2002) e é elementar na modelagem do fluxo da água (DE JONG VAN LIER; DOURADO NETO; METSELAAR, 2009).

Para finalizar as propriedades que mais influenciam na dinâmica da água no solo, tem-se a condutividade hidráulica. Esta, mede a habilidade do solo em conduzir água, e as características de retenção de água no solo, que expressam a sua habilidade em armazenar água (KLUTE; DIRKSEN, 1986).

Diante do exposto, o objetivo principal deste capítulo foi determinar e utilizar os valores de densidade, porosidade, condutividade hidráulica do solo saturado e não-saturado e curva de retenção de água no solo visando o estudo da dinâmica da água no solo para a modelagem do bulbo úmido e manejo da irrigação localizada subsuperficial.

## **4 REVISÃO DE LITERATURA**

### **4.1 Densidade do solo**

A densidade é um importante atributo físico dos solos e tem relação com a estrutura, uma vez que esta é função do arranjo e orientação das partículas do solo, assim como da quantidade e geometria dos espaços porosos (AGUIAR, 2008; SANCHEZ, 2012;). A densidade do solo expressa a relação entre a quantidade de massa de solo seco por unidade de volume do solo. No volume do solo é incluído o volume de sólidos e o de poros do solo (REINERT; REICHERT, 2006).

Ela tem sido usada como medida da qualidade do solo devido às suas relações intrínsecas com outros atributos, como porosidade, umidade do solo, condutividade hidráulica, infiltração e retenção de água no solo, desenvolvimento de raízes, trocas gasosas e

suscetibilidade do solo aos processos erosivos, sendo muito utilizado na avaliação da compactação dos solos (COSTA *et al.*, 2007; GUARIZ *et al.*, 2009.).

Relacionando com as classes texturais de solo, os solos arenosos apresentam valores de densidade naturalmente mais elevados em relação aos solos argilosos. Os valores normais para solos arenosos variam de 1,2 a 1,9 g cm<sup>-3</sup>, enquanto solos argilosos apresentam valores mais baixos, de 0,9 a 1,7 g cm<sup>-3</sup> (REINERT; REICHERT, 2006).

Quando ocorre a degradação da estrutura do solo, o efeito imediato é no aumento da densidade, acarretando a redução da macroporosidade (ALVES; SUZUKI; SUZUKI, 2007). Como consequência disso, tem-se à redução na área da seção transversal para o fluxo de água, juntamente com o movimento do fluido, afetando com isso o movimento de água no solo. Alguns autores observaram que em solos degradados há relação inversa entre densidade do solo e porosidade total (ALVES, 1992; ANJOS *et al.*, 1994; VEIGA; BASSIL; ROSSO, 1994).

A variabilidade espacial da densidade do solo é altamente afetada pelo manejo agrícola, pelo tipo de solo e pela profundidade de amostragem. O número de amostras necessárias para sua determinação é dúvida comum entre pesquisadores. Ao se coletar amostras de solo, a variabilidade dos resultados é atribuída, habitualmente, a erros de metodologia na amostragem e a sua heterogeneidade, em profundidade e no sentido horizontal. Logo, torna-se difícil identificar e separar a interferência de cada um desses fatores; entretanto, a experiência tem indicado que se a amostragem for feita cuidadosamente, a principal fonte de variação é a heterogeneidade do solo (TIMM *et al.*, 2006).

Dentre os métodos de determinação da densidade do solo, o de maior utilização e considerado padrão, é o do anel volumétrico, o qual consiste na amostragem de solo com estrutura indeformada num anel (cilindro metálico) de volume conhecido (REICHARDT; TIMM, 2008).

Outro método utilizado, o do torrão parafinado, consiste na coleta de torrões de volume variável, secos ao ar, e impermeabilizados com parafina líquida. O volume dos torrões é determinado pelo volume de água deslocado pelos mesmos quando imersos em água (REICHARDT; TIMM, 2008).

Os métodos mais modernos de determinação da densidade do solo baseiam-se em técnicas nucleares. Entre estas técnicas, a tomografia computadorizada tem sido utilizada há mais de duas décadas principalmente em estudos de compactação do solo e seus efeitos na produção agrícola e degradação do solo (PIRES *et al.*, 2010).

Outro método de determinação de densidade do solo baseado em técnicas nucleares é a utilização de sondas de superfície nêutron-gama, as quais são empregadas para medidas de

densidade do solo para camadas de até no máximo, 30 cm de profundidade. O uso de sondas no campo permite repetir as medidas tanto quanto desejado, sem destruição das amostras, facilitando seu uso em solos cultivados (PIRES; ROSA; TIMM, 2011).

#### 4.2 Densidade de partículas

A densidade de partículas, expressa a relação entre a quantidade de massa de solo seco por unidade de volume de sólido do solo (REINERT; REICHERT, 2006); está relacionada ao volume efetivamente ocupado por matéria sólida, desconsiderando a porosidade (TEIXEIRA *et al.*, 2017).

Depende primariamente da composição química e composição mineralógica do solo (REINERT; REICHERT, 2006). Sua determinação pode ser afetada pela fração dos poros que não está efetivamente aberta para a atmosfera, como os poros oclusos no interior de minerais ou nódulos (TEIXEIRA *et al.*, 2017).

Tem valor considerável, uma vez que é requisitada na maioria das expressões matemáticas em que o volume ou peso da amostra do solo estão sendo considerados (RANDO, 1981). Não varia com o manejo do solo, é um atributo estático, considerando-se que mudanças só seriam perceptíveis em um tempo bastante considerável.

Na maioria dos solos minerais, a densidade média das partículas é de cerca de 2,6-2,7 g cm<sup>-3</sup> e é, portanto, próxima da densidade do quartzo, que é frequentemente prevalente em solos arenosos. Os minerais de argila aluminossilicatos têm uma densidade semelhante. A presença de óxidos de ferro e de vários minerais pesados aumenta o valor médio de da densidade de partículas, enquanto a presença de matéria orgânica diminui (HILLEL, 1980).

A determinação da densidade de partículas do solo possui grande relevância como indicativa da composição mineralógica, cálculo da velocidade de sedimentação de partículas em líquidos e determinação indireta da porosidade (FERREIRA *et al.*, 2003).

A escolha do método para a determinação da densidade de partículas leva em consideração aspectos como quantidade do material a ser analisado, disponibilidade de equipamentos e exatidão requerida na determinação (FLINT; FLINT, 2002), bem como praticidade e tempo de processamento. Os métodos mais usuais são o método do picnômetro e o método do balão volumétrico.

### 4.3 Porosidade

Segundo Curi *et al.*, 1993, a porosidade do solo corresponde ao volume do solo não ocupado por partículas sólidas, incluindo todo o espaço poroso ocupado pelo ar e água. Este volume resulta na porosidade total do solo. Segundo Aguiar (2008), é reflexo direto da estrutura e textura do solo, sendo os poros determinados pelo arranjo e geometria das partículas, diferindo quanto à forma, comprimento, largura e tortuosidade.

A porosidade do solo interfere na aeração, condução e retenção de água, resistência à penetração e à ramificação das raízes no solo e, conseqüentemente, no aproveitamento de água e nutrientes disponíveis (TOGNON, 1991). Sua relação com a condutividade hidráulica é tema de muitas discussões e estudos, a fim de melhorar a compreensão do comportamento físico do solo (SASAL; ANDRIULO; TABOADA, 2006).

Para a Agronomia, a porosidade é um índice de grande importância pois permite estimar a lâmina de água necessária a irrigação de uma área, é necessária no cálculo de projetos de drenagem, é um importante parâmetro na avaliação da estrutura e influencia na temperatura do solo (AMARO FILHO; ASSIS JUNIOR; MOTA, 2008). O solo ideal deve apresentar um volume e dimensão dos poros adequados para a entrada, movimento e retenção de água e ar para atender às necessidades das culturas (HILLEL, 1980).

A classificação mais usual da porosidade refere-se à sua distribuição de tamanho em duas classes: micro e macroporosidade. A microporosidade é uma classe de tamanho de poros que, após ser saturada em água, a retém contra a gravidade. Os macroporos, ao contrário, após serem saturados em água não a retém, ou são esvaziados pela ação da gravidade. A funcionalidade desses poros fica evidente quando se considera que os microporos são os responsáveis pela retenção e armazenamento da água no solo e os macroporos responsáveis pela aeração e pela maior contribuição na infiltração de água no solo (REINERT; REICHERT, 2006).

Os limites entre os quais varia a porosidade total de um solo são bastante amplos. Solos de textura grossa tendem a ser menos porosos que os de textura fina, embora o tamanho médio dos poros individuais seja maior em solos arenosos que em solos argilosos. Em solos argilosos, a porosidade é altamente variável à medida que o solo alternadamente expande, contrai, agrega, dispersa, compacta e racha (HILLEL, 1980).

A porosidade do solo se torna de extrema importância, visto que é responsável por muitos fenômenos além de desenvolver uma série de mecanismos no solo. Se analisada de forma conjunta à matriz do solo, obtém como respostas um grupo de outras propriedades físicas

associadas às relações de massa e volume das fases do sistema solo (REINERT; REICHERT, 2006).

#### **4.4 Curva de retenção de água do solo**

A curva de retenção de água no solo tem sido utilizada para descrever a dinâmica da água no solo (VAN GENUCHTEN, 1980; DEXTER; BIRD, 2001). A curva é parte fundamental da caracterização das propriedades hidráulicas do solo (CICHOTA; JONG VAN LIER, 2004), especialmente em estudos de balanço e disponibilidade de água às plantas, de dinâmica da água e solutos no solo, de infiltração e no manejo da irrigação (TORMENA; SILVA, 2002).

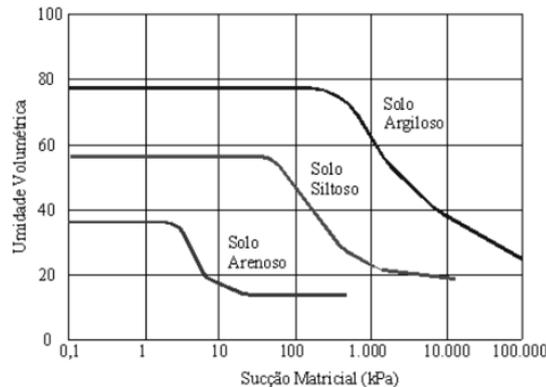
A curva de retenção é uma das mais importantes medidas da característica hidráulica do solo e é elementar na modelagem do fluxo da água (DE JONG VAN LIER; DOURADO NETO; METSELAAR, 2009). Essa curva representa graficamente a relação entre a energia de retenção de água (potencial matricial, em escala logarítmica) e o conteúdo de água correspondente. Essa relação proporciona uma transformação entre potencial mátrico e umidade do solo.

A forma da curva característica é dependente das características intrínsecas de cada solo, resultando da ação conjunta dos atributos do solo, como textura, estrutura, mineralogia e matéria orgânica (GUPTA; LARSON, 1979; BEUTLER *et al.*, 2002).

De acordo com Childs (1940), à medida que a sucção aumenta, mais água é retirada do solo e mais dos poros relativamente grandes, que não podem reter água contra uma forte sucção aplicada, logo, se esvaziarão. Lembrando a equação da capilaridade, podemos prontamente prever que um aumento gradual na sucção resultará no esvaziamento de poros progressivamente menores, até que, em altos valores de sucção, apenas os poros muito estreitos retenham água. O aumento da sucção é, portanto, associado à diminuição da umidade do solo.

Em geral, quanto maior o teor de argila, maior a retenção de água em qualquer sucção específica e mais gradual a inclinação da curva. Em um solo arenoso, a maioria dos poros é relativamente grande, e uma vez que esses poros grandes são esvaziados em uma determinada sucção, apenas uma pequena quantidade de água permanece. Em um solo argiloso, a distribuição do tamanho dos poros é mais uniforme, e mais da água é adsorvida, de modo que o aumento da sucção matricial provoca uma diminuição mais gradual do teor de água (HILLEL, 1980).

Figura 1 – Modelos típicos de curvas de retenção de água no solo com diferentes texturas.



Fonte: Adaptado de Fredlund e Xing (1994).

Se dois corpos que diferem na textura ou na estrutura entrarem em contato físico direto, tenderão a um estado de equilíbrio de energia potencial no qual o potencial da água se tornará igual durante todo o tempo, mas cada um dos dois corpos reterá uma quantidade de água determinada por sua própria característica de umidade do solo (HILLEL, 1980).

Como o potencial matricial varia com o conteúdo de água no solo, sendo tanto menor quanto mais seco estiver o solo, foram desenvolvidos aparelhos e métodos que buscassem uma correlação entre ele e o conteúdo de água no solo (LIBARDI, 2010). Existem diversas técnicas para medição da sucção em solos, dentre elas pode-se citar: psicrômetro, papel filtro, tensiômetros, translação de eixos, condutividade térmica e condutividade elétrica (CHAGAS, 2014).

A curva característica de água no solo é dependente da trajetória seguida durante o ensaio, de secagem, umedecimento ou mista, e este fenômeno é denominado histerese. A curva de secagem e a curva de umedecimento formam os limites extremos para a curva característica de um dado solo. Entre essas curvas existem infinitas outras curvas que representam a relação umidade e a tensão de água do solo. As curvas de secagem e de umedecimento são assintóticas nos extremos (umidade tendendo a zero e a de tensão tendendo ao infinito) (HILLEL, 1998; JURY; HORTON, 2004; LAL; SHUKLA, 2004; MIYAZAKI, 2005).

Tradicionalmente utiliza-se a câmara de pressão de Richards para obtenção da curva de retenção. Entretanto, esse método apresenta algumas dificuldades, como por exemplo a determinação do ponto de equilíbrio entre a pressão aplicada e a água retida no solo, o contato amostra-placa, o longo tempo exigido para as medidas e o custo do equipamento (TAVARES; FELICIANO; VAZ, 2008). Dentre os métodos alternativos, o método do papel filtro vem sendo amplamente utilizado.

#### 4.4.1 Método do papel filtro

O método do papel filtro é empregado para estimar o potencial matricial de água no solo e baseia-se no alcance do equilíbrio do papel filtro com o fluxo de água que ocorre em um solo (GOMES, 2007). Quando o solo úmido é colocado em contato com um material poroso, a água será transferida do solo para esse material até que o equilíbrio seja alcançado. No estado de equilíbrio, os potenciais matriciais da água no solo e no material poroso igualam-se, apesar de as respectivas umidades serem diferentes (MARINHO; OLIVEIRA, 2006).

O método do papel filtro determina o potencial matricial do solo de forma indireta, logo, alguns aspectos influenciam a confiabilidade do método, por exemplo o tempo de equilíbrio, a variação de temperatura, o contato entre o papel filtro e a amostra, o manuseio e a exposição ao ambiente (BICALHO *et al.*, 2007).

O tempo de contato entre o papel filtro e a amostra é fator importante neste método, pois deve ser suficiente para que o equilíbrio seja alcançado (MARINHO; OLIVEIRA, 2006). O período de sete dias é considerado suficiente para garantir o equilíbrio na maioria das medições de potencial matricial (LEONG; HE; RAHARDJO, 2002). Também deve ser dada atenção a temperatura, pois a variação durante o período de equilíbrio aumenta a variabilidade dos resultados (AL-KHAFRAF; HANKS, 1974). A variação de temperatura deve ser menor que 3 °C, considerando uma temperatura nominal de 20 °C (ASTM, 2003).

Irregularidades ou descontinuidades na superfície da face da amostra em interação com o papel filtro podem alterar significativamente a precisão das medidas, acarretando aferições incorretas em razão da deficiência de contato entre o papel filtro e o solo (GOMES, 2007). Porém, esse autor também salienta que o aumento do tempo de contato entre o papel filtro e o solo pode compensar eventuais dificuldades de acesso da água intersticial ao papel filtro.

Após o equilíbrio, é necessário garantir que o papel filtro seja removido do ambiente de equilíbrio sem alteração significativa de umidade, para obter-se uma medição confiável de potencial matricial. Por esse motivo, o manuseio deve ser o mais rápido possível, até ser aferida a quantidade de água no papel filtro (BULUT; LYTTON; WRAY, 2001).

Além disso, sua acurácia depende da precisão com que foi determinada a curva de calibração do papel (BICALHO *et al.*, 2007). Na literatura, diferentes autores propõem curvas de calibração, mas que mostram razoável concordância entre si (MARINHO; OLIVEIRA, 2006). A calibração do papel filtro Whatman N° 42 propostas por vários pesquisadores são realizadas para o papel inicialmente seco ao ar. As várias funções de calibrações são

determinadas através do ajuste de dados experimentais dos valores de sucção controlada do papel filtro determinados diretamente por diferentes técnicas experimentais e modelagem matemática usadas na calibração do papel (CHRYSTELLO, 2017). Na Tabela 1 são apresentadas algumas curvas encontradas na literatura para o papel filtro Whatman n° 42.

Tabela 1 – Equações das curvas de calibração do papel filtro Whatman N° 42.

Referência	Medida	Equação de calibração
Hamblin (1981)	Potencial matricial	$\Psi[kPa] = 10(8,022 - 3,683 \log ())$ $\Psi[kPa] = 10(4,84 - 0,0622) \text{ para } u \leq 47\%$
Chandler et al. (1992)	Potencial matricial	$\Psi[kPa] = 10(6,05 - 2,48 \log ()) \text{ para } u > 47\%$
Fredlund e Xing (1994)	Potencial matricial	$\Psi[kPa] = 0,23 [e(268)^{0,629} - e]2,101$
	Potencial total	$\Psi[kPa] = 18500 [e(37)^{0,242} - e]2,248$ $\Psi[kPa] = 10(2,909 - 0,0229) \text{ para } u \geq 47\%$
Leong et al. (2002)	Potencial matricial	$\Psi[kPa] = 10(4,945 - 0,0673) \text{ para } u < 47\%$ $\Psi[kPa] = 10(8,778 - 0,222) \text{ para } u \geq 26\%$
	Potencial total	$\Psi[kPa] = 10(5,31 - 0,0879) \text{ para } u < 26\%$
Lucas et al. (2011)	Potencial matricial	$\log \Psi[kPa] = 4,9322 - 0,0836 u$

Fonte: ALMEIDA, 2013; u – umidade gravimétrica do papel filtro,  $\Psi$  – potencial.

Almeida (2015), é uma das principais referências deste método atualmente. A autora avaliou o método do papel filtro, utilizando papel filtro Whatman n°42, na obtenção da curva de retenção de água em comparação com o método tradicional em cinco diferentes solos do Perímetro Irrigado Baixo Acaraú, no estado do Ceará.

#### 4.4.2 Modelo de van Genuchten

Em Agronomia, a faixa de água de interesse no solo é convencionalmente denominada de água disponível para as plantas e corresponde ao intervalo compreendido entre a capacidade de campo e o ponto de murcha permanente (OLIVEIRA *et al.*, 2004). Por esse motivo, a capacidade de retenção de água no solo tem sido extensamente estudada até o potencial matricial de 1.500 kPa, potencial em que o conteúdo de água no solo é considerado o limite, em termos de deficiência hídrica, para o desenvolvimento da maioria das plantas cultivadas (RICHARDS; WEAVER, 1943).

Nessas condições, para a descrição do comportamento físico-hídrico dos solos, o modelo de ajuste proposto por van Genuchten (1980) tem sido adotado universalmente. Esse modelo permite relacionar, com alto poder de predição, a energia de retenção e disponibilidade hídrica (DEXTER, 2004) (Equação 1).

$$\theta = \theta_r + \frac{\theta_s - \theta_r}{(1 + |\alpha\Psi_m|^n)^m} \quad \text{Equação 1}$$

Onde:  $\theta_r$  e  $\theta_s$  são os conteúdos de água residual e de saturação ( $\text{m}^3 \text{m}^{-3}$ ), respectivamente,  $\Psi_m$  o potencial mátrico da água no solo (kPa), (escalador do  $\Psi_m$ ),  $m$  e  $n$  (relacionados ao formato da curva).

De acordo com Carducci *et al.*, 2011, essa equação matemática é caracterizada por apresentar duas assíntotas, relacionadas com os conteúdos de água no solo correspondentes à saturação e ao conteúdo residual, e um ponto de inflexão entre os platôs, o qual é dependente dos atributos do solo, sendo a sua forma e inclinação reguladas por parâmetros empíricos de ajuste do modelo (“ $\alpha$ ”, “ $n$ ” e “ $m$ ”). Porém, de acordo com Schaap e van Genuchten (2005), o modelo de van Genuchten (1980) é instável numericamente nas faixas de sucções muito baixas.

#### 4.5 Condutividade hidráulica do solo

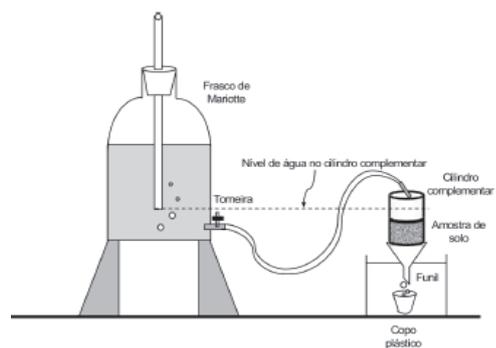
As propriedades que determinam a densidade do fluxo de água no solo são a condutividade hidráulica, que mede a habilidade do solo em conduzir água, e as características de retenção de água no solo, que expressam a sua habilidade em armazenar água (KLUTE; DIRKSEN, 1986). A condutividade hidráulica do solo é designada como a facilidade com que a água se movimenta através do solo, sendo importante no uso agrícola e, conseqüentemente, à produção das culturas e à preservação do solo e do ambiente (GONÇALVES; LIBARDI, 2013).

O valor da condutividade hidráulica é constante em condição de saturação, uma vez que se considera que a porosidade do solo não se altera durante um experimento em que se determina a condutividade. No entanto, em condição de não saturação, existe dependência de  $K$  em relação ao conteúdo de água. Com a diminuição do conteúdo de água no solo há uma diminuição da área útil ao fluxo, visto que os poros livres de água não contribuem no movimento; além disso, os poros preenchidos com ar aumentam a tortuosidade do fluxo (AMARO FILHO; ASSIS JUNIOR; MOTA, 2008).

Uma vez que o solo, como meio poroso, pode ter sua estrutura modificada por processos naturais e antropogênicos, detecta-se alta variabilidade espacial da condutividade hidráulica no solo (WARRICK; NIELSEN, 1980; JONG VAN LIER; LIBARDI, 1999). Essa propriedade varia em diferentes solos e até no mesmo solo, dependendo, portanto, das propriedades do meio e do fluido. A condutividade hidráulica é considerada uma das propriedades que reflete as condições físicas do solo, sua qualidade e estabilidade estrutural (ANGELOTTI NETTO; FERNANDES, 2005).

A condutividade hidráulica saturada do solo ( $K_s$ ) representa um parâmetro chave para análise da intensidade do deslocamento da água no solo. Pode-se determinar a condutividade hidráulica do solo saturado tanto em condição de laboratório quanto de campo. No laboratório podem ser usados métodos diretos e indiretos. A determinação da condutividade hidráulica no campo apresenta a vantagem de se obter a informação diretamente no local onde se pretende desenvolver experimentos ou cultivos, porém o método direto é a forma mais comum de se medir a condutividade hidráulica em laboratório e é feita através do permeâmetro de carga constante (Figura 2). Esse método consiste em se ter um bloco de solo com estrutura não deformada, sobre o qual se mantém uma lâmina constante de água, coletando-se na parte inferior do bloco de solo, o volume de água drenada em intervalos conhecidos de tempo (AMARO FILHO; ASSIS JUNIOR; MOTA, 2008).

Figura 2- Permeâmetro de carga constante.



Fonte: TEIXEIRA, 2005.

Para a condutividade hidráulica do solo não-saturado, os métodos de campo empregados com mais sucesso são fundamentados em experimentos de drenagem interna, como o método do perfil instantâneo (HILLEL; KRENTOS; STILIANOV, 1972), que se baseia na análise dos componentes da equação de Richards em perfis de potenciais e fluxos transientes

durante a drenagem vertical que ocorre após a saturação do solo por uma chuva ou irrigação (PAIGE; HILLEL, 1993).

O método do perfil instantâneo apresenta como vantagem principal a possibilidade de se medir diretamente no campo as propriedades hidráulicas, sem a necessidade de aguardar o estabelecimento de um equilíbrio dinâmico (“steady state”). Vários autores, comparando resultados do método do perfil instantâneo com os de outros métodos, inclusive de laboratório, concluíram que o perfil instantâneo *in situ* resulta em determinações mais consistentes, além de sua relativa facilidade de realização (PREVEDELLO; PREVEDELLO; LIBARDI, 1981; PAIGE; HILLEL, 1993; MARION *et al.*, 1994), chegando a considerá-lo o método padrão.

Entretanto, o método apresenta algumas limitações. Baker, Veneman e Bouma (1974) e Paige e Hillel (1993) ressaltam que a drenagem interna pode ser influenciada pela presença da água subterrânea quando esta se encontra próxima à superfície; em perfis de solos heterogêneos, não há uma redistribuição de água uniforme, pois a presença de camadas menos permeáveis impede o fluxo vertical de água, favorecendo o fluxo lateral; e solos com inclinação não permitem uma inundação e uma drenagem vertical homogênea.

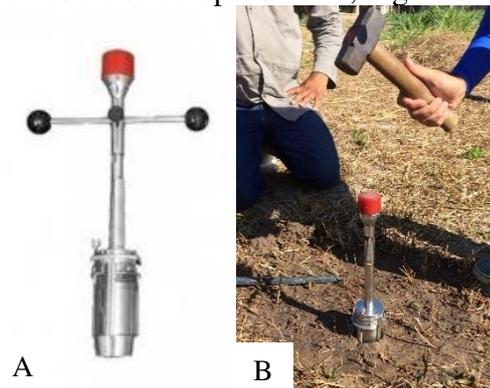
## **5 MATERIAL E MÉTODOS**

### **5.1 Densidade do solo**

O trabalho foi realizado em área experimental próxima do Laboratório de Hidráulica e Irrigação, da Universidade Federal do Ceará – Campus do Pici. Segundo Vieira (2013), o solo é classificado como Argissolo Amarelo Eutrocoeso típico, textura franco argilo-arenosa. Foram coletadas 10 amostras em pontos espacializados dentro da área de estudo com 10 centímetros de profundidade.

Foi utilizado o método do anel volumétrico (Método padrão, Embrapa 1997), obtendo-se a massa e o volume de amostras de solo com estrutura indeformada. Para a coleta utilizou-se o amostrador do tipo Uhland (Figuras 3A e 3B), o solo coletado foi colocado em estufa a 110 °C por 24 horas. O cilindro utilizado para a coleta das amostras tem altura de 3,88 centímetros e diâmetro de 4,85 cm, obtendo-se um volume de 71,68 cm<sup>3</sup>.

Figura 3: Figura 3A: Amostrador do tipo Uhland; Figura 3B: Coleta das amostras.



Fonte: Elaborado pela autora, 2018.

Após as 24 horas, retirou-se os cilindros da estufa, resfriou-se em dessecador e depois pesou-se as amostras secas. Em posse desses dados, utilizou-se a equação 2 para obtenção da densidade do solo.

$$\rho_s = \frac{m_s}{V} \quad \text{Equação 2}$$

Onde:  $\rho_s$  – densidade do solo, em  $\text{kg dm}^{-3}$  (equivalente a  $\text{g cm}^{-3}$ );  $m_s$  – massa da amostra de solo seco a  $110\text{ }^\circ\text{C}$ , em g;  $V$  – volume do cilindro, em  $\text{cm}^3$ .

## 5.2 Densidade de partículas

Foram coletados 10 pontos amostrais de solo para a análise da densidade de partículas, em três diferentes profundidades (10, 20 e 30 centímetros), para a obtenção de uma amostra composta. As análises foram realizadas no Laboratório de Física do Solo do Departamento de Solos da Universidade Federal do Ceará – Campus do Pici.

O solo coletado passou 7 dias secando ao ar em bandejas e para facilitar o processo de secagem, foi revolvido 2 vezes por dia (Figuras 4A e 4B). Após os 7 dias, foi coletado uma porção de solo para ser destorroado (Figura 4C) e passado na peneira com malha de 2 mm (Figura 4D) para separar os cascalhos e assim iniciar as análises.

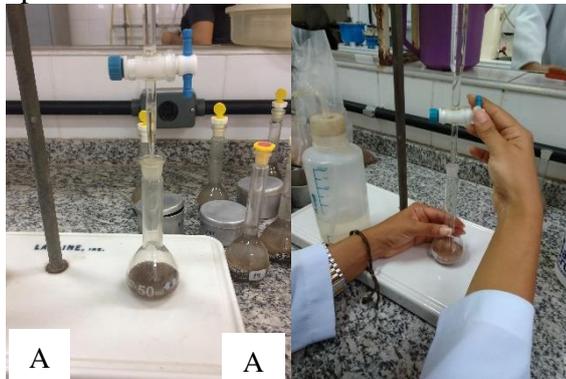
Figura 4 – Figura 4A: Secagem do material; Figura 4B: Revolvimento do material; Figura 4C: Destorroamento do solo; Figura 4D: Peneira com malha de 2mm.



Fonte: Elaborada pela autora, 2018.

Para a determinação da densidade de partículas, foi utilizado o método do balão volumétrico. Foram colocadas 20 gramas de solo seco em estufa, em um balão volumétrico de 50 mL e foi acrescentado álcool etílico até completar os 50 mL, agitando o balão cuidadosamente para eliminar eventuais bolhas (Figuras 5A e 5B). O valor de álcool gasto na proveta foi anotado para uso na equação 3 que foi utilizada para o cálculo da densidade de partículas.

Figura 5 – 5A: 20 gramas de TFSE em balão volumétrico; 5B: acréscimo de álcool etílico para completar 50 ml.



Fonte: Elaborado pela autora, 2018.

$$\rho_p = \frac{m_s}{(50 - V_{ag})} \quad \text{Equação 3}$$

Onde:  $\rho_p$  = densidade de partículas,  $\text{g cm}^{-3}$ ;  $m_s$  = massa de solo seco a  $110^\circ\text{C}$ , g;  $V_{ag}$  = volume de álcool utilizado, mL.

### 5.3 Porosidade total

A porosidade do solo pode ser determinada por diferentes métodos. Neste trabalho, foi utilizado o método indireto. Esse método é considerado preferível a qualquer outro método, desde que os valores de densidade do solo e densidade de partículas sejam corretamente determinados. Foram calculados 10 diferentes valores de porosidade total.

O cálculo da porosidade foi feito através da equação 4, após a realização das análises de densidade do solo e densidade de partículas.

$$\text{porosidade total (\%)} = \left(1 - \frac{\rho_s}{\rho_p}\right) \times 100 \quad \text{Equação 4}$$

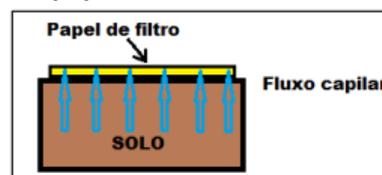
Onde:  $\rho_s$  = densidade do solo,  $\text{g cm}^{-3}$ ;  $\rho_p$  = densidade de partículas,  $\text{g cm}^{-3}$ .

### 5.4 Curva de retenção de água no solo

Foi utilizado o papel filtro Whatman n°42 e para o ensaio foram coletadas amostras de solo indeformadas em 15 pontos. O solo foi coletado usando o amostrador do tipo Uhland na profundidade de 10 a 20 cm, em cilindros de metal com 2 cm de altura e 4,6 cm de diâmetro.

Os procedimentos foram realizados no laboratório do Departamento de Engenharia Hidráulica e Ambiental da Universidade Federal do Ceará. As amostras foram colocadas para saturar por capilaridade durante 24 horas. Após esse período, a primeira amostra foi colocada em contato com o papel filtro para obtenção da umidade do solo saturado. O procedimento consiste em colocar em contato com uma amostra de solo uma fração de papel filtro com geometria e área igual ao topo do anel, de tal forma que seja estabelecido o equilíbrio de sucção entre eles (Figura 6). Nesta situação, o papel e o solo estarão com diferentes umidades, mas submetidos ao mesmo potencial mátrico (ALMEIDA, 2013).

Figura 6 – Técnica do papel filtro na medida do potencial matricial.

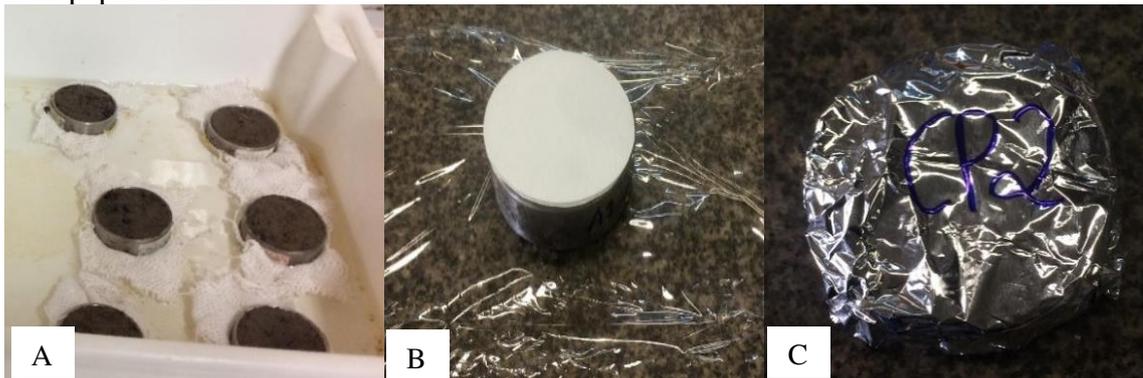


Fonte: ALMEIDA, 2013.

As outras amostras foram expostas ao ar para perda de água por drenagem e evaporação para depois serem colocadas em contato com o papel filtro com diferentes umidades. As amostras em contato com o papel filtro foram envolvidas com filme plástico e papel alumínio (para evitar perda ou ganho de umidade), identificadas e armazenadas em caixa de isopor (para obtenção do equilíbrio entre o papel filtro e o solo) por no mínimo sete dias (Figura 7).

O tempo adotado para deixar as amostras na caixa de isopor, envolvidas com o papel filme e o papel alumínio, foi de sete dias, baseado nas normas da ASTM-D 5298-93. Passados os sete dias, foi feita a pesagem do papel filtro para a obtenção da umidade, antes e depois de serem levados para estufa a 105 °C por 24 horas, em balança de precisão (quatro casas decimais).

Figura 7 – Método do papel filtro: Figura 7A – amostras saturando; Figura 7B - amostra pronta para ser envolvida com papel filme; Figura 7C – amostra identificada e envolvida com papel alumínio.



Fonte: Elaborado pela autora, 2018.

Chandler, Crilly e Montgomery (1992) obtiveram as equações de calibração (Equações 5 e 6) para o papel filtro Whatman n° 42, onde o potencial matricial ( $\psi$ ) em kPa é estimado por uma correlação com a umidade gravimétrica do papel filtro ( $u$ ).

$$\text{Para } u > 47\% \quad \Psi = 10^{(6,05-2,48 \text{ Log } (u))} \quad \text{Equação 5}$$

$$\text{Para } u < 47\% \quad \Psi = 10^{(4,84-0,0622u)} \quad \text{Equação 6}$$

Onde:  $u$  = umidade a base de peso, %;  $\Psi$  = potencial matricial, kPa.

Para o ajuste dos dados foram elaboradas planilhas com as condições para a estimativa do potencial matricial. O ajuste da curva ao modelo de van Genuchten, foi obtido através do software SWRC 2.0 (DOURADO NETO *et al.*, 2001) da Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz.

$$\theta = \theta_r + \frac{\theta_s - \theta_r}{(1 + |\alpha \Psi_m|^n)^m}$$
Equação 7

Onde:  $\theta$  = umidade volumétrica,  $\text{m}^3\text{m}^{-3}$ ;  $\theta_r$  = conteúdo de água residual,  $\text{m}^3\text{m}^{-3}$ ;  $\theta_s$  = conteúdo de água de saturação,  $\text{m}^3\text{m}^{-3}$ ;  $\Psi_m$  = potencial matricial de água no solo, kPa;  $\alpha$  = escalonador do  $\Psi_m$ ; m e n = relacionados ao formato da curva.

Posteriormente a obtenção dos parâmetros de van Genuchten, os dados foram inseridos no software SLIDE 6.0 da Rocscience, que foi utilizado na modelagem numérica deste estudo e será detalhado no próximo capítulo, obtendo a curva característica do solo também por meio deste.

### 5.5 Condutividade hidráulica do solo saturado e não saturado

Para a determinação da condutividade do solo saturado, foi utilizado o método do permeâmetro de carga constante. O ensaio foi realizado no Laboratório do Grupo de Pesquisa em Engenharia de água e Solo da Universidade Federal do Ceará, Campus do Pici.

Foram coletadas 11 amostras de solo indeformadas com amostrador do tipo Uhland, e colocadas para saturar por cerca de 24 horas. Depois de saturadas, foi colocado na parte superior do cilindro um disco de papel filtro de mesmo diâmetro, a fim de evitar a perturbação da superfície do solo pela água. Além disso, foi colocado na parte superior do cilindro, um outro cilindro de igual diâmetro e espessura, ajustado e fixado com fita adesiva impermeável.

O conjunto pronto foi colocado sobre o funil de vidro, foi colocada água sobre a superfície do solo e ajustado o nível da água acima da amostra. Para manter o nível constante de água sobre o solo foi utilizado um frasco de Mariotte (Figura 8).

Figura 8 – Método do permeâmetro de carga constante.



Fonte: Elaborado pela autora, 2018.

Depois de estabilizado o nível da água, foi determinado o volume percolado em um intervalo de 60 minutos e calculado a condutividade hidráulica pela equação de Darcy (Equação 8).

$$K_s = \frac{(V \times L)}{(A \times t \times (h + L))} \quad \text{Equação 8}$$

Onde:  $K_s$ =condutividade hidráulica do solo saturado,  $\text{cm h}^{-1}$ ;  $V$ = volume de água percolado, mL ;  $L$  = altura da camada da amostra, cm ;  $A$ = área da seção transversal do da amostra,  $\text{cm}^2$  ;  $t$  = tempo entre o início e o fim do ensaio, h ;  $h$  = carga hidráulica sobre a amostra, cm.

Para determinação da condutividade do solo não saturado foi realizado o método do perfil instantâneo. O ensaio foi realizado na área experimental do Laboratório de Hidráulica e Irrigação da Universidade Federal do Ceará, Campus do Pici. Foi delimitada uma parcela experimental com 3 m de diâmetro, a qual foi delimitada lateralmente com lona plástica e circundada por camalhões de aproximadamente 0,4 m de altura para conter a água a ser aplicada na saturação do solo (Figura 9).

Foram instaladas duas baterias compostas, cada uma, por quatro tensiômetros no centro da área. Os tensiômetros foram instalados, com espaçamento de 30 cm entre eles, nas profundidades de 5, 15, 25 e 35 centímetros. Após instalação dos tensiômetros, a área experimental foi inundada de modo a garantir a saturação do perfil, sendo constatada a saturação do solo pela leitura nula nos tensiômetros. Após saturação do solo, a área foi coberta com lona de polietileno para evitar perdas por evaporação ou entrada de água através da superfície, e por fim, foi posta sobre a área uma camada de palha para evitar grandes oscilações na temperatura do solo.

Figura 9 – Método do perfil instantâneo.



Fonte: Elaborado pela autora, 2018.

Com o início da drenagem interna, as leituras dos tensiômetros foram coletadas de uma em uma hora no primeiro dia após a saturação (totalizando 10 leituras no dia 16/11/2018) e a partir do segundo dia (17/11/2018) leituras a cada 24 horas, sempre as 8:30 horas. Totalizando um total de 576 horas de observações (até o dia 10/12/2018).

Os valores de potencial matricial ( $\Psi_m$ ) foram obtidos a partir da curva de retenção de água no solo obtida pelo método do papel filtro. O potencial total ( $\Psi_t$ ) foi calculado considerando como referência gravitacional a superfície do solo, sendo igual à soma do potencial gravitacional ( $\Psi_g$ ) e potencial matricial ( $\Psi_m$ ). Assim o  $\Psi_g$  foi considerado 5 cm, 15 cm, 25 cm e 35 cm para cada respectiva profundidade.

Com as medidas simultâneas da umidade e potencial total da água no solo ao longo do perfil, foi determinada para cada tempo a condutividade hidráulica  $K$  em função do conteúdo volumétrico de água ( $\theta$ ), com base no procedimento de Hillel, Krentos e Stilianov (1972), utilizando a equação 9.

$$K(\theta)|_z = \frac{-\int_0^z \frac{\partial \theta}{\partial t} dZ}{\left. \frac{\partial \phi_t}{\partial z} \right|_z} \quad \text{Equação 9}$$

Onde o numerador é a densidade de fluxo e o denominador é o gradiente de potencial total na profundidade do solo  $z$ .

Após esse procedimento foi feita a comparação entre a curva característica obtida no software SLIDE 6.0 da Rocscience, onde foi feito o modelo numérico do presente estudo e a curva do perfil instantâneo para cada profundidade de interesse.

## 6 RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 6.1 Densidade do solo, densidade de partículas e porosidade total

Na Tabela 2 estão dispostas as análises estatísticas descritivas da densidade do solo ( $\rho_s$ ), densidade de partículas ( $\rho_p$ ) e porosidade total para a profundidade 0-10 cm. Pode-se observar que os valores de média e mediana estão próximos, indicando distribuição simétrica. Em relação ao desvio padrão, nota-se que apenas para a porosidade total foi obtido um desvio maior em relação à média, indicando uma maior dispersão dos dados. De acordo com o teste de Kolmogorov-Smirnov os dados apresentam distribuição normal.

Segundo Vieira (2013) o solo da área de estudo é classificado como Argissolo Amarelo Eutrocoeso típico, textura franco argilo-arenosa. Para solos arenosos, Reinert e Reichert (2006) relataram que os valores normais de densidade variam entre 1,2 e 1,9 g cm<sup>-3</sup>. Silva (2019), estudando solos do Ceará relatou valores de densidade variando entre 1,60 a 1,71 g cm<sup>-3</sup>, apresentando também classes texturais franco argilo-arenosa e argilo-arenosa. No presente estudo, a densidade teve média 1,57 g cm<sup>-3</sup> sendo corroborada pelos estudos citados.

Tabela 2 – Medidas estatísticas descritivas de densidade e porosidade.

Número de amostras (n)	Métrica de análise	$\rho_s$	$\rho_p$	Porosidade total
10	Mínimo	1,34	2,43	28,45
	Máximo	1,72	2,58	48,31
	Mediana	1,59	2,47	32,16
	Média	1,57	2,49	35,33
	Desvio padrão	0,12	0,06	6,99
	Variância	0,02	0,04	48,85
	Assimetria	-0,79	0,80	1,05
	Distribuição	Normal	Normal	Normal

Fonte: Elaborado pela autora, 2019.

Em relação a densidade de partículas, Paiva *et al.* (2000) encontraram em Argissolo Amarelo em Tabuleiro Costeiro na Bahia valores de 2,41 e 2,38 g cm<sup>-3</sup>. Já Menezes (2016) relatou valor de 2,60 g cm<sup>-3</sup> em solos do Ceará, estando mais próximo da média de 2,50 g cm<sup>-3</sup> do presente estudo. A discrepância se deve ao fato dos maiores teores de argila nos solos da Bahia, em contraste aos menores teores encontrados nos Argissolos do Ceará.

Prevedello *et al.* (2013), encontraram valores de porosidade total em média 41% para a camada de 10-20 cm aproximando-se dos resultados encontrados neste estudo. Vários autores (GIAROLA *et al.*, 2003; LIMA *et al.*, 2006; SANTANA *et al.*, 2006; CORRÊA *et al.*, 2008; DANTAS *et al.*, 2014) têm relatado valores de porosidade total abaixo de 0,40 cm<sup>3</sup> cm<sup>-3</sup> em Argissolos, corroborando o resultado do presente estudo.

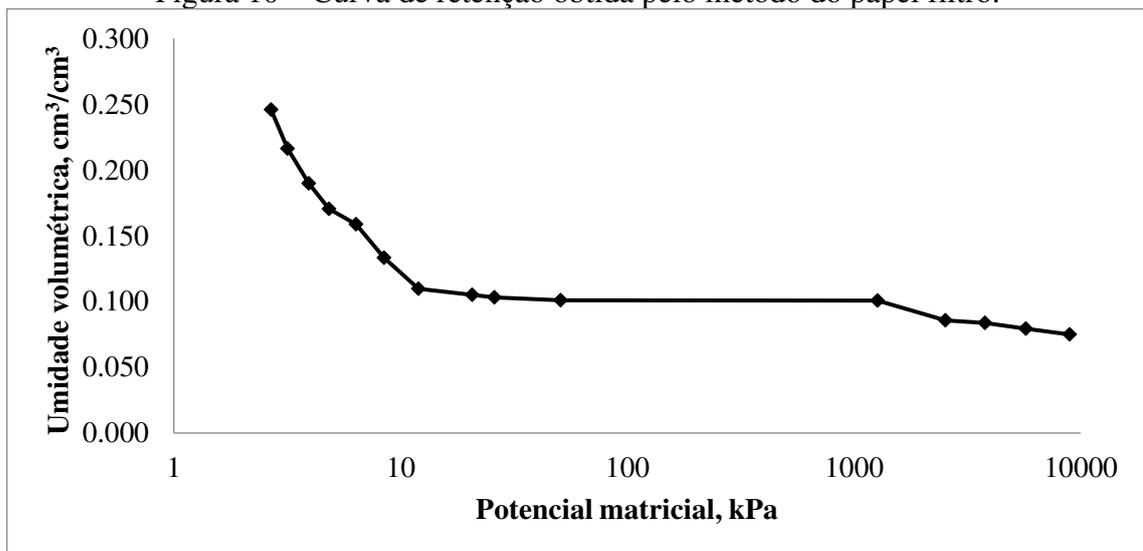
Alguns autores realizaram a caracterização física da área de estudo, relatando valores de densidade do solo, densidade de partículas e porosidade total. Cajazeira (2007) apresentou valores de densidade do solo de 1,69 Mg m<sup>-3</sup> em média, densidade de partículas de 2,62 Mg m<sup>-3</sup> e porosidade total de 0,35 m<sup>3</sup> m<sup>-3</sup>. Silva (2019) relatou valor de densidade do solo de 1,60 a 1,71 g cm<sup>-3</sup>, corroborando os resultados do presente estudo, indicando que a área não sofreu tanta influência do preparo mecanizado do solo durante os anos e que não deverá apresentar empecilhos na movimentação de água.

## 6.2 Curva de retenção de água no solo

Na Figura 10 é apresentado o gráfico obtido com os valores da umidade volumétrica e do potencial matricial, obtidos com o método do papel filtro para o solo da área de estudo. Pode-se observar que foram obtidos mais pontos na parte mais úmida da curva, o que pode estar relacionado a dificuldade do solo de perder água por ter mais argila que areia. Além disso, algumas amostras apresentaram presença de matéria orgânica após o período de 7 dias de armazenamento, o que pode ter interferido no resultado.

Na Tabela 3, podem-se visualizar os parâmetros da curva característica de retenção de água no solo ajustadas pelo software SWRC utilizando o modelo de van Genuchten (1980), obtendo-se um ajuste de 0,972 indicando um bom modelo. Com a entrada dos parâmetros de van Genuchten, obtidos no software SWRC, foi obtida a curva característica do solo obtida no software SLIDE 6.0 (Figura 11).

Figura 10 – Curva de retenção obtida pelo método do papel filtro.



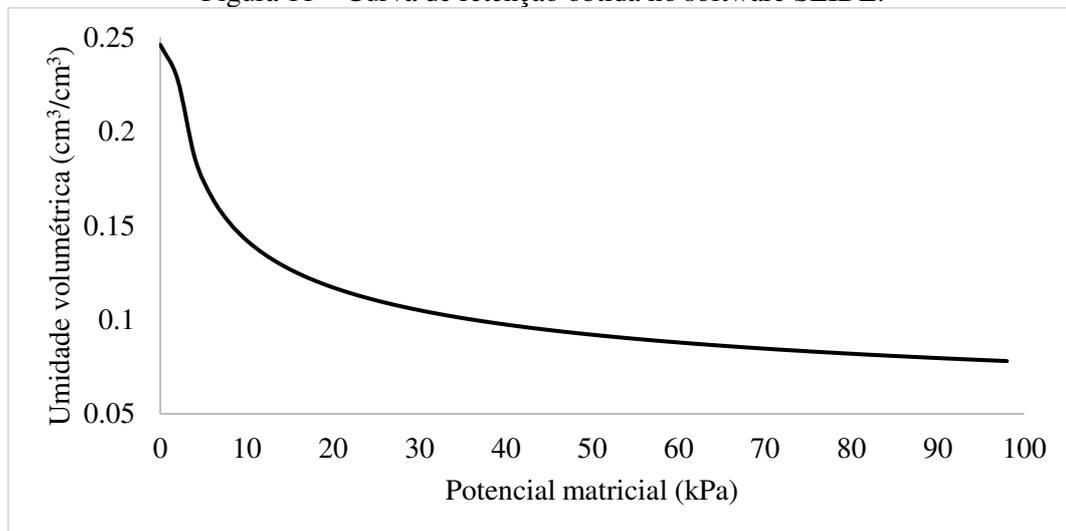
Fonte: Elaborado pela autora, 2019.

Tabela 3 – Parâmetros de ajuste das curvas características de retenção de água no solo utilizando o modelo de van Genuchten.

Parâmetros	
$\alpha$	0,626
$\Theta_s$	0,246 cm <sup>3</sup> cm <sup>-3</sup>
$\Theta_r$	0,025 cm <sup>3</sup> cm <sup>-3</sup>
m	0,0479
n	7,2095

Fonte: Elaborado pela autora, 2019.

Figura 11 – Curva de retenção obtida no software SLIDE.



Fonte: Elaborado pela autora, 2019.

### 6.3 Condutividade hidráulica do solo

#### 6.3.1 Condutividade hidráulica do solo saturado

Na Tabela 4 estão dispostas as análises estatísticas descritivas da condutividade hidráulica do solo saturado. Pode-se observar que os valores de média e mediana estão próximos, indicando distribuição simétrica. Analisando o desvio padrão e a variância, pode-se dizer que os dados variam pouco em relação à média. De acordo com o teste de Kolmogorov-Smirnov os dados apresentam distribuição normal.

Tabela 4 – Medidas estatísticas descritivas de condutividade hidráulica do solo saturado.

Número de amostras (n)	Métricas de análise	Condutividade hidráulica do solo saturado (K, cm h <sup>-1</sup> )
11	Mínimo	7,20
	Máximo	8,96
	Mediana	8,03
	Média	8,01
	Desvio padrão	0,63
	Variância	0,40
	Assimetria	0,20
	Distribuição	Normal

Fonte: Elaborado pela autora, 2019.

Segundo Mesquita e Moraes (2004), as práticas culturais adotadas que alteram a estrutura do solo influenciam diretamente a condutividade hidráulica, influenciam mais até do que os processos de gênese e formação da estrutura dos solos, o que pode justificar a variação da condutividade hidráulica, mesmo que pequena, já que é uma área experimental sempre preparada para cultivo.

O método utilizado, apesar de ser uma forma clássica para a medida da condutividade hidráulica do solo saturado, pode apresentar divergência nos resultados por algumas limitações como possível pequeno circuito de fluxo através dos macroporos, ao fluxo ao longo das paredes do cilindro amostrador, e ao fluxo devido à presença de canais de minhocas ou raízes abertos no final da amostra de solo (MOHANTY; SKAGGS; van GENUCHTEN, 1998; REYNOLDS *et al.*, 2000).

Segundo Freire *et al.* (2003), o solo da área de estudo é classificado como solo com condutividade moderadamente rápida, com uma condutividade hidráulica média de 8,01 cm h<sup>-1</sup> (Tabela 5). O valor encontrado se aproxima do valor encontrado por Silva, Montenegro e Santos (2012), que encontraram uma média de 8,43 cm h<sup>-1</sup> para a profundidade de 15 cm para Argissolo Amarelo Eutrófico abrupto, classificando -se da mesma forma que o solo da área de estudo de acordo com Freire *et al.* (2003). Porém, o desvio padrão desses autores foi bem alto quando comparado ao desse estudo.

Duarte (2013) realizando estudo na mesma área relatou condutividade hidráulica média de 8,84 cm h<sup>-1</sup>, classificando-se como moderadamente rápida como a encontrada no presente estudo. A diminuição encontrada nesse estudo pode ser devido as práticas culturais adotadas na área experimental durante os anos (MESQUITA; MORAES, 2004).

Tabela 5 – Classificação da condutividade hidráulica do solo saturado,  $\text{cm h}^{-1}$ .

Classes de condutividade hidráulica do solo saturado	Valores de condutividade hidráulica do solo saturado ( $K$ , $\text{cm h}^{-1}$ )
Muito lenta	<0,125
Lenta	0,125 a 0,5
Moderadamente lenta	0,5 a 2
Moderada	2 a 6,25
Moderadamente rápida	6,25 a 12,5
Rápida	12,5 a 25
Muito rápida	> 25

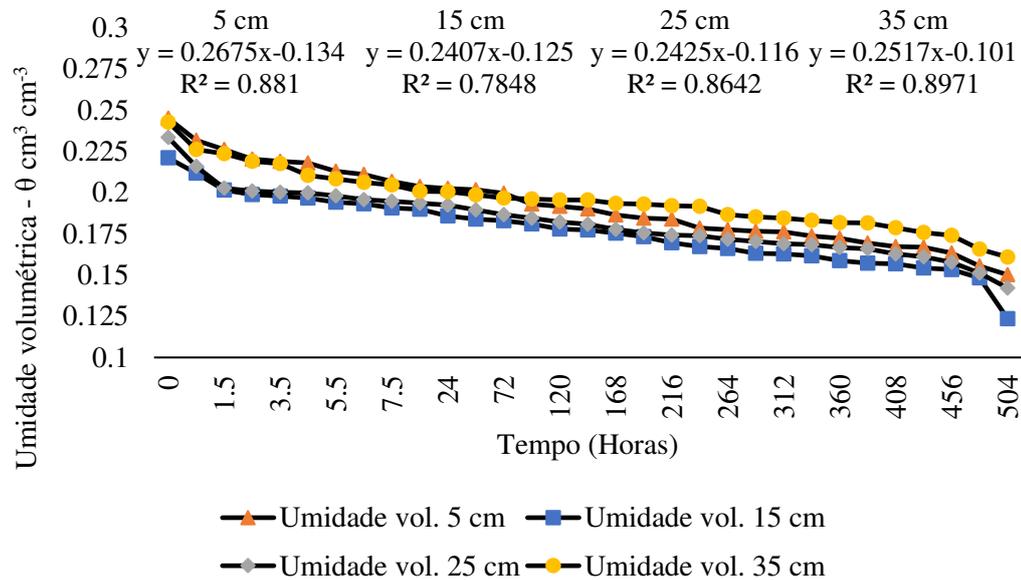
Fonte: Freire et al., 2003.

### 6.3.2 Condutividade hidráulica do solo não-saturado

Com os parâmetros da curva de retenção de água no solo, obtido pelo método do papel filtro e ajustado conforme van Genuchten (1980), foram calculados os valores de potencial matricial.

Na Figura 12 observa-se o ajuste potencial da relação umidade versus tempo, com altos coeficientes de determinação para as profundidades de 5, 15, 25 e 35 cm, sendo que na profundidade de 15 cm, o coeficiente de determinação foi baixo quando comparado às outras profundidades.

Figura 12 - Curvas de ajuste da umidade volumétrica em função do tempo de redistribuição de água no solo.



Fonte: Elaborado pela autora, 2019.

Na Tabela 6, apresentam-se os valores calculados de densidade de fluxo de água ( $q$ ), para cada camada de observação (10, 20 e 30 centímetros) em 12 diferentes tempos de distribuição (1, 7, 12, 20, 33, 55, 90, 148, 245, 403, 665 e 720 horas), sendo  $\delta\theta/\delta t$  a variação da umidade volumétrica pela variação do tempo e  $-(dq/dt)\Delta Z$  o gradiente.

Tabela 6 – Valores de densidade de fluxo de água em cada profundidade de interesse (10, 20 e 30 cm) para cada tempo.

Tempo (h)	Profundidade (cm)	$-\delta\theta/\delta t$ (h <sup>-1</sup> )	$-(dq/dt)\Delta Z$ (m h <sup>-1</sup> )	$q = -\Sigma(\delta\theta/\delta t) dz$ (m.h <sup>-1</sup> )
1	10	-0,0117629000	-0,0011762900	-0,0017693550
	20	-0,0121338000	-0,0024267600	-0,0037277100
	30	-0,0095898000	-0,0028769400	-0,0083779650
7	10	-0,0015515556	-0,0001551556	-0,0002333823
	20	-0,0015973669	-0,0003194734	-0,0004947846
	30	-0,0012847638	-0,0003854291	-0,0048168900
12	10	-0,0008852924	-0,0000885292	-0,0001331641
	20	-0,0009109404	-0,0001821881	-0,0002828126
	30	-0,0007362331	-0,0002208699	-0,0003720419
20	10	-0,0005201663	-0,0000520166	-0,0000782425
	20	-0,0005349628	-0,0001069926	-0,0001664491
	30	-0,0004343557	-0,0001303067	-0,0001303067
33	10	-0,0003088456	-0,0000308846	-0,0000464560
	20	-0,0003174719	-0,0000634944	-0,0000989913
	30	-0,0002589314	-0,0000776794	-0,0000776794

55	10	-0,0001814667	-0,0000181467	-0,0000272959
	20	-0,0001864399	-0,0000372880	-0,0000582623
	30	-0,0001527618	-0,0000458286	-0,0000458286
90	10	-0,0001086796	-0,0000108680	-0,0000163474
	20	-0,0001116031	-0,0000223206	-0,0000349502
	30	-0,0000918496	-0,0000275549	-0,0000275549
148	10	-0,0000647548	-0,0000064755	-0,0000097403
	20	-0,0000664636	-0,0000132927	-0,0000208592
	30	-0,0000549451	-0,0000164835	-0,0000164835
245	10	-0,0000383171	-0,0000038317	-0,0000057636
	20	-0,0000393084	-0,0000078617	-0,0000123638
	30	-0,0000326438	-0,0000097931	-0,0000097931
403	10	-0,0000228240	-0,0000022824	-0,0000034331
	20	-0,0000234029	-0,0000046806	-0,0000073770
	30	-0,0000195222	-0,0000058567	-0,0000058567
665	10	-0,0000135506	-0,0000013551	-0,0000020383
	20	-0,0000138873	-0,0000027775	-0,0000043872
	30	-0,0000116368	-0,0000034910	-0,0000034910
720	10	-0,0000124747	-0,0000012475	-0,0000018764
	20	-0,0000127837	-0,0000025567	-0,0000040400
	30	-0,0000107198	-0,0000032159	-0,0000032159

Fonte: Elaborado pela autora, 2019.

Partindo-se dos valores de potencial matricial, calculados por meio dos parâmetros da curva característica ajustados pelo modelo de van Genuchten (1980), foram obtidos os gráficos de potencial matricial em função do tempo (horas) para as três profundidades de interesse (10, 20 e 30 cm), cujas equações ajustadas pelo modelo potencial com seus respectivos coeficientes de determinação são apresentados na Tabela 7.

Tabela 7 – Equações ajustadas para cada profundidade de interesse (10, 20 e 30 cm) pelo modelo potencial com seus respectivos coeficientes de determinação.

Profundidades (m)	$\Psi_m$	$R^2$
0,10	$0,2787 t^{0,335}$	0,8341
0,20	$0,2678 t^{0,3388}$	0,7425
0,30	$0,168 t^{0,3655}$	0,5319

Fonte: Elaborado pela autora, 2019.

Considerando a superfície do solo como sendo a referência gravitacional, foram calculados os valores de potencial total ( $\Psi_t$ ), sendo ajustados em função da profundidade para os doze tempos de redistribuição (1, 7, 12, 20, 33, 55, 90, 148, 245, 403, 665 e 720 horas) avaliados neste estudo. Os gradientes de potencial total em função da distância são o resultado da derivação das equações de ajuste das curvas de potencial total ( $\Psi_t$ ) versus distância (10 cm).

Os valores de condutividade hidráulica do solo não-saturado ( $K_{\theta}$ ) foram, assim, determinados pela equação de Darcy-Buckingham (Tabela 8).

Tabela 8 – Valores de gradiente de potencial total ( $\delta\psi/\delta z$ ) e de condutividade hidráulica do solo não-saturado ( $K_{\theta}$ ) para as profundidades de 10, 20 e 30 centímetros.

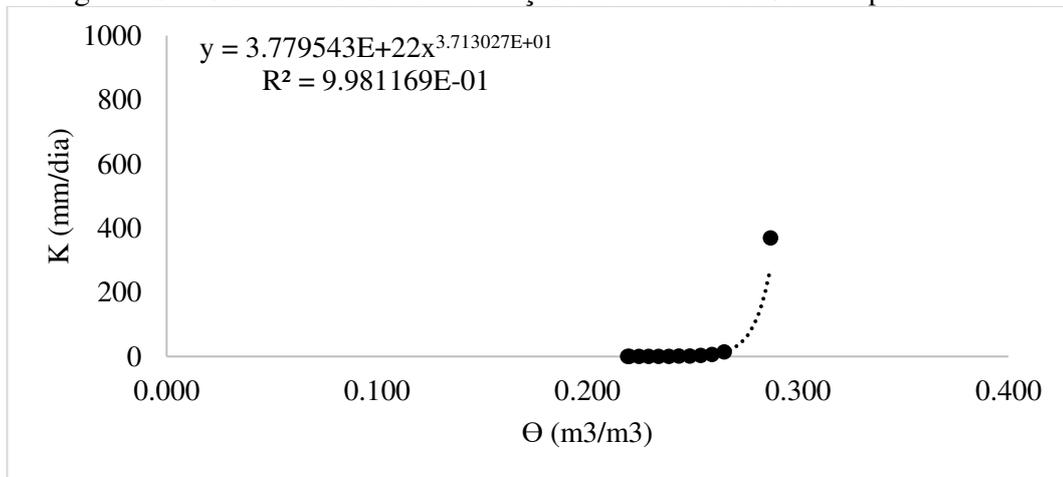
Tempo (h)	Profundidade (cm)	$q=\Sigma(\delta\theta/\delta t) dz$ (m.h <sup>-1</sup> )	$\delta\psi/\delta z$ (m.m <sup>-1</sup> )	$K_{\theta}$ (m.h <sup>-1</sup> )
1	10	-0,0017693550	0,97900	0,001807
	20	-0,0037277100	0,35700	0,010442
	30	-0,0083779650	1,46100	0,003297
7	10	-0,0002333823	0,51096	0,000457
	20	-0,0004947846	0,17246	0,002869
	30	-0,0048168900	1,68381	0,000385
12	10	-0,0001331641	0,26741	0,000498
	20	-0,0002828126	0,14117	0,002003
	30	-0,0003720419	1,75161	0,000212
20	10	-0,0000782425	-0,3344	0,002339
	20	-0,0001664491	0,12876	0,001293
	30	-0,0001303067	1,81554	0,000121
33	10	-0,0000464560	0,41147	0,000113
	20	-0,0000989913	0,13992	0,000707
	30	-0,0000776794	1,87551	0,000070
55	10	-0,0000272959	-0,90282	0,000030
	20	-0,0000582623	0,18414	0,000316
	30	-0,0000458286	1,93062	0,000040
90	10	-0,0000163474	-1,50197	0,000011
	20	-0,0000349502	0,26910	0,000130
	30	-0,0000275549	1,97374	0,000024
148	10	-0,0000097403	-2,26180	0,000004
	20	-0,0000208592	0,41081	0,000051
	30	-0,0000164835	2,00180	0,000014
245	10	-0,0000057636	-3,22742	0,000002
	20	-0,0000123638	0,62942	0,000020
	30	-0,0000097931	2,00695	0,000008
403	10	-0,0000034331	-4,41896	0,000001
	20	-0,0000073770	0,94133	0,000008
	30	-0,0000058567	1,97954	0,000005
665	10	-0,0000020383	-5,91205	0,000000
	20	-0,0000043872	1,37923	0,000003
	30	-0,0000034910	1,90703	0,000003
720	10	-0,0000018764	-6,18030	0,000000
	20	-0,0000040400	1,46231	0,000003
	30	-0,0000032159	1,89040	0,000003

Fonte: Elaborado pela autora, 2019.

Nas figuras 13, 14 e 15 são observados dos graficos da função  $K(\theta)$  e suas análises de regressão para as profundidades 10, 20 e 30 cm. A curva da função condutividade hidráulica,

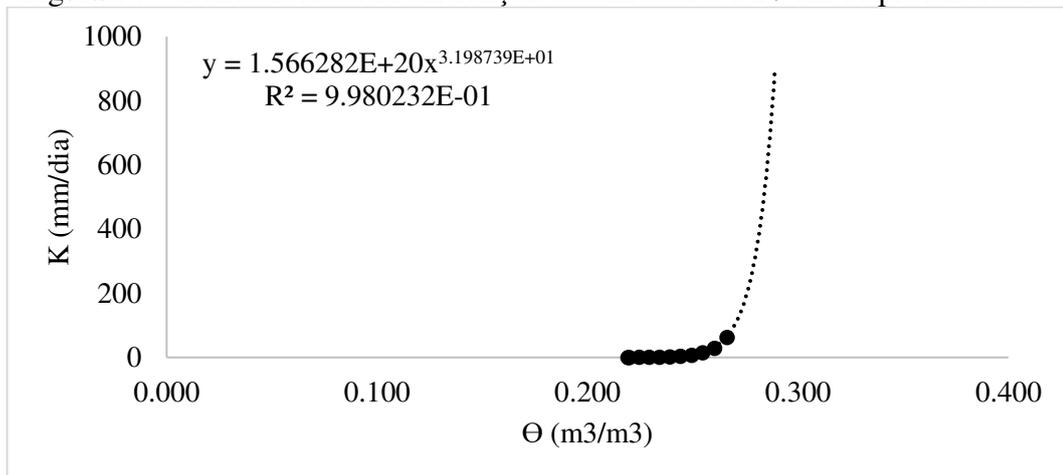
determinada em condições de campo pelo método do perfil instantâneo, normalmente apresenta comportamento exponencial (HILLEL; KRENTOS; STILIANOV, 1972; LIBARDI *et al.*, 1980), porém o melhor modelo de ajuste para as profundidades deste estudo (10, 20 e 30 cm) foi o potencial, com coeficiente de determinação igual a 0,9981; 0,998 e 0,9988, respectivamente. Feitosa (2017), trabalhando na mesma área de estudo a 25 cm de profundidade relatou um coeficiente de determinação igual a 0,997 corroborando os resultados do presente estudo.

Figura 13 – Condutividade K em função da umidade a 10 cm de profundidade.



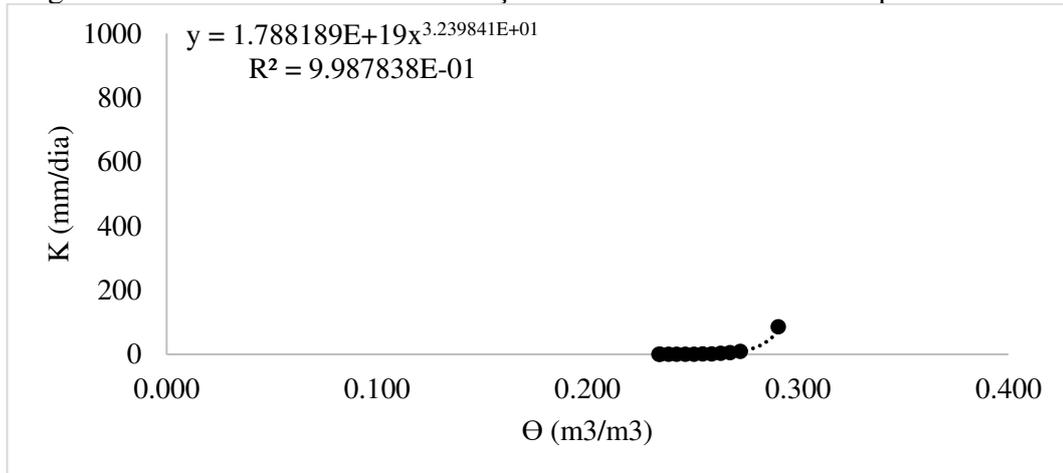
Fonte: Elaborado pela autora, 2019.

Figura 14 – Condutividade K em função da umidade  $\theta$  a 20 cm de profundidade.



Fonte: Elaborado pela autora, 2019.

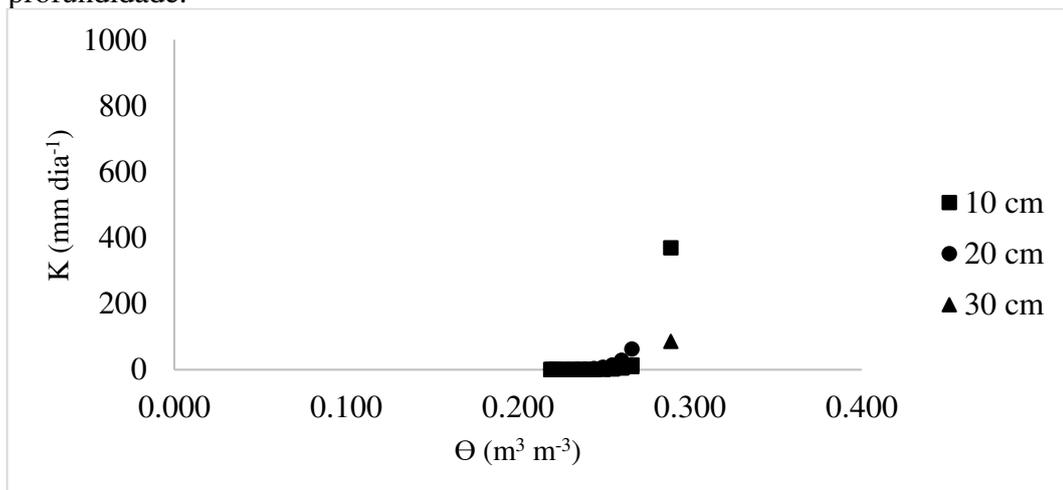
Figura 15 – Condutividade K em função da umidade  $\theta$  a 30 cm de profundidade.



Fonte: Elaborado pela autora, 2019.

Observando a figura 16 nota-se que há uma tendência de a condutividade hidráulica do solo diminuir com a profundidade, o que pode ser explicado pelo aumento do teor de argila em profundidade (VIEIRA, 2013), que faz com que a água se movimente mais lentamente. Almeida (2013), constatou em solos arenosos que a condutividade hidráulica determinada pelo método do perfil instantâneo, decresce com a profundidade. Giacheti (2000) também constatou decréscimo na condutividade hidráulica com o aumento da profundidade, devido à redução do número de poros desses solos.

Figura 16 – Condutividade K em função da umidade  $\theta$  a 10, 20 e 30 cm de profundidade.



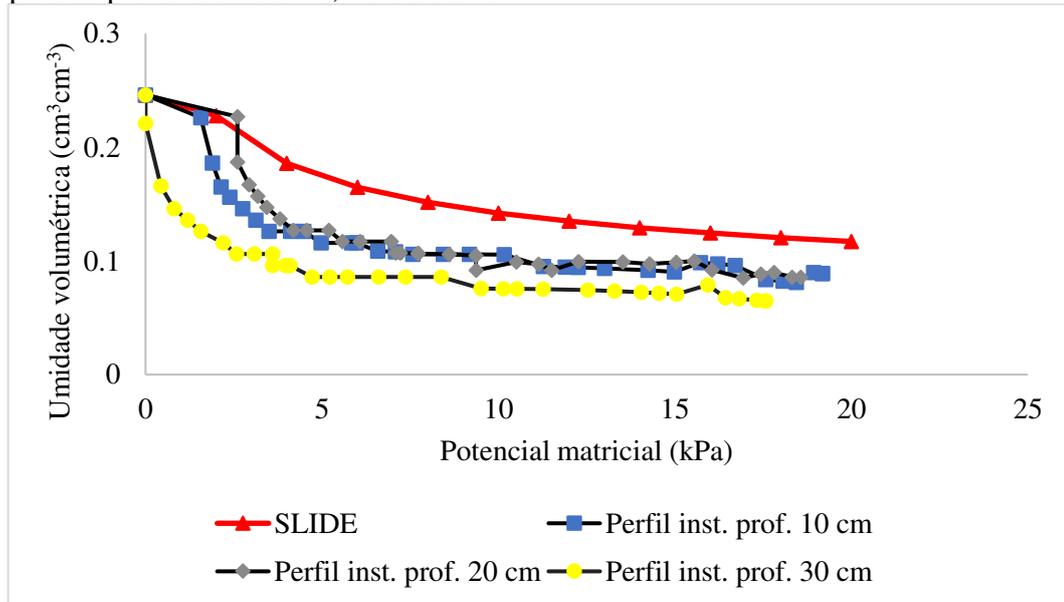
Fonte: Elaborado pela autora, 2019.

A Figura 17 mostra a comparação entre a curva característica obtida no software SLIDE 6.0 da Rocscience\* e as curvas de secagem obtidas para cada

\*Rocscience: Desenvolvedor de softwares 2D e 3D para análises geotécnicas.

profundidade de interesse (10, 20 e 30 cm) no perfil instantâneo. Pode-se observar que as curvas mostram a mesma tendência, a diferença entre as duas ocorreu devido a ao tempo que se tem na medida do potencial matricial e da umidade, no perfil instantâneo possui mais pontos dentro do intervalo de tempo.

Figura 17 – Curva característica SLIDE 6.0 vs. curva de secagem perfil instantâneo para as profundidades 10, 20 e 30 cm.



Fonte: Elaborado pela autora, 2019.

## 7 CONCLUSÕES

Os atributos físicos estudados (densidade, porosidade, condutividade hidráulica do solo saturado e não-saturado e curva de retenção de água no solo) se expressaram adequados à caracterização física do solo propondo-se a modelagem da dinâmica da água no bulbo úmido em irrigação subsuperficial.

## 8 Capítulo 2 – Utilização de modelagem numérica na avaliação do bulbo úmido no solo em irrigação subsuperficial

### RESUMO

O conhecimento sobre a dinâmica da água no solo está relacionado à sua dimensão temporal e espacial e é fundamental no estabelecimento de metodologias adequadas no manejo de irrigação. Diante deste cenário, simulações por meio de modelagem numérica permitem a previsão do fluxo de água no solo, dadas algumas circunstâncias. O objetivo desta pesquisa foi avaliar a eficiência de um modelo numérico 2D, solucionando a equação de Richards através da técnica dos elementos finitos, por meio da utilização do software SLIDE 6.0 da Rocscience, para simular a distribuição de água e a forma do bulbo úmido resultante de um tubo gotejador subsuperficial ao solo, dadas suas propriedades hidráulicas (densidade, porosidade, condutividade hidráulica do solo e curva de retenção de água no solo) e os parâmetros do sistema de irrigação (diferentes profundidades de instalação do tubo gotejador e diferentes espaçamentos entre emissores). Para a validação do modelo foi feita regressão com posterior cálculo do coeficiente de determinação ( $R^2$ ) e raiz do erro médio quadrático (RMSE) empregando dados coletados em experimento realizado na Universidade Federal do Ceará, Campus do Pici utilizando o método termogravimétrico para medida da umidade do solo. Conclui-se que o modelo 2D gerado mostrou-se eficiente na solução da equação de Richards, em condições de solo não saturado e transiente, sendo aplicável para a simulação da distribuição de água e forma do bulbo úmido resultante de um tubo gotejador subsuperficial ao solo, dada suas propriedades físico-hídricas e os parâmetros do sistema de irrigação, visando o projeto e manejo de sistemas de irrigação.

**Palavras-chave:** Modelo. Irrigação por gotejamento. Dinâmica da água.

### ABSTRACT

Knowledge about the dynamics of water in the soil is related to its temporal and spatial dimension and is fundamental in the establishment of adequate methodologies in irrigation management. Given this scenario, simulations using numerical modeling allow the prediction of water flow in the soil, given some circumstances. The study aimed to evaluate the efficiency of a 2D numerical model, solving Richards equation using finite element technique, using the

software SLIDE 6.0 from Rocscience, to simulate the water distribution and the shape of the wet bulb resulting from a subsurface dripper tube to the soil, given its hydraulic properties (density, porosity, hydraulic conductivity of the soil and water retention curve in the soil) and the parameters of the irrigation system (different depths of installation of the drip tube and different spacing between emitters). For model validation, regression was performed with subsequent calculation of the coefficient of determination ( $R^2$ ) and root of the mean square error (RMSE) using data collected in an experiment carried out at the Federal University of Ceara, Campus do Pici using the thermogravimetric method to measure humidity from soil. It is concluded that the 2D model generated was efficient in the solution of the Richards equation, in soil conditions not saturated and transient, being applicable for the simulation of water distribution and wet bulb shape resulting from a subsurface drip pipe to the soil, given its physical-hydric properties and the parameters of the irrigation system, aiming at the design and management of irrigation systems.

**Keywords:** Modeling. Drip Irrigation. Water Dynamics.

## 9 INTRODUÇÃO

O uso cada vez mais intenso da água pela agricultura, indústria e população exige utilização racional deste recurso para produção de alimentos. Diante deste contexto, o uso de métodos de irrigação que utilizem água com maior eficiência é essencial. Portanto, os sistemas de irrigação localizada têm lugar de destaque, tanto no uso da água, quanto na aplicação de fertilizantes solúveis.

O conhecimento da dinâmica da água no bulbo úmido, é essencial para maximizar a eficiência de irrigação, permitindo a aplicação de água na quantidade e no tempo apropriado. São vários os parâmetros físicos que influenciam no conteúdo e na movimentação de água do solo, como a densidade, a porosidade e a condutividade hidráulica. Por se tratar de um ambiente heterogêneo, o solo apresenta diferentes valores para estes parâmetros, evidenciando-se assim a necessidade de um método de avaliação eficiente, como a técnica dos elementos finitos. Esse método de análise do fluxo de água em solos não saturados possibilita delinear a distribuição de água no solo com maior precisão (DI RADO *et al.*, 2009).

A equação de Richards explica a dinâmica da água em solos não saturados e, uma vez que se trata de uma equação diferencial não linear, não possui uma solução analítica, requerendo então o uso de elementos finitos para obtenção das soluções (CRUZ, 2015). Assim, como uma solução mais rápida e precisa, softwares que simulam o fluxo de água no solo através

do método dos elementos finitos utilizando a equação de Richards podem auxiliar na tomada de decisão dos técnicos para elaboração e manejo de projetos de irrigação (NEZHAD; JAVADI; ABBASI, 2010).

O software SLIDE® da Rocscience é considerado um dos softwares mais completos para análises de fluxo de água no solo, pois é de rápido processamento e disponibilizado para todos os tipos de meios porosos, permitindo a criação e edição de modelos complexos com mais facilidade (ROCSCIENCE INC., 2010).

### **9.1 Objetivo geral**

O objetivo desta pesquisa foi avaliar a eficiência de um modelo numérico 2D, solucionando a equação de Richards através da técnica dos elementos finitos, por meio da utilização do software SLIDE 6.0 da Rocscience, para simular a distribuição de água e a forma do bulbo úmido resultante de um tubo gotejador subsuperficial ao solo, dadas suas propriedades hidráulicas e os parâmetros do sistema de irrigação.

### **9.2 Objetivos específicos**

- A) Utilizar as propriedades físico-hídricas (densidade, porosidade, condutividade hidráulica do solo saturado e não-saturado e curva de retenção de água do solo) para modelagem da dinâmica da água no solo no bulbo úmido em irrigação subsuperficial.
- B) Empregar um modelo numérico na solução da equação de Richards através da técnica dos elementos finitos para manejar a irrigação subsuperficial simulando diferentes profundidades e espaçamentos entre emissores.
- C) Validar o modelo proposto com o uso de dados coletados em campo utilizando índices estatísticos.

## **10 REVISÃO DE LITERATURA**

### **10.1 Água no solo**

As duas propriedades que definem o estado hidráulico de um solo são a quantidade de água armazenada nos poros do solo e a energia potencial da água. Na modelagem hídrica do solo, é comum representar a primeira propriedade, em termos de uma relação volumétrica, significando a fração do volume total do solo que é ocupada pela água contida no solo (ARRAES, 2014).

A energia potencial da água no solo, fornece a força motriz para o movimento da água, a qual move-se a partir de pontos com diferentes valores de potencial (LIBARDI, 2005). Ou seja, a água sempre se move em resposta a um gradiente de potencial, e não a um gradiente de umidade. Quando há diferença de potencial da água entre dois pontos, ela se moverá do ponto de maior para o de menor energia (AMARO FILHO; ASSIS JUNIOR; MOTA, 2008).

A pesquisa do movimento de água no solo utiliza como teoria o comportamento de fluídos em meios porosos. Sabendo que o solo é um sistema complexo, suas partículas formam um meio poroso com capacidade de armazenar líquidos e gases (CRUZ, 2015). Em Agronomia e no que diz respeito ao fornecimento de água à planta, mais importante que conhecer o sentido do movimento da água é poder quantificar esse movimento (AMARO FILHO; ASSIS JUNIOR; MOTA, 2008).

A quantificação do movimento da água no solo, tanto sob as condições de saturação como de não saturação, tem sido feita pelas chamadas equações de fluxo para regime estacionário e para regime transiente (LIBARDI, 2005). Em solo saturado é a situação particular de movimento de solução mais simples, uma vez que a condutividade hidráulica é constante, portanto, a aplicação direta da equação de Darcy é suficiente (AMARO FILHO; ASSIS JUNIOR; MOTA, 2008).

Em 1856, o engenheiro hidráulico Henry Darcy realizou uma série de experimentos com o intuito de pesquisar o fluxo de água em uma coluna vertical, saturada, com sistema de solo homogêneo (sem camadas com a profundidade ou nenhuma variação nas propriedades do solo), isotrópico (propriedades do solo uniforme em todas as direções) e com a área da secção transversal constante (HILLEL, 1998; WARRICK, 2003; LAL; SHUKLA, 2004).

Darcy concluiu que a vazão, através da coluna comportava-se de maneira inversamente proporcional ao comprimento da coluna e diretamente proporcional à área da secção transversal e à diferença entre os potenciais hidráulicos (ARRAES, 2014). Darcy apresentou a seguinte equação:

$$q = -K \frac{\Delta\Psi}{Z} \quad \text{Equação 10}$$

Onde:  $q$  = densidade de fluxo,  $m^3 m^{-2} s$ ;  $\Delta\Psi$  = diferença de potencial (m);  $Z$  = distância entre os dois pontos considerados (m);  $K$  = condutividade hidráulica ( $m s^{-1}$ ); o sinal negativo é a indicação de que o sentido do movimento é contrário ao do gradiente.

A densidade de fluxo refere-se à velocidade média da água através da matriz do solo, logo é importante não confundir a densidade de fluxo com a velocidade da água nos poros. Porque, o fluxo de fato não ocorre através de toda a área da secção transversal (HILLEL, 1998;

LAL; SHUKLA, 2004; REICHARDT; TIMM, 2008). Logo, a velocidade média do líquido nos poros deve ser maior do que a densidade de fluxo (HILLEL, 1998). E em condições de solo não saturado, a área disponível é menor ainda, pois o fluido só se movimenta pelos poros cheios de água (REICHARDT; TIMM, 2008).

Porém, a maioria dos processos envolvendo interações solo-água no campo, e particularmente o fluxo de água na zona radicular da maioria das plantas cultivadas, ocorre enquanto o solo está em uma condição não saturada (HILLEL, 1980). A primeira grande diferença entre o movimento de água em solo saturado e solo não saturado está na condutividade hidráulica que, para solo não saturado, não é mais uma constante. A variação da condutividade hidráulica com a variação na umidade do solo é tão acentuada que é conveniente que sejam plotados em gráfico semilogarítmico (AMARO FILHO; ASSIS JUNIOR; MOTA, 2008).

Na condição de não saturação quando atua o potencial mátrico, além do potencial gravitacional, os processos de fluxo são mais difíceis de serem descritos quantitativamente, uma vez que podem promover mudanças no estado e quantidade de água durante o fluxo (ARRAES, 2014).

Em 1907, Buckingham apresentou uma equação geral para a densidade de fluxo em solo não saturado, muito semelhante a equação de Darcy, em que explicita a relação funcional entre a condutividade hidráulica e a umidade do solo. Embora Buckingham não tenha feito nenhuma referência à equação de Darcy, prefere-se chamá-la de equação de Darcy-Buckingham quando se trata de fluxo de água dentro do solo em qualquer condição de umidade (AMARO FILHO; ASSIS JUNIOR; MOTA, 2008).

$$q = -K(\theta) \frac{\Delta\Psi}{\Delta s} \quad \text{Equação 11}$$

Onde:  $q$  = densidade de fluxo,  $m^3 m^{-2} s$ ;  $\Delta\Psi$  = gradiente de potencial (m/m);  $K$  = condutividade hidráulica em função da umidade ( $m s^{-1}$ );  $s$  = coordenada qualquer de posição  $x$ ,  $y$  ou  $z$ ; sinal negativo é a indicação de que o sentido do movimento é contrário ao do gradiente.

Percebe-se a dificuldade na quantificação da densidade de fluxo  $q$ , visto que para cada valor de  $\Psi$  haverá um valor correspondente de  $K$ , abstraindo-se, inclusive, a anisotropia do solo, que promove alteração no valor de  $q$ . Como o potencial mátrico é uma função do conteúdo de água, também o gradiente mudará com a variação da umidade (AMARO FILHO; ASSIS JUNIOR; MOTA, 2008).

Quando o solo está saturado, todos os poros são cheios de água e condutores, de modo que a continuidade e a condutividade são máximas (HILLEL, 1980). Já quando o solo

não está saturado, alguns dos poros ficam cheios de ar, diminuindo a área útil ao fluxo, além de um aumento na tortuosidade (AMARO FILHO; ASSIS JUNIOR; MOTA, 2008).

Assim, para determinar o fluxo de água no solo não saturado, precisa-se conhecer o valor da umidade para qualquer posição (x, y ou z) e para qualquer tempo (t). Ou seja, precisa-se estabelecer uma equação diferencial da umidade em função da posição e do tempo, do tipo  $\Theta = \Theta(x, t)$ . Incluindo a densidade de fluxo, para as três direções a equação da continuidade ou equação de Richards fica da seguinte forma:

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left[ K_x(\theta) \frac{\partial \Psi}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[ K_y(\theta) \frac{\partial \Psi}{\partial y} \right] + \frac{\partial}{\partial z} \left[ K_z(\theta) \frac{\partial \Psi}{\partial z} \right] \quad \text{Equação 12}$$

Onde:  $\Psi$  é o potencial mátrico [L]; K é a condutividade hidráulica do solo não saturado [L T<sup>-1</sup>], devido ao potencial matricial.

De maneira prática, pode-se concluir que a equação da continuidade diz que “a variação da armazenagem de água num determinado comprimento de solo, num certo intervalo de tempo, pode ser determinada pela diferença entre a densidade de fluxo de água que entra através de uma das extremidades desse comprimento e a densidade de fluxo de água que sai na outra extremidade no intervalo de tempo considerado” (LIBARDI, 2010).

Em solos arenosos, a água às vezes permanece quase inteiramente nos espaços capilares nos pontos de contato das partículas, formando assim “bolsas de água” separadas e descontínuas. Em solos argilosos os grandes espaços de agregação que conferem alta condutividade na saturação tornam-se barreiras ao fluxo de água de um agregado para os outros (HILLEL, 1980).

Um solo arenoso saturado conduz água mais rapidamente do que um solo argiloso. No entanto, o oposto pode ser verdade quando os solos não estão saturados. Em um solo com poros grandes, esses poros rapidamente se esvaziam e tornam-se não condutores à medida que a sucção se desenvolve, diminuindo assim a condutividade hidráulica. Em um solo com poros pequenos, por outro lado, muitos dos poros retêm e conduzem a água mesmo com uma sucção apreciável, de modo que a condutividade hidráulica não diminui tão acentuadamente e pode ser maior do que a de um solo com poros grandes sujeitos a mesma situação. Um outro ponto de diferença é a natureza da força promotora do movimento. A força de movimento em um solo saturado é o gradiente de um potencial de pressão positiva. Por outro lado, a água em um solo não saturado está sujeita a uma pressão subatmosférica, ou sucção, que é equivalente a um potencial de pressão negativa (HILLEL, 1980).

Na investigação do fluxo água no solo não saturado outro parâmetro bastante pertinente é a curva característica do solo, que ao ser determinada pode estabelecer as características do fluxo de água através da sucção matricial do solo (RAVICHANDRAN, 2009). De fato, há um interesse maior nestes parâmetros, pois as informações pertinentes a estas propriedades direcionam para uma validação de modelos matemáticos capazes de estimar a quantidade de água e o seu trajeto no solo, mas, por apresentarem variabilidades tanto espaciais como temporais, são características de difícil monitoramento (CRUZ, 2015).

## 10.2 Irrigação subsuperficial

Um das maneiras que vem ganhando força nas últimas décadas e possibilitam a agricultura irrigada ser mais eficiente na utilização da água e dos nutrientes é a prática de irrigação por gotejamento subsuperficial (BIZARI; GRECCO; SOUZA, 2016).

A operação do sistema geralmente é baseada na demanda do suprimento de água que permite a aplicação de pequenas quantidades em alta frequência. Isso possibilita um ambiente consistente de água no solo para a cultura. Entretanto, o sistema pode ser operado utilizando suprimentos de água sazonais que variam em quantidade e qualidade e com suprimentos programados. A frequência de aplicação depende fortemente da cultura, do solo e das condições climáticas (CAMP; LAMM, 2007).

Uma importante decisão no uso do sistema de gotejamento subsuperficial, é a profundidade de instalação do gotejador. Esta profundidade varia com a cultura, o tipo de solo, a fonte de água, pragas, clima e a preferência do irrigante. As características das raízes das plantas e a redistribuição de água no solo, devem ser os fatores mais importantes na escolha da profundidade de instalação (SANTOS *et al.*, 2016).

O sistema de gotejamento subsuperficial foi usado primeiramente para culturas de alto valor econômico, como frutas, vegetais, plantas ornamentais e nozes. Com o aumento da confiabilidade e da longevidade do sistema, começou-se a usar com culturas agrônômicas de baixo valor econômico, como algodão, amendoim e cereais (CAMP; LAMM, 2007).

A irrigação subsuperficial apresenta potenciais vantagens quando manejada adequadamente, como: uso mais eficiente da água; menos riscos de prejudicar a qualidade da água; aumento da possibilidade de utilizar águas degradadas; melhor uniformidade de aplicação da água; aumento da saúde das plantas; melhor manejo de fertilizantes e pesticidas; melhor controle de ervas daninhas; melhoria na gestão de operações agrícolas; permitem automação;

diminuem os custos com energia; flexibilidade de dimensionamento hidráulico, dentre outras (KUNZ; ÁVILA; PETRY, 2014; CAMP; LAMM, 2007).

Por outro lado, existem circunstâncias e situações que apresentam desvantagens para o sistema de gotejamento subsuperficial, como: pequeno padrão de molhamento; dificuldade no monitoramento e avaliação de eventos de irrigação; reduzido movimento ascendente de água; desenvolvimento restrito de raízes de plantas; problemas com espaçamento entre linhas e rotação de culturas; problemas com o desenvolvimento da cultura; alto custo inicial; problemas de filtragem; problemas com vazamentos são de difícil localização e reparo; a operação e o manejo precisam de um monitoramento mais consistente em relação a outros sistemas, dentre outras (CAMP; LAMM, 2007; PAVERO, 2002).

Para o dimensionamento adequado do sistema de irrigação por gotejamento são necessárias informações sobre a região na qual a água e os nutrientes são aplicados, tal região é conhecida por volume de solo molhado (GRECCO, 2016). O conhecimento das dimensões do volume de solo molhado é um aspecto essencial para aperfeiçoar o uso da água e dos nutrientes, evitando a percolação profunda (HAO *et al.*, 2007).

A avaliação desta região e a obtenção da distribuição da água e do soluto ao redor do gotejador permitem definir informações importantes, tais como lâmina e frequência de irrigação, espaçamento entre gotejadores e dimensionamento hidráulico, como também o manejo da irrigação (HAO *et al.*, 2007).

### **10.2.1 Forma e dimensões do bulbo úmido**

O bulbo úmido pode ser definido como a forma do volume de solo umedecido, proveniente de uma fonte pontual de água no solo, o qual depende do equilíbrio entre as forças capilares e gravitacionais, assim como da textura do solo, da condutividade hidráulica, da vazão do gotejador, do conteúdo inicial de água no solo (KELLER, 1984) e do total de água aplicado no solo (SCHWARTZMAN; ZUR, 1986).

Durante o processo de infiltração, se o solo estiver relativamente seco, existe uma diferença visível entre o solo molhado pela lâmina de água que avança e o solo seco. Este plano é denominado frente de molhamento. No caso da infiltração de água em solos relativamente úmidos, a frente de molhamento é difusa e difícil de ser determinada (REICHARDT, 1990).

As informações sobre a distribuição da água no bulbo úmido são de grande importância, tanto para o dimensionamento dos sistemas de irrigação como no seu manejo, visto que a determinação do espaçamento entre emissores, a localização de sensores de

umidade, a definição das zonas de diferentes intensidades de absorção de água e nutrientes, requerem o conhecimento da dinâmica de água no bulbo úmido (SOUZA; MATSURA, 2004).

Geralmente, o critério para dimensionar um sistema por gotejamento é baseado na classe textural do solo (BARROS, 2007). Porém, Thorburn, Cook e Bristow (2003) mostram um exemplo ocorrido na Austrália, onde a recomendação não se enquadrava com a realidade em campo, portanto não se pode confiar no uso de critérios do tipo de textura do solo para determinação do volume de solo molhado.

A determinação direta das dimensões do bulbo úmido no campo é um processo demorado e caro, normalmente fora da realidade financeira da maioria dos produtores e sua obtenção por meio de tabelas, embora prática, é comum que se constituam de uma aproximação grosseira. Uma alternativa seria a utilização de modelos matemáticos, os quais simulam o formato e as dimensões do bulbo úmido a partir de características relacionadas ao solo e ao gotejador utilizado (SATO; SOUZA; PERES, 2013).

Há muitas soluções analíticas para equações descrevendo a infiltração de água de fontes pontuais que permitem a estimativa de padrões de umedecimento do solo a partir das propriedades hidráulicas do solo (CAMP, 1998).

De acordo com alguns autores, como Li, Zhang e Rao (2004) e Gomes (1994), em solos de textura muito argilosa, o máximo diâmetro molhado ocorre na superfície, e tende a ser mais extenso lateralmente, devido às forças capilares mais acentuadas. Por outro lado, em solos de textura arenosa, o máximo diâmetro molhado ocorre mais profundamente, o movimento de água é maior na direção vertical. Dessa forma, apesar dos solos arenosos apresentarem reduzida porosidade total, os movimentos do ar e da água são rápidos nesses solos, em função da predominância de macroporos. Já nos solos de textura fina, apesar de apresentarem grande espaço poroso, os movimentos dos fluidos são relativamente lentos, devido à presença predominante de microporos (KUNZ; ÁVILA; PETRY, 2014).

Segundo Souza e Matsura (2004), para um mesmo volume aplicado, o aumento da vazão implica um aumento do avanço horizontal e um decréscimo da profundidade do bulbo úmido. À medida que se aumenta o volume de água aplicado, maior é o avanço da frente de molhamento, tanto em profundidade quanto lateralmente, aumentando as dimensões do bulbo úmido.

Philip (1968), desenvolveu uma teoria matemática para um fluxo de água não-saturado bidimensional e tridimensional de fontes enterradas e cavidades esféricas. Warrick, Lomen e Amoozegar-Fard, (1980) relataram um modelo matemático para descrever o fluxo de

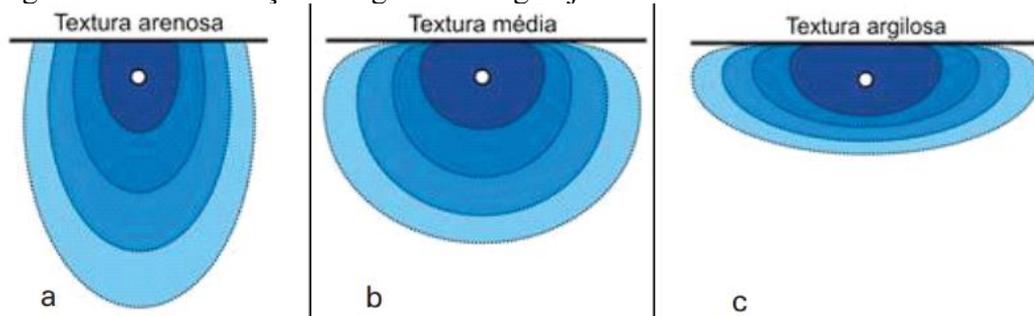
umidade tridimensional linearizado com extração de raízes sob condições estáveis para várias fontes subterrâneas.

Ben-Asher e Phene (1993), sugeriram um modelo numérico para analisar bidimensionalmente o fluxo de água para gotejadores localizados superficialmente e subsuperficialmente no solo. Os volumes de água aplicados tendem a possuir formas arredondadas e elípticas conforme descritas por Zur (1996). Para Schwartzman e Zur (1986) o volume de solo molhado depende da condutividade hidráulica do solo, da vazão do emissor e do total de água aplicado no solo.

A determinação da forma do bulbo úmido é complexa e o resultado pouco confiável devido à heterogeneidade do solo. Contudo, a principal regra é de que o volume do solo úmido é diretamente proporcional ao volume de água aplicado e inversamente proporcional ao conteúdo de água inicial do solo. Além disso, o fluxo horizontal de água no bulbo está diretamente relacionado com a força capilar, interferindo também no fluxo de água vertical do bulbo (SOUZA, 2002).

Conforme o tipo de solo, o movimento da água assume uma determinada forma (Figura 18), existindo uma relação entre o raio de umedecimento (dimensão horizontal) e profundidade de umedecimento (dimensão vertical). Essas dimensões determinam o bulbo úmido (SOUZA FILHO, 2011).

Figura 18 – Distribuição de água de um gotejador em solos de diferentes texturas.



Fonte: Simões, Oliveira e Calgaro, 2016.

Um dos aspectos mais importantes do planejamento e manejo do sistema de gotejamento subsuperficial é o movimento de água no solo abaixo do gotejador. A profundidade de instalação, o espaçamento entre emissores e pressão do sistema são de extrema importância para fornecer a quantidade de água requerida pela cultura (ELMALOGLU; DIAMANTOPOULOS, 2009).

### 10.2.2 Modelagem numérica

Durante as últimas décadas, muitos modelos foram desenvolvidos para quantificar o fluxo de água em meios porosos. Os modelos computacionais baseados em solução analítica e/ou numérica da equação do transporte de água no solo estão sendo cada vez mais utilizados para uma ampla gama de aplicações em pesquisa, gestão dos recursos hídricos e manejo de irrigação (DABACH *et al.*, 2011; KUKLIK; HOANG, 2014; SATCHITHANANTHAM *et al.*, 2014; TAN; SHAO; LIU, 2014).

Em um processo de modelagem, os parâmetros e hipóteses assumidos são, geralmente, reportadas como forma de validação dos modelos, e devem ser considerados com base na realidade regional para que haja garantia da confiabilidade da aplicação da metodologia empregada, uma vez que, as informações pertinentes ao uso da ferramenta são de extrema importância para o entendimento e controle das práticas de irrigação (MONTENEGRO; MACKAY; MONTENEGRO, 2002).

Em campos agrícolas o que prevalece é a condição de solo não saturado, devendo esta ser analisada com atenção, pois muitas vezes a modelagem não tem solução direta, interferindo no armazenamento de água e nutrientes que são vitais para o desenvolvimento de cultivos agrícolas. Contudo, opta-se pelos modelos numéricos pois são comumente usados na solução de problemas de fluxo de água em solos não saturados devido à facilidade de manuseio (LAL; SHUKLA, 2004).

Entretanto, os métodos numéricos devem ser empregados com cautela, visto que, o solo é um meio heterogêneo com valores diversificados de condutividade hidráulica e para sua solução requer um tratamento dos dados de forma adequada para aproximações por elementos finitos (CORREA, 2006).

É bastante relevante a combinação da curva característica do solo ou a granulometria com a aplicação do método dos elementos finitos para solucionar o fluxo de água em solos não saturados, pois os modelos que integram estes procedimentos possibilitam delinear a distribuição de água no solo com maior precisão (DI RADO *et al.*, 2009). Os parâmetros da curva característica do solo adquiridos em laboratório são usados apenas na fase inicial da calibração do modelo numérico, ficando por conta deste a simulação do fluxo de água no solo para as condições reais de campo (SCORZA JÚNIOR; SILVA; RIGITANO, 2010).

Existe uma grande diferença entre modelos que fazem a medida e os que fazem simulação de um comportamento. Em modelos que simulam um comportamento, não pode haver otimização da calibração ou dos parâmetros que caracterizam o solo, pois para um manejo

eficaz em zonas não saturadas é necessário um entendimento do processo que ocorre no solo a partir de critérios de avaliação testados diretamente em campo (CRUZ, 2015). No entanto, os problemas que envolvem a descrição do fluxo de água em algum meio físico, geralmente estão ligados a uma formulação complexa com equações diferenciais parciais. Os métodos numéricos são a melhor alternativa para resolver as equações diferenciais por discretização dos domínios espaciais e temporais, e normalmente se usam diferenças finitas ou método dos elementos finitos (OLIVEIRA, 2008).

O método dos elementos finitos propõe que o número infinito de variáveis desconhecidas, sejam substituídas por um número limitado de elementos de comportamento bem definido. Essas divisões podem apresentar diferentes formas, tais como a triangular, quadrilateral, entre outras, em função do tipo e da dimensão do problema. Como são elementos de dimensões finitas, são chamados de “elementos finitos” (MIRLISENNA, 2016).

Os elementos finitos são conectados entre si por pontos, os quais são denominados de nós ou pontos nodais. Ao conjunto de todos esses itens dá-se o nome de malha. Em função dessas subdivisões da geometria, as equações matemáticas que regem o comportamento físico não serão resolvidas de maneira exata, mas de forma aproximada. A precisão do Método dos Elementos Finitos depende da quantidade de nós e elementos, do tamanho e dos tipos de elementos da malha (MIRLISENNA, 2016).

O método das diferenças finitas é um método simples de ser aplicado, geralmente de baixo custo computacional e que gera bons resultados. É o método mais antigo e o mais divulgado, devido à simplicidade na compreensão, aprendizado e implementação. Foi o primeiro método a ser utilizado para a solução sistemática de problemas de água subterrânea (PIZARRO, 2009).

Esse método pode ser utilizado na obtenção de soluções numéricas de uma vasta gama de equações diferenciais, sendo seu princípio básico que a equação diferencial que se deseja aproximar pode ser numericamente equilibrada em cada ponto discreto do modelo. Assim, o domínio é discretizado por uma malha regularmente espaçada em cada uma das dimensões do problema, sendo as funções e propriedades de interesse consideradas apenas nestes pontos discretos (DI BARTOLO, 2010).

Resumidamente, a análise do fluxo de água no solo não saturado pelo método das diferenças finitas é feita em três passos. O primeiro é modelar o problema gerando a malha de elementos finitos e especificando as propriedades dos materiais envolvidos e as condições de contorno. O segundo é o processamento do modelo através da formulação e solução do sistema

de equações de elementos finitos. O terceiro passo é a interpretação dos resultados (CRUZ, 2015).

Entretanto, tratando-se de problemas que envolvem a aplicação de água e o comportamento do seu fluxo, por exemplo, em sistemas de irrigação por gotejamento subsuperficial, há uma necessidade de serem melhores estudados, pois servem de subsídio para projetos de irrigação dessa natureza, precisando na sua maioria da utilização de modelos de simulação do movimento de água no solo para explicar o comportamento da dinâmica da água em meios porosos a partir de experimentos de campo (KUNZ; ÁVILA; PETRY, 2014).

#### *10.2.2.1 Softwares para modelagem numérica*

Uma variedade de métodos numéricos pode ser utilizada para resolver a equação do fluxo de água para saturação variável (equação de Richards). A popularidade dos métodos numéricos deriva do fato de que a equação de Richards somente pode ser resolvida analiticamente para um número muito limitado de casos. Os programas computacionais são ferramentas muito empregadas para obter soluções em menor tempo e com menor custo, pois as simulações realizadas no mesmo ajudam a inferir comportamentos em pontos onde não se dispõem de medidas, facilitando a análise da variação das condições de contorno (CRUZ, 2015).

Como exemplos de softwares baseados em elementos finitos que utiliza a equação de Richards citam-se: Hydrus (SIMUNEK; van GENUCHTEN; SEJNA, 2006), FlexPDE (AL-CHALABI, 2013), SEEP/W (GEO-SLOPE International Ltd., 2009), COMSOL Multiphysics® (COMSOL, 2011) e SLIDE® (ROCSCIENCE INC., 2010). Contudo, os resultados proporcionados pelos softwares numéricos são fortemente dependentes da confiabilidade dos parâmetros de entrada e muitas vezes pode não levar em consideração o que de fato ocorre em campo (CRUZ, 2015).

Na escala unidimensional tem-se o modelo Hydrus1D (ŠIMŮNEK; VAN GENUCHTEN; SEJNA, 2006), que é bastante conhecido e utiliza o método dos elementos finitos para solução da equação de Richards. No Brasil, destacam-se os modelos propostos por Corrêa (2001), Costa *et al.* (1999) ambos utilizando o método das diferenças finitas e o modelo proposto por Miranda (2001) que utiliza o método dos volumes finitos.

Na escala bidimensional destacam-se as abordagens propostas Bresler e Russo (1975), Clement; Wise e Molz (1994), Gong *et al.* (2006), Elmaloglou e Diamantopoulos (2009), todas elas utilizando o método das diferenças finitas. No Brasil na escala bidimensional

se destacam os modelos propostos por Botrel (1988), Rivera *et al.* (2006), Tolentino Junior (2014), sendo que estes utilizam o método dos volumes finitos para gotejadores superficiais e solos homogêneos.

Cruz (2015), utilizou o software Slide® para avaliação do bulbo úmido com fita gotejadora superficial na cultura da melancia, gerando um modelo 2D. Este software é um dos mais completos para análises de fluxo de água no solo, de rápido processamento, disponibilizado para todos os tipos de meios porosos, permitindo a criação e edição de modelos complexos com muita facilidade (ROCSCIENCE INC., 2010). O programa resolve a equação de Richards (1931) em regime permanente utilizando o método dos elementos finitos para determinação da carga hidráulica no meio simulado. Apresenta em sua interface ferramentas para análises da dinâmica da água no solo através de modelagem com elementos finitos em uma malha não estruturada, em que o usuário pode definir as condições de contorno para as simulações das condições de fluxo de água em regime estacionário e transiente para meios porosos (CRUZ, 2015).

## **11 MATERIAL E MÉTODOS**

### **11.1 Modelagem computacional 2D**

Um modelo numérico foi desenvolvido para simular a distribuição de água no perfil do solo abaixo de várias fontes de água. A solução da equação diferencial para movimento da água em solo não saturado foi realizada pela discretização do espaço-tempo utilizando a técnica dos elementos finitos.

Foi utilizado o programa Slide 6.0 da Rocscience Inc. para a simulação 2D do fluxo de água no solo. O software possui um módulo chamado Groundwater que permite simular o fluxo de água para solos em condições saturadas e não saturadas. O modelo necessita do conhecimento de algumas variáveis como condições de contorno iniciais, condutividade hidráulica saturada e os parâmetros da curva característica do solo, sejam eles pelos modelos de Gardner (1958), Brooks e Corey (1964), van Genuchten (1980) ou Fredlund e Xing (1994).

A equação de Richards que descreve o movimento da água em meio poroso isotérmico, bidimensional, com a coordenada vertical positiva para baixo e sob condições não saturadas, pode ser descrito pela equação 13, expressando a condutividade hidráulica em função da umidade volumétrica.

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left[ K_x(\theta) \frac{\partial \Psi}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[ K_y(\theta) \frac{\partial \Psi}{\partial y} \right] + \frac{\partial}{\partial z} \left[ K_z(\theta) \frac{\partial \Psi}{\partial z} \right] \quad \text{Equação 13}$$

Onde:  $\Psi$  é o potencial mátrico [L]; K é a condutividade hidráulica do solo não saturado [L T<sup>-1</sup>], devido ao potencial matricial.

Nesta expressão, derivadas parciais de  $\Psi$  aparecem em relação ao espaço e ao tempo, que pode ser substituído por diferenças finitas. Os coeficientes são função da variável dependente  $\Psi$ , tendo seus valores estimados para as diferentes situações de tempo e espaço. A aproximação de diferenças finitas implica que o domínio de cálculo e o tempo sejam discretizados.

Para a solução iterativa da equação 13, foi determinado um número máximo de 1000 iterações. A curva característica do solo foi obtida pelo método do papel filtro (ALMEIDA, 2013) e os parâmetros de van Genuchten foram obtidos através do software SWRC (DOURADO NETO *et al.*, 2001). Foi necessário, ainda, o valor da condutividade hidráulica do solo saturado, obtido através do permeâmetro de carga constante em ensaio realizado no laboratório do Grupo de Pesquisa em Engenharia de Água e Solo – Semiárido, da Universidade Federal do Ceará – Campus do Pici.

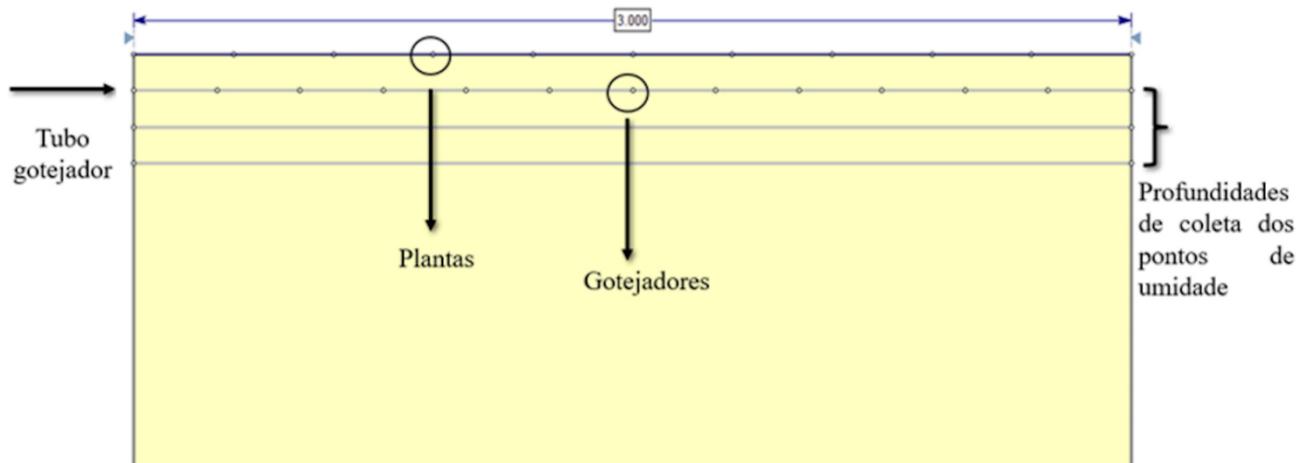
Ao contrário da grande maioria dos modelos de simulação do movimento de água em duas dimensões, foi utilizada a hipótese de um perfil inicial de água não uniforme, sendo uma maneira mais realista. Para a primeira irrigação, foi assumido que o potencial matricial inicial dependia apenas da profundidade, enquanto no início das irrigações subsequentes, também foi considerada uma vazão em vários pontos ao longo do eixo horizontal.

As condições de contorno iniciais são pontos de umidade inicial. Neste estudo foram coletados em 24 diferentes pontos, em três diferentes profundidades (10, 20 e 30 centímetros). Foi desenhada uma malha com dimensões de 3m x 10m, com 4 condições iniciais de contorno (lençol freático a 10 m; linha com pontos de umidade a 10, 20 e 30 centímetros), além disso foram colocados pontos representando os emissores em diferentes espaçamentos (25, 50, 75 e 100 centímetros) e dentro dessa malha foram simuladas diferentes profundidades dos tubos gotejadores (10, 20 e 30 centímetros) (Figura 19).

Após o desenho da malha, foi realizada a discretização do modelo, criando uma malha com 5000 elementos de tipo triangular com 3 nós e incluídos os parâmetros da curva característica e o valor da condutividade hidráulica do solo saturado. No regime estacionário, os pontos onde foram coletados os dados de umidade, foram configurados como pressão negativa, representando o potencial matricial. Nos locais onde estavam localizados os

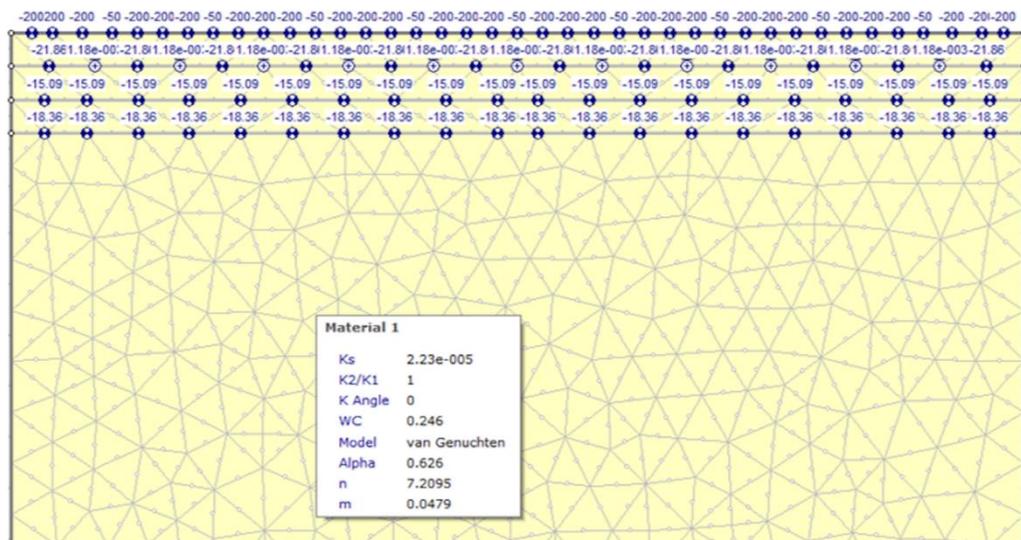
emissores, os pontos foram configurados como nodal flow rate e o valor da vazão foi o de cada emissor ( $2,0 \text{ L h}^{-1}$ ) (Figura 20).

Figura 19– Desenho da malha no software SLIDE 6.0, detalhe para os pontos representando os emissores a 25 cm, o tubo gotejador na profundidade de 10 cm, as profundidades de coleta dos pontos de umidade e os pontos representando as plantas.



Fonte: Software SLIDE elaborado pela autora, 2019.

Figura 20– Desenho da malha no software SLIDE 6.0, após a discretização do modelo e inclusão das propriedades hidráulicas do solo.

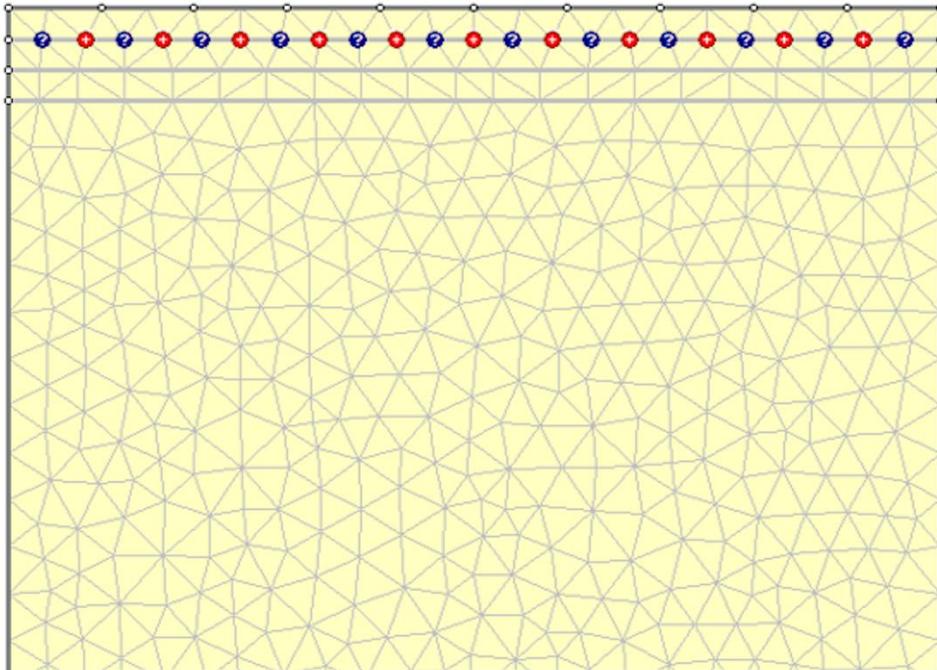


Fonte: Software SLIDE elaborado pela autora, 2019.

No módulo do regime transiente, as condições de contorno foram colocadas como desconhecidas. Os pontos onde estavam localizados os emissores foram colocadas condições de contorno transientes representando a irrigação que foi feita em campo (Figura 21). Para os

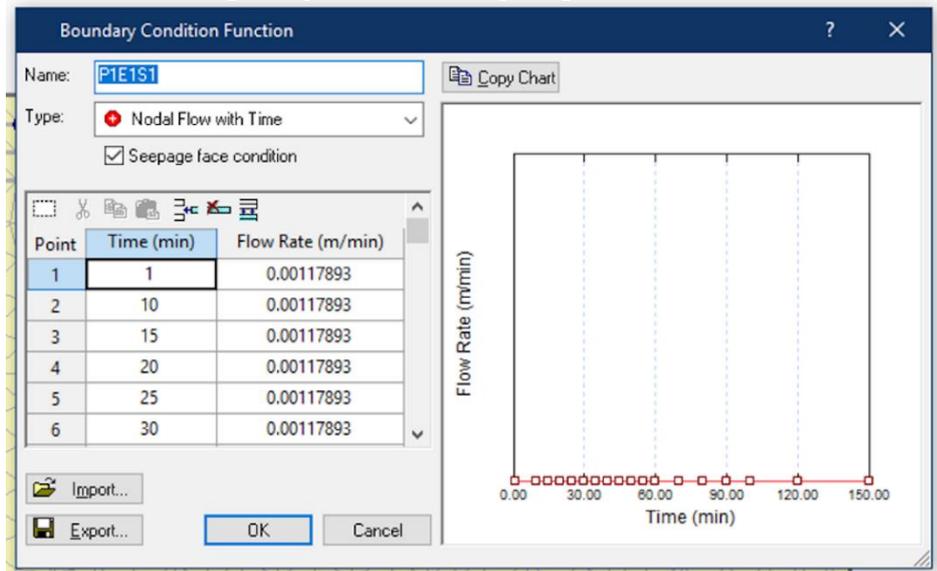
tempos analisados foram ajustados os dados de vazão de cada ponto até o tempo de 60 minutos e partir desse momento a vazão foi cortada (Figura 22), simulando a secagem do solo.

Figura 21 – Desenho da malha no software SLIDE 6.0 no módulo do regime transiente, com os emissores configurados com condições de contorno transiente.



Fonte: Software SLIDE elaborado pela autora, 2019.

Figura 22 – Módulo para ajuste das condições pontuais de contorno transientes.



Fonte: Software SLIDE elaborado pela autora, 2019.

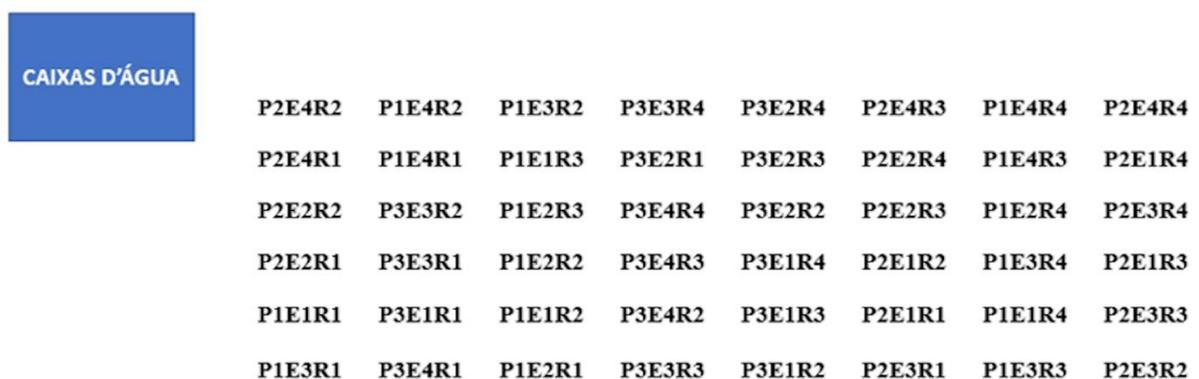
Para as simulações, o software foi configurado para realizar 1000 iterações e foram divididos em 18 estágios (1, 10, 15, 20, 25, 30, 35, 40, 45, 50, 55, 60, 70, 80, 90, 100, 120 e 150 minutos).

## 11.2 Coleta de dados em campo

Primeiramente, foi montado um sistema de irrigação por gotejamento subsuperficial na área experimental do Laboratório de hidráulica da Universidade Federal do Ceará – Campus do Pici. Foi usado um tubo gotejador do fabricante Rivulis, modelo D5000 PC, indicado para gotejamento enterrado. Os tubos gotejadores foram enterrados em três diferentes profundidades (10, 20 e 30 centímetros) e o espaçamento entre os emissores foi modificado, totalizando quatro diferentes espaçamentos (25, 50, 75 e 100 centímetros).

No campo, os diferentes espaçamentos (E1, E2, E3, E4) e profundidades (P1, P2, P3) foram distribuídos em parcelas ao acaso, com 4 repetições (R1, R2, R3, R4) para cada tratamento, totalizando 48 parcelas experimentais. Além disso, houve a inclusão do fator tempo durante a irrigação (10, 30 e 60 minutos) para a coleta do solo. O delineamento estatístico utilizado foi o de parcelas sub-subdivididas (Figura 23). Cada parcela continha um tubo gotejador com três metros de comprimento e foi plantado milho da variedade AG1051 com espaçamento entre plantas de 30 centímetros.

Figura 23 – Croqui do experimento em campo.

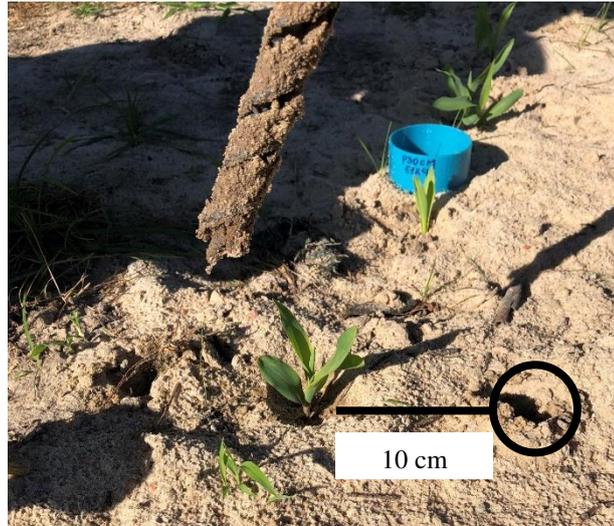


Fonte: Elaborada pela autora, 2019.

Os pontos de amostragem foram localizados ao longo de uma malha, tomando como eixo central o ponto onde as plantas estavam localizadas. A partir desse ponto, foi amostrado 10 cm na direção horizontal (formando um ângulo de 90° com o tubo gotejador). Para

determinação da umidade do solo foi utilizado o método termogravimétrico. As amostras de solo foram coletadas com um trado de rosca (Figura 24) nas profundidades de 10, 20 e 30 centímetros, nas 4 repetições, nos 3 diferentes tempos de irrigação (10, 30 e 60 minutos).

Figura 24 – Coleta do solo na direção horizontal ao ponto onde as plantas estavam localizadas com trado de rosca.



Fonte: Elaborada pela autora, 2019.

Depois de coletadas, as amostras foram pesadas para obter massa úmida e posteriormente colocadas na estufa a 110 °C por 24 horas para obtenção da massa seca. A umidade volumétrica foi obtida pela Equação 14, em que a densidade do solo foi obtida pelo método do anel volumétrico (ver capítulo 1).

$$\theta = \frac{m_u - m_s}{m_s} \times d_s \quad \text{Equação 14}$$

Onde:  $\theta$  é a umidade volumétrica,  $\text{cm}^3\text{cm}^{-3}$ ;  $m_u$  é a massa de solo úmido, g;  $m_s$  é a massa do solo seco, g;  $d_s$  é a densidade do solo  $\text{g cm}^{-3}$ .

Após as coletas de solo durante a irrigação, foram coletadas amostras para validação dos dados estimados pelo modelo após o corte da irrigação. As amostras de solo foram coletadas com um trado de rosca nas profundidades de 10, 20 e 30 centímetros, em 3 repetições, em 3 diferentes tempos após o corte da irrigação (10, 30 e 60 minutos). O procedimento realizado para a obtenção da umidade volumétrica foi o mesmo descrito no parágrafo anterior.

Com base na distribuição temporal e espacial da umidade volumétrica, o modelo foi avaliado através da comparação dos valores de umidade volumétrica obtidos

experimentalmente com os estimados pelo modelo proposto. Para as análises estatísticas descritivas foi usado o software SPSS® v.20.

## 12 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Nas Tabelas 9, 10 e 11 estão dispostas as análises estatísticas descritivas dos dados de umidade em relação a profundidade de instalação do tubo gotejador, o espaçamento entre emissores e ao tempo de irrigação, respectivamente.

Tabela 9 – Medidas estatísticas descritivas da umidade medida em campo em relação a profundidade de instalação do tubo gotejador.

Métrica de análise	Profundidade 10 cm	Profundidade 20 cm	Profundidade 30 cm
n	48	48	48
Mínimo	0,116	0,120	0,110
Máximo	0,267	0,250	0,250
Mediana	0,160	0,166	0,174
Média	0,167	0,168	0,180
Desvio padrão	0,033	0,030	0,036
Variância	0,001	0,001	0,001
Assimetria	0,757	0,666	0,459
Distribuição	Normal	Normal	Normal

Fonte: Elaborado pela autora, 2019.

Ao analisar a Tabela 9, pode-se inferir que para a profundidade de instalação do tubo gotejador a 30 cm, foi encontrada a maior umidade média. O desvio padrão para as 3 profundidades ficou em torno de 3% indicando uma baixa dispersão dos dados em relação à média.

Tabela 10 – Medidas estatísticas descritivas da umidade medida em campo em relação ao espaçamento entre os emissores.

Métrica de análise	Espaçamento 1 (25 cm)	Espaçamento 2 (50 cm)	Espaçamento 3 (75 cm)	Espaçamento 4 (100 cm)
n	36	36	36	36
Mínimo	0,120	0,120	0,110	0,140
Máximo	0,270	0,250	0,220	0,250
Mediana	0,186	0,168	0,151	0,170
Média	0,188	0,168	0,155	0,176
Desvio padrão	0,036	0,032	0,027	0,029
Variância	0,001	0,001	0,001	0,001
Assimetria	0,174	0,784	0,883	0,856
Distribuição	Normal	Normal	Normal	Normal

Fonte: Elaborado pela autora, 2019.

Observando a Tabela 10, pode-se concluir que para o espaçamento entre os emissores de 25 cm, foi encontrada a maior umidade média, o que era esperado pois tem-se mais fontes de água mais próximas umas das outras. O desvio padrão para os 4 espaçamentos ficou em torno de 3% indicando uma baixa dispersão dos dados em relação à média.

Tabela 11 – Medidas estatísticas descritivas da umidade medida em campo em relação ao tempo de irrigação.

Métrica de análise	Tempo 1 (10 min)	Tempo 2 (30 min)	Tempo 3 (60 min)
N	48	48	48
Mínimo	0,120	0,120	0,110
Máximo	0,240	0,250	0,270
Mediana	0,155	0,171	0,187
Média	0,158	0,172	0,185
Desvio padrão	0,024	0,030	0,039
Variância	0,001	0,001	0,002
Assimetria	0,872	0,528	0,150
Distribuição	Normal	Normal	Normal

Fonte: Elaborada pela autora, 2019.

Na Tabela 11 pode-se observar que a maior média de umidade foi encontrada para o tempo de irrigação de 60 min, o que era esperado pois com um maior tempo de aplicação, maior a quantidade de água no solo. O desvio padrão para os tempos de 10 e 30 min ficou em torno de 3%, já para o tempo de 60 min ficou em torno de 4%, esses valores indicam uma baixa dispersão dos dados em relação à média.

Foi feita a análise de variância para as variáveis profundidade de instalação do tubo gotejador, espaçamento entre os emissores, tempo de irrigação, umidade e suas interações, o resultado está disposto na Tabela 12.

Tabela 12 - Análise de variância da umidade como variável dependente da profundidade de instalação do tubo gotejador, espaçamento entre os emissores, tempo e a interação entre estes.

FV	GL	QM	F	Sig
Profundidade	2	0,002	2,725	0,070
Espaçamento	3	0,007	8,596	0,000**
Tempo	2	0,009	10,553	0,000**
Prof. x Esp.	6	0,001	1,428	0,211
Prof. x Tempo	4	0,001	1,028	0,396
Esp. x Tempo	6	0,002	1,800	0,106
Prof. x Esp. x Tempo	12	0,000	0,441	0,943

Fonte: Elaborada pela autora, 2019.

Ao analisar a Tabela 12, pode-se inferir que o espaçamento entre os emissores e o tempo de irrigação influenciaram significativamente a umidade do solo. Posteriormente foi feito o teste de Tukey a 5% de significância e os resultados estão disposto na Tabela 13.

Tabela 13 – Resultados do Teste de Tukey a 5% de significância para as variáveis profundidade de instalação do tubo gotejador, espaçamento entre emissores e tempo em relação a umidade medida em campo.

Espaçamento (cm)	Média	Tempo (min)	Média
25	0,188 a	10	0,158 b
50	0,168 ab	30	0,172 ab
75	0,155 b	60	0,185 a
100	0,176 ab		

Fonte: Elaborado pela autora, 2019.

Para a variável profundidade, a maior média foi encontrada para a profundidade de instalação do tubo gotejador de 30 cm. Esse resultado pode ser justificado pela análise de solo realizada por Vieira (2013) na área de estudo, que demonstrou um aumento de 114 g.kg<sup>-1</sup> de argila de 10 a 39 centímetros no perfil do solo e, portanto, a água tende a ficar acumulada nesta camada. Além disso, a camada tem menos influência da evaporação de água pela superfície do solo.

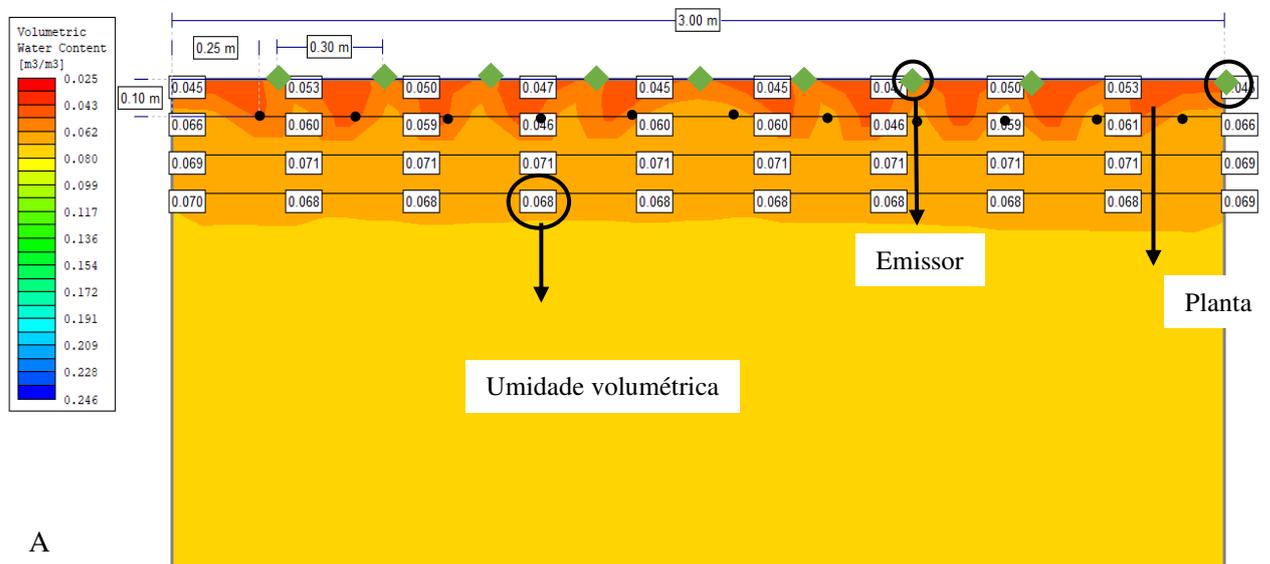
Para a variável espaçamento entre os emissores, o teste de médias indicou a maior média para o espaçamento de 25 cm entre os emissores. Tal resultado é razoável haja vista a maior proximidade entre as fontes de aplicação de água. De acordo com o Teste de Tukey, os espaçamentos entre emissores de 25 cm, 50 cm e 100 cm não apresentam diferença significativa entre eles. Já o espaçamento entre emissores de 75 cm, apresenta diferença significativa apenas em relação ao espaçamento de 25 cm, exibindo a menor média de umidade dentre os tratamentos. Em solos arenosos, os bulbos úmidos tendem a ter um diâmetro menor que em solos argilosos, diminuindo a distância máxima entre emissores para que ocorra sobreposição de bulbos. Hung (1995), calculando o espaçamento máximo entre emissores em função do tipo de solo para emissores de 2 L.h<sup>-1</sup>, concluiu que os espaçamentos máximos para solos arenosos, médios e argilosos devem ser de 30, 60 e 100 cm, respectivamente.

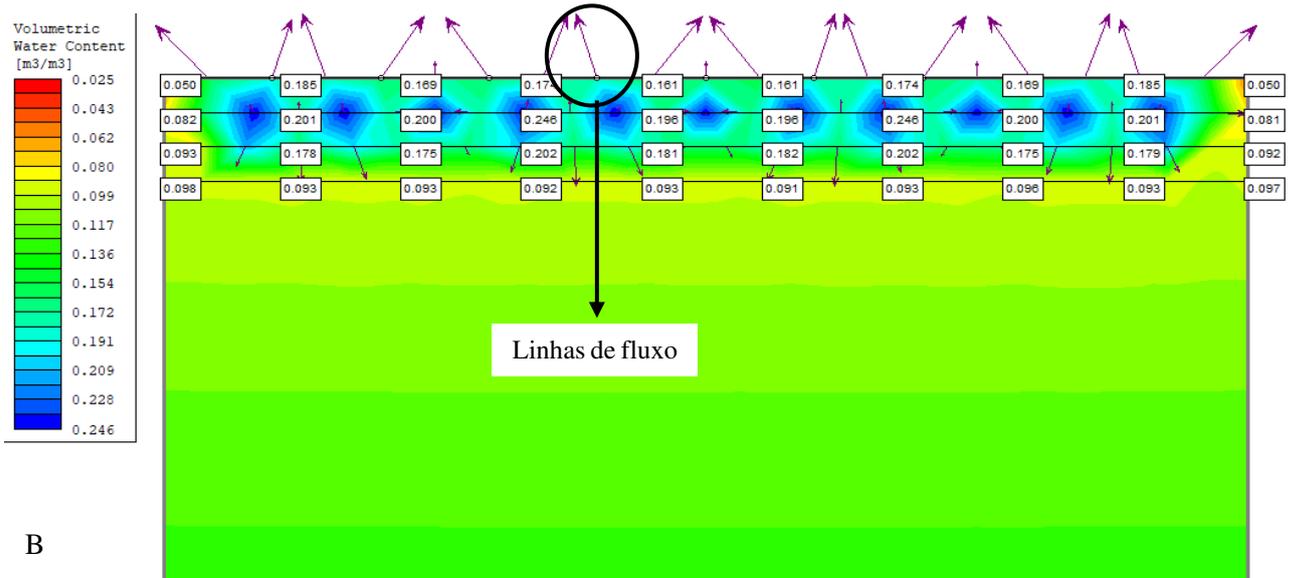
Para a variável tempo de irrigação, a maior média de umidade foi encontrada no maior tempo de duração da irrigação, criando um maior volume de solo úmido, assim como relatado por Subbauah e Mashru (2013). De acordo com o Teste de Tukey, os tempos de irrigação 30 min e 60 min não apresentaram diferença significativa entre as médias. Já o tempo

de irrigação de 10 min, apresentou a menor média de umidade e diferiu significativamente apenas do tempo de irrigação de 60 min.

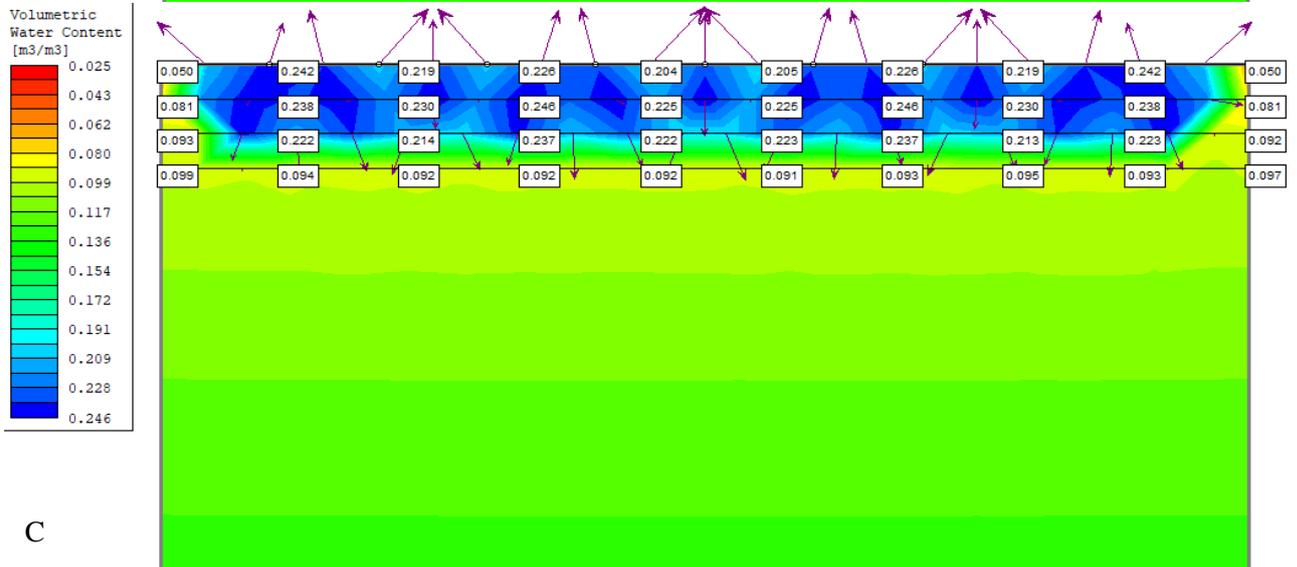
As simulações foram feitas com as condições encontradas em campo e utilizadas no modelo, em que a umidade volumétrica saturada obtida pelo método do papel filtro foi de  $0,246 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$ . O progresso do modelo com os parâmetros adequados pode ser visualizado nas figuras 25, 26, 27, 28, 29, 30, 31, 32, 33, 34, 35 e 36, que apresentam a evolução da simulação do fluxo de água no solo ( $\text{cm}^3 \text{ cm}^{-3}$ ) para um ciclo de irrigação de 60 minutos, com uma vazão de  $2 \text{ L h}^{-1}$ , diferentes profundidades de instalação do tubo gotejador (10, 20 e 30 cm) e diferentes espaçamentos entre os emissores (25, 50, 75 e 100 cm). Nestas figuras constou a condição inicial, que é considerada a condição de umidade atual do sistema, e mais 11 estágios temporais, que compreendem a condição transiente do modelo (simulação da frente de umedecimento com o tempo), distribuídos em 10, 15, 20, 25, 30, 35, 40, 45, 50, 55 e 60 minutos.

Figura 25 – Resultado da simulação durante a irrigação com profundidade do tubo gotejador a 10 cm, 25 cm entre emissores e 30 cm entre plantas. Figura 25A: inicial; Figura 25B: 10 min; Figura 25C: 15 min; Figura 25D: 20 min; Figura 25E: 25 min; Figura 25F: 30 min; Figura 25G: 35 min; Figura 25H: 40 min; Figura 25I: 45 min; Figura 25J: 50 min; Figura 25L: 55 min; Figura 25M: 60 min.

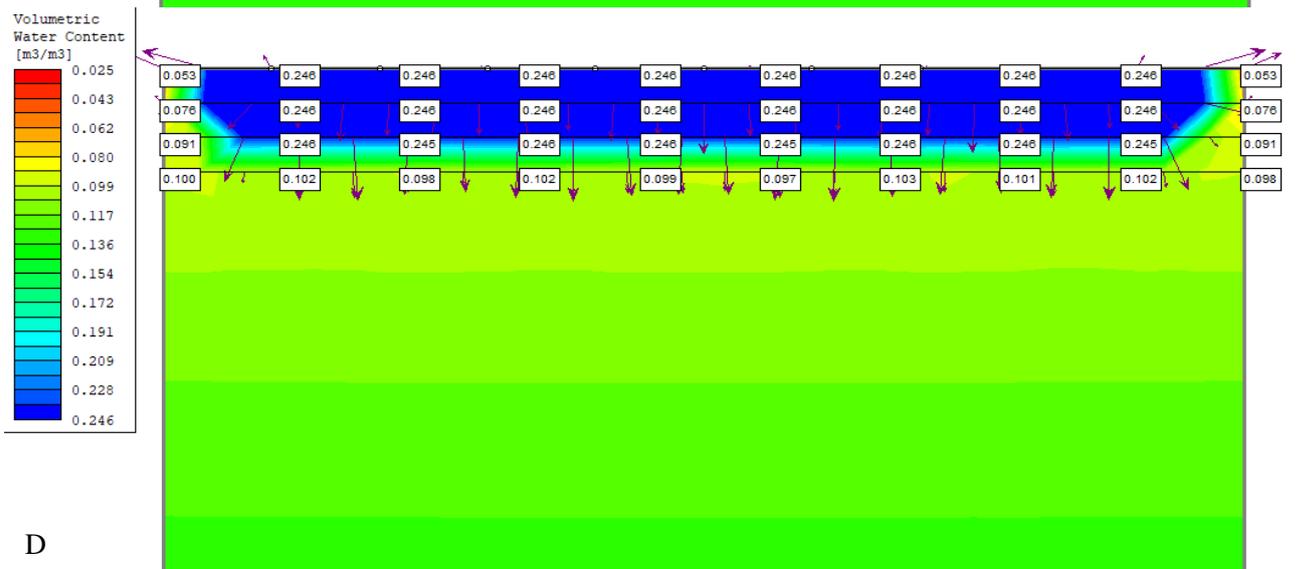




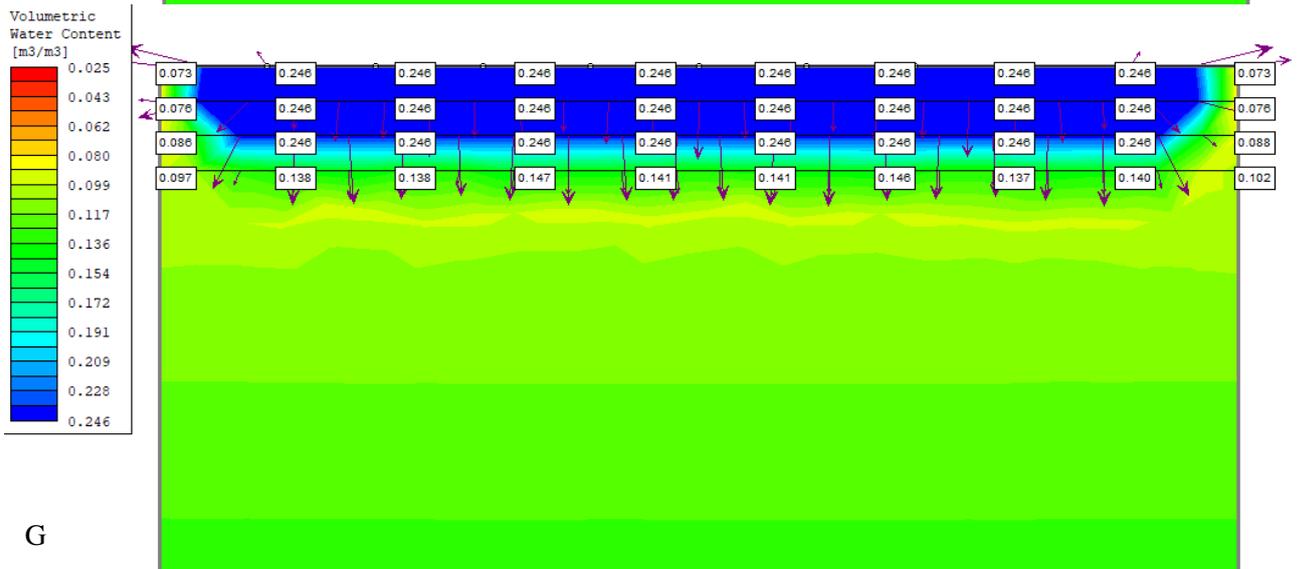
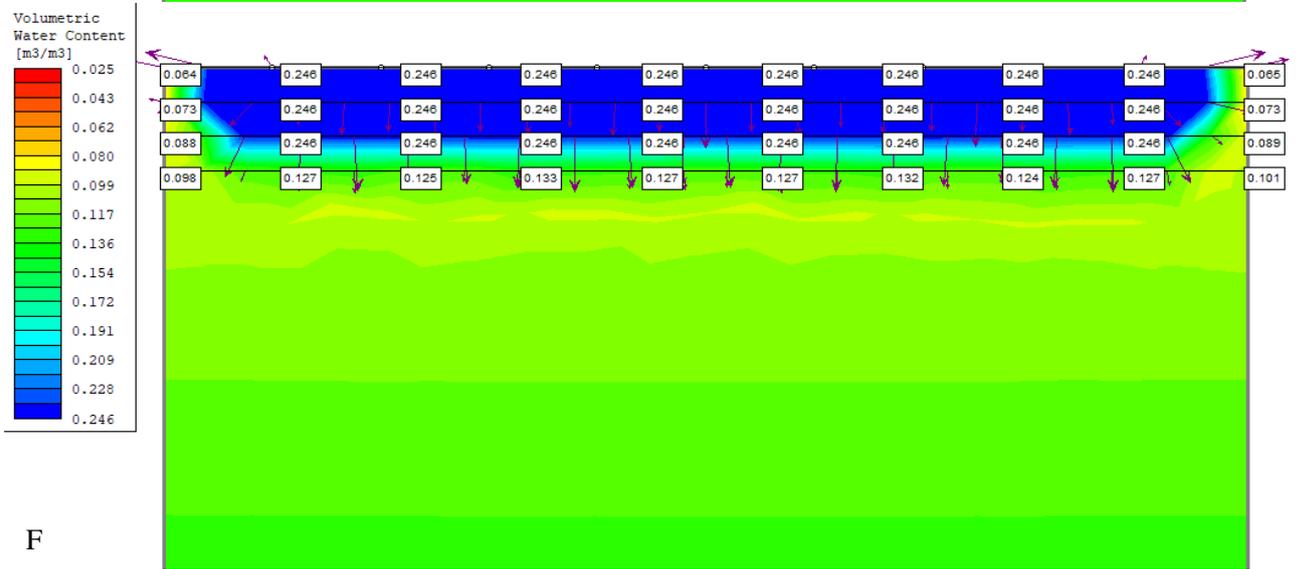
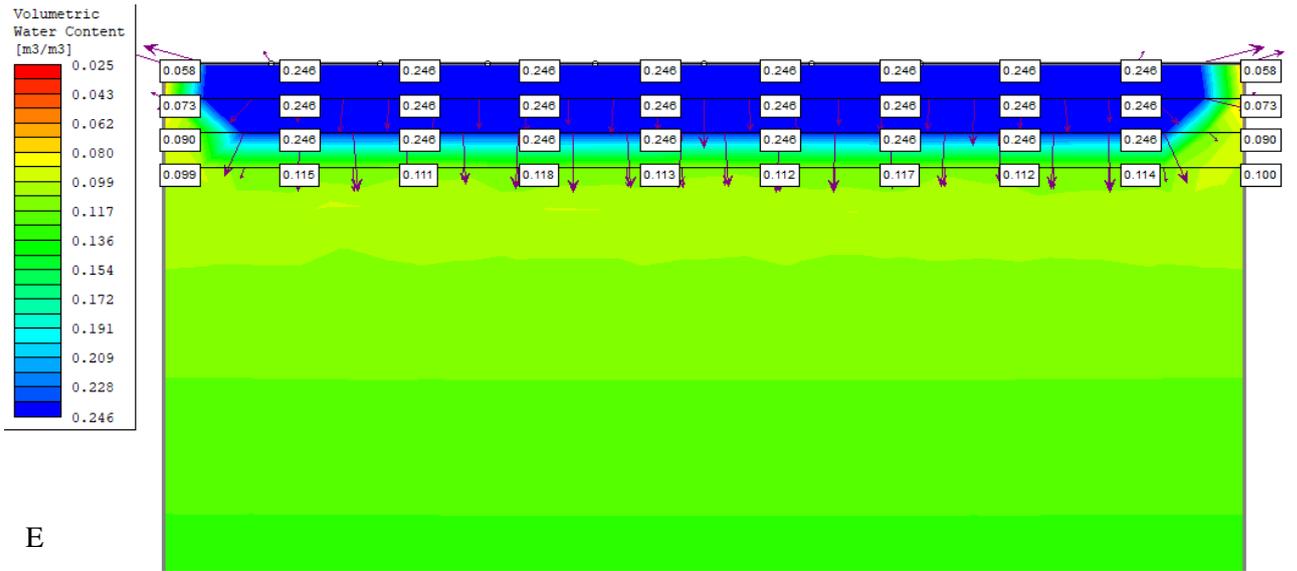
B

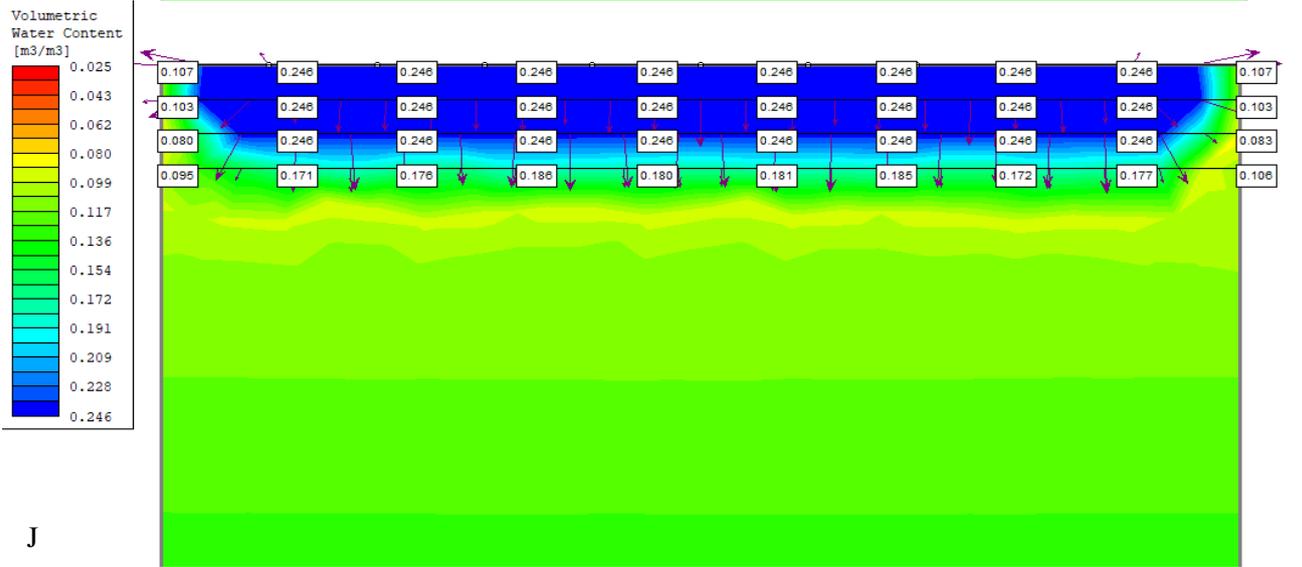
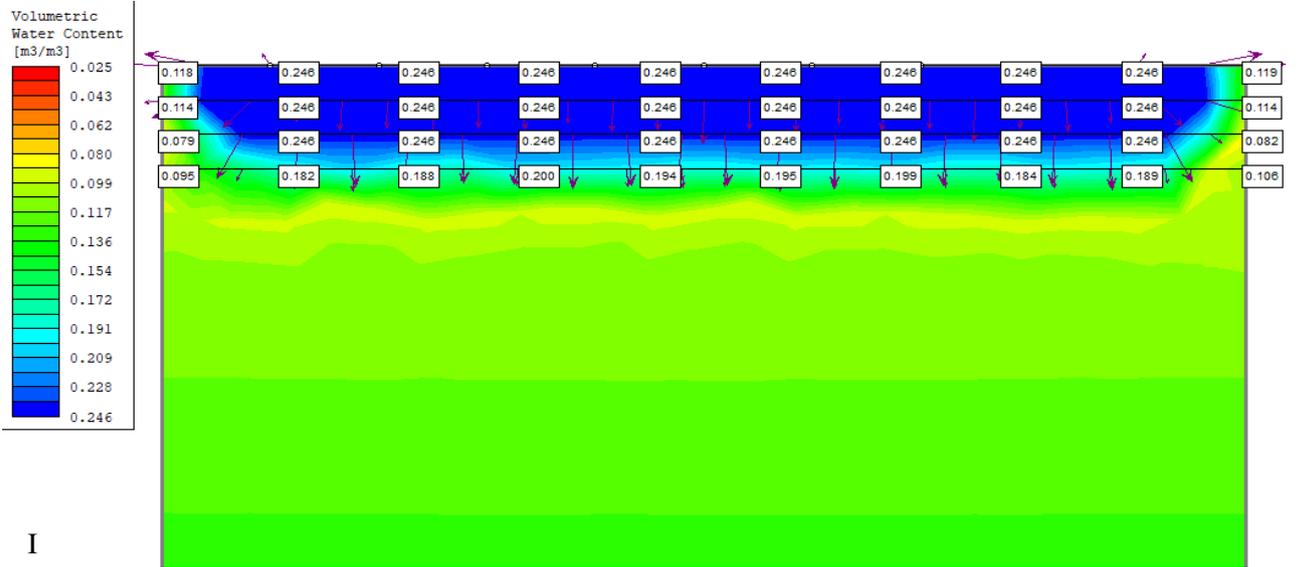
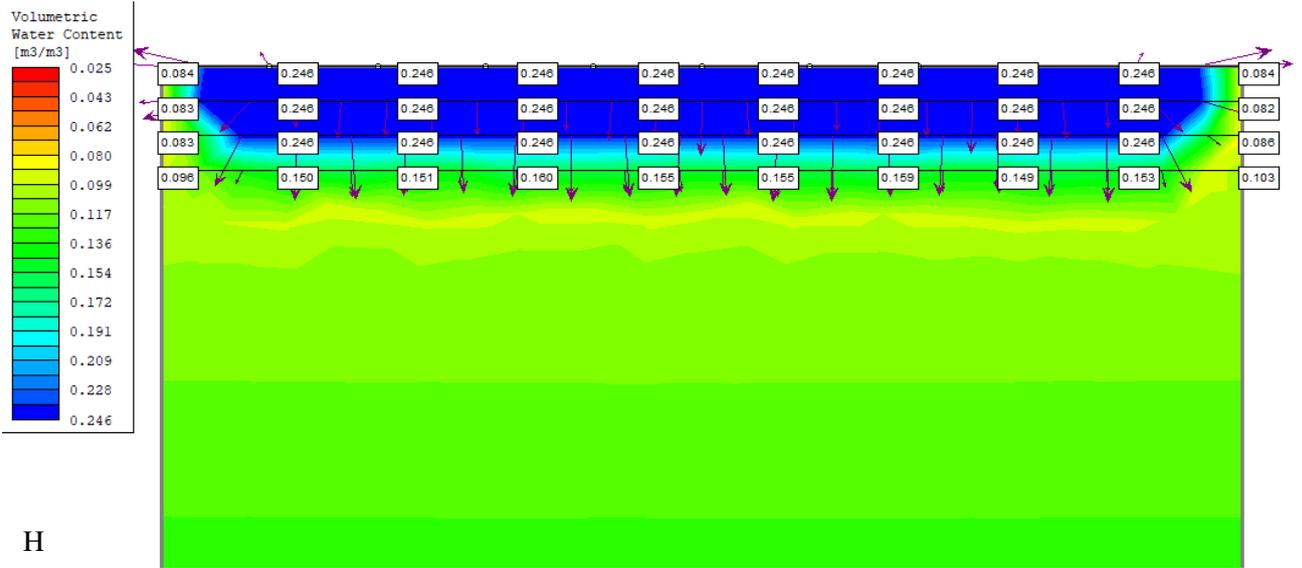


C

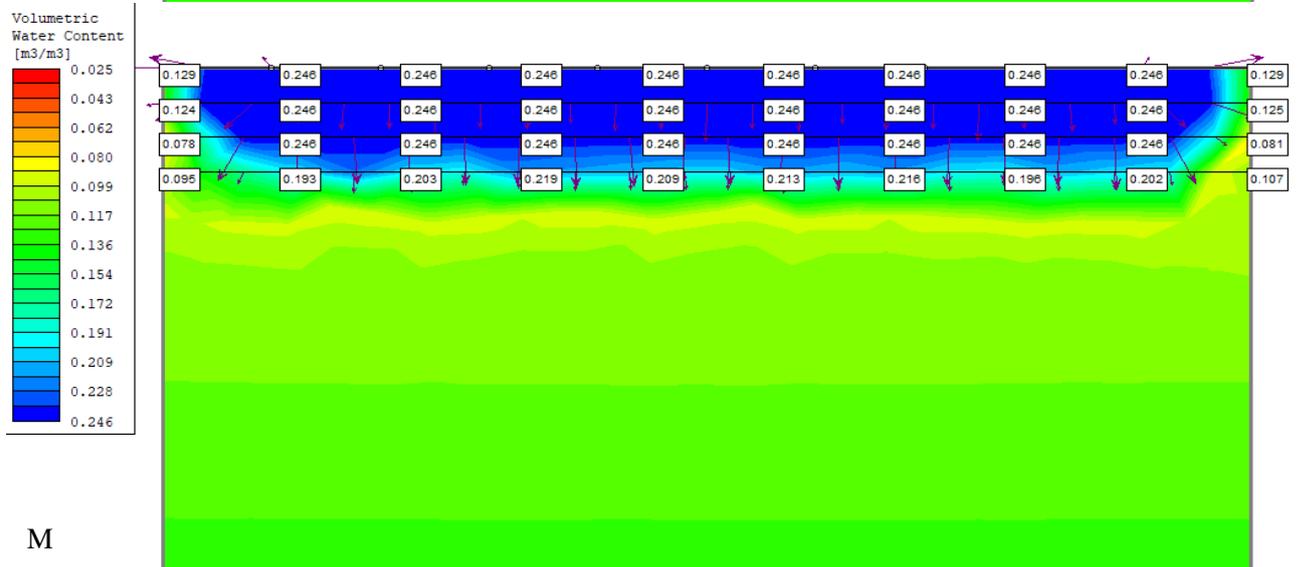
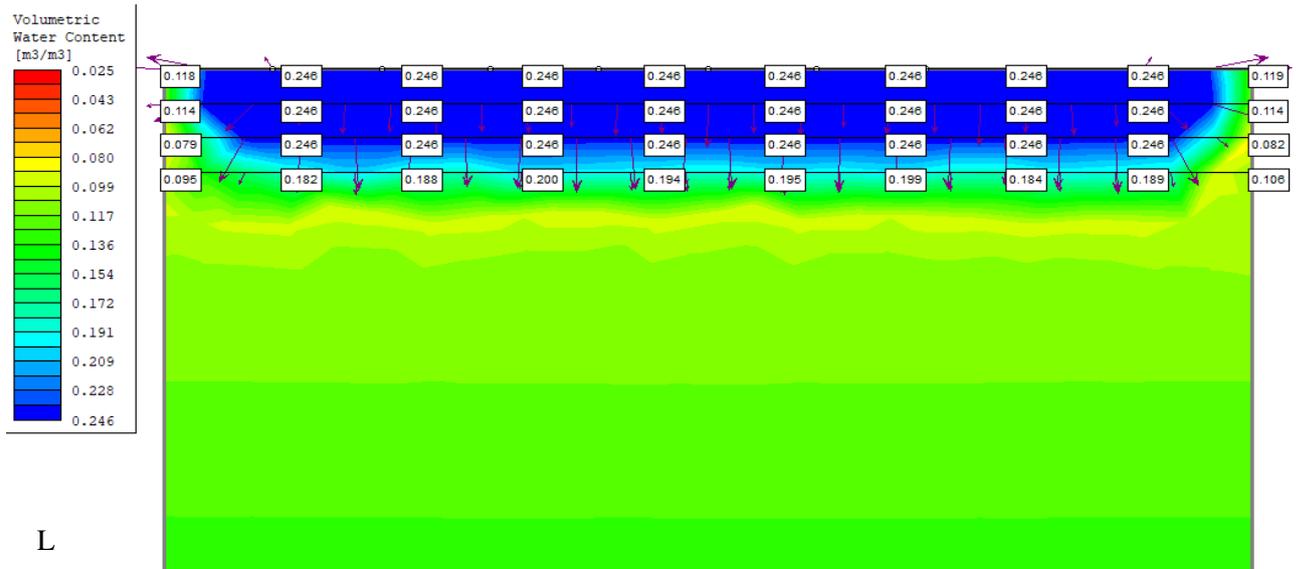


D



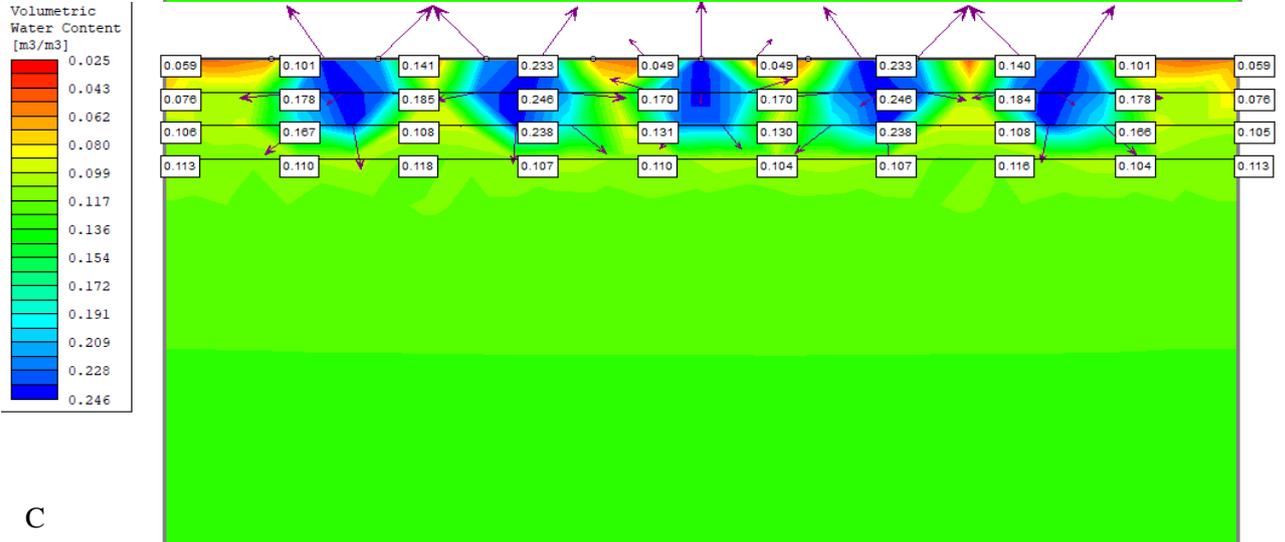
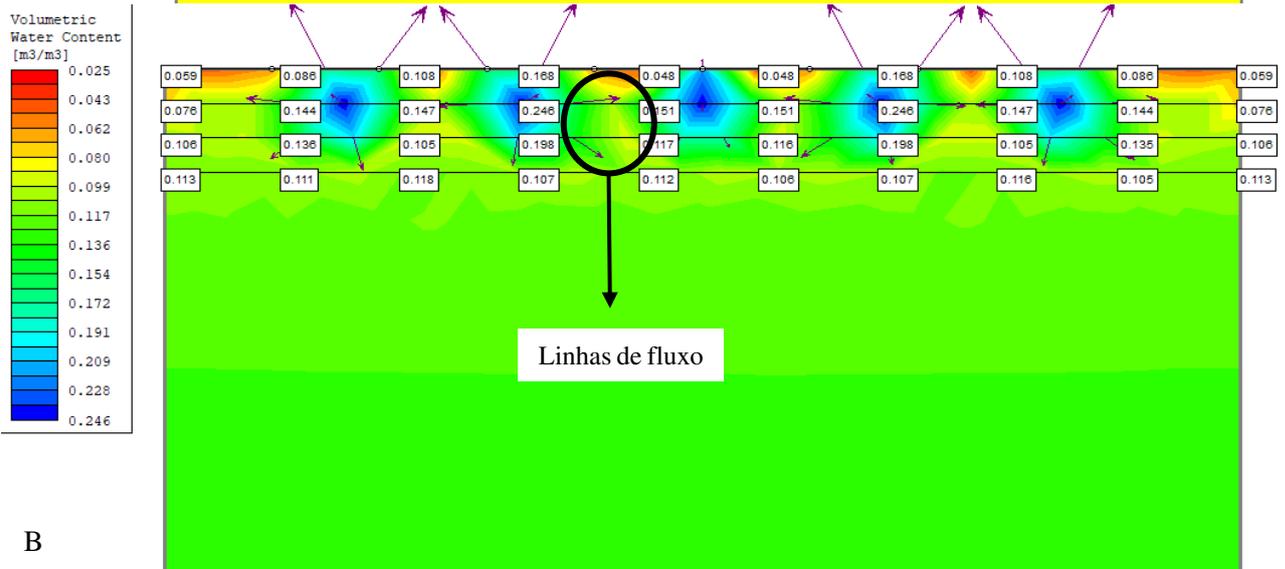
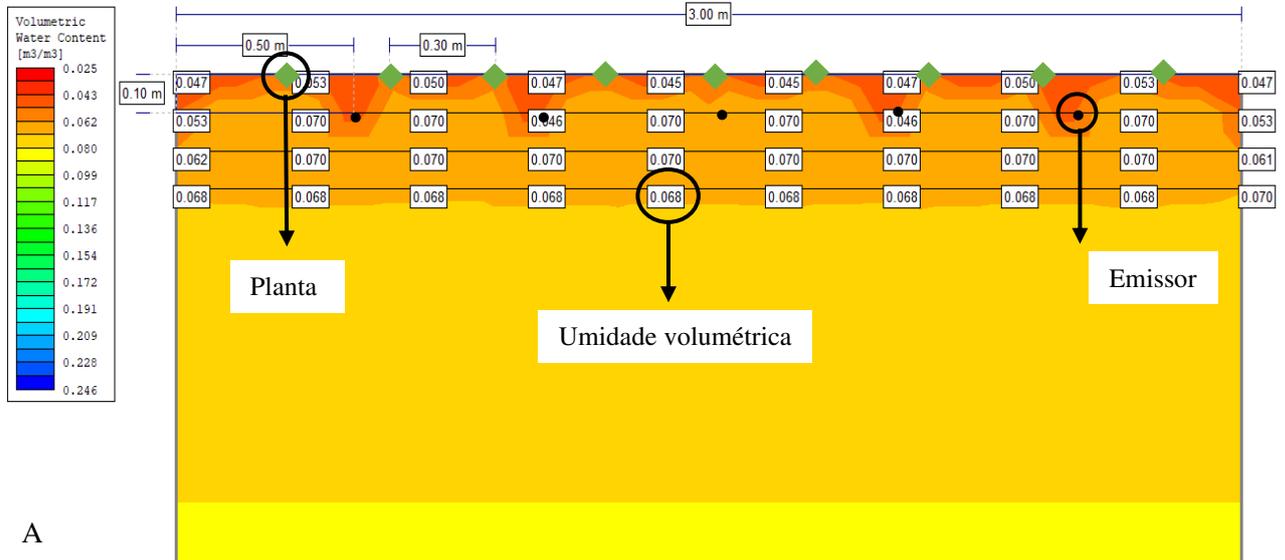


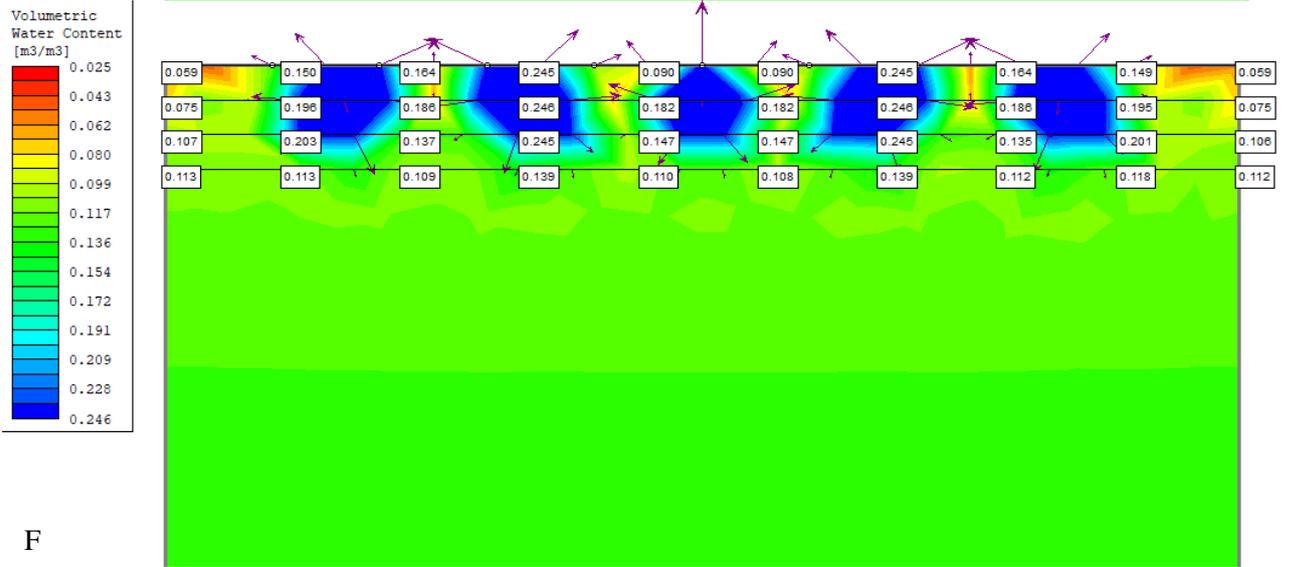
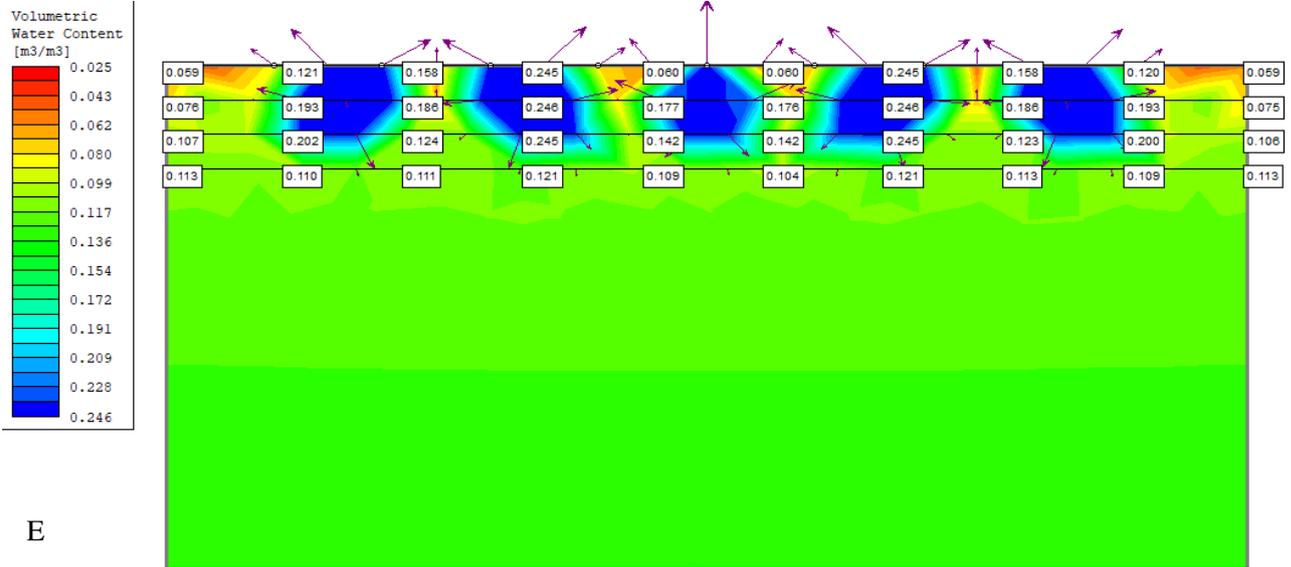
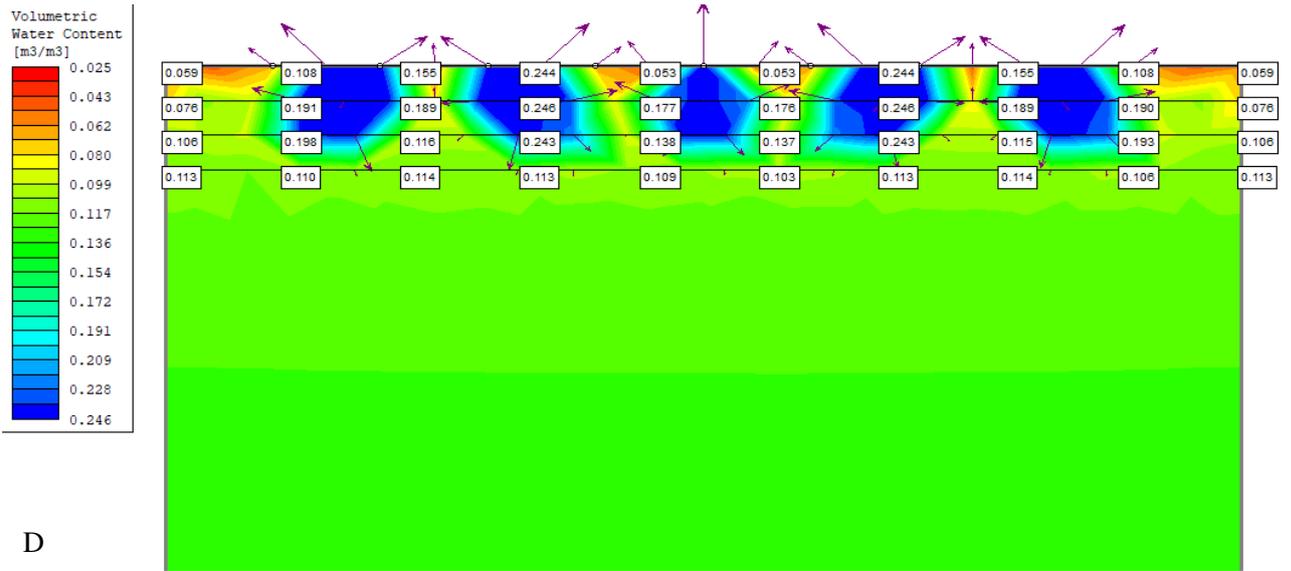
J

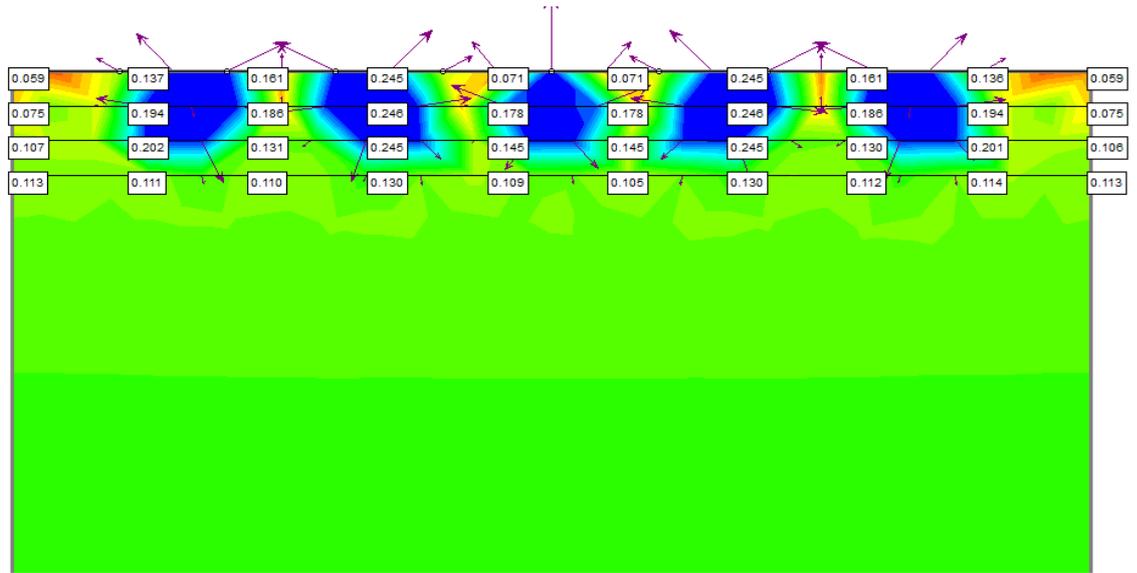
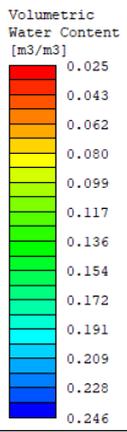


Fonte: Retirado do software SLIDE pela autora, 2020.

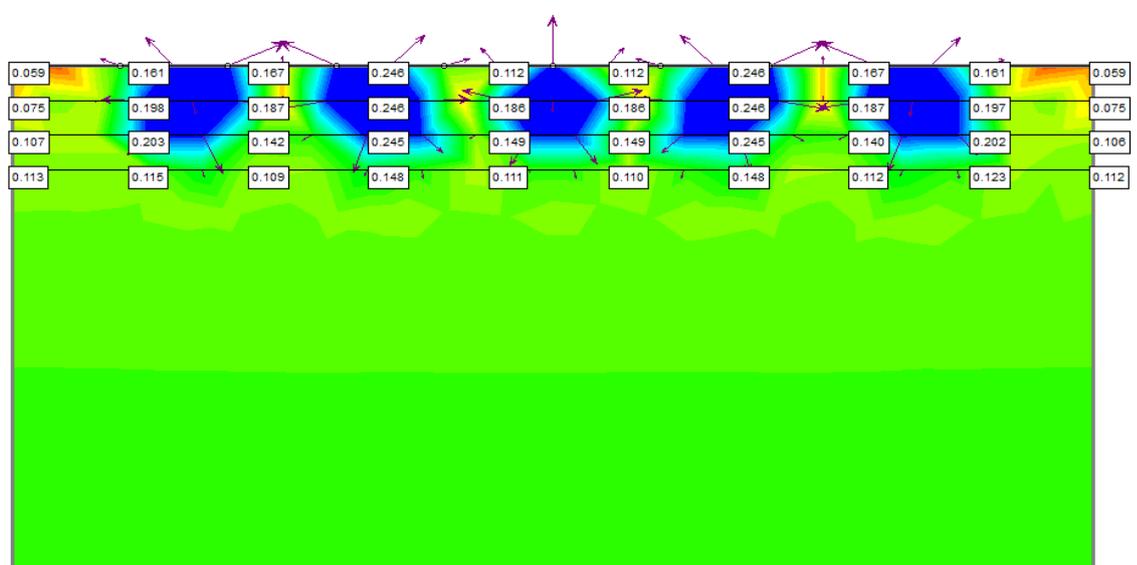
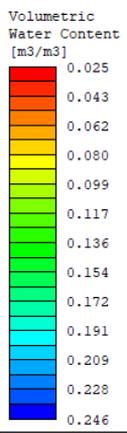
Figura 26 – Resultado da simulação durante a irrigação com profundidade do tubo gotejador a 10 cm, 50 cm entre emissores e 30 cm entre plantas. Figura 26A: inicial; Figura 26B: 10 min; Figura 26C: 15 min; Figura 26D: 20 min; Figura 26E: 25 min; Figura 26F: 30 min; Figura 26G: 35 min; Figura 26H: 40 min; Figura 26I: 45 min; Figura 26J: 50 min; Figura 26L: 55 min; Figura 26M: 60 min.



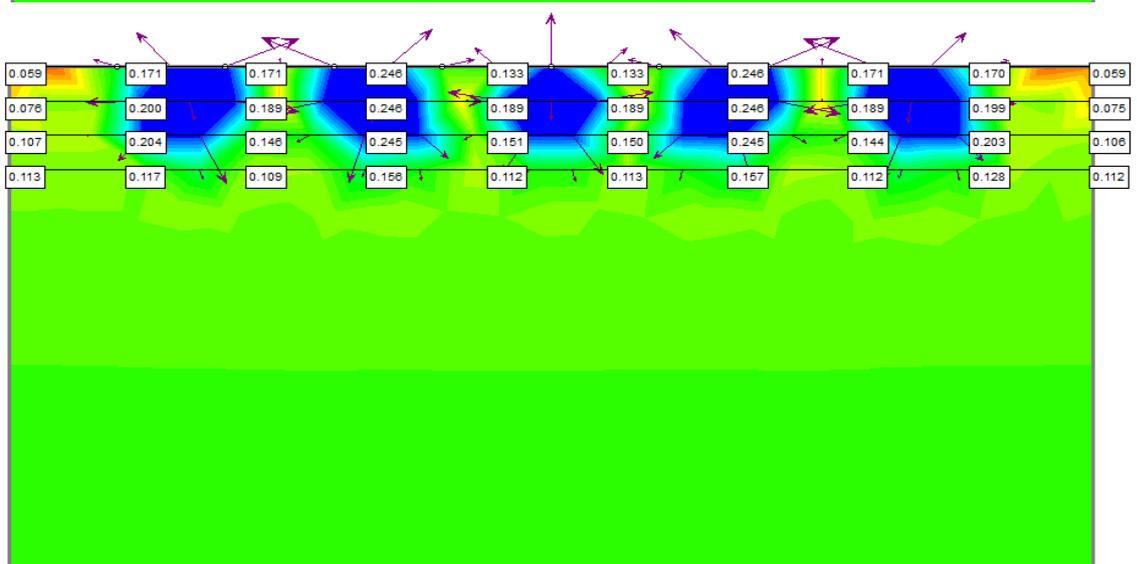
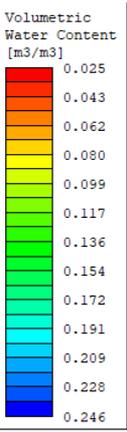




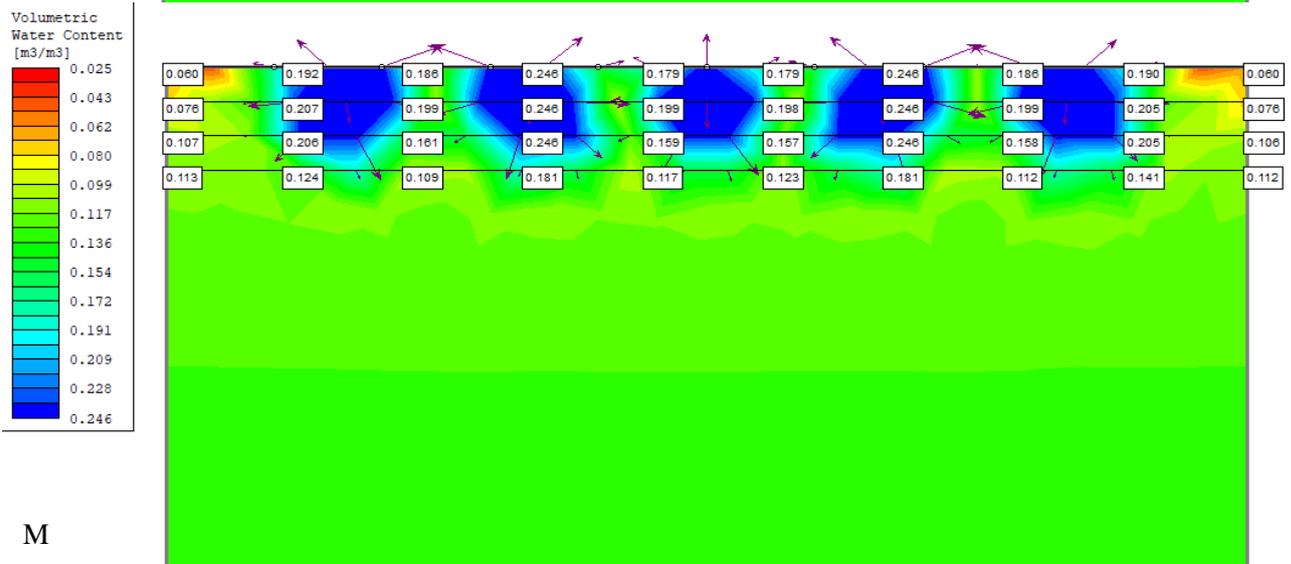
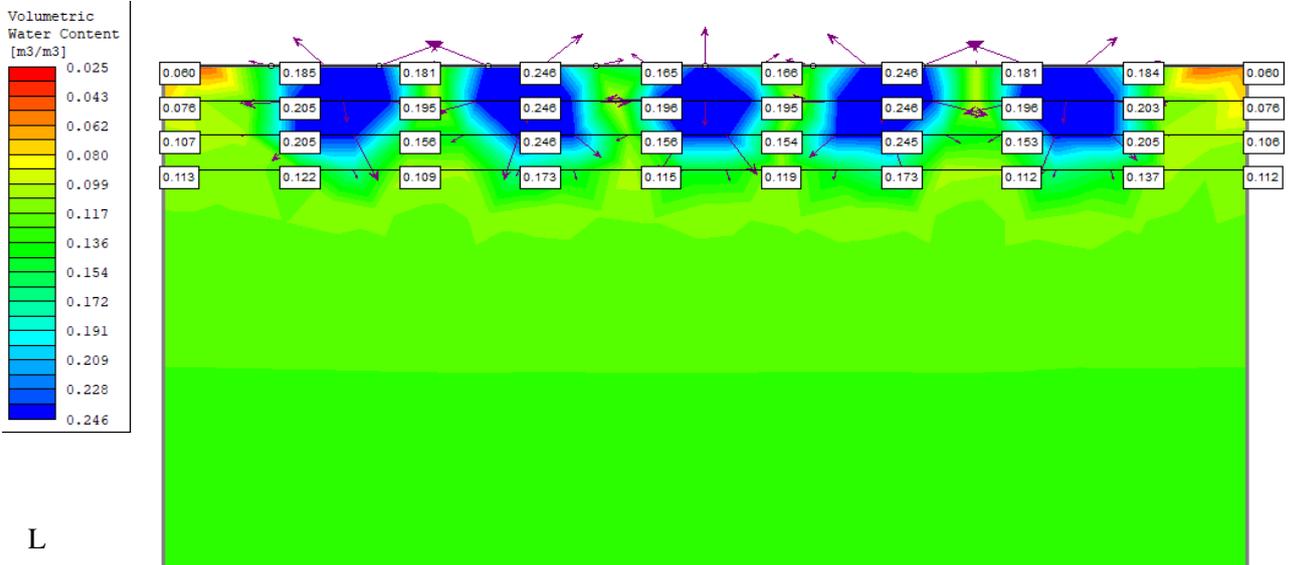
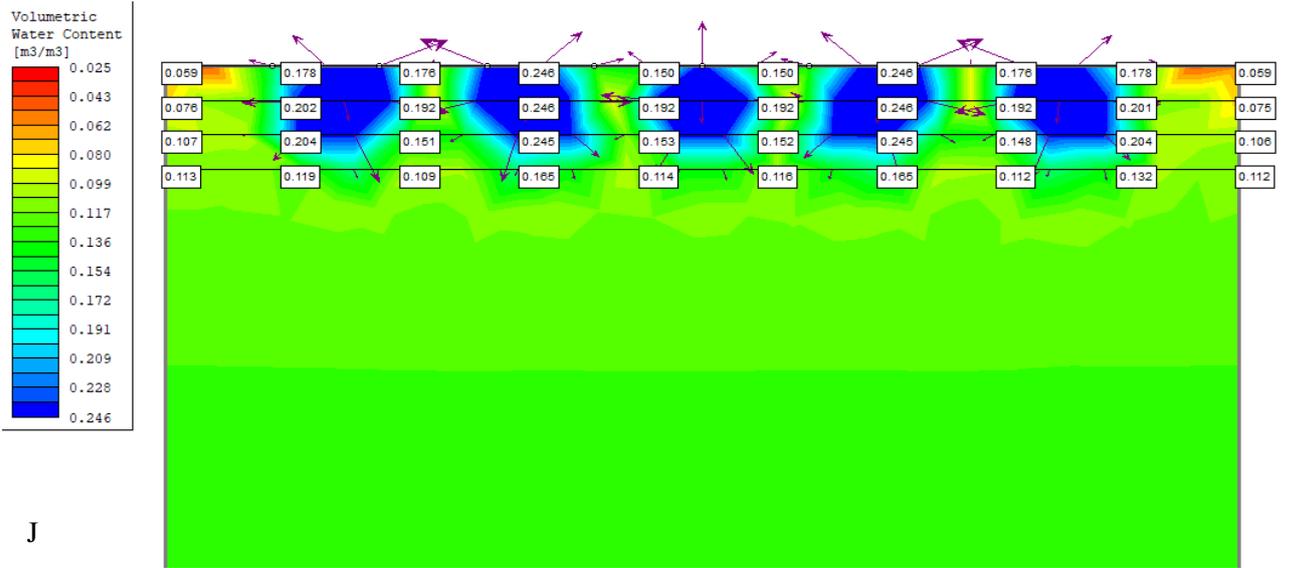
G



H

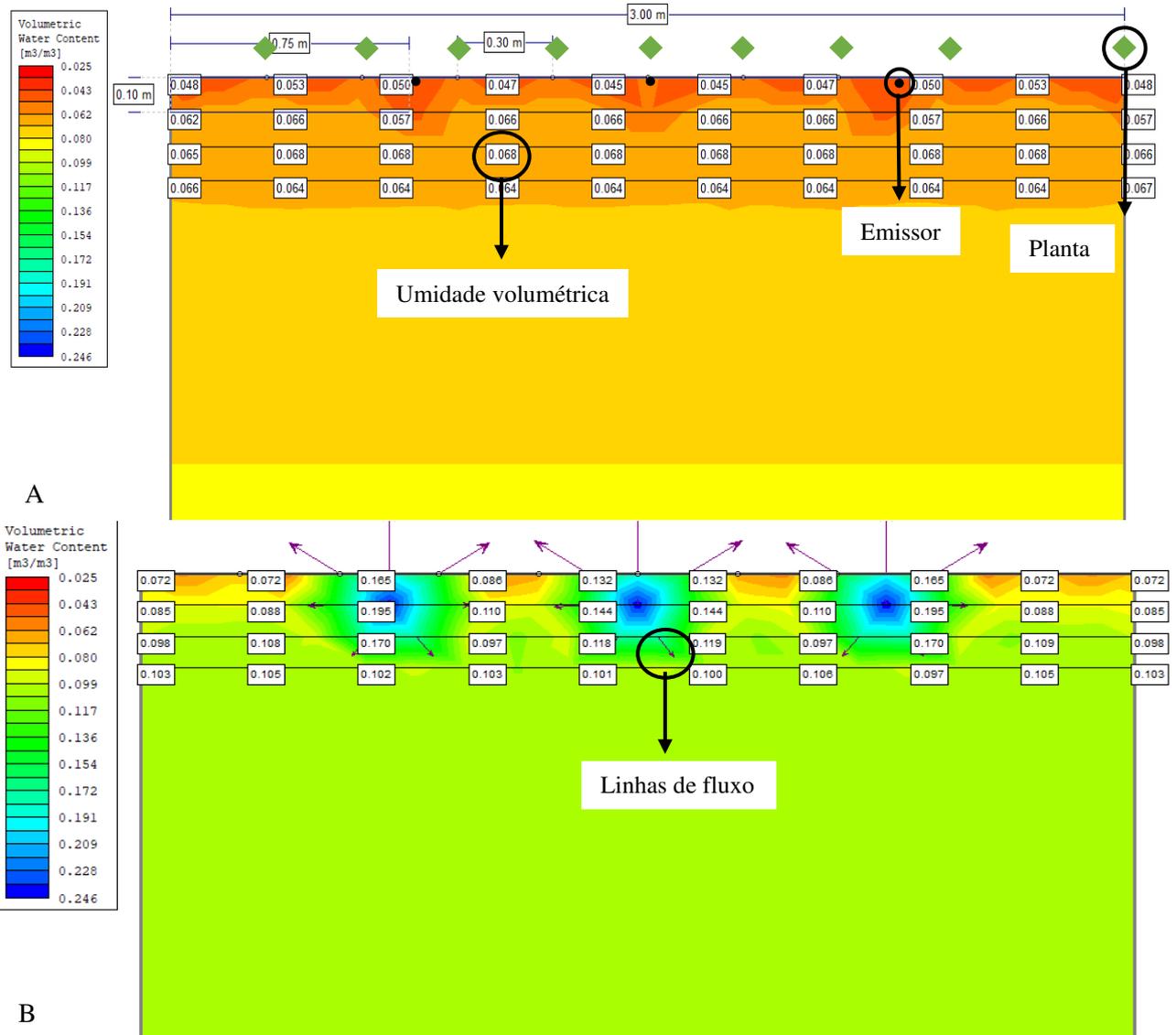


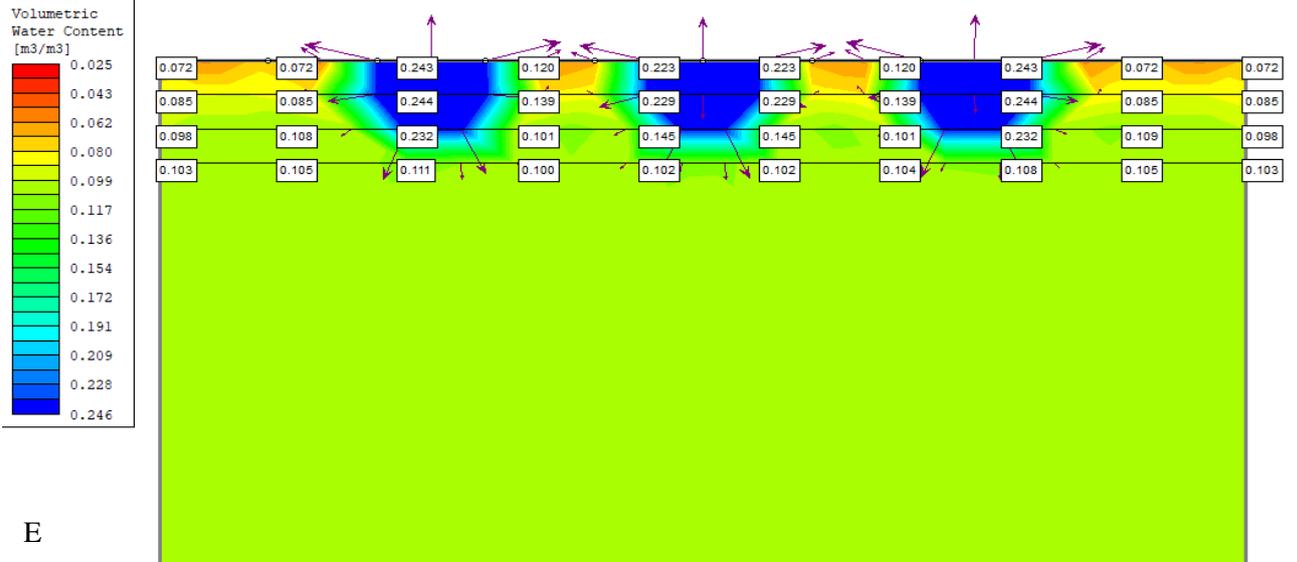
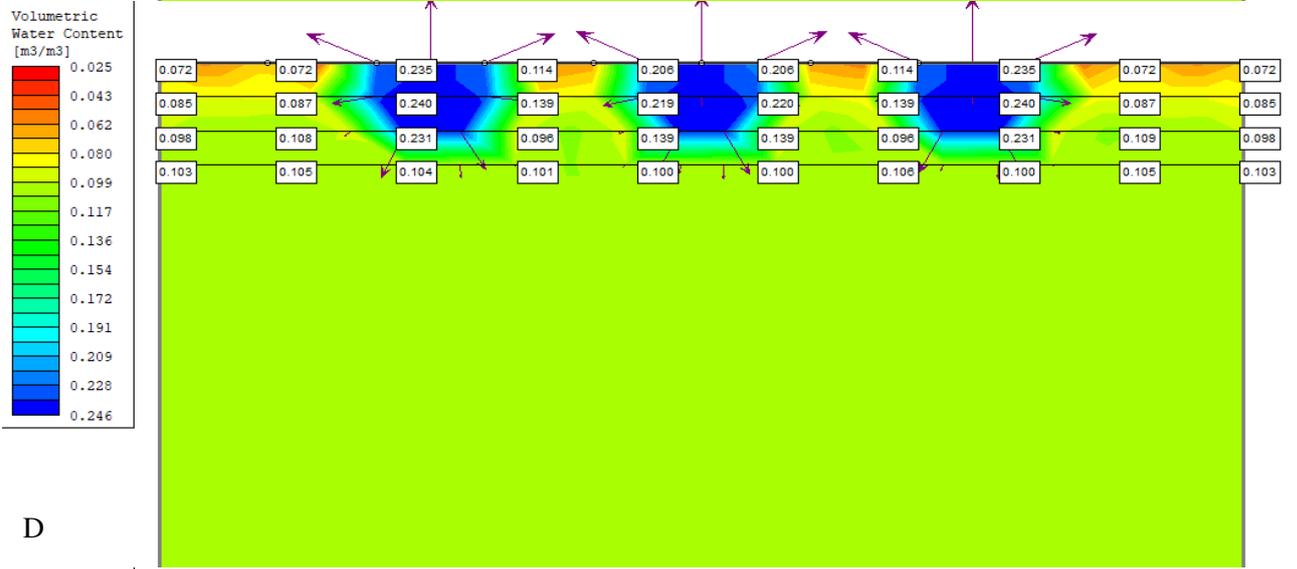
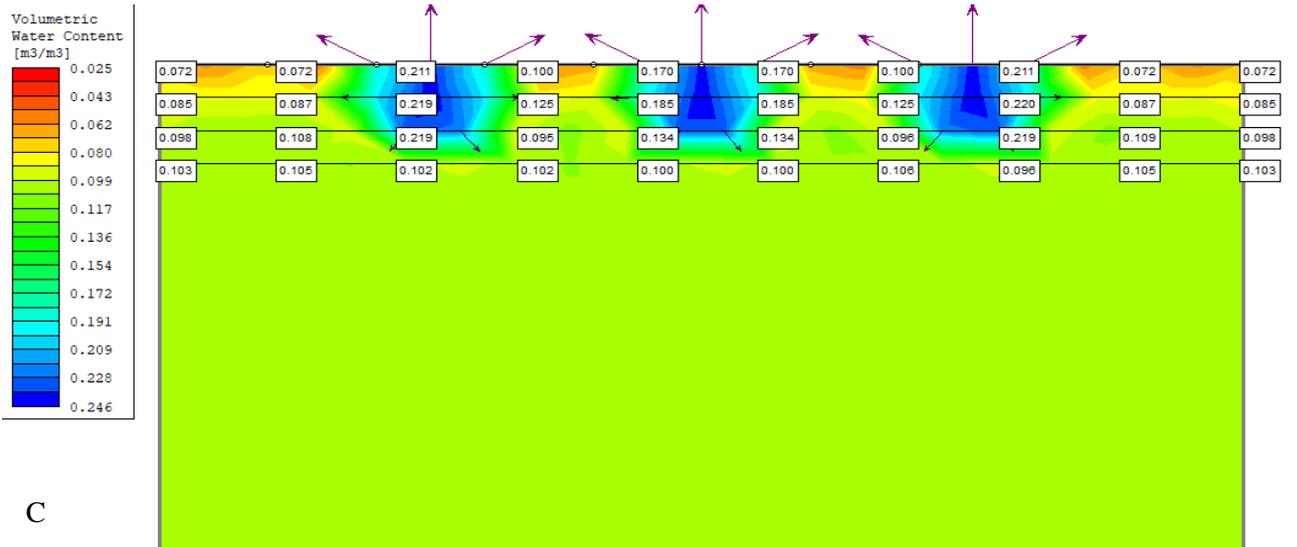
I

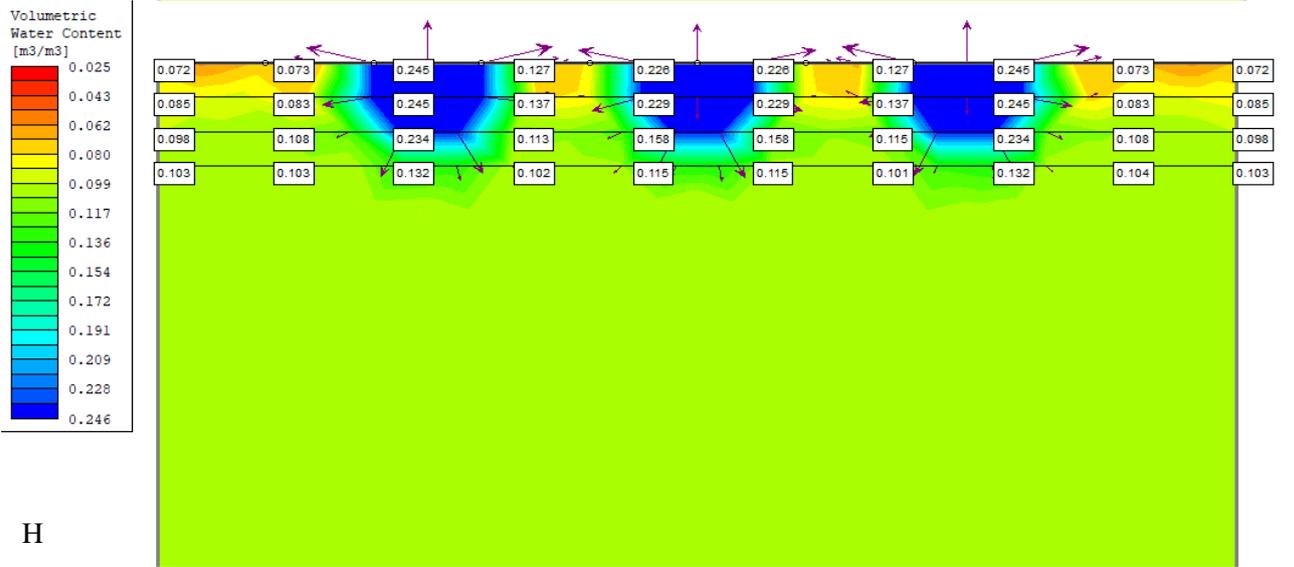
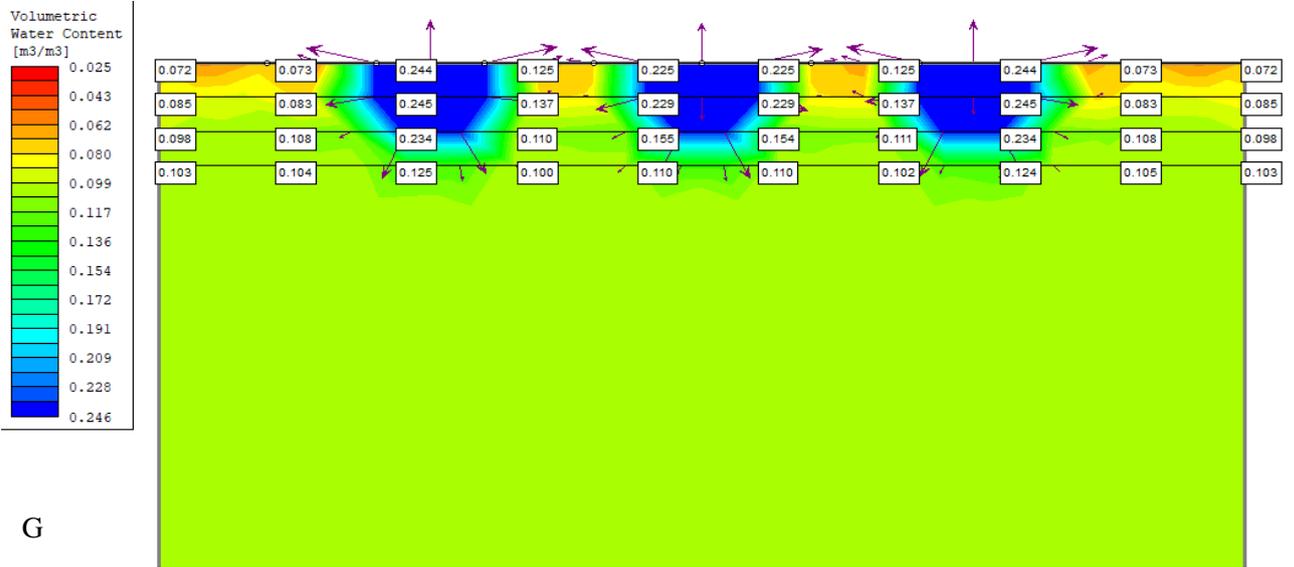
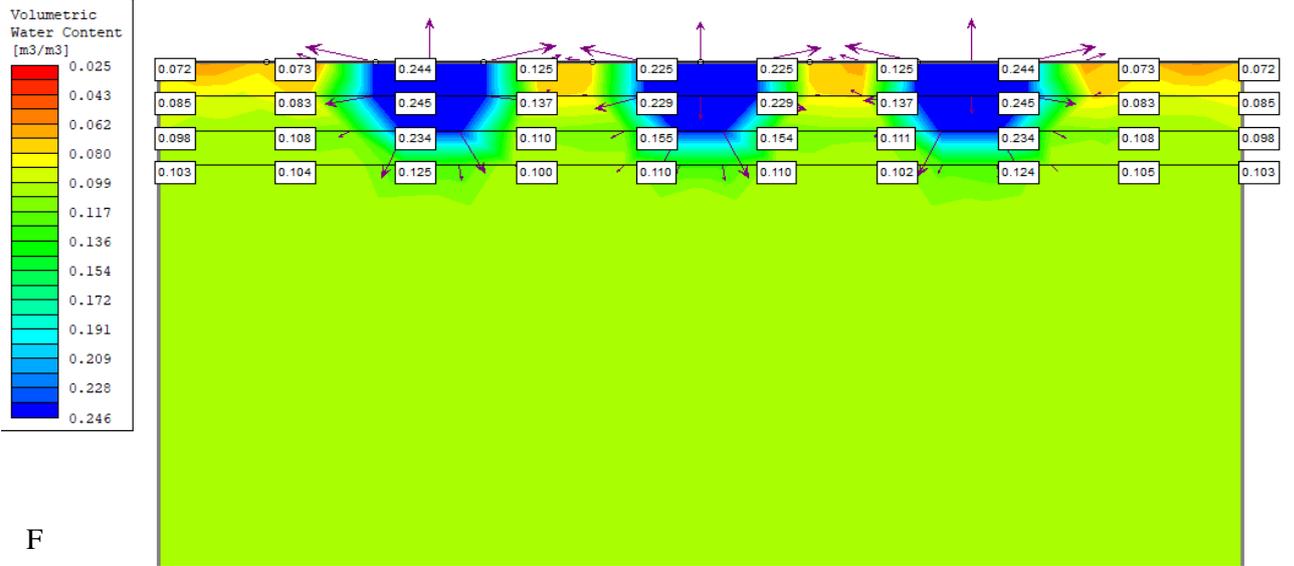


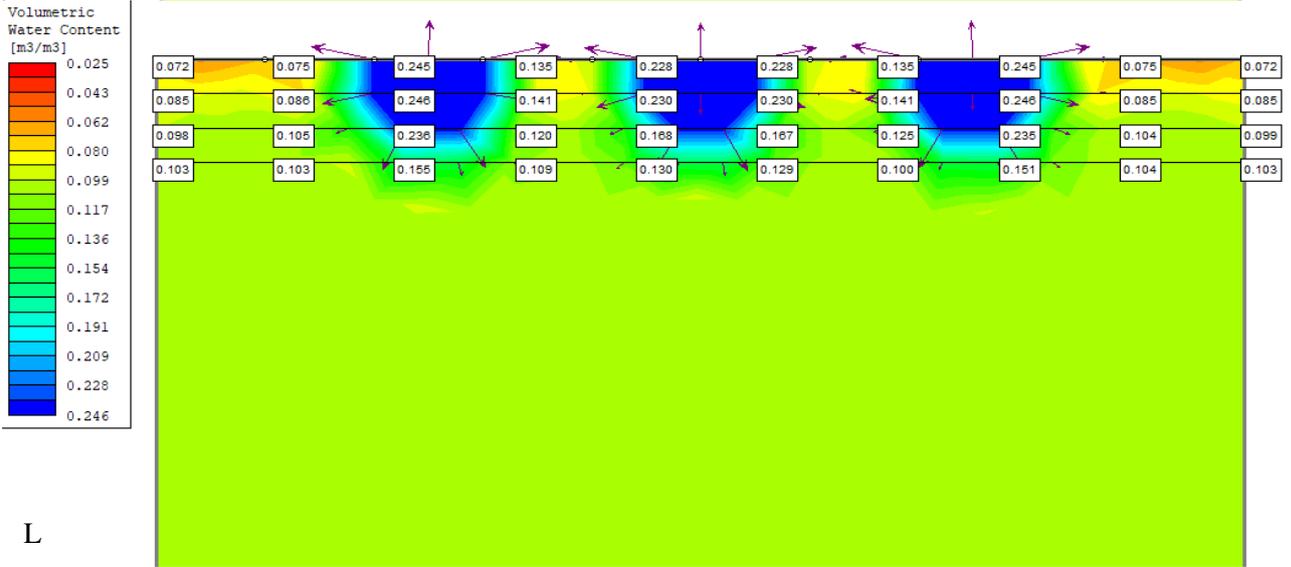
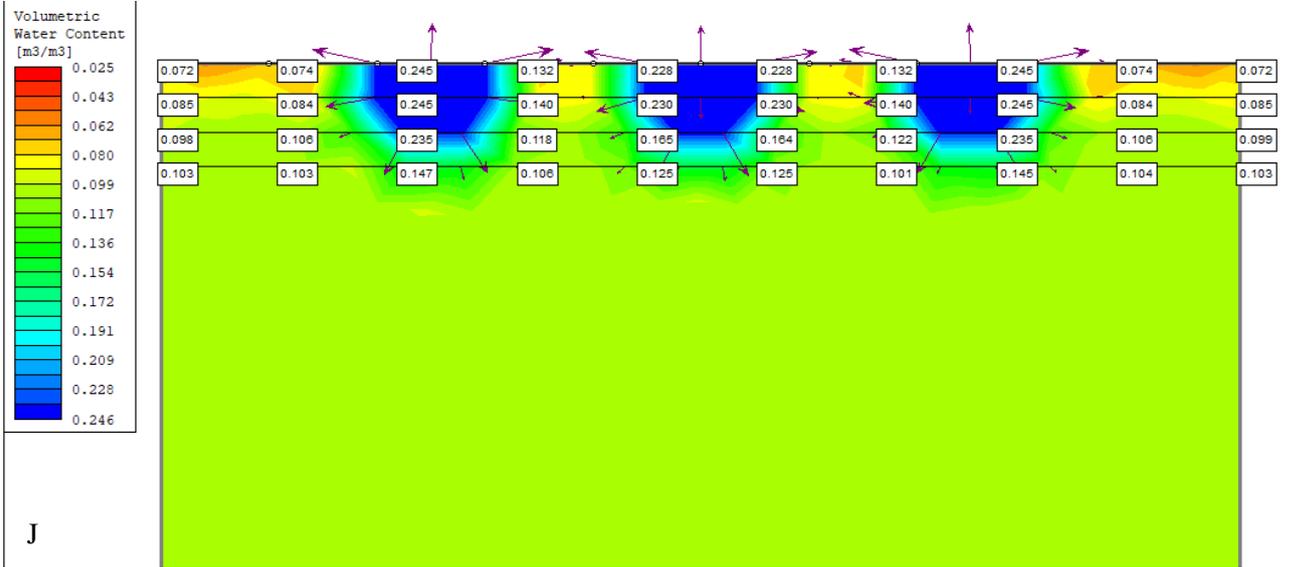
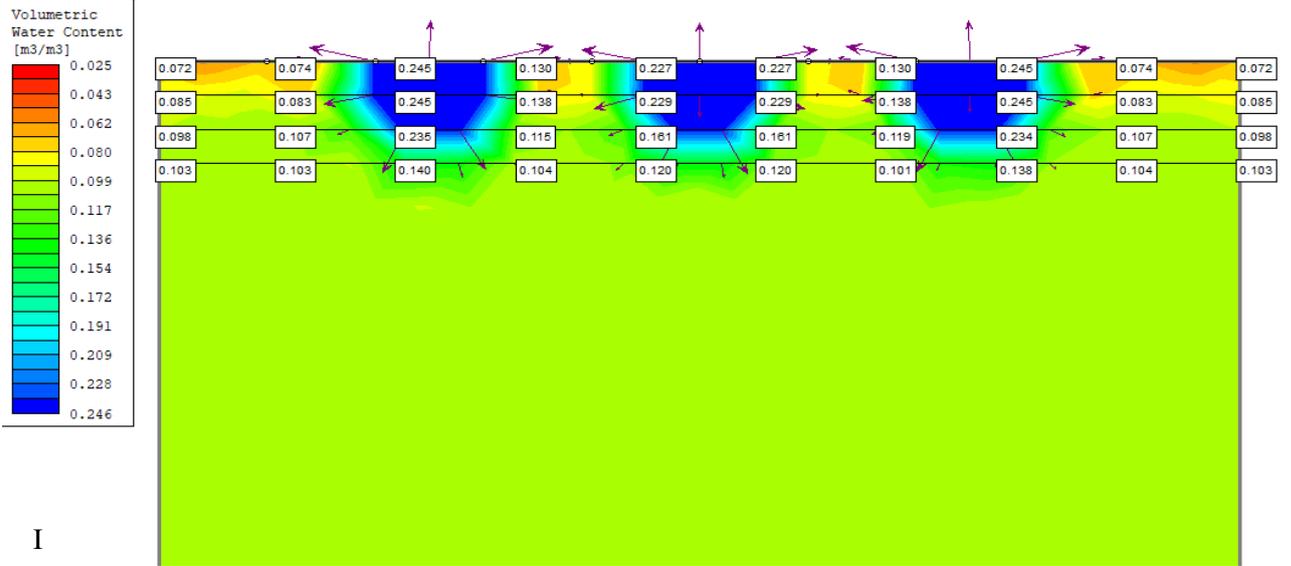
Fonte: Retirado do software SLIDE pela autora, 2020.

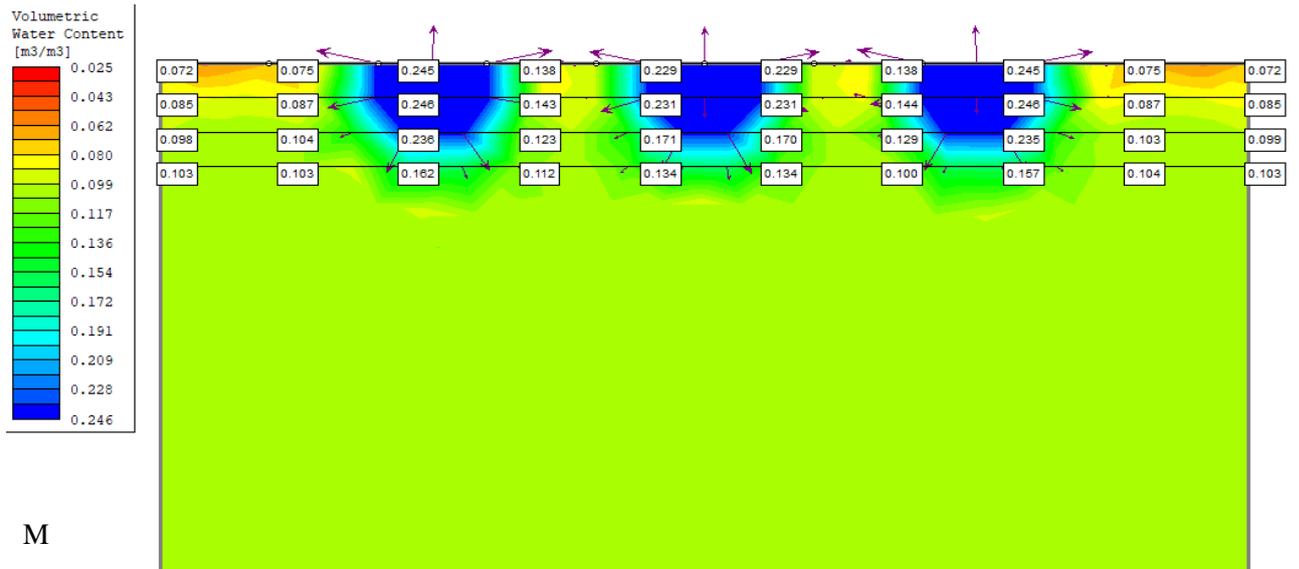
Figura 27 – Resultado da simulação durante a irrigação com profundidade do tubo gotejador a 10 cm, 75 cm entre emissores e 30 cm entre plantas. Figura 27A: inicial; Figura 27B: 10 min; Figura 27C: 15 min; Figura 27D: 20 min; Figura 27E: 25 min; Figura 27F: 30 min; Figura 27G: 35 min; Figura 27H: 40 min; Figura 27I: 45 min; Figura 27J: 50 min; Figura 27L: 55 min; Figura 27M: 60 min.







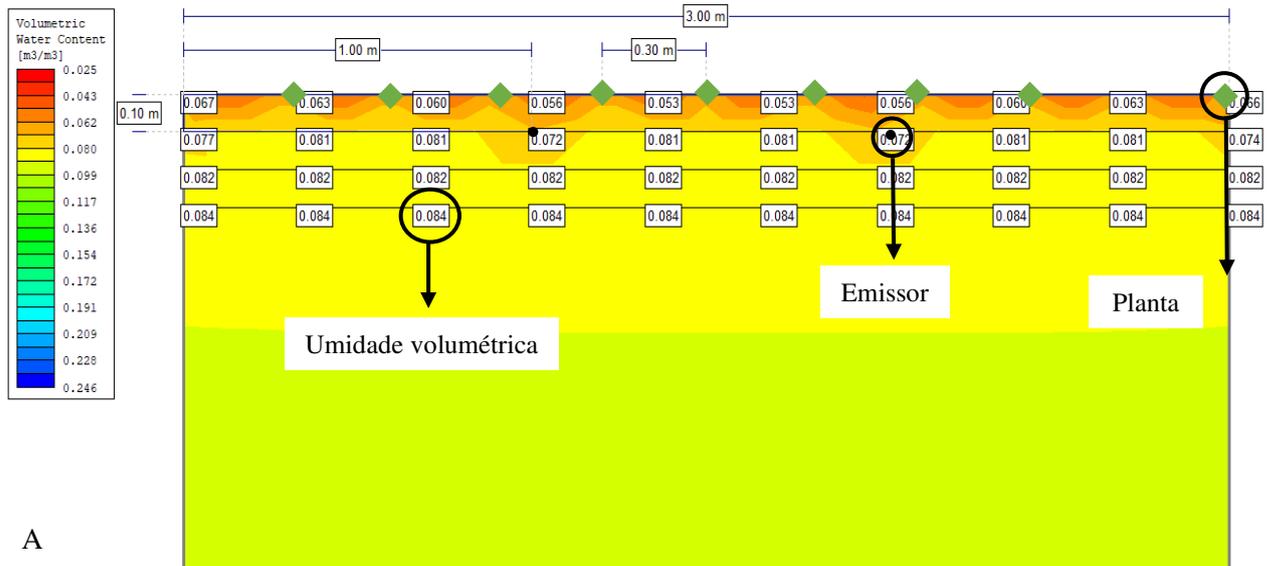




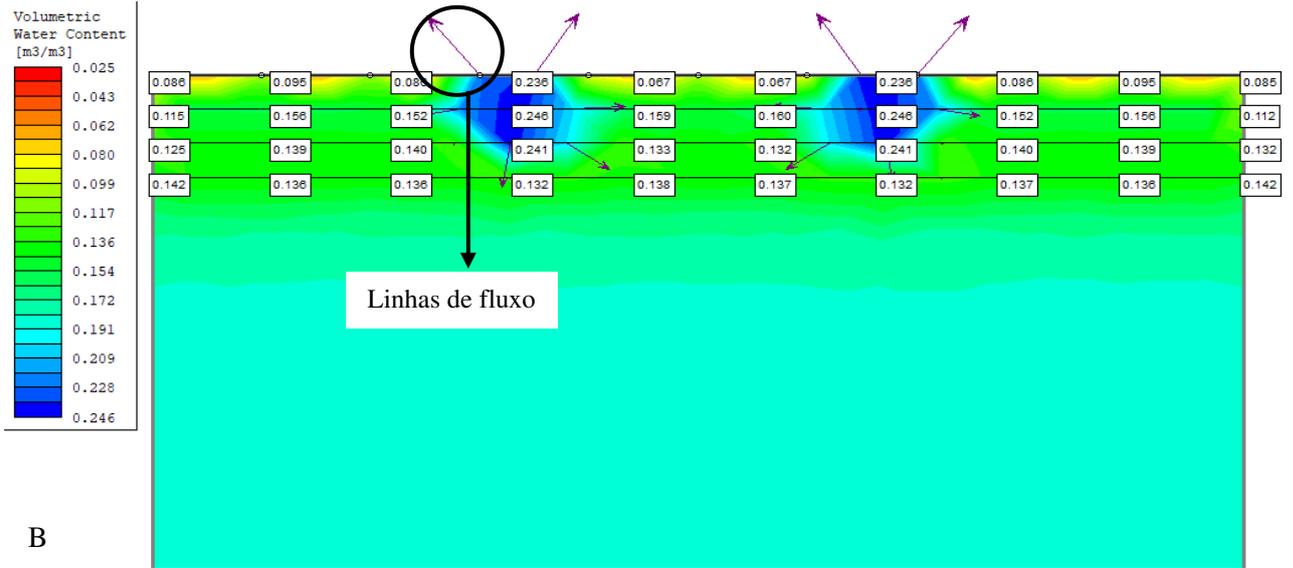
M

Fonte: Retirado do software SLIDE pela autora, 2020.

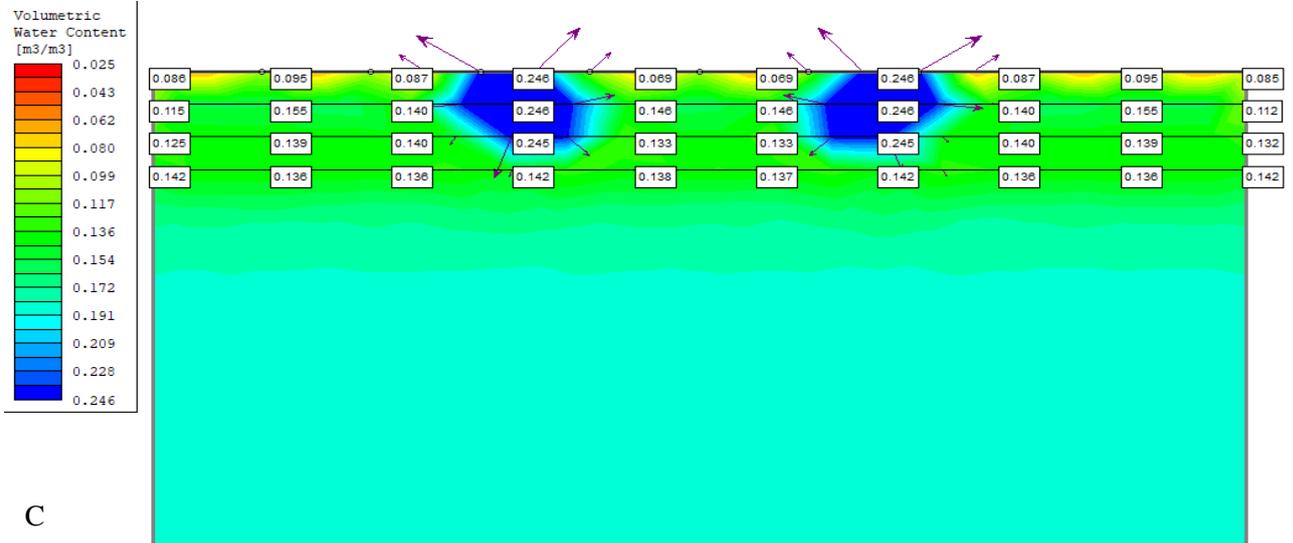
Figura 28 – Resultado da simulação durante a irrigação com profundidade do tubo gotejador a 10 cm, 100 cm entre emissores e 30 cm entre plantas. Figura 28A: inicial; Figura 28B: 10 min; Figura 28C: 15 min; Figura 28D: 20 min; Figura 28E: 25 min; Figura 28F: 30 min; Figura 28G: 35 min; Figura 28H: 40 min; Figura 28I: 45 min; Figura 28J: 50 min; Figura 28L: 55 min; Figura 28M: 60 min.



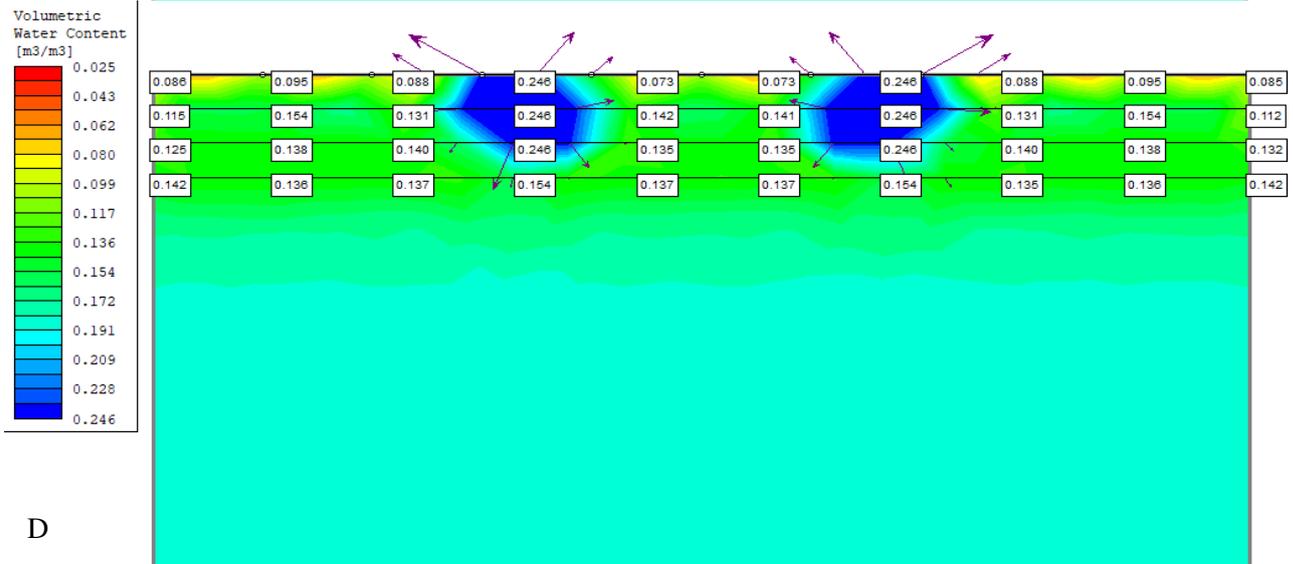
A



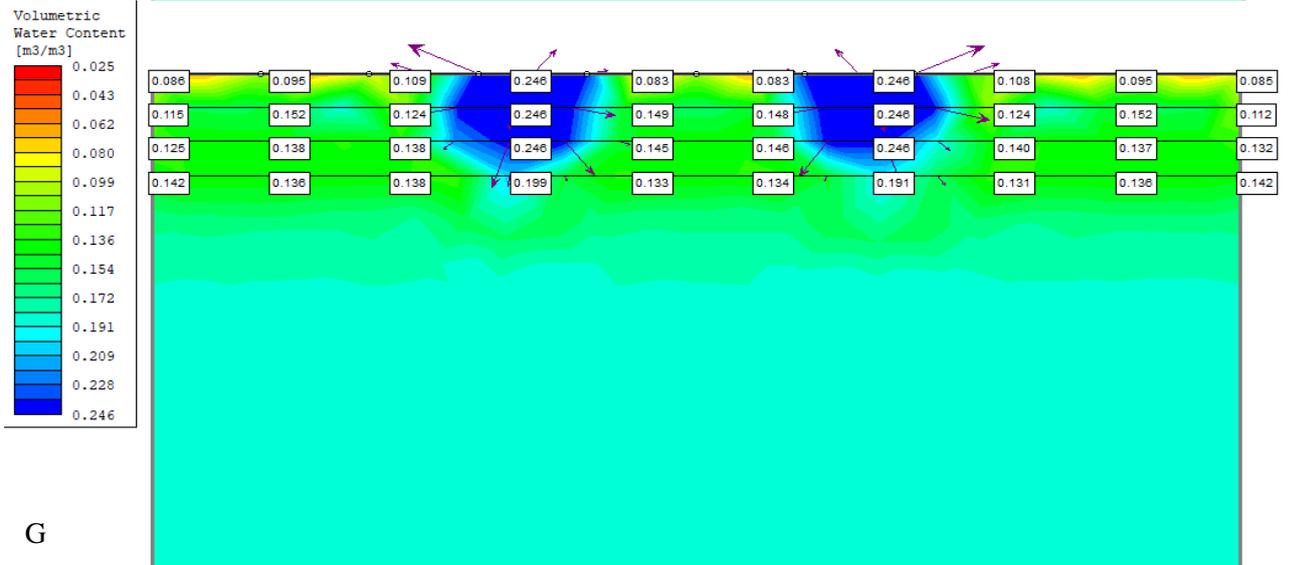
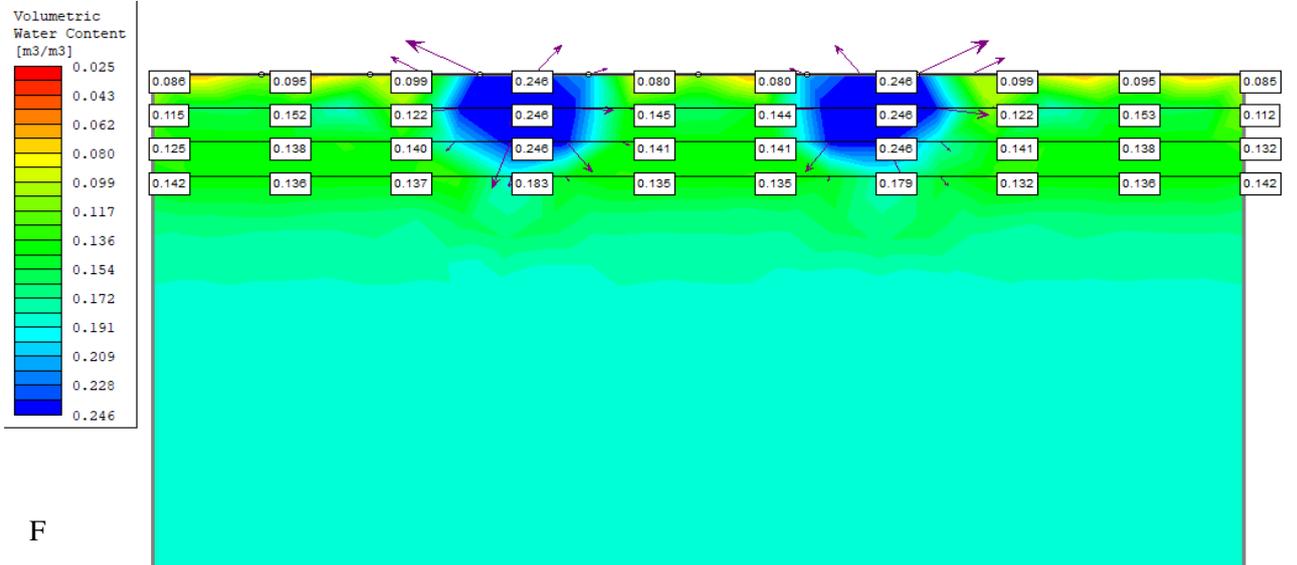
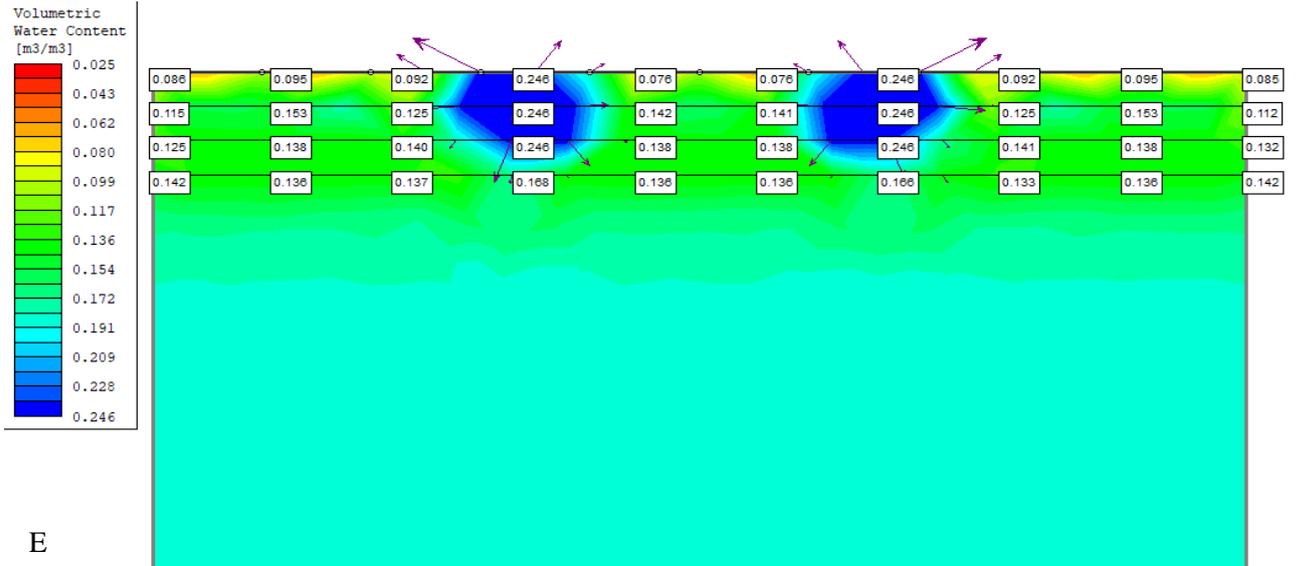
B

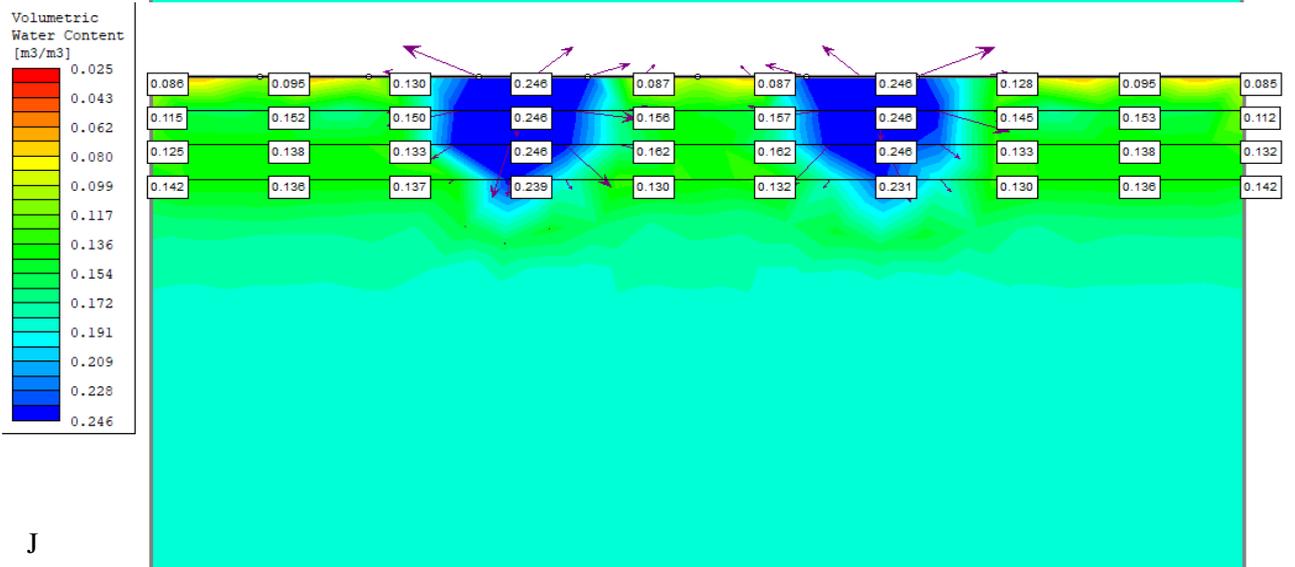
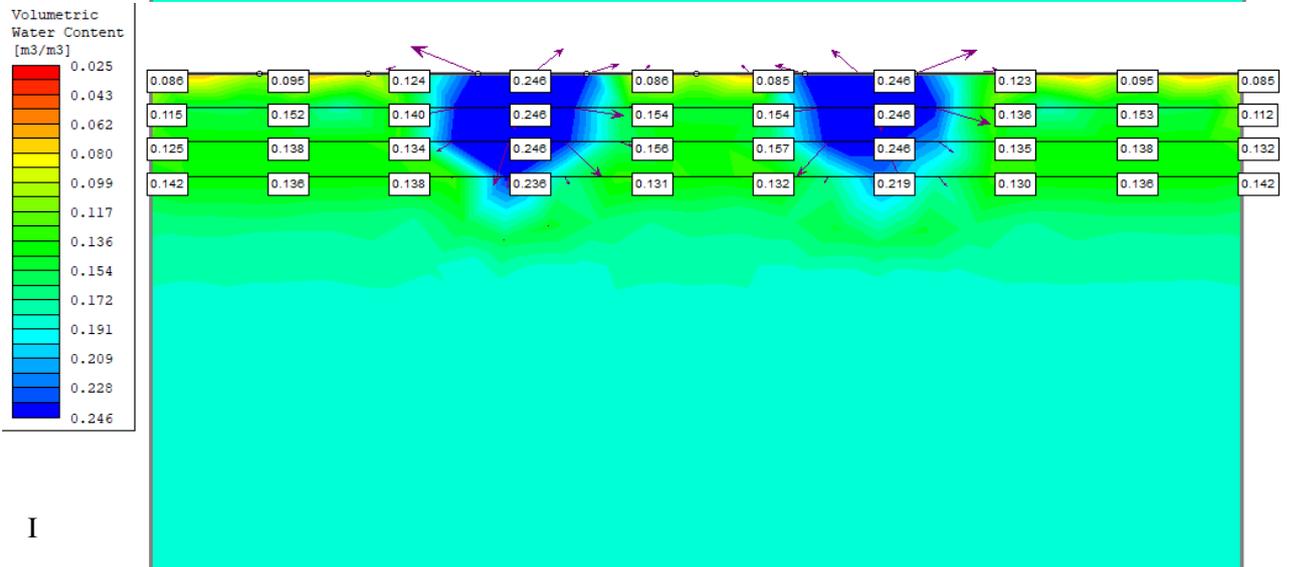
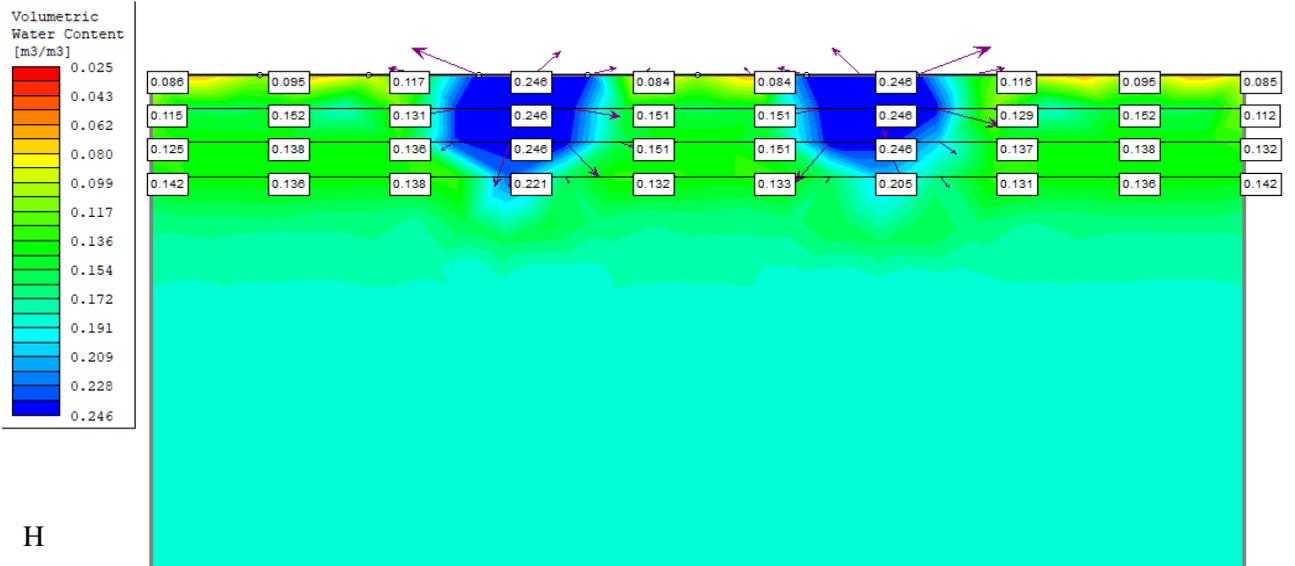


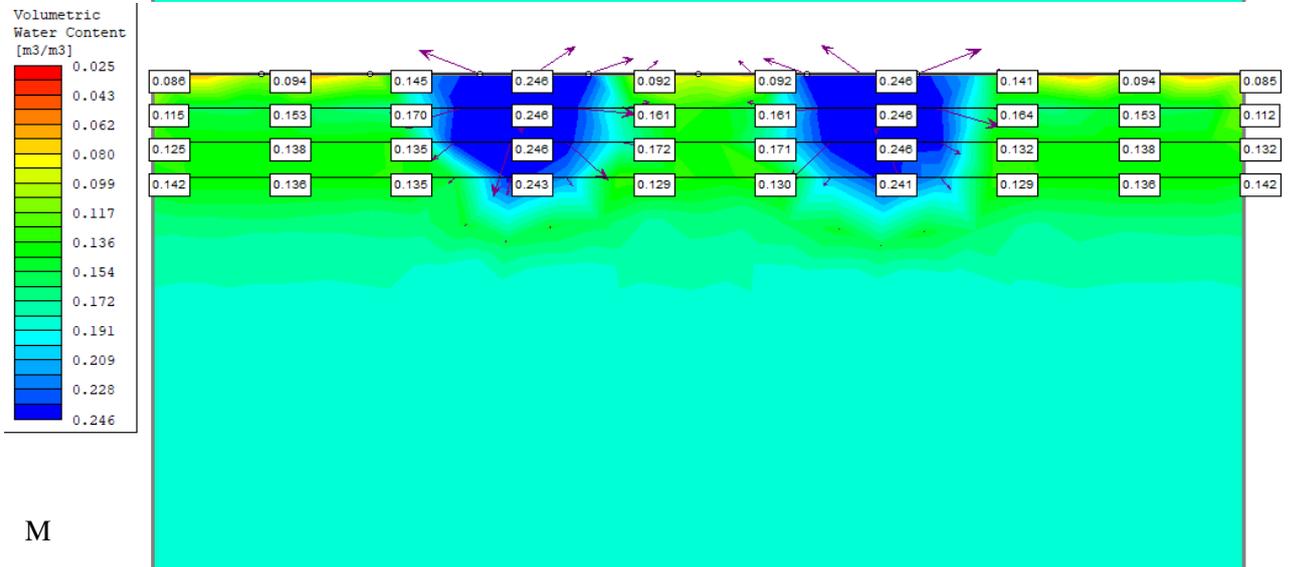
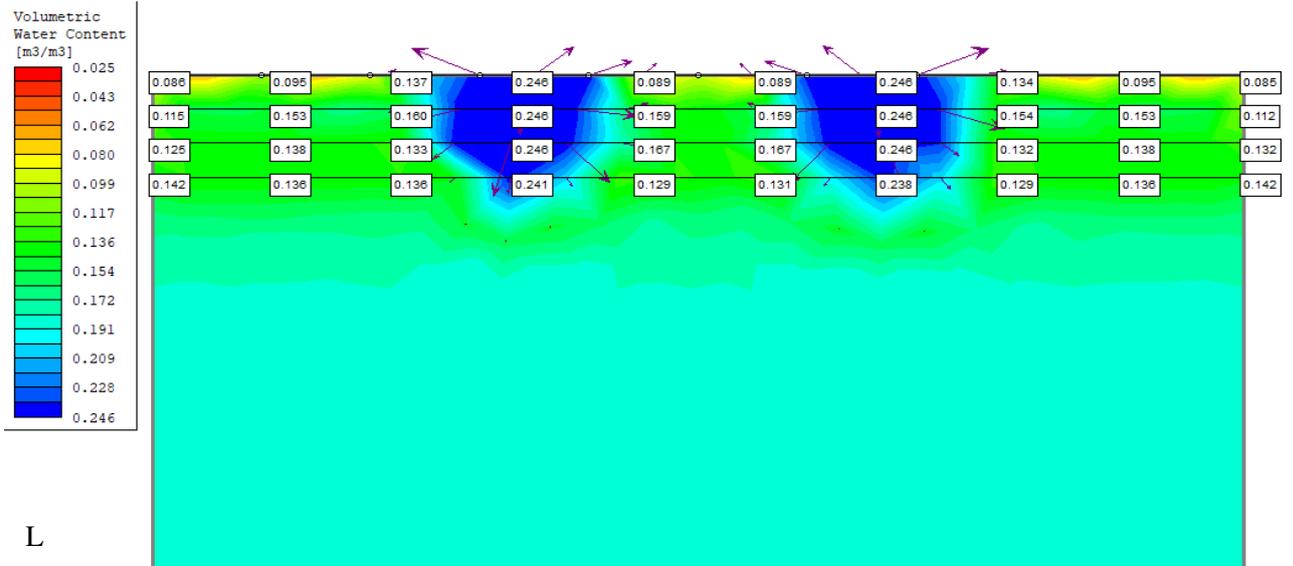
C



D

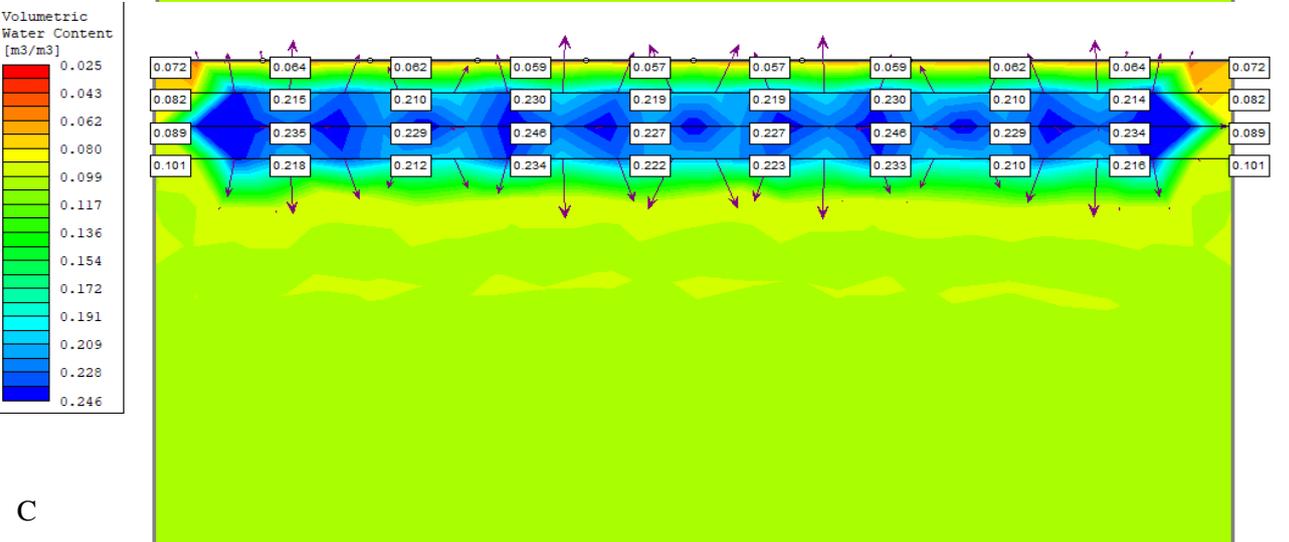
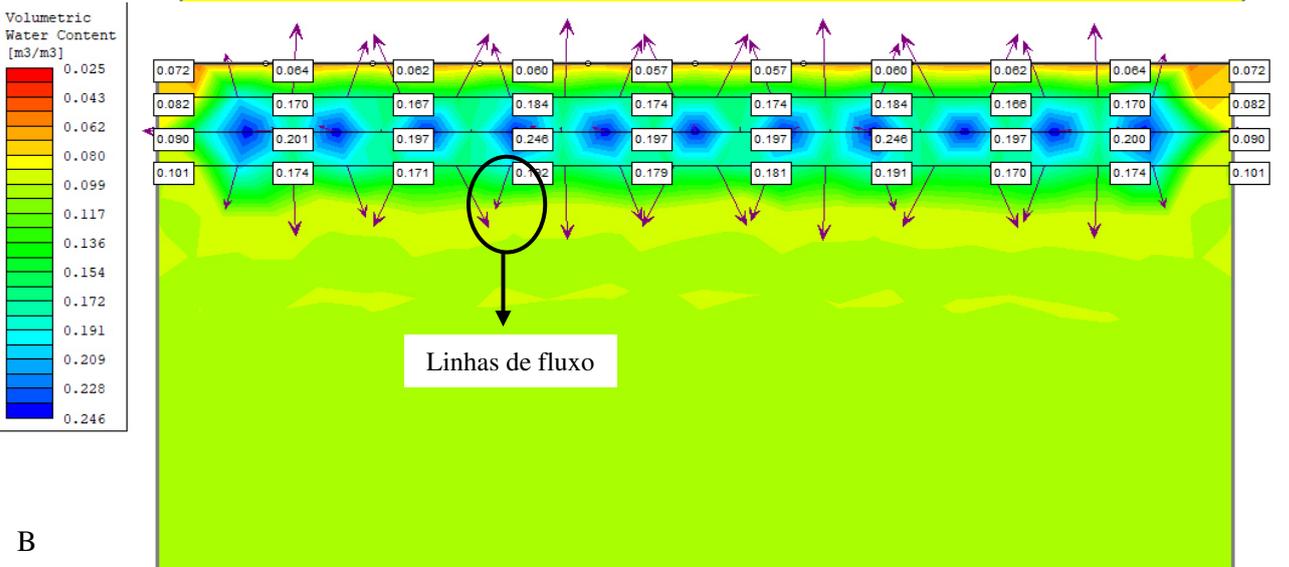
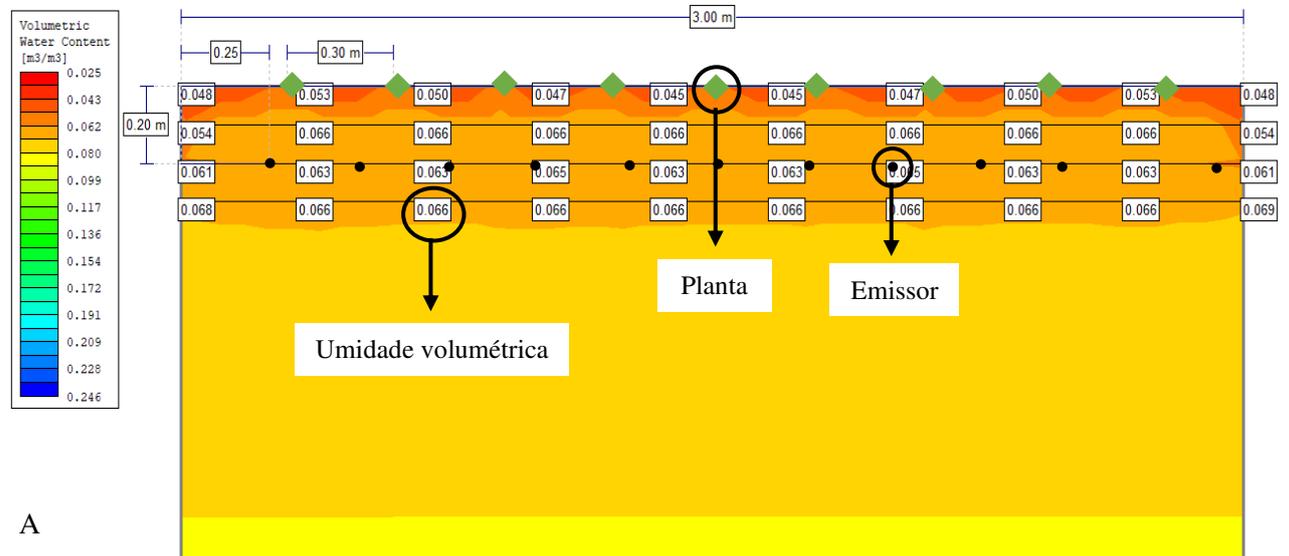


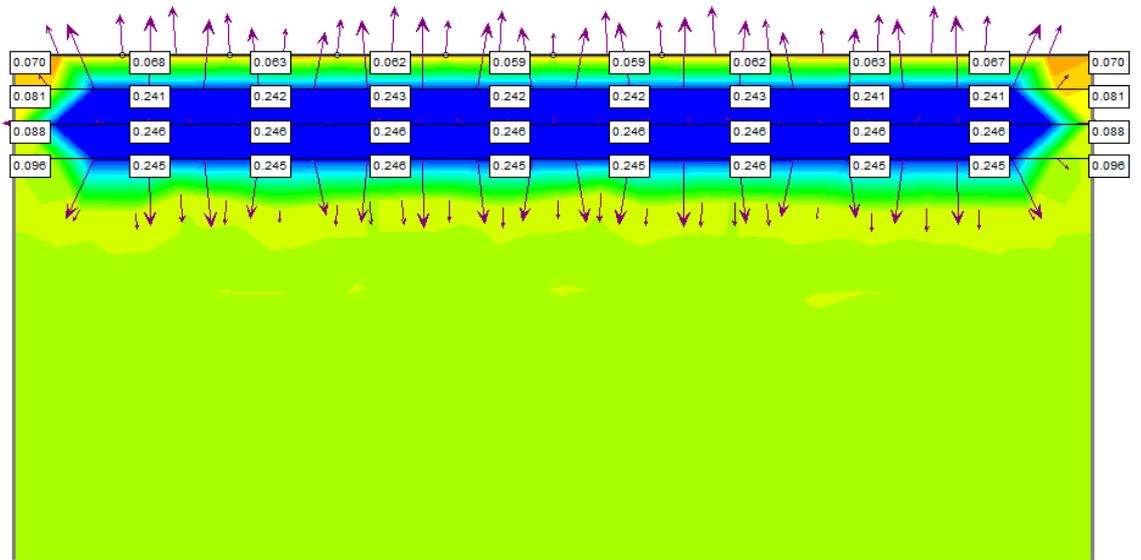
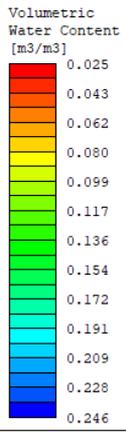




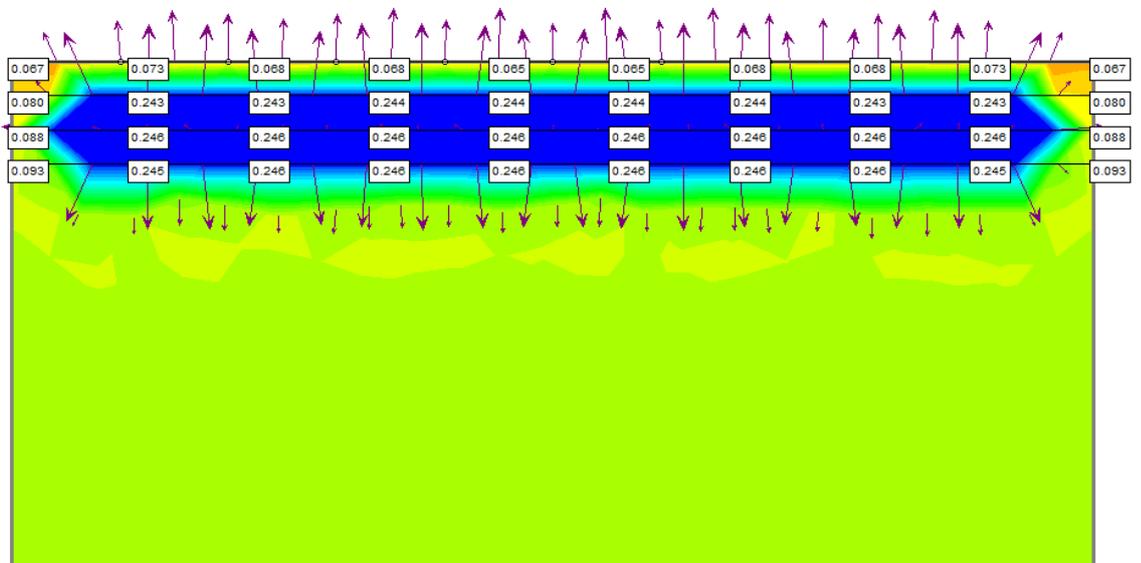
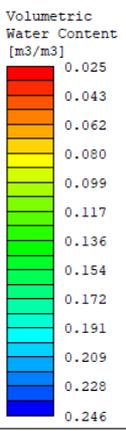
Fonte: Retirado do software SLIDE pela autora, 2020.

Figura 29 – Resultado da simulação durante a irrigação com profundidade do tubo gotejador a 20 cm, 25 cm entre emissores e 30 cm entre plantas. Figura 29A: inicial; Figura 29B: 10 min; Figura 29C: 15 min; Figura 29D: 20 min; Figura 29E: 25 min; Figura 29F: 30 min; Figura 29G: 35 min; Figura 29H: 40 min; Figura 29I: 45 min; Figura 29J: 50 min; Figura 29L: 55 min; Figura 29M: 60 min.

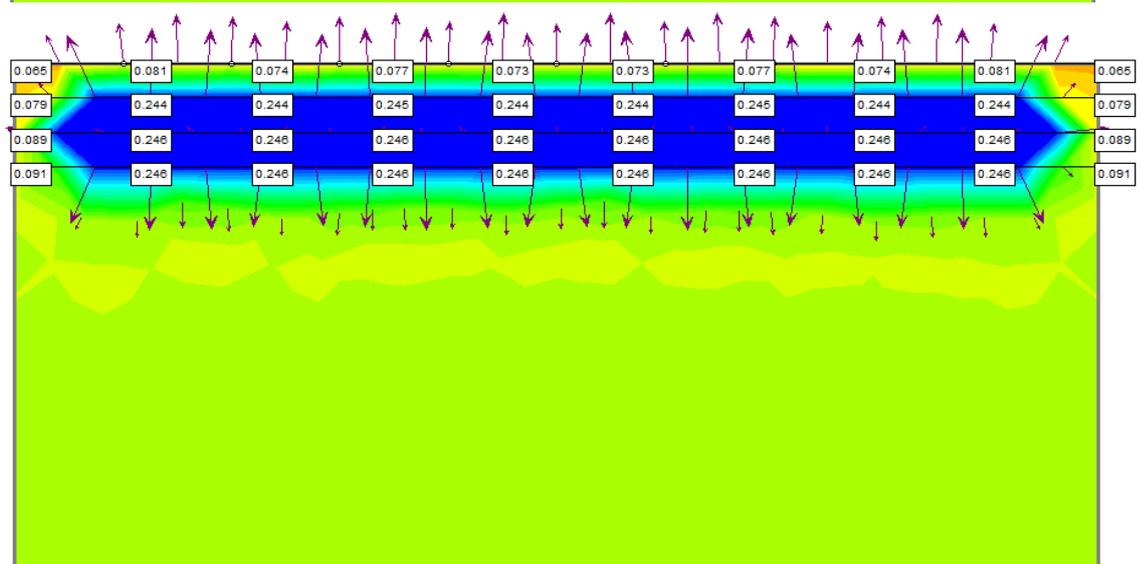
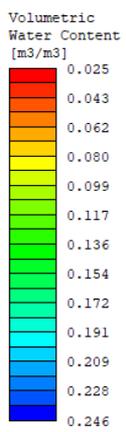




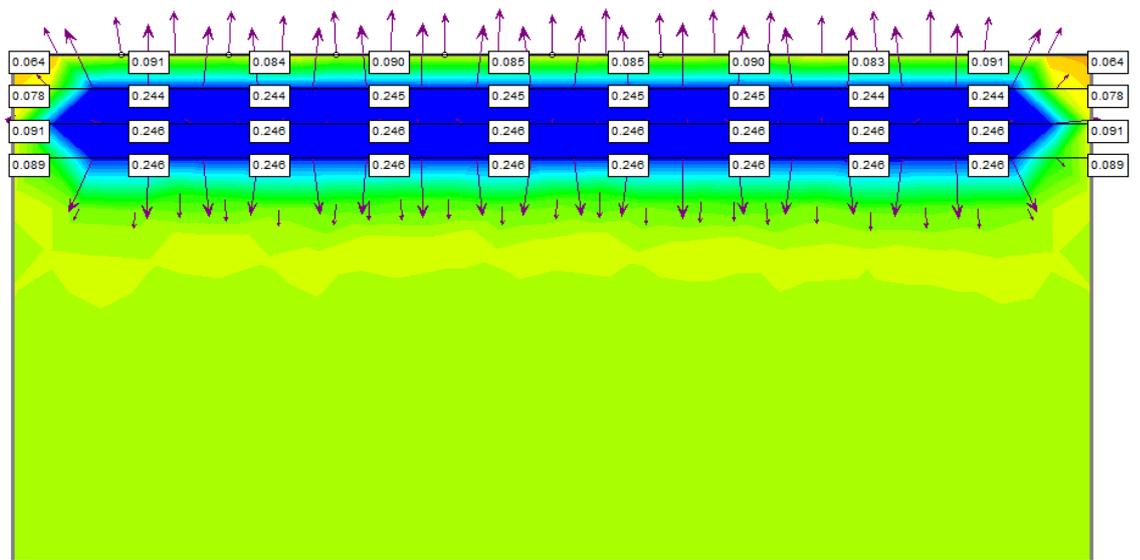
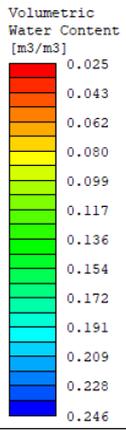
D



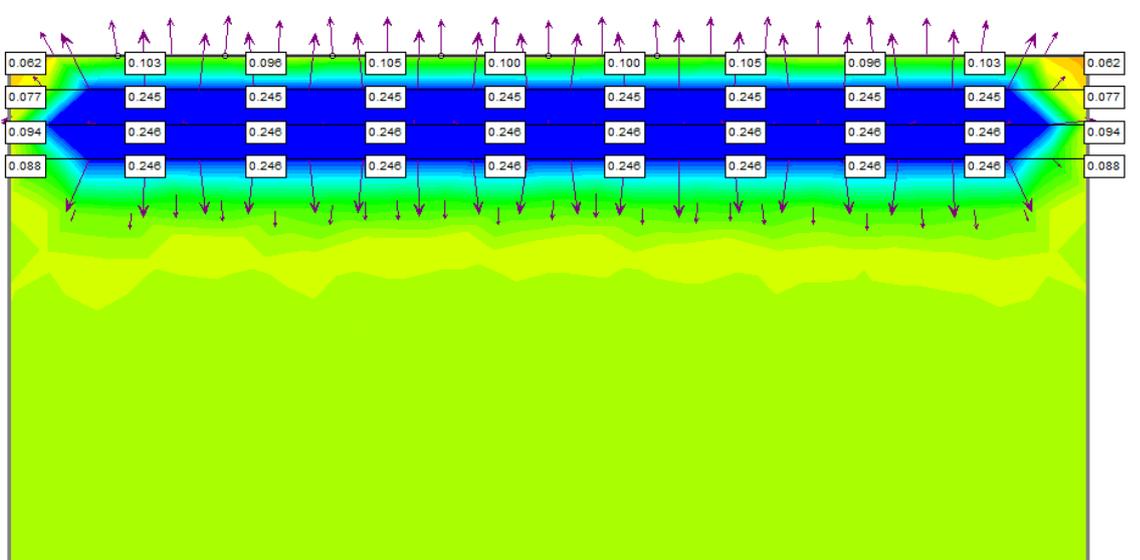
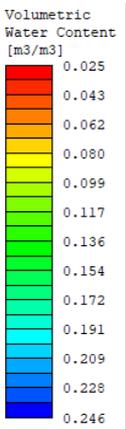
E



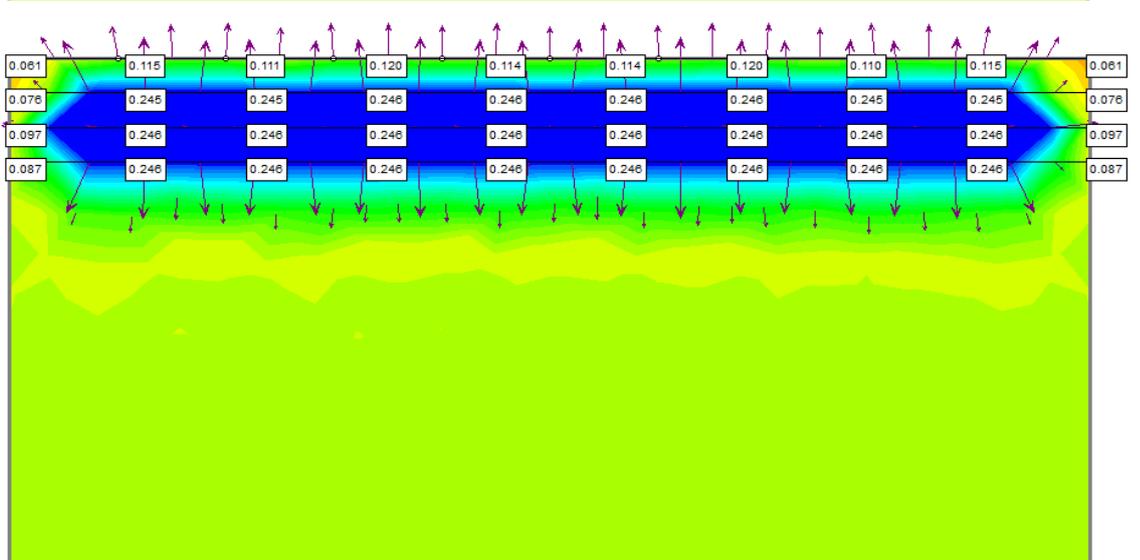
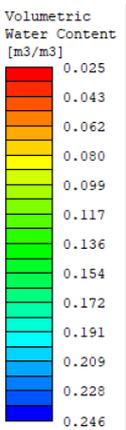
F



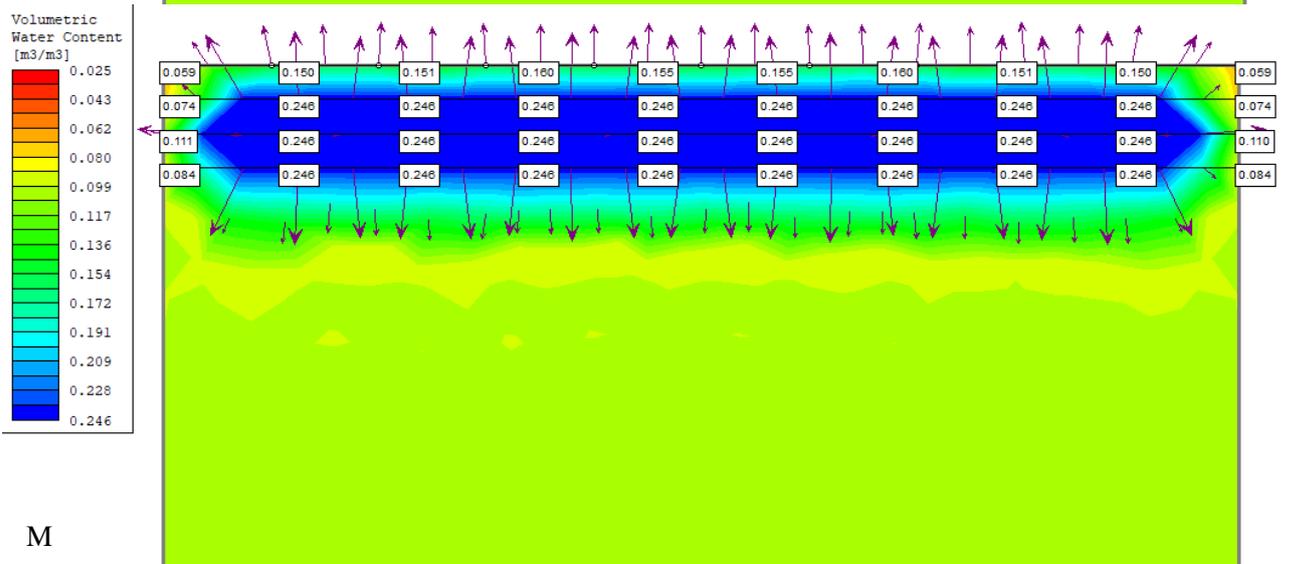
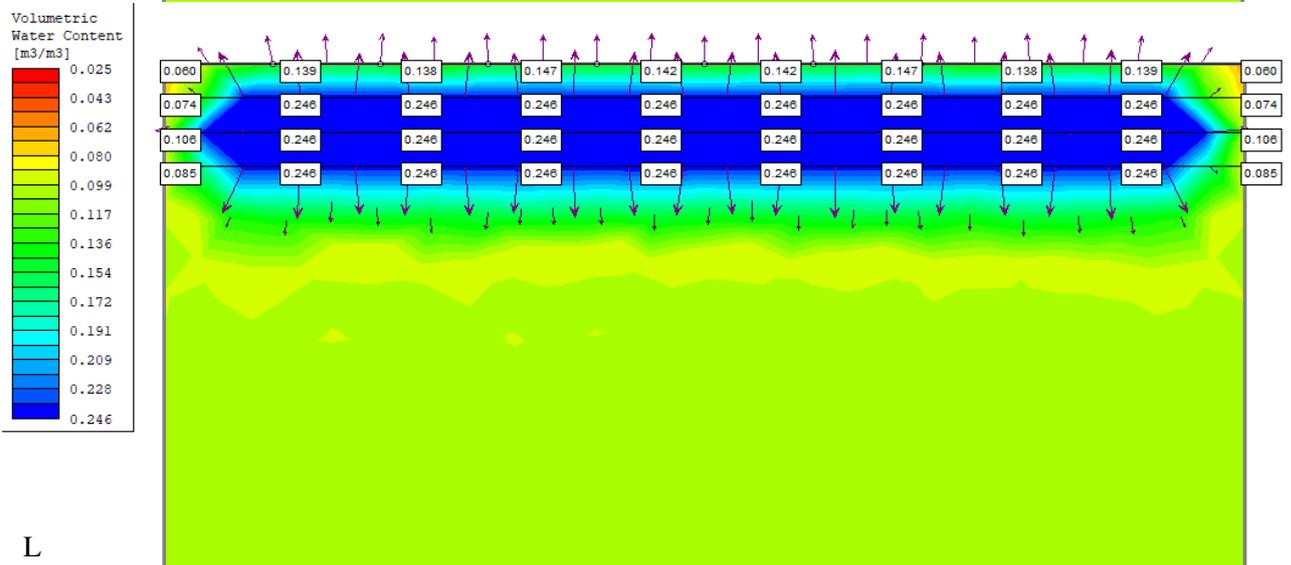
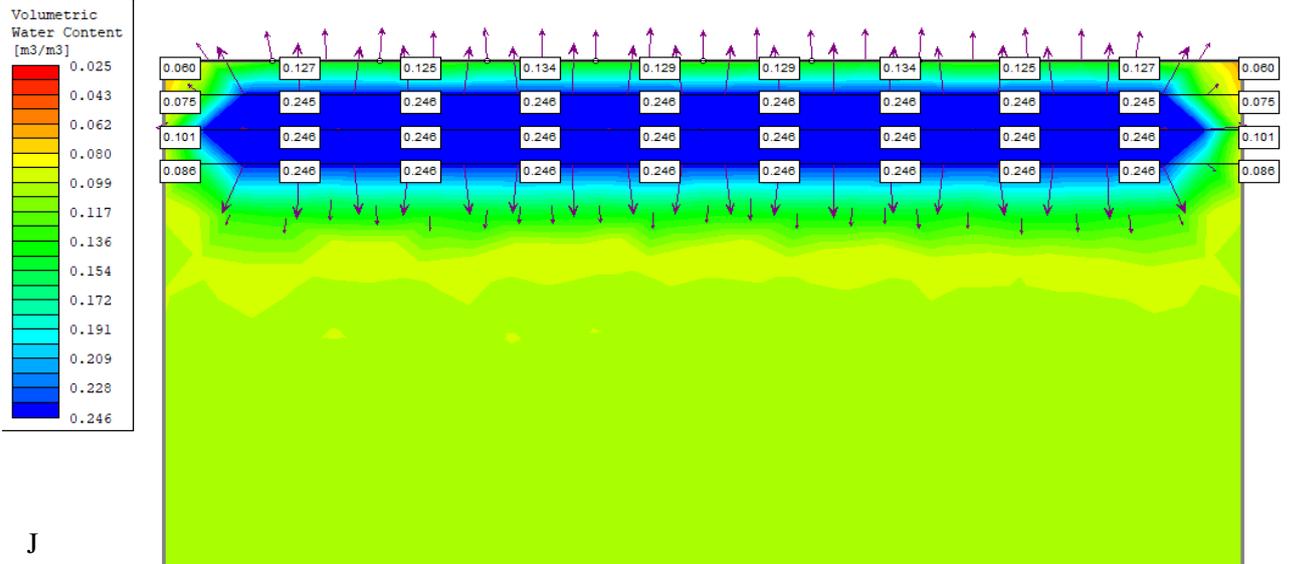
G



H

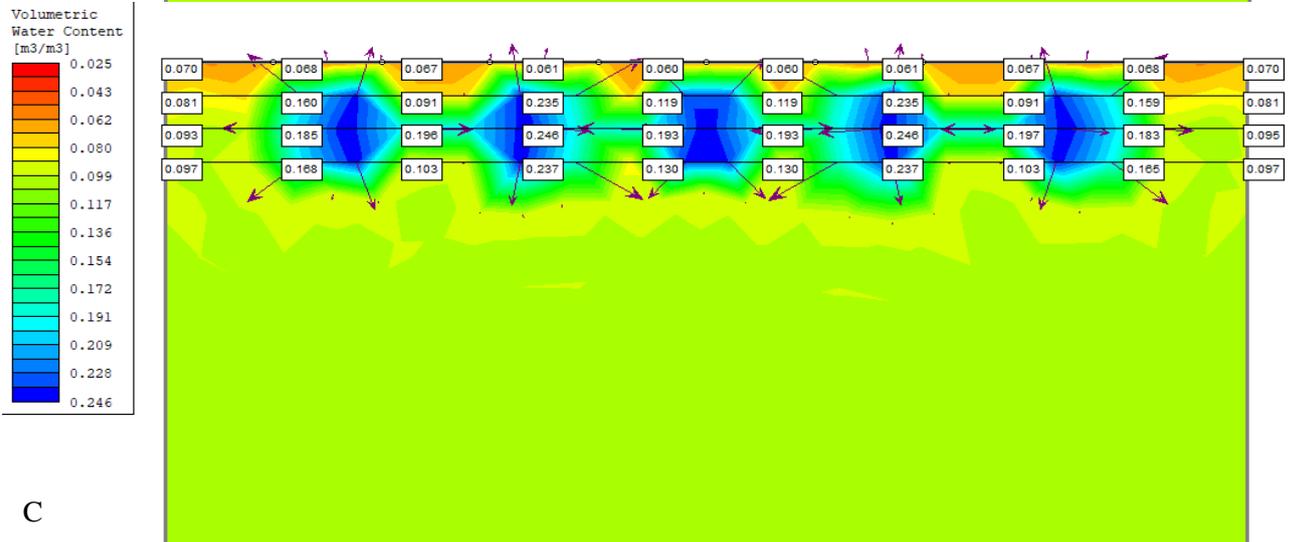
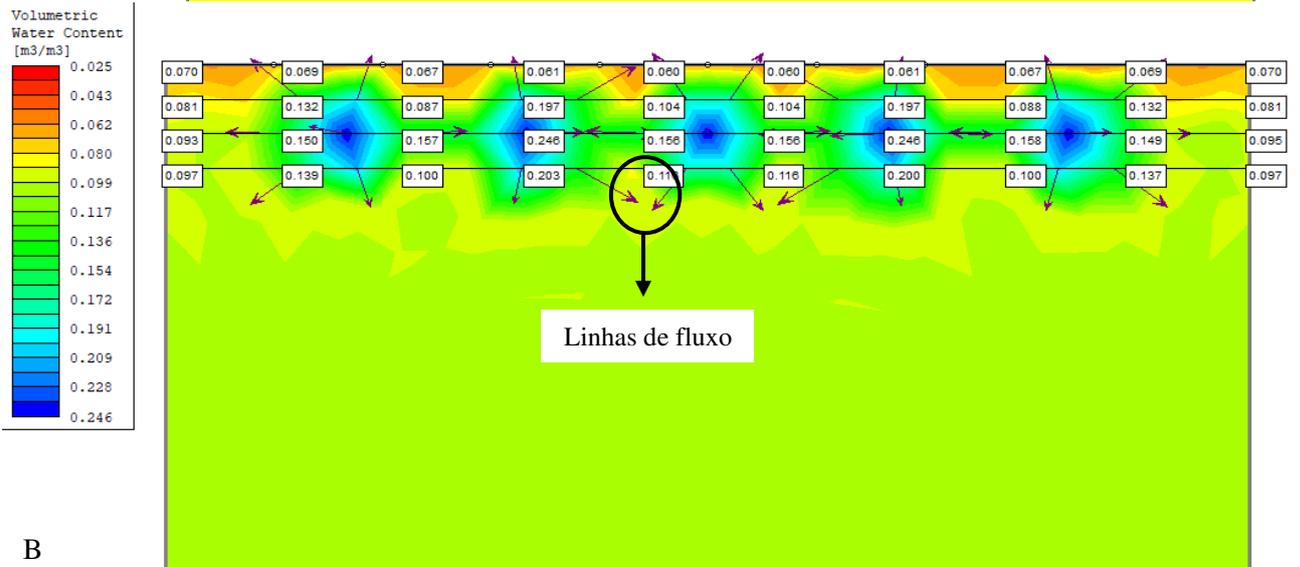
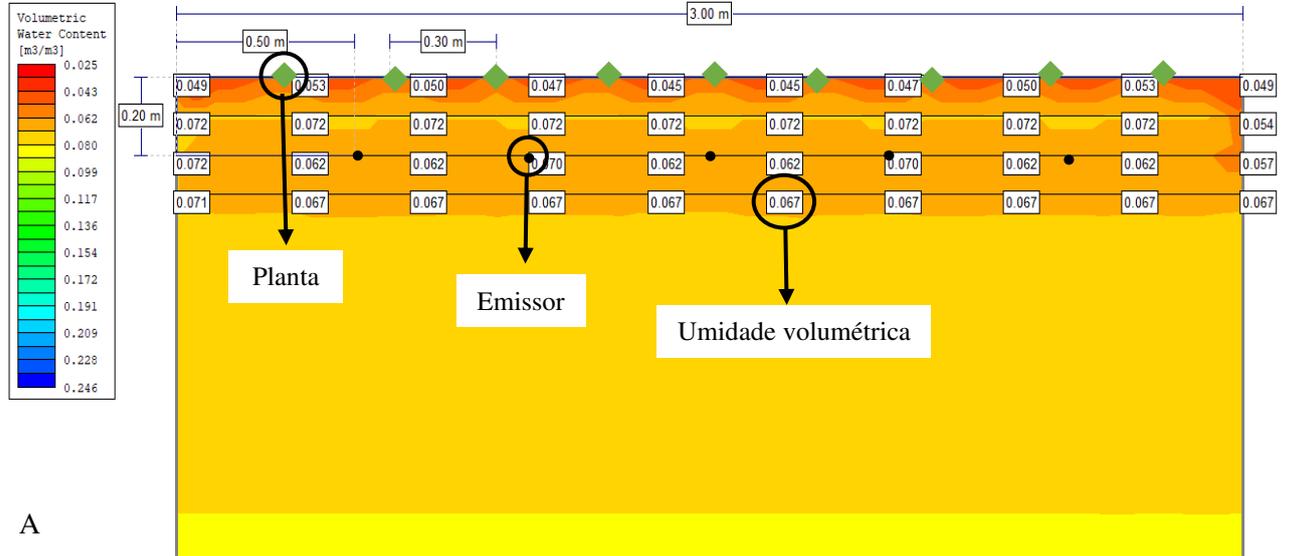


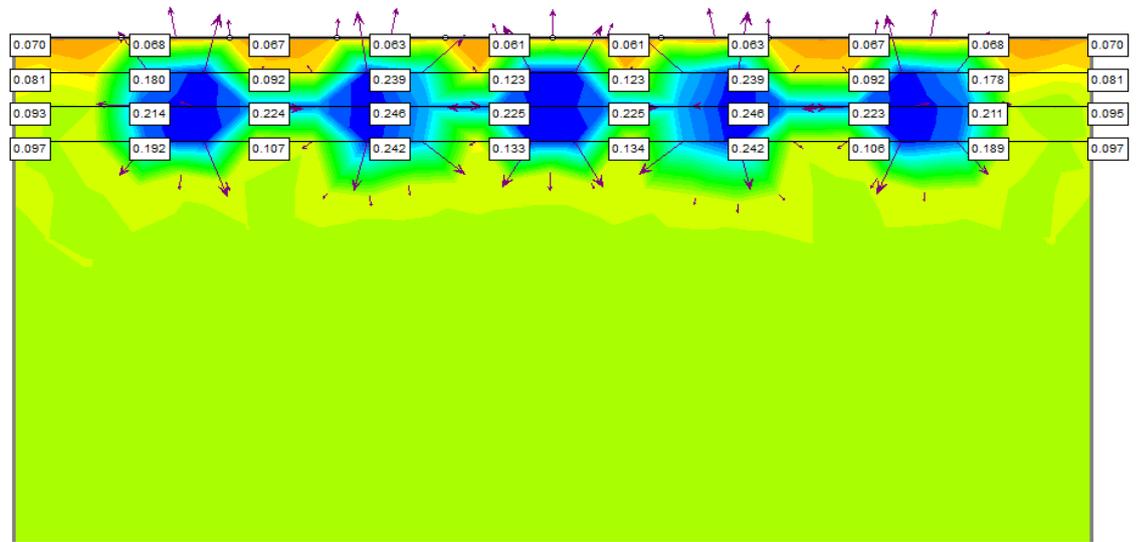
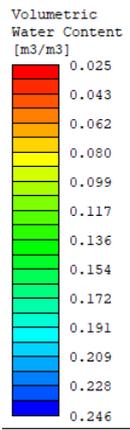
I



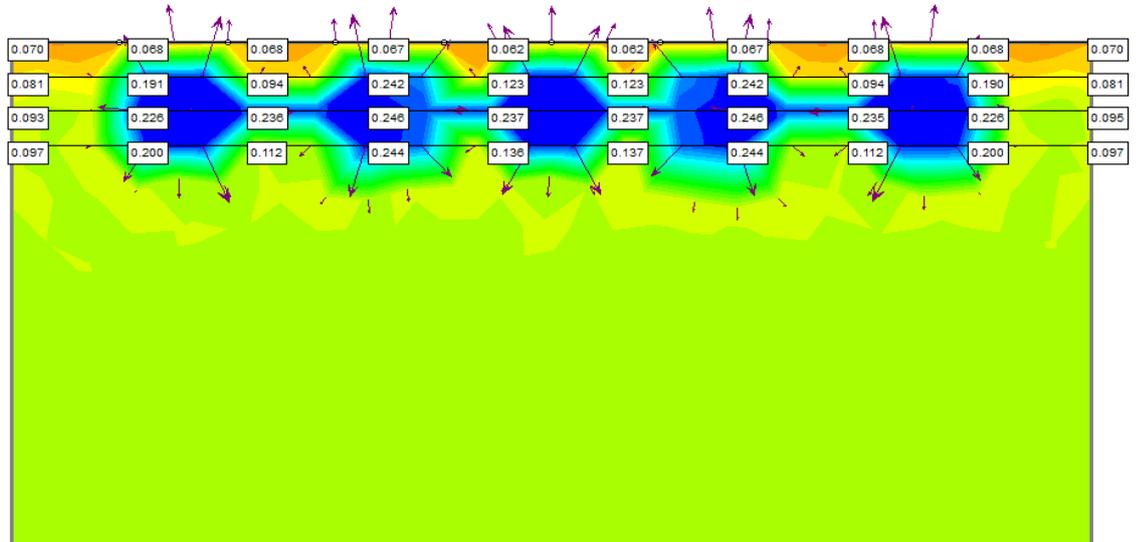
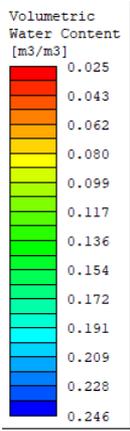
Fonte: Retirado do software SLIDE pela autora, 2020.

Figura 30 – Resultado da simulação durante a irrigação com profundidade do tubo gotejador a 20 cm, 50 cm entre emissores e 30 cm entre plantas. Figura 30A: inicial; Figura 30B: 10 min; Figura 30C: 15 min; Figura 30D: 20 min; Figura 30E: 25 min; Figura 30F: 30 min; Figura 30G: 35 min; Figura 30H: 40 min; Figura 30I: 45 min; Figura 30J: 50 min; Figura 30L: 55 min; Figura 30M: 60 min.

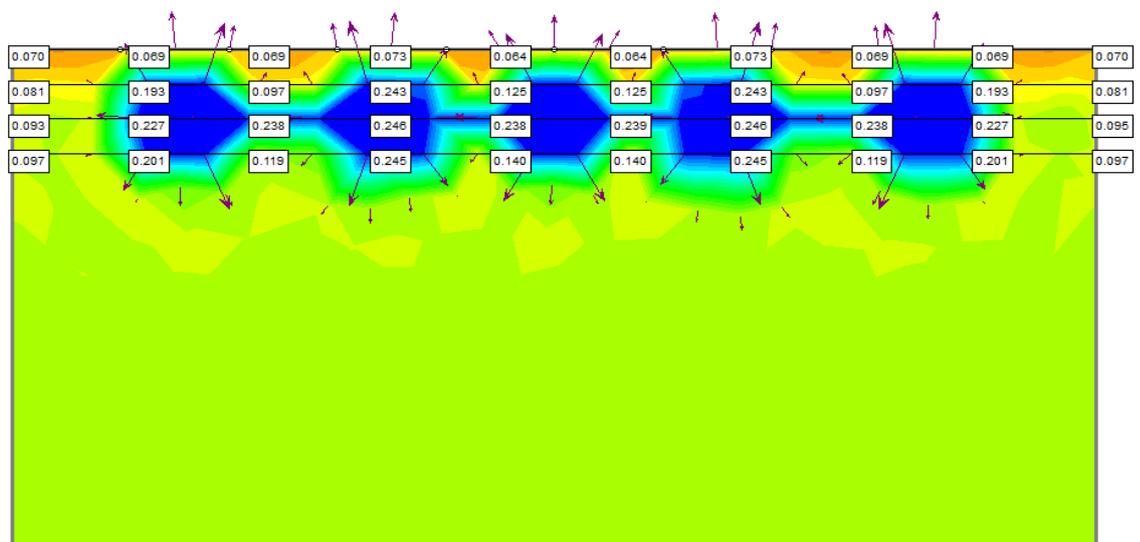
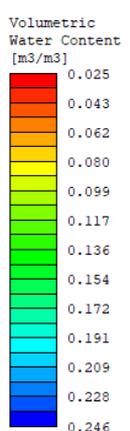




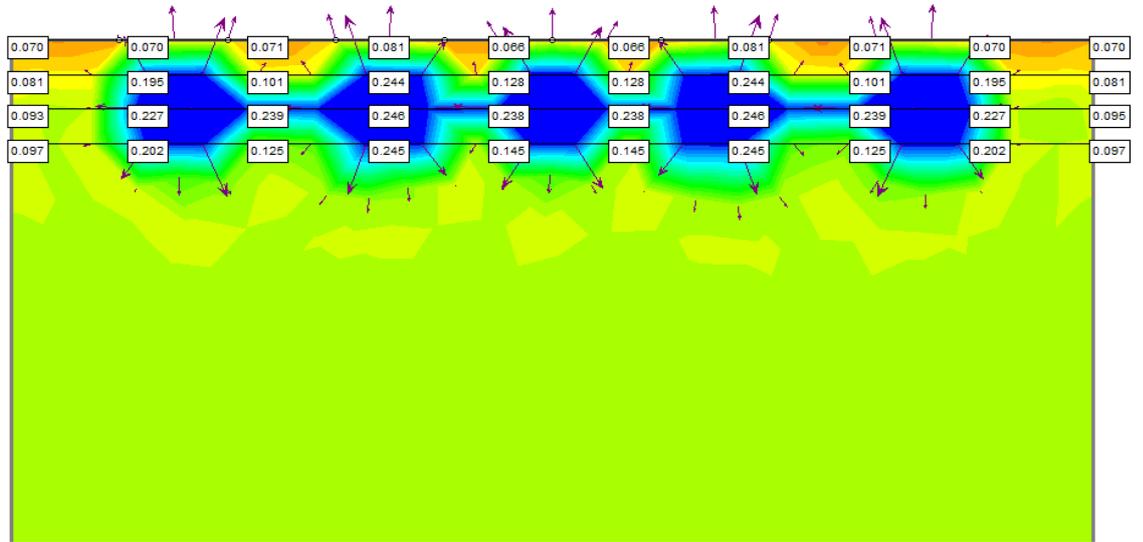
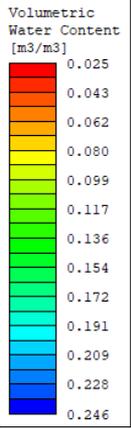
D



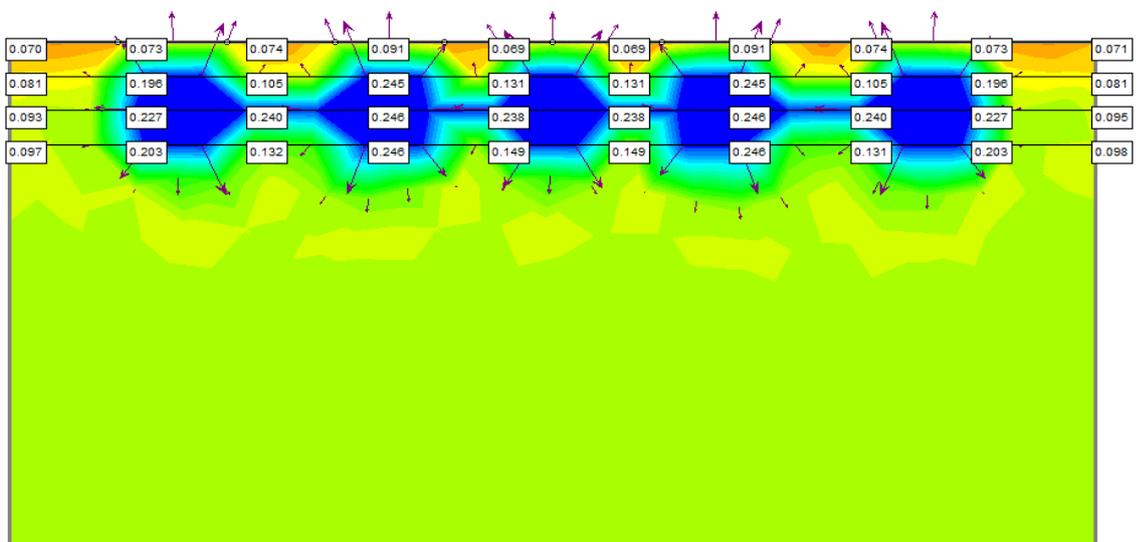
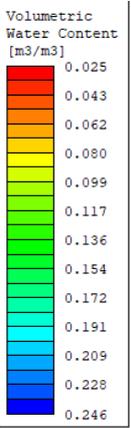
E



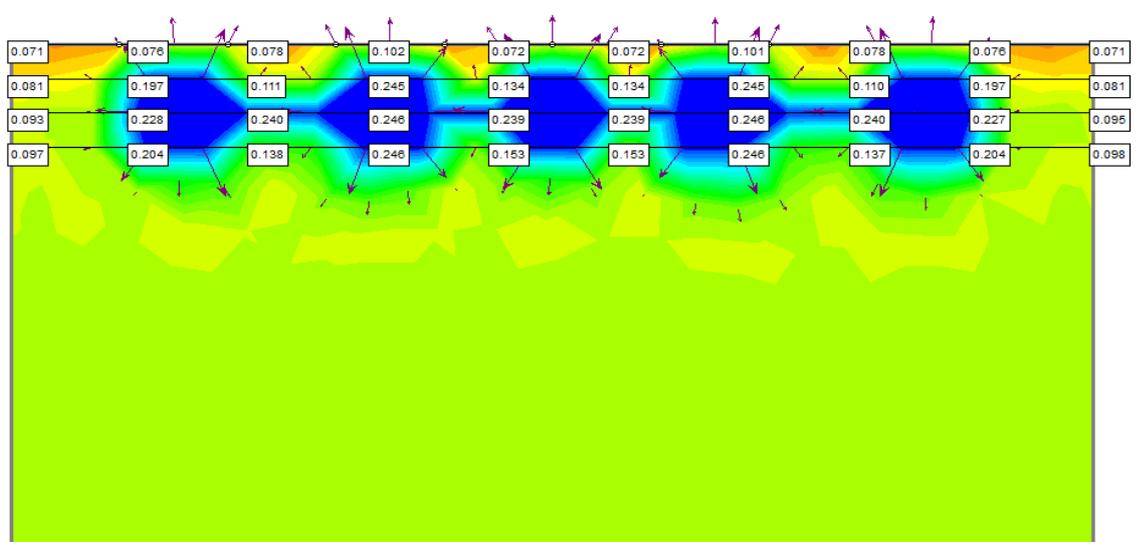
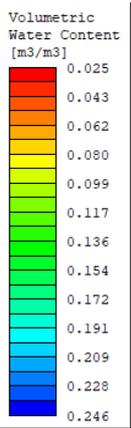
F



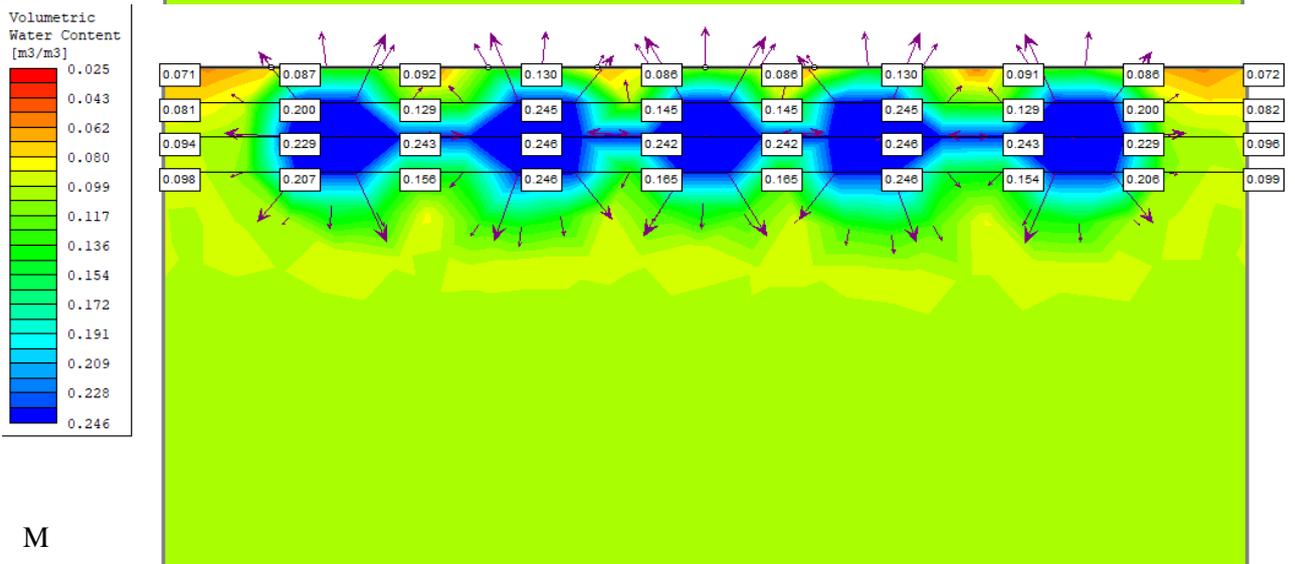
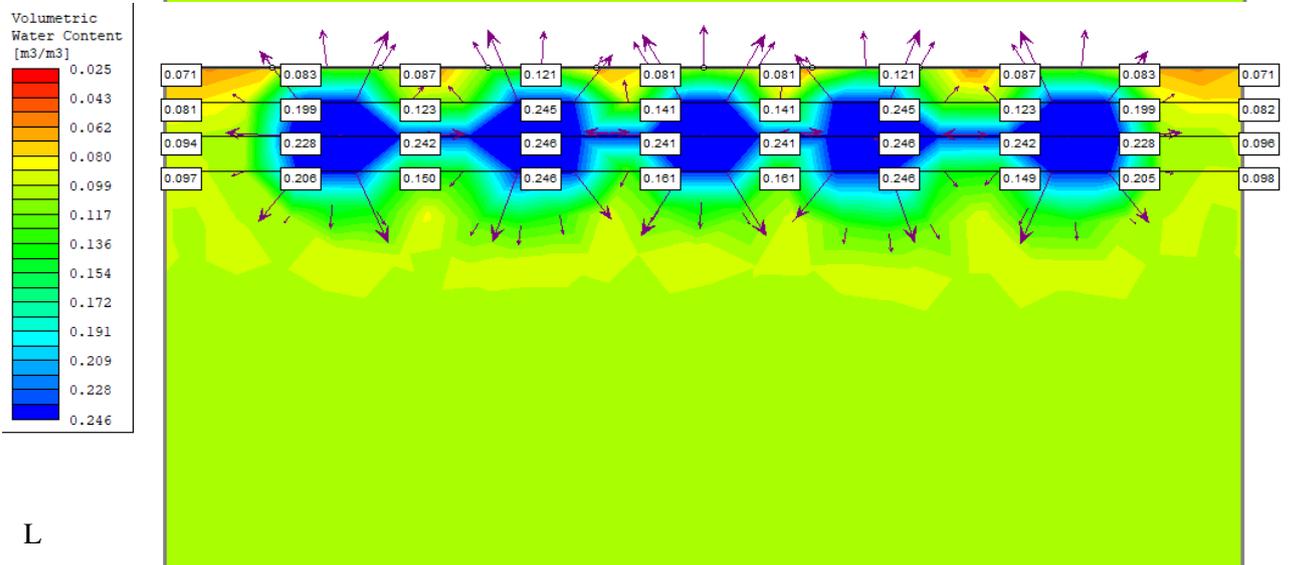
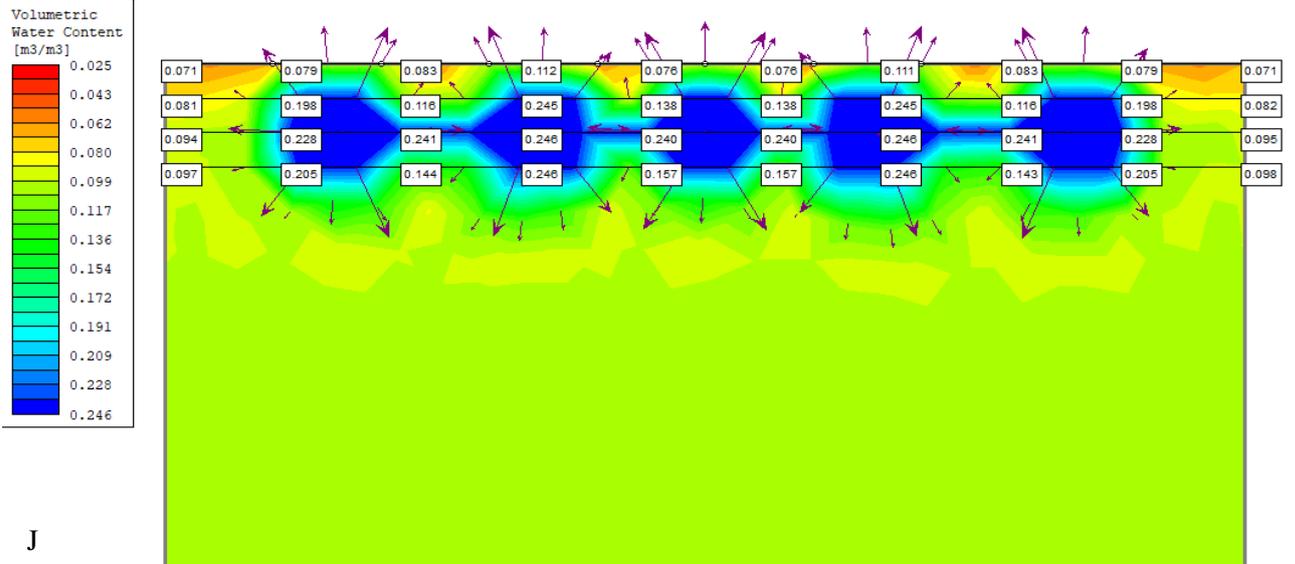
G



H

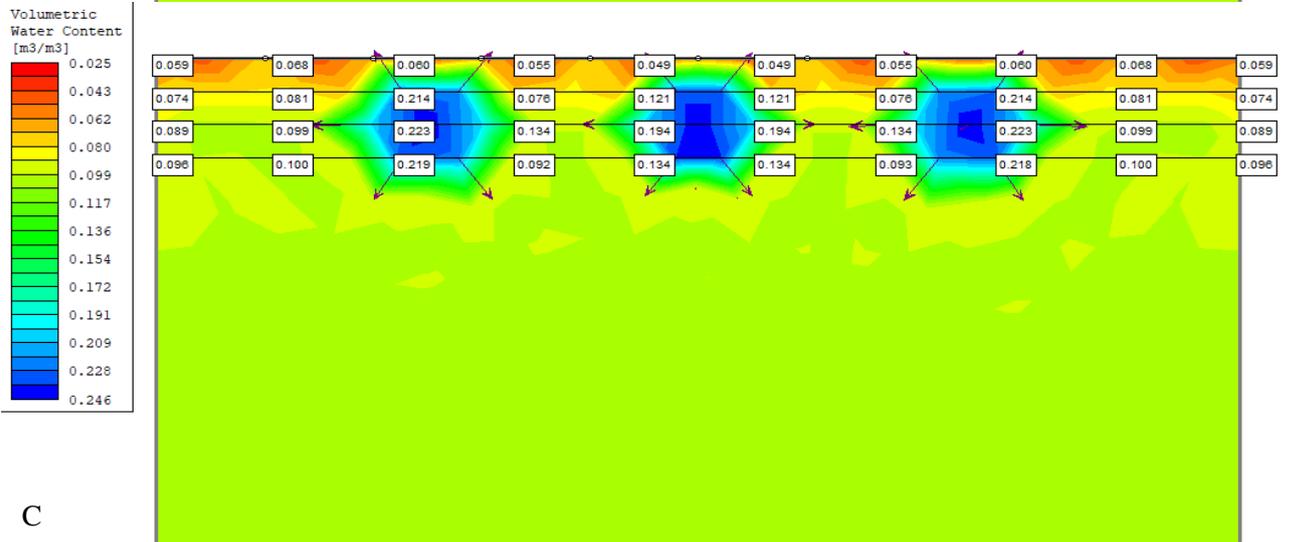
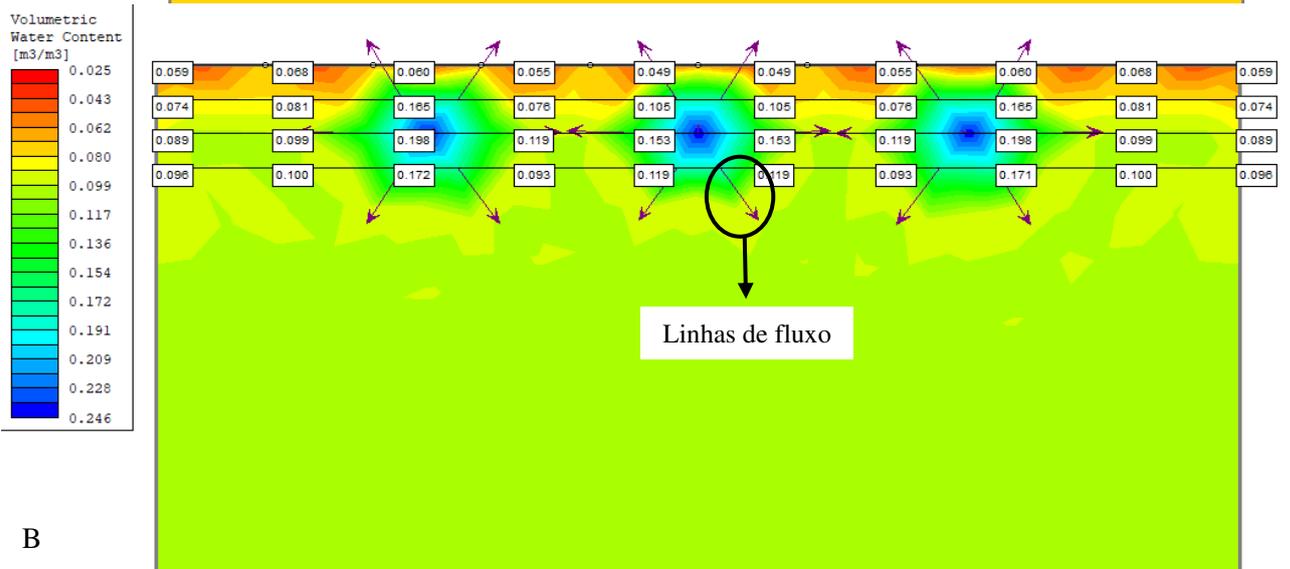
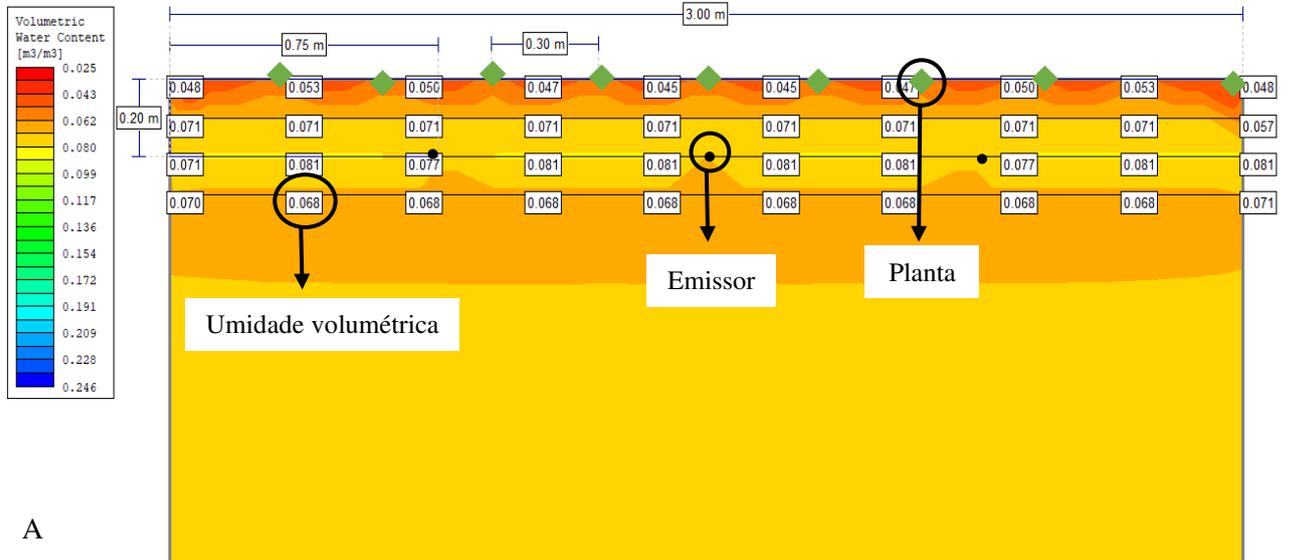


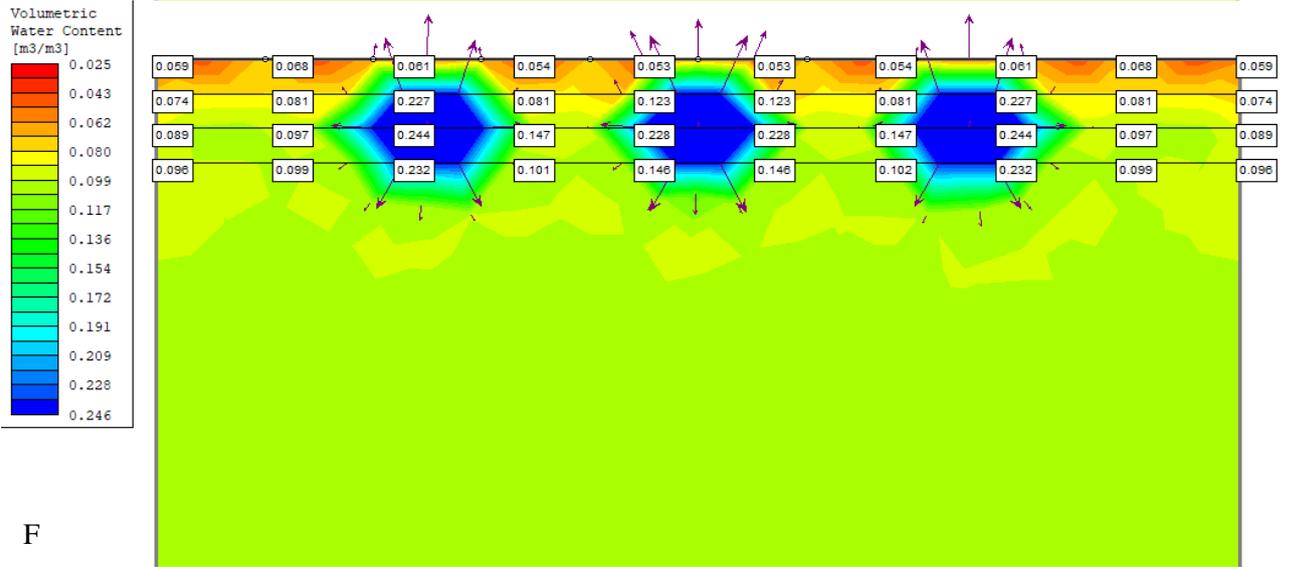
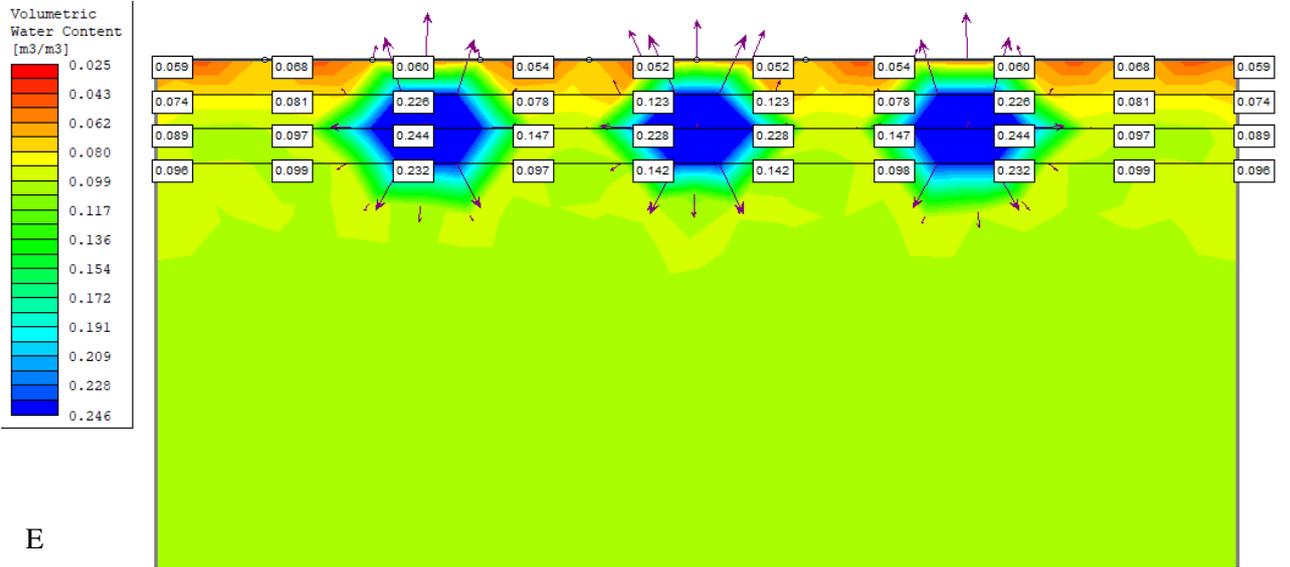
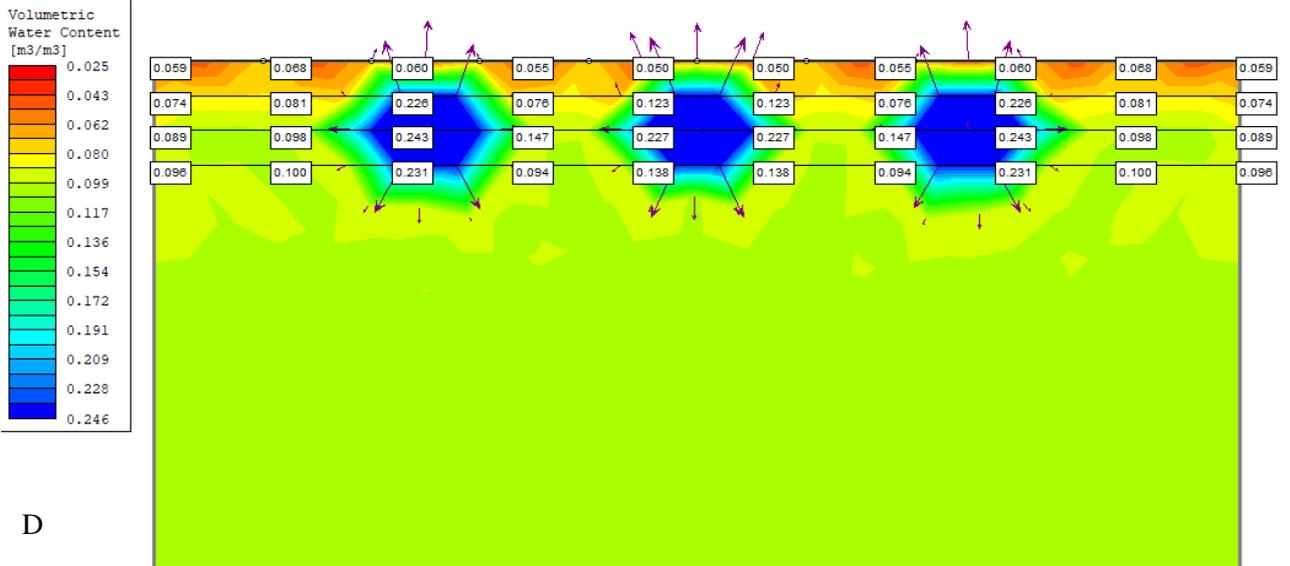
I

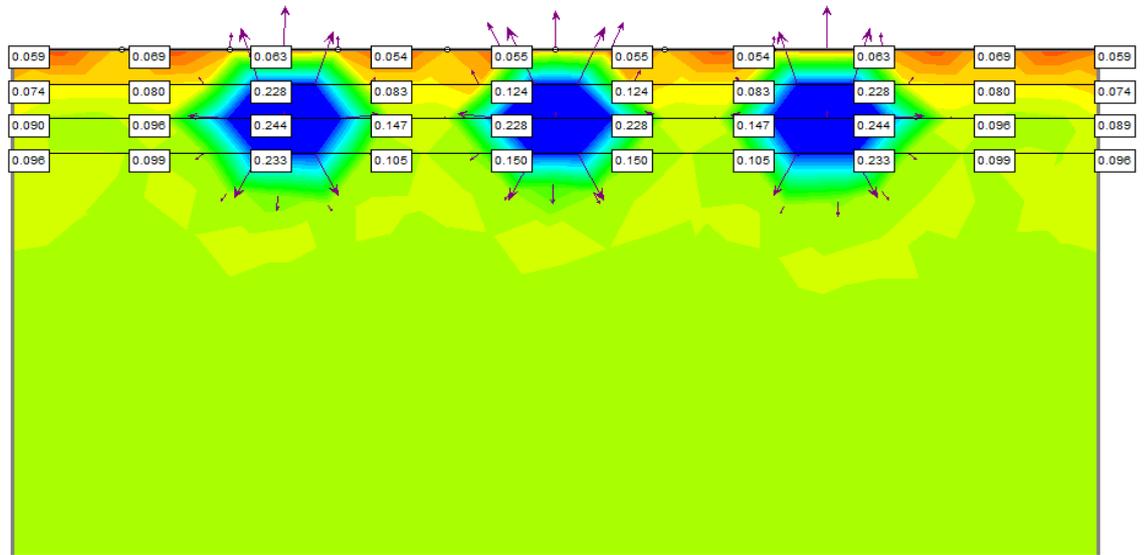
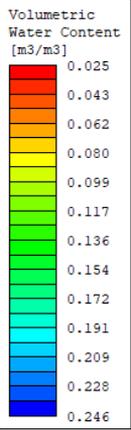


Fonte: Retirado do software SLIDE pela autora, 2020.

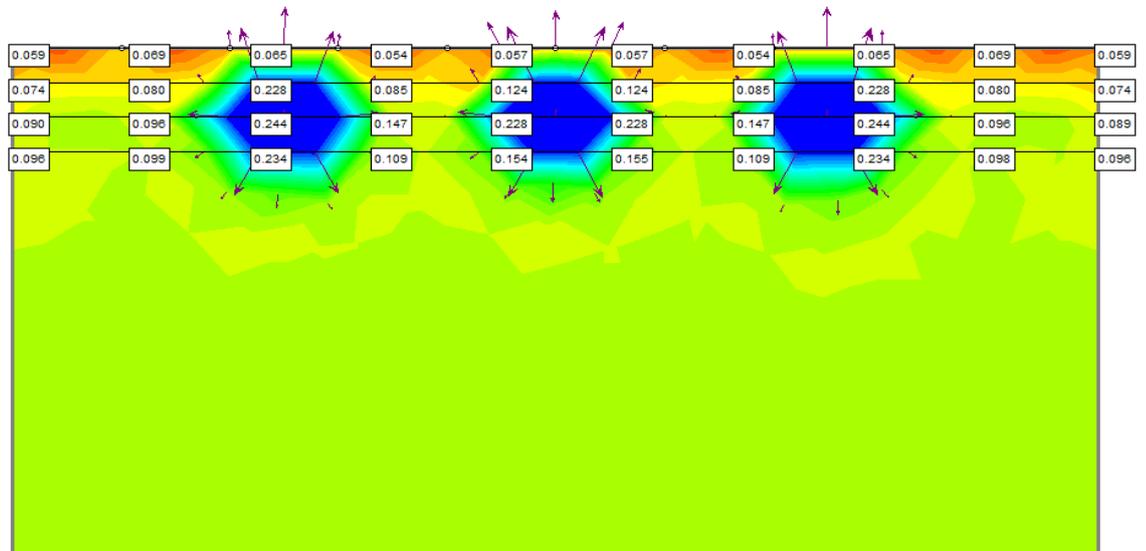
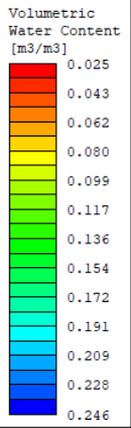
Figura 31 – Resultado da simulação durante a irrigação com profundidade do tubo gotejador a 20 cm, 75 cm entre emissores e 30 cm entre plantas. Figura 31A: inicial; Figura 31B: 10 min; Figura 31C: 15 min; Figura 31D: 20 min; Figura 31E: 25 min; Figura 31F: 30 min; Figura 31G: 35 min; Figura 31H: 40 min; Figura 31I: 45 min; Figura 31J: 50 min; Figura 31L: 55 min; Figura 31M: 60 min.



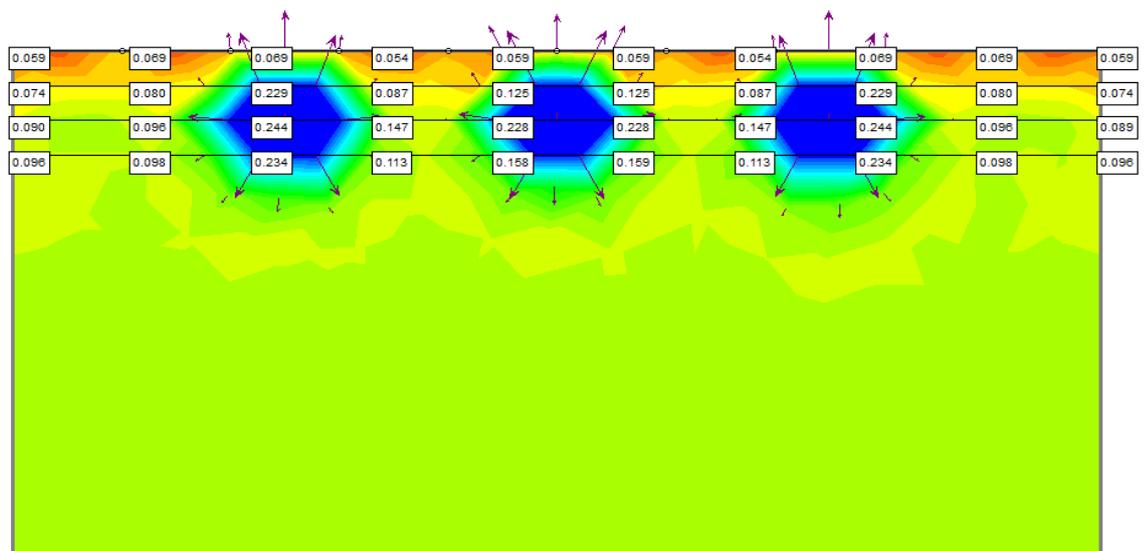
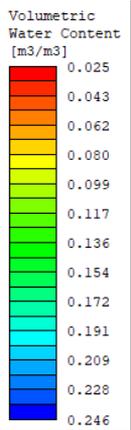




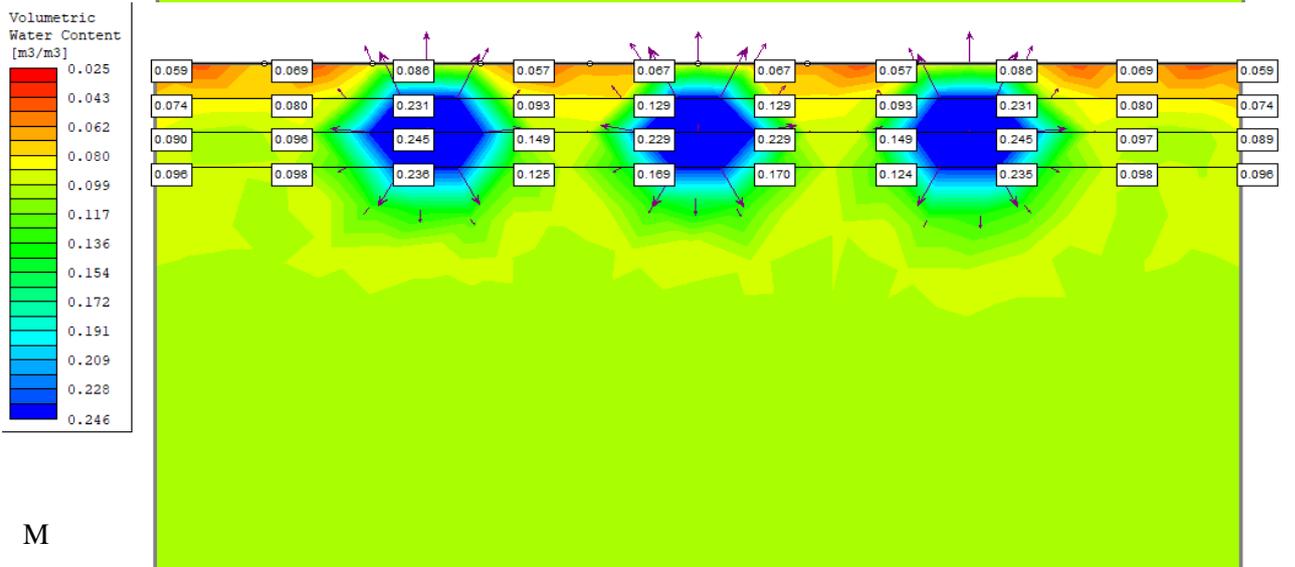
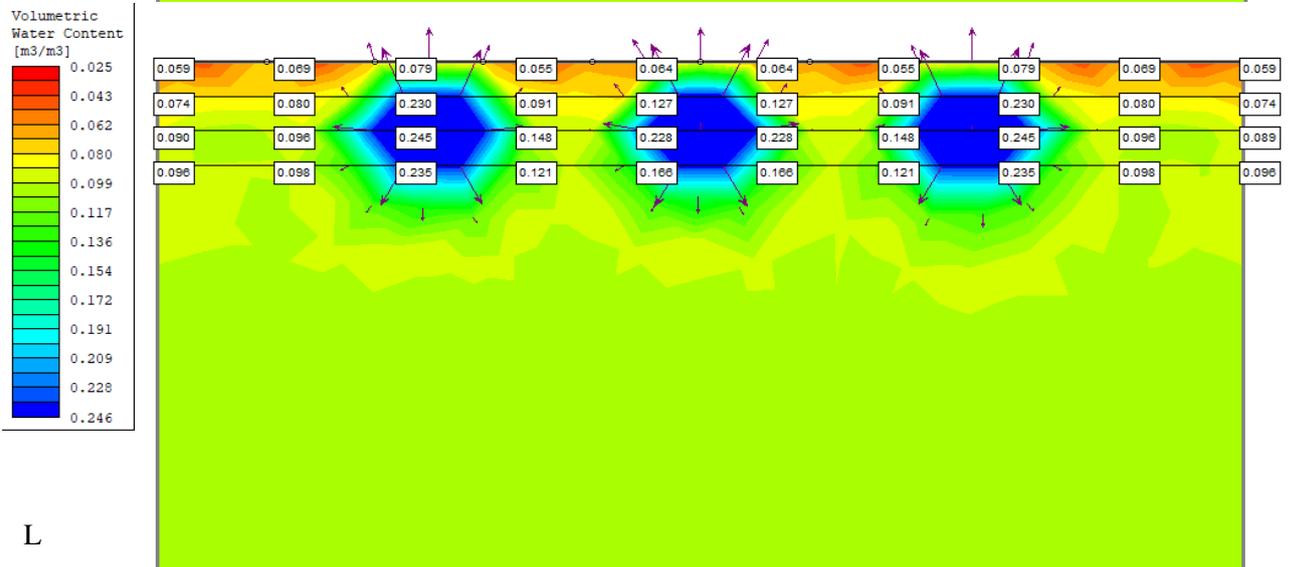
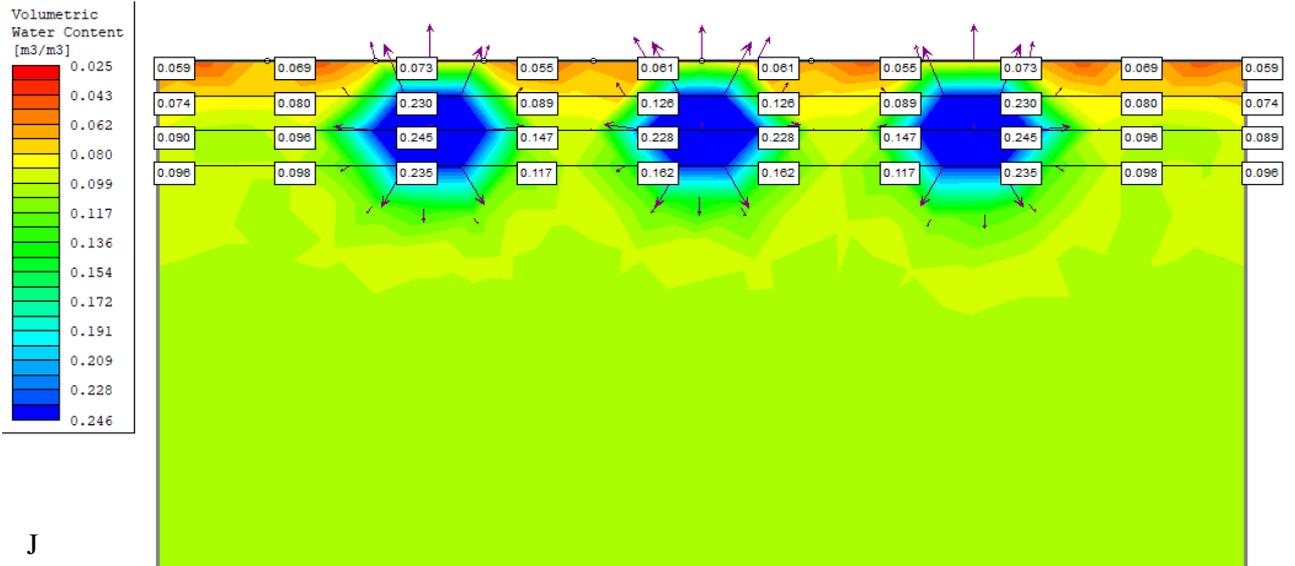
G



H

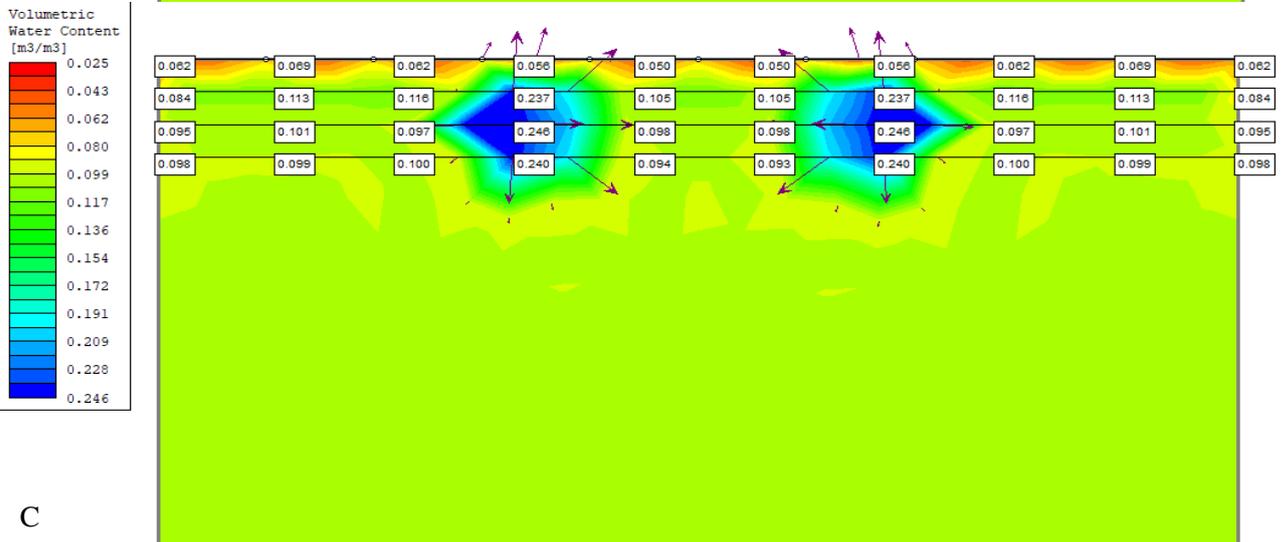
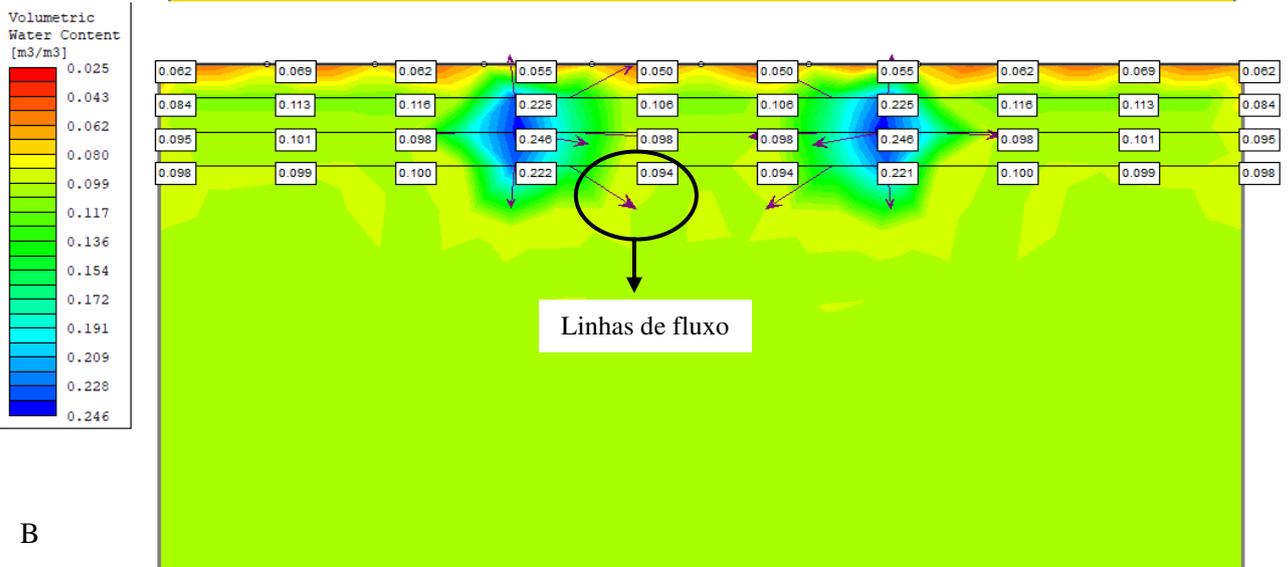
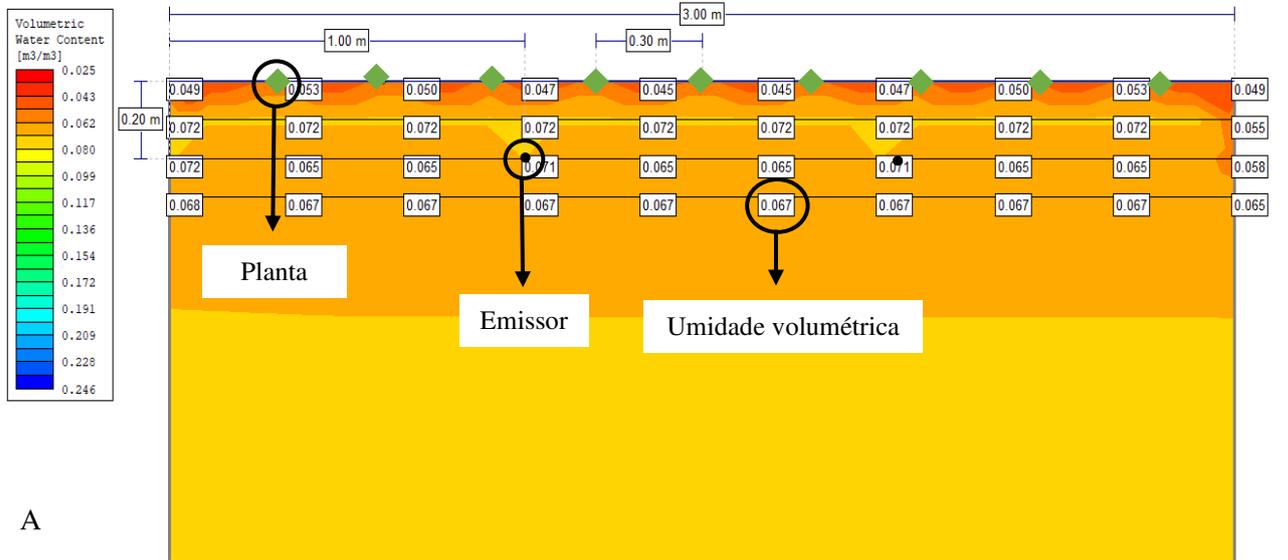


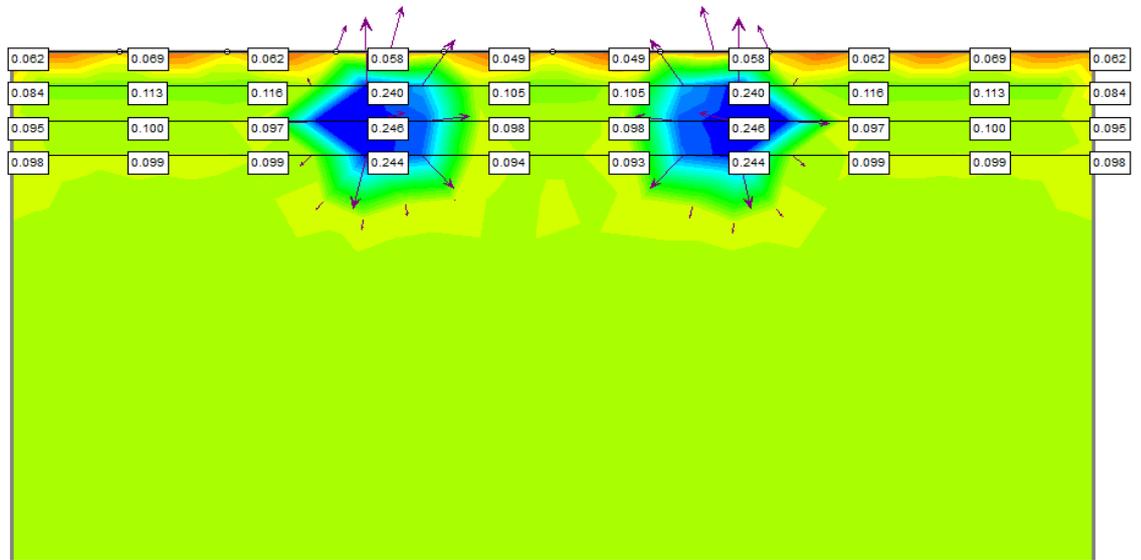
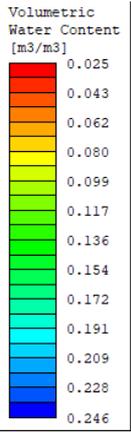
I



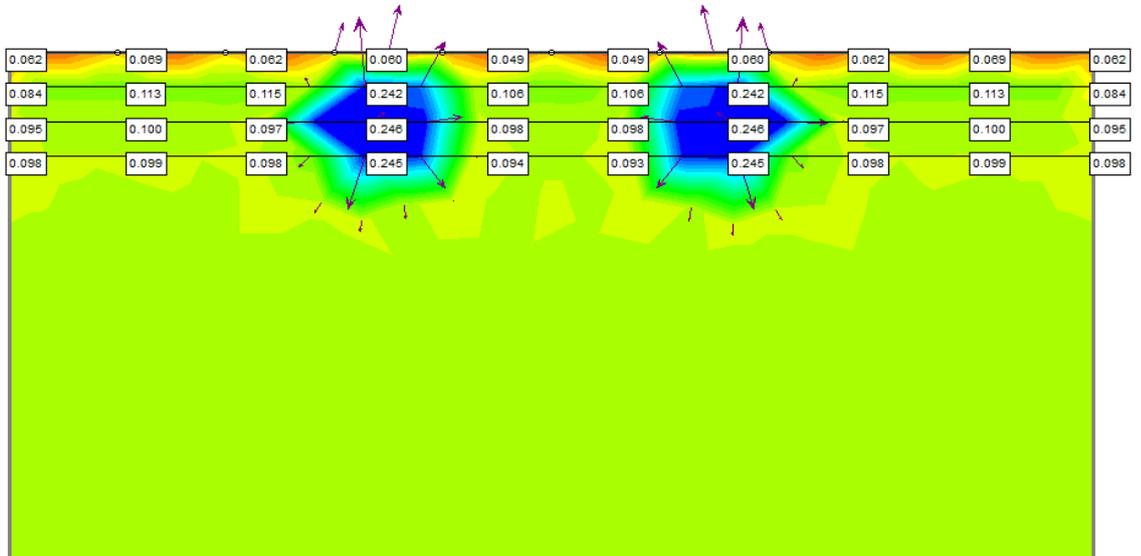
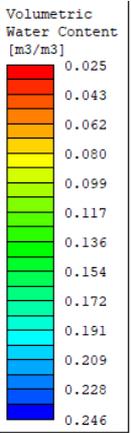
Fonte: Retirado do software SLIDE pela autora, 2020.

Figura 32 – Resultado da simulação durante a irrigação com profundidade do tubo gotejador a 20 cm, 100 cm entre emissores e 30 cm entre plantas. Figura 32A: inicial; Figura 32B: 10 min; Figura 32C: 15 min; Figura 32D: 20 min; Figura 32E: 25 min; Figura 32F: 30 min; Figura 32G: 35 min; Figura 32H: 40 min; Figura 32I: 45 min; Figura 32J: 50 min; Figura 32L: 55 min; Figura 32M: 60 min.

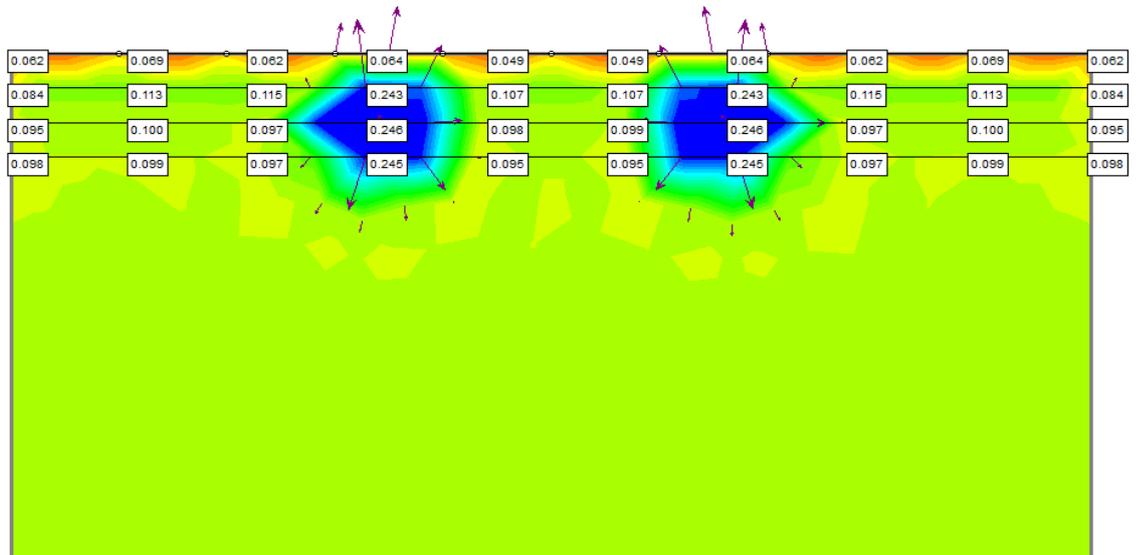
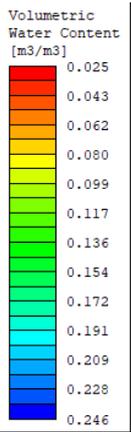




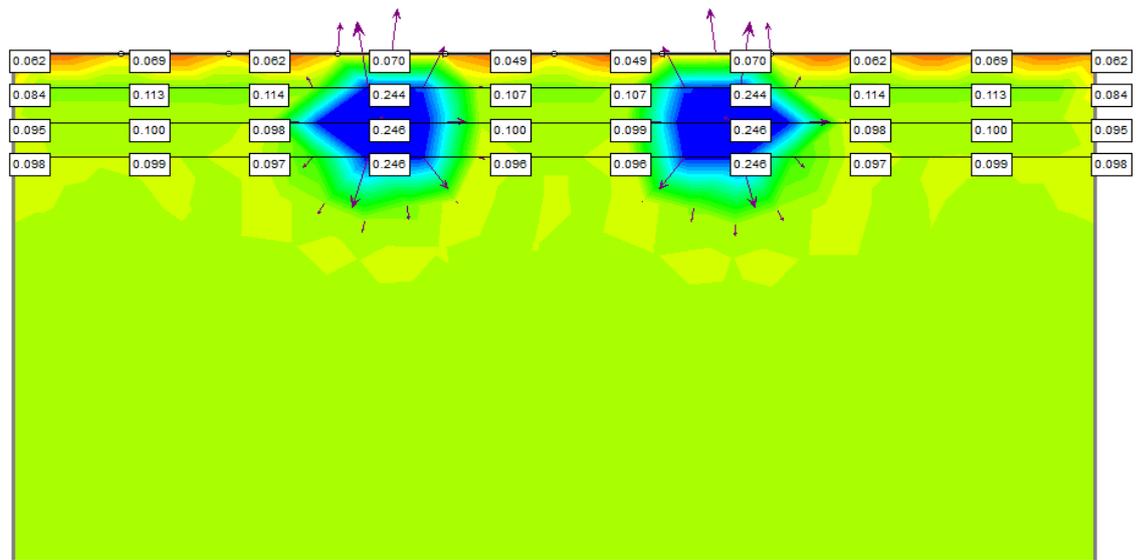
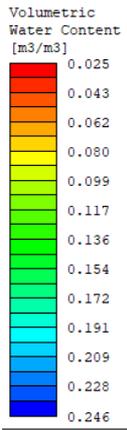
D



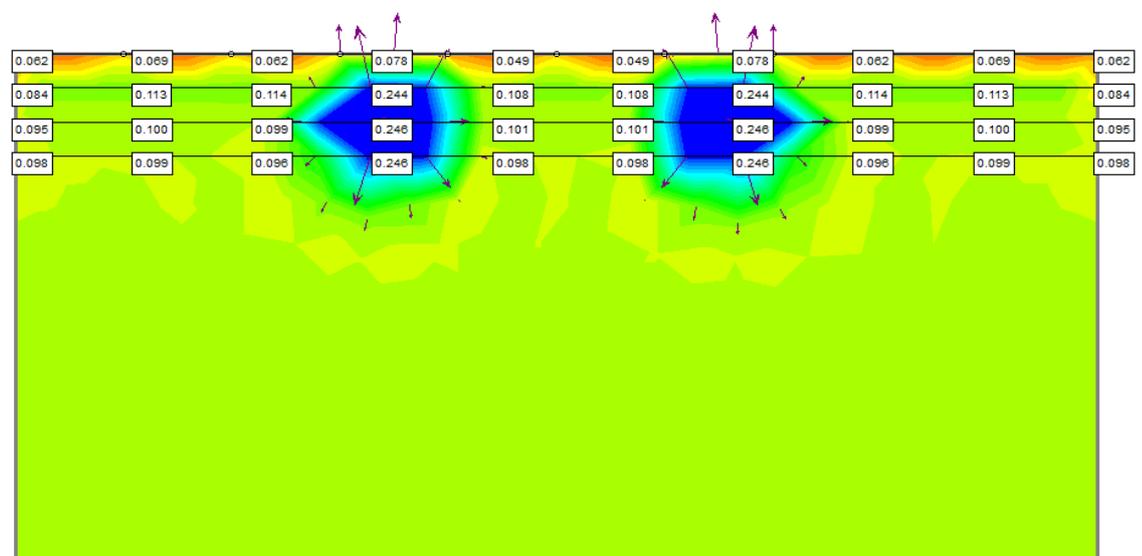
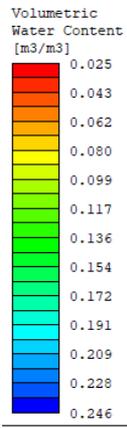
E



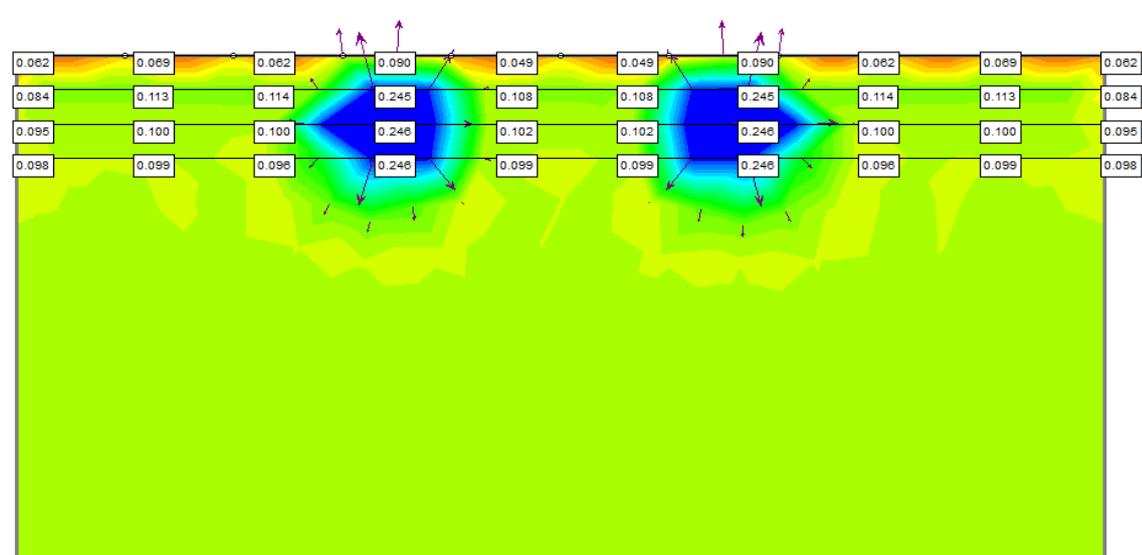
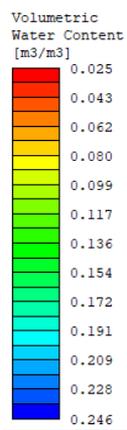
F



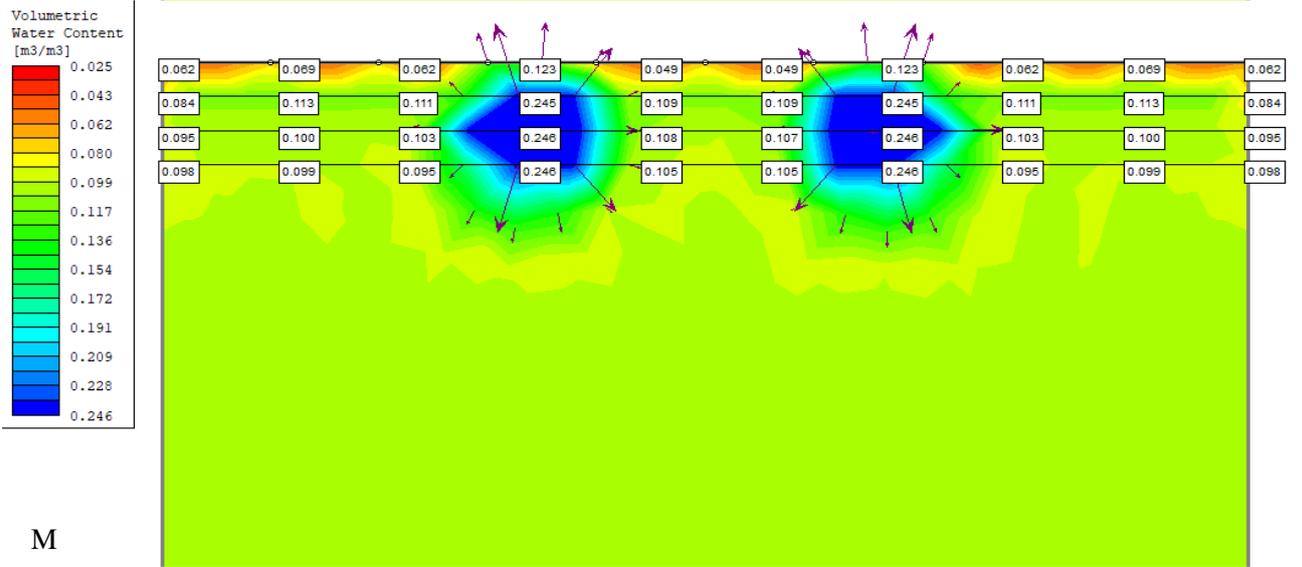
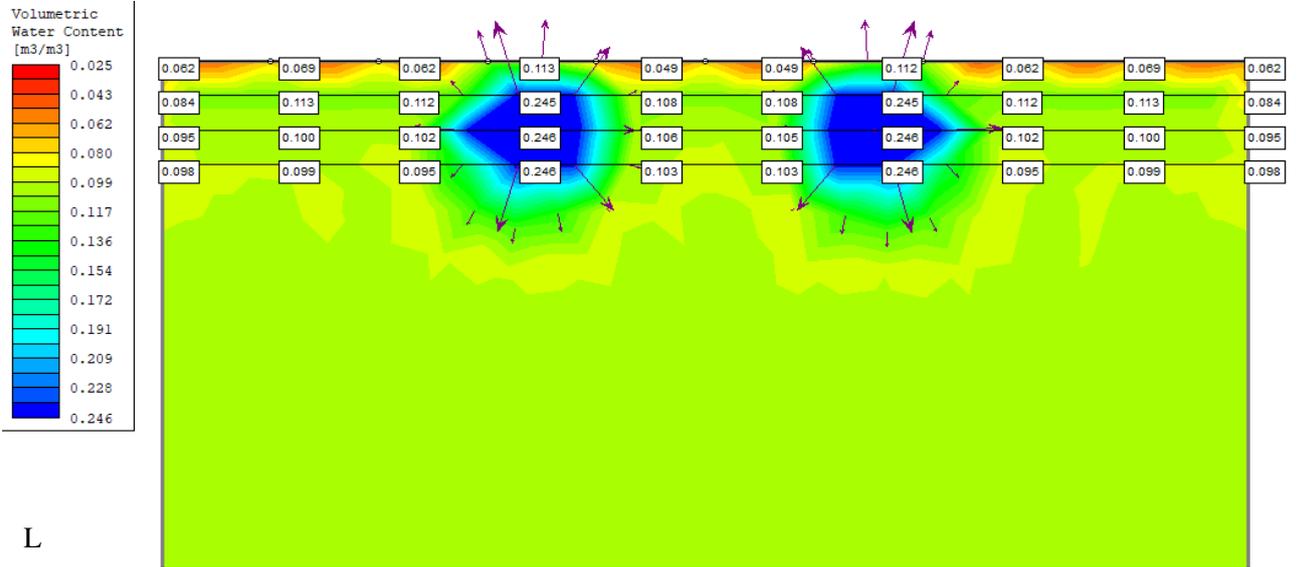
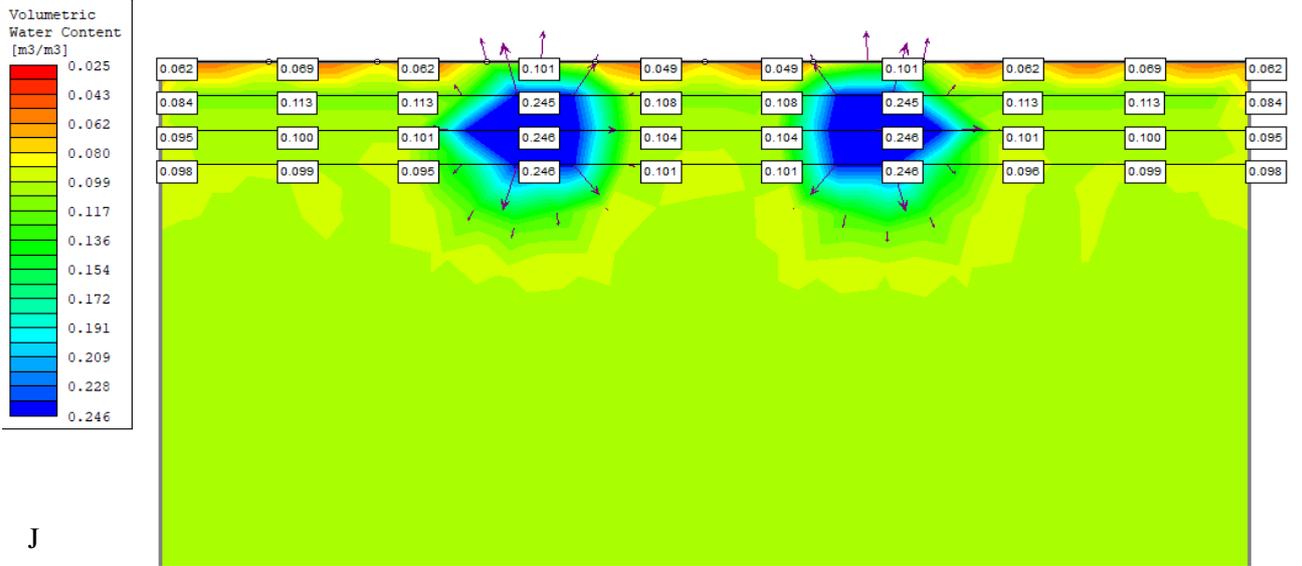
G



H



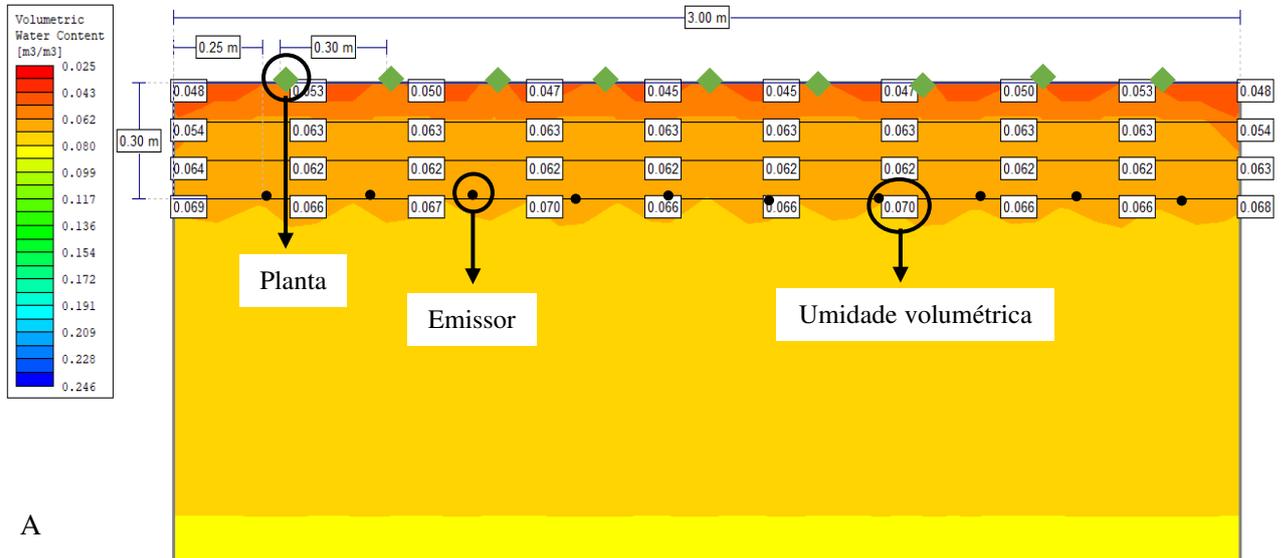
I



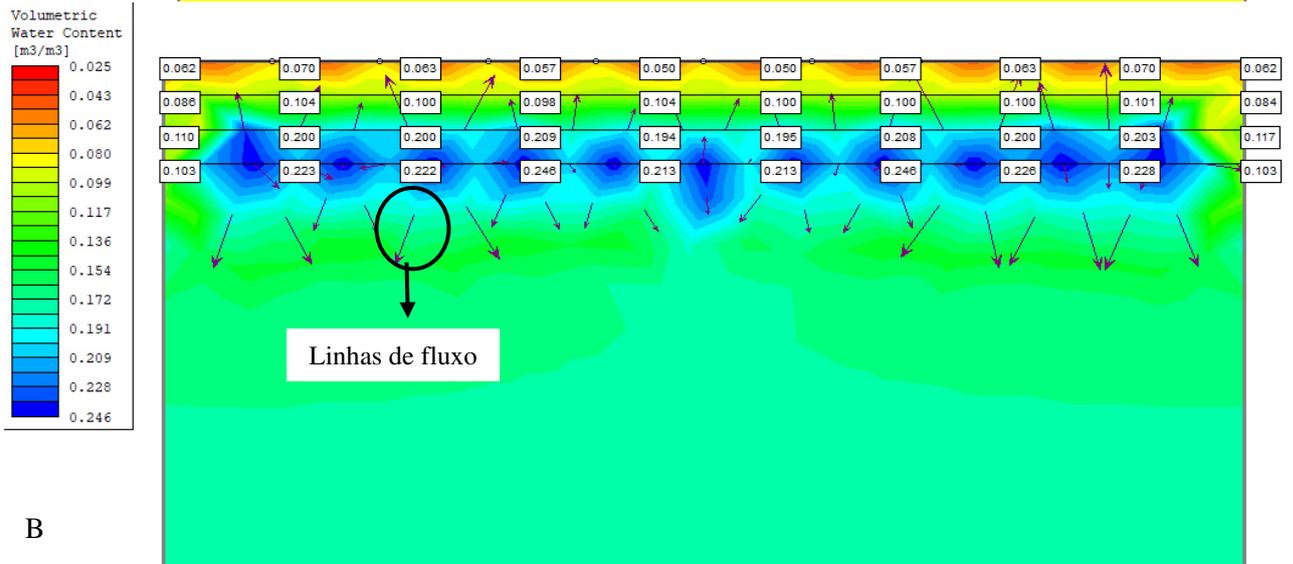
M

Fonte: Retirado do software SLIDE pela autora, 2020.

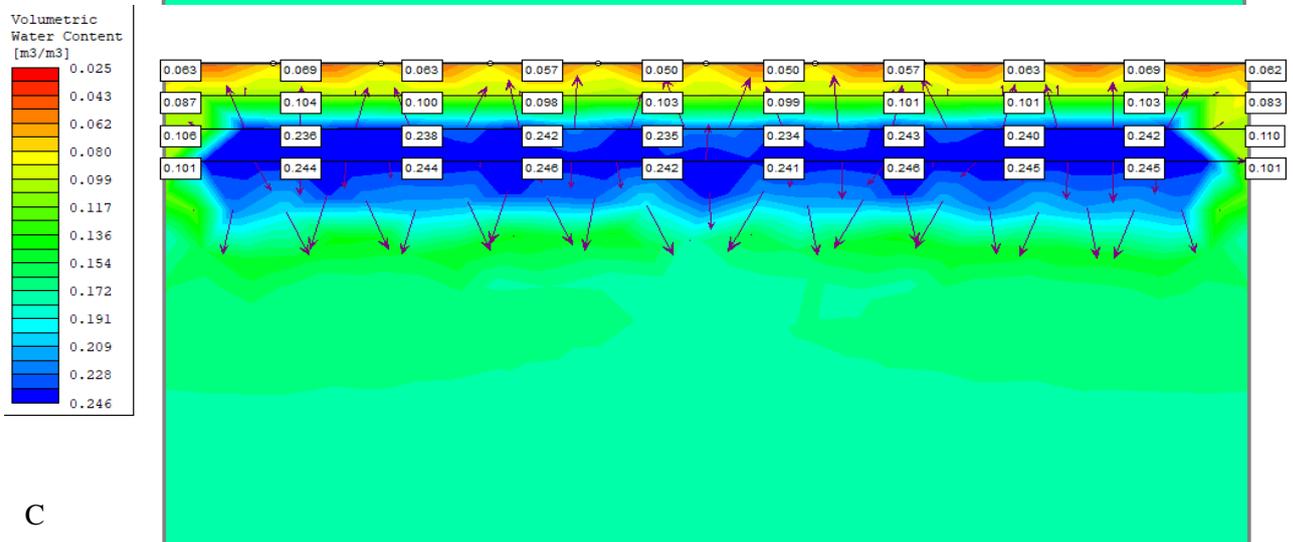
Figura 33 – Resultado da simulação durante a irrigação com profundidade do tubo gotejador a 30 cm, 25 cm entre emissores e 30 cm entre plantas. Figura 33A: inicial; Figura 33B: 10 min; Figura 33C: 15 min; Figura 33D: 20 min; Figura 33E: 25 min; Figura 33F: 30 min; Figura 33G: 35 min; Figura 33H: 40 min; Figura 33I: 45 min; Figura 33J: 50 min; Figura 33L: 55 min; Figura 33M: 60 min.



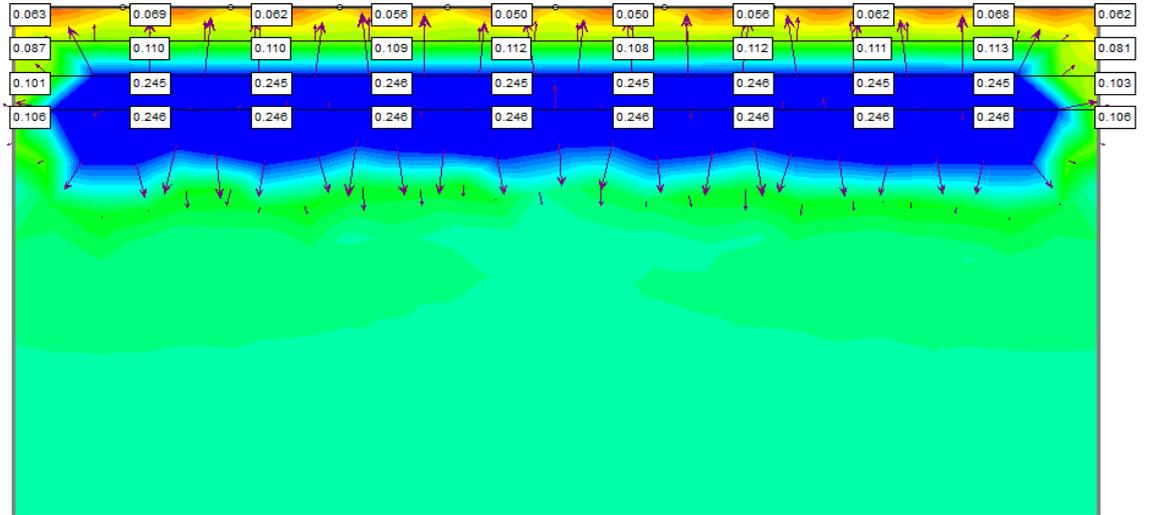
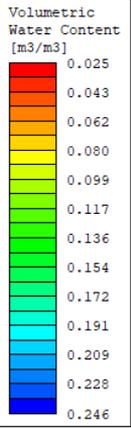
A



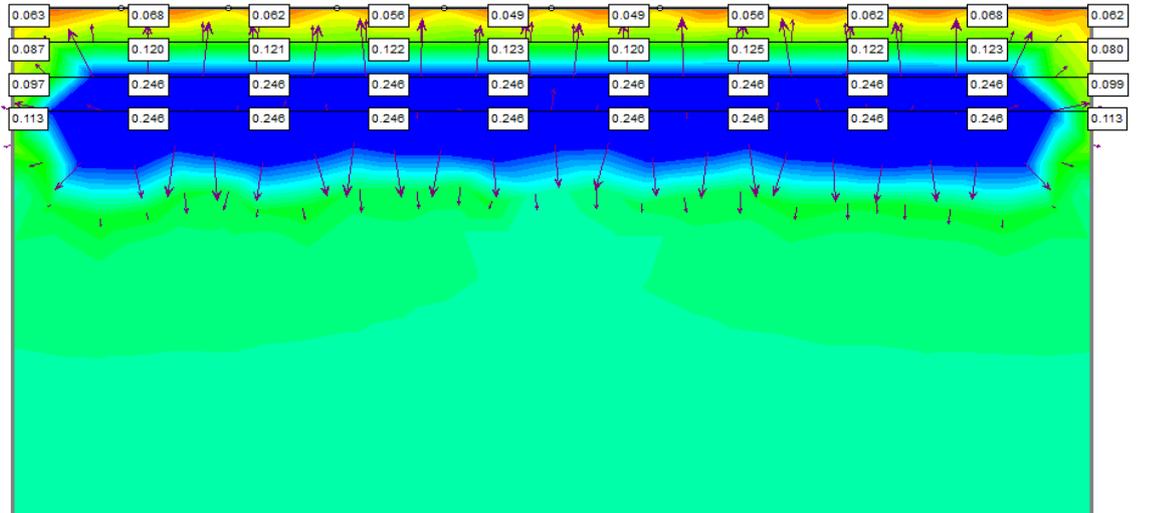
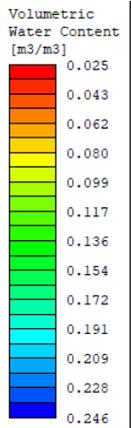
B



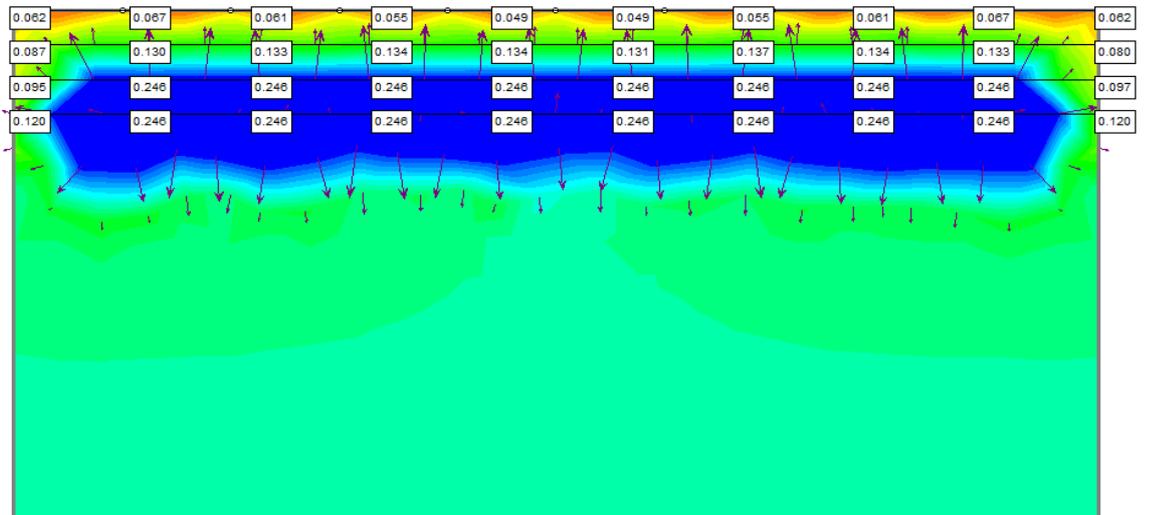
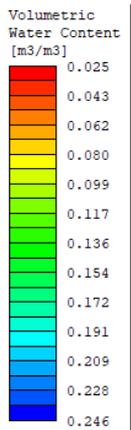
C



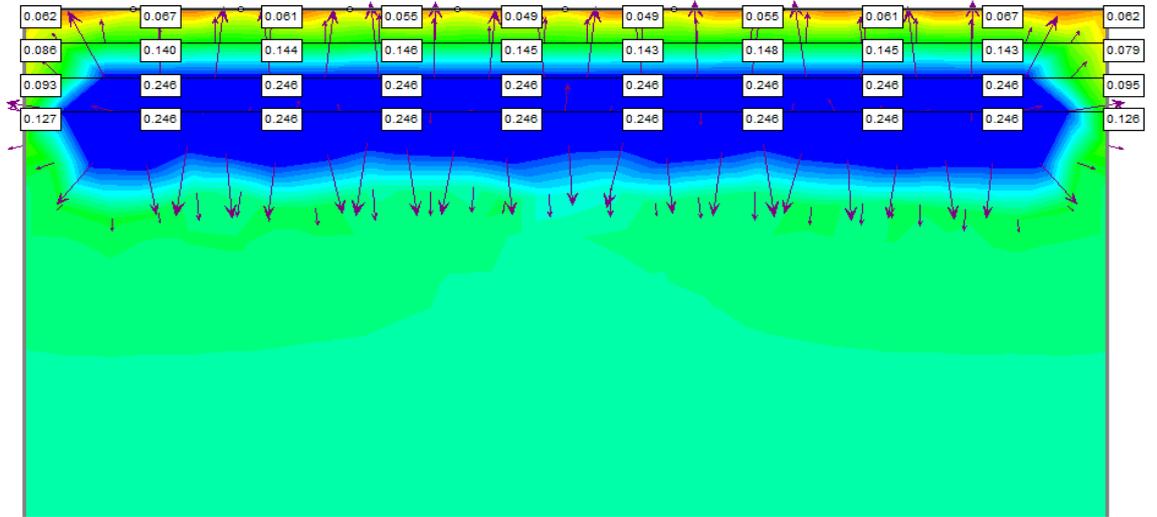
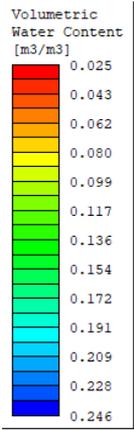
D



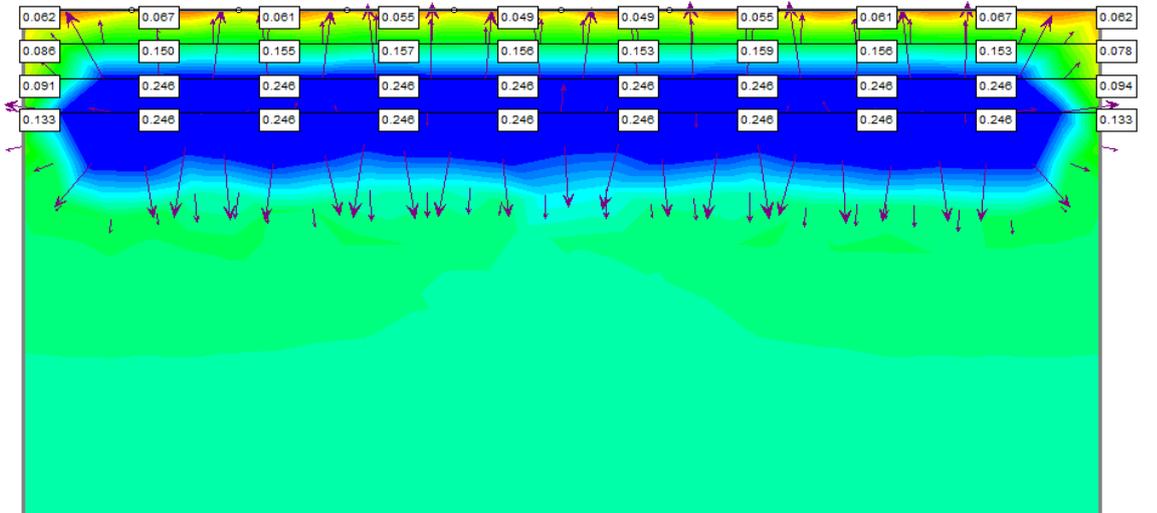
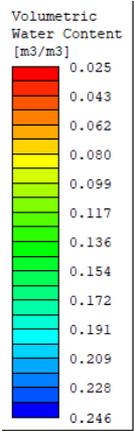
E



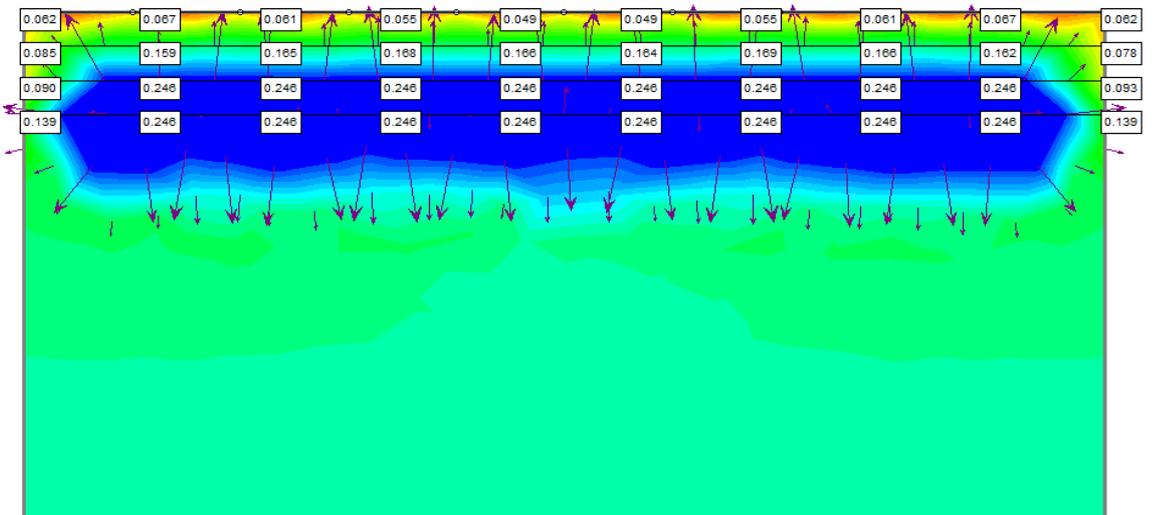
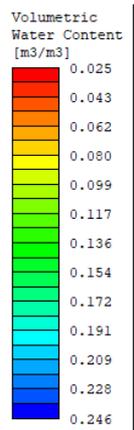
F



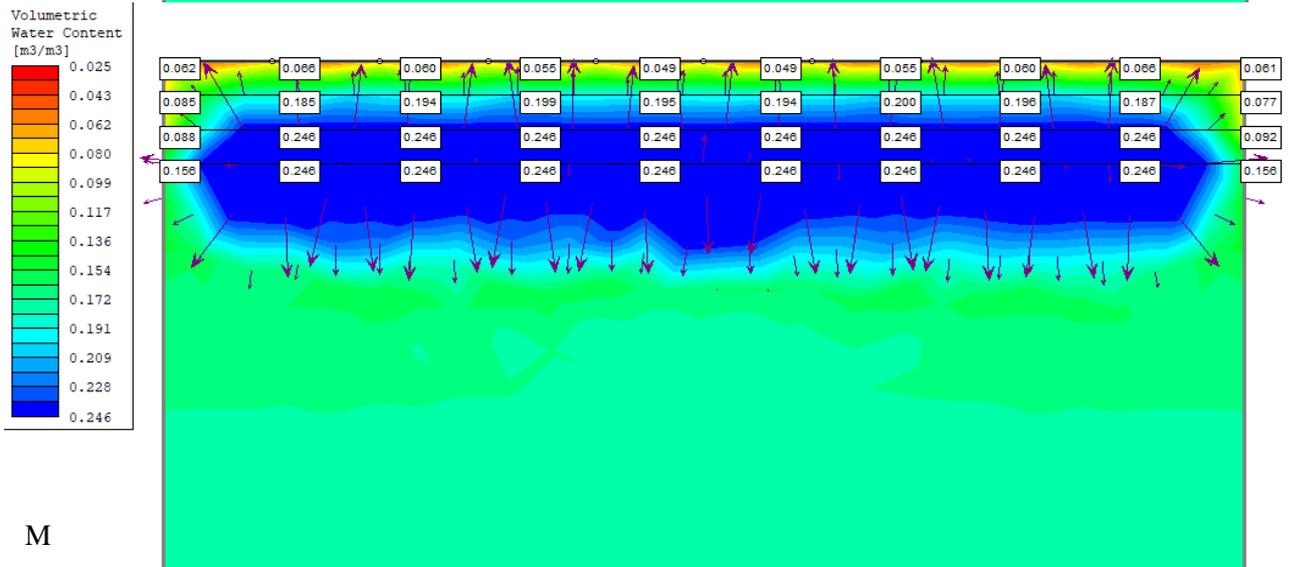
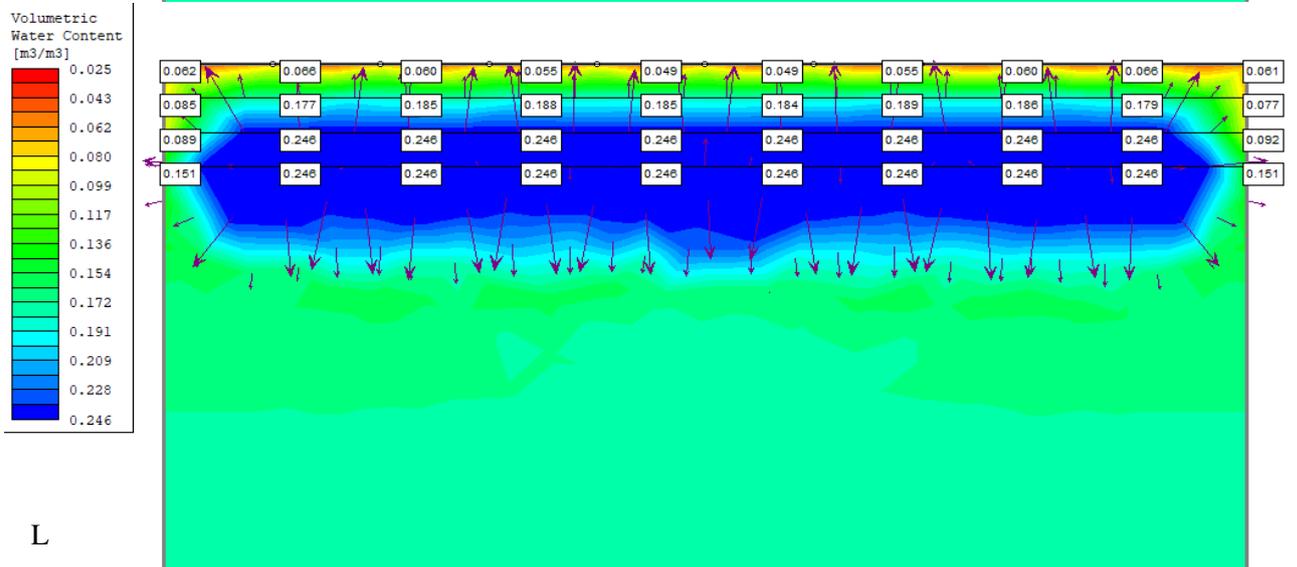
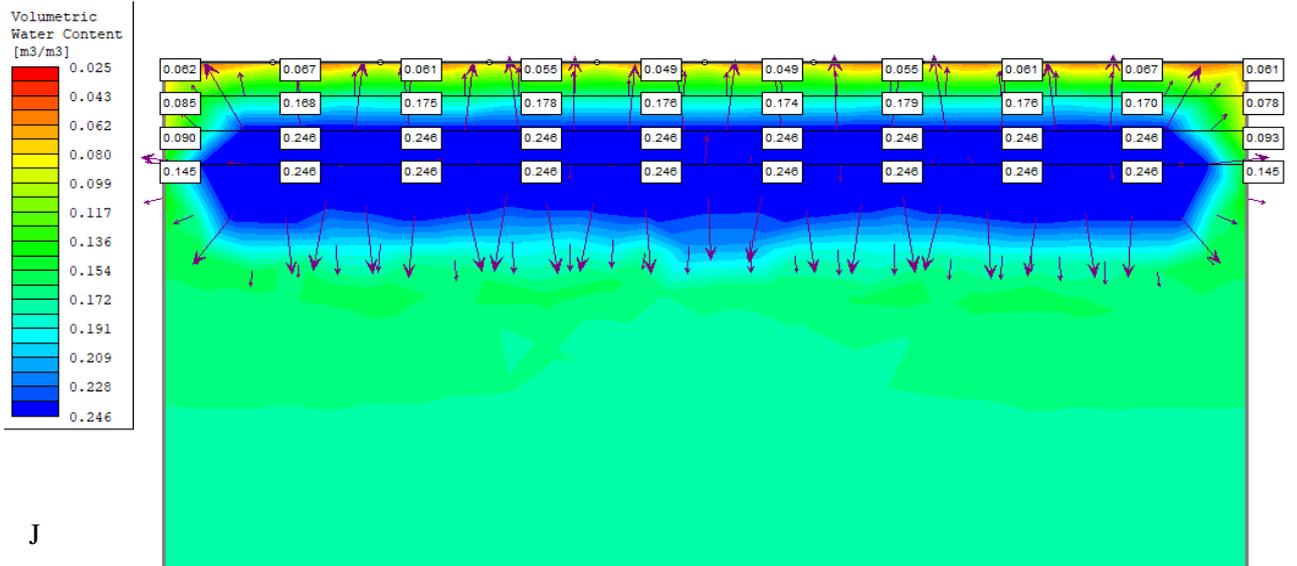
G



H

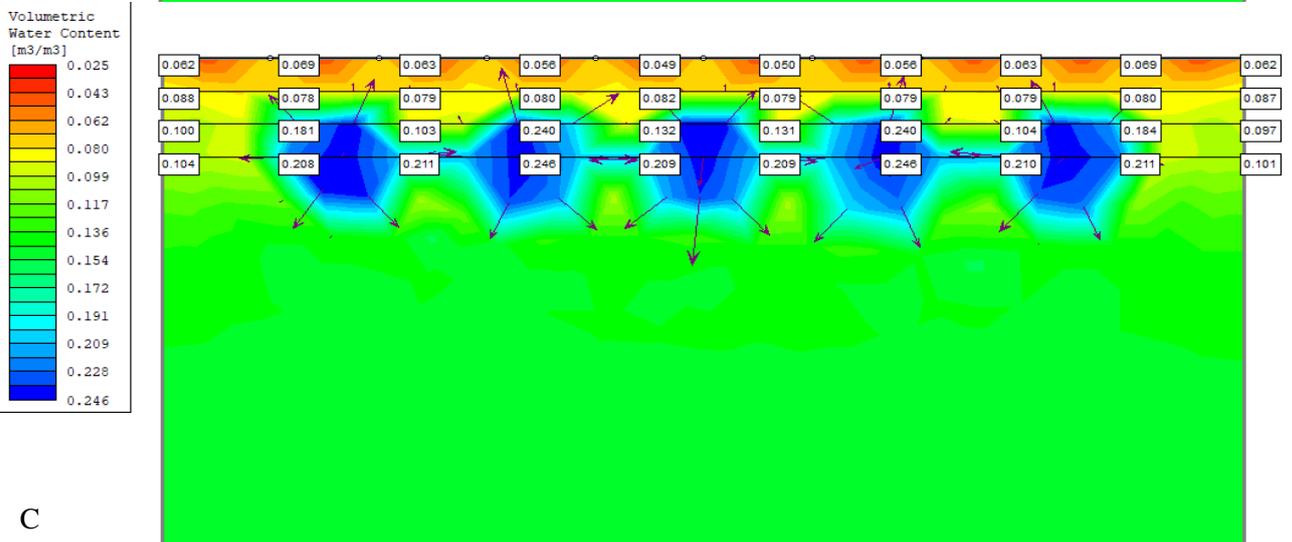
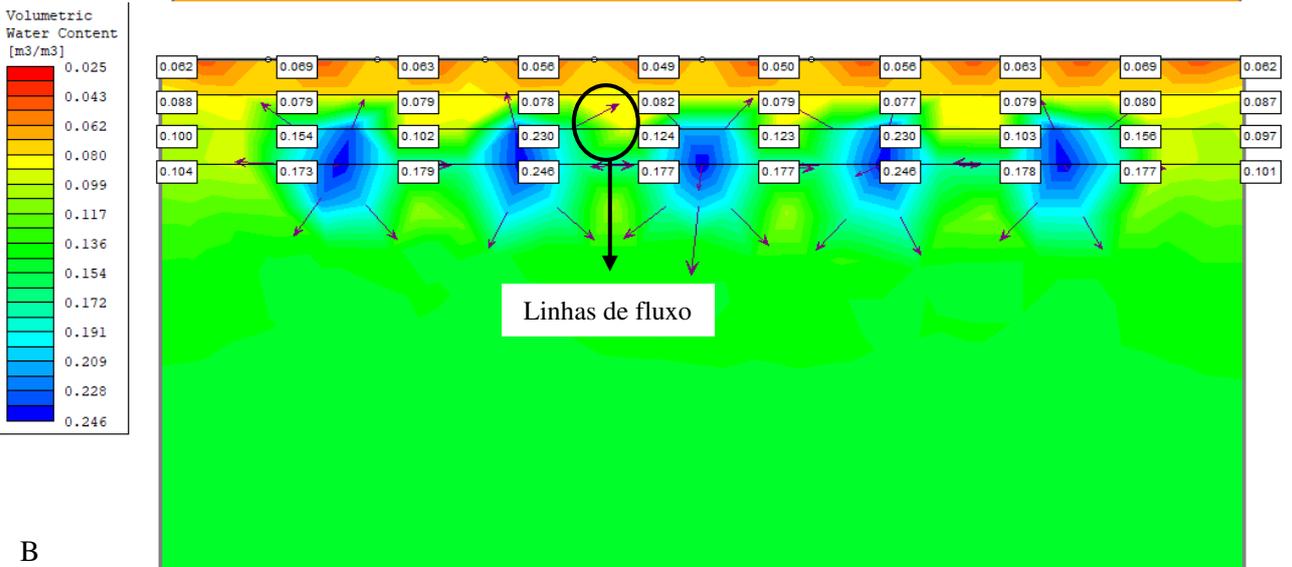
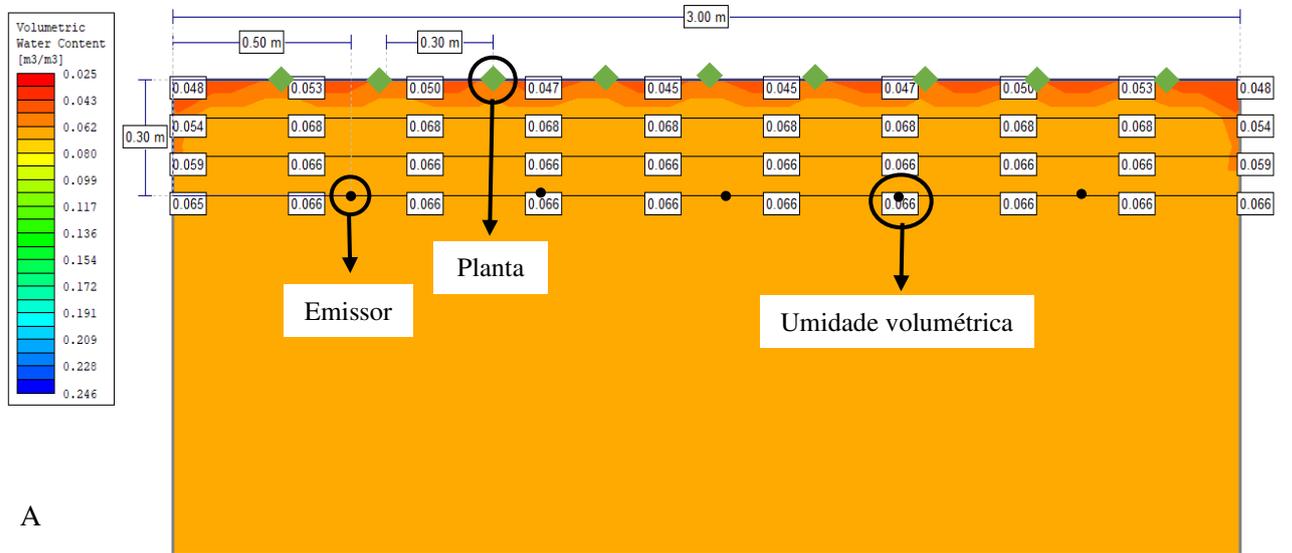


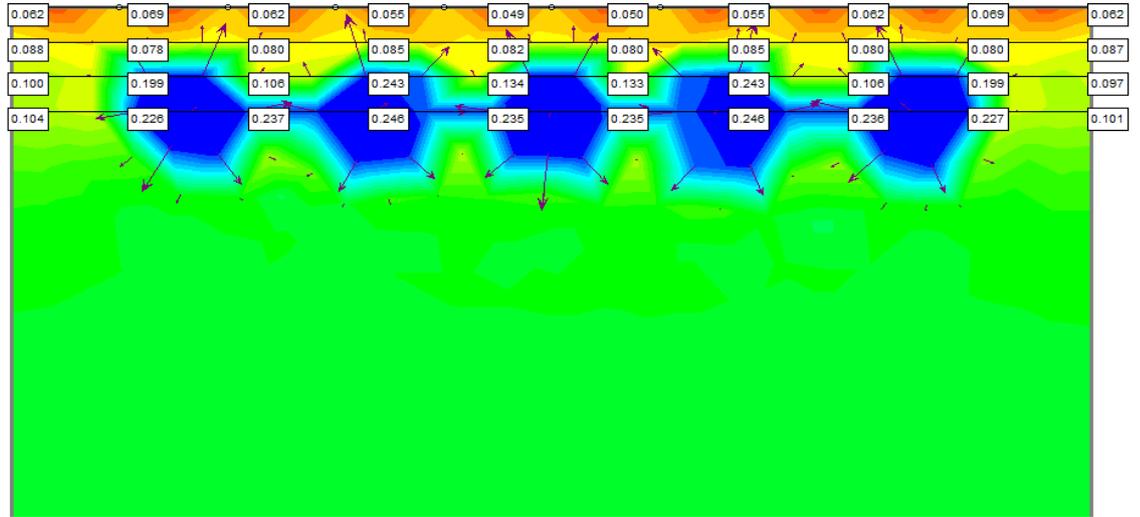
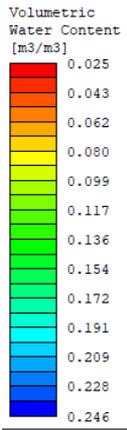
I



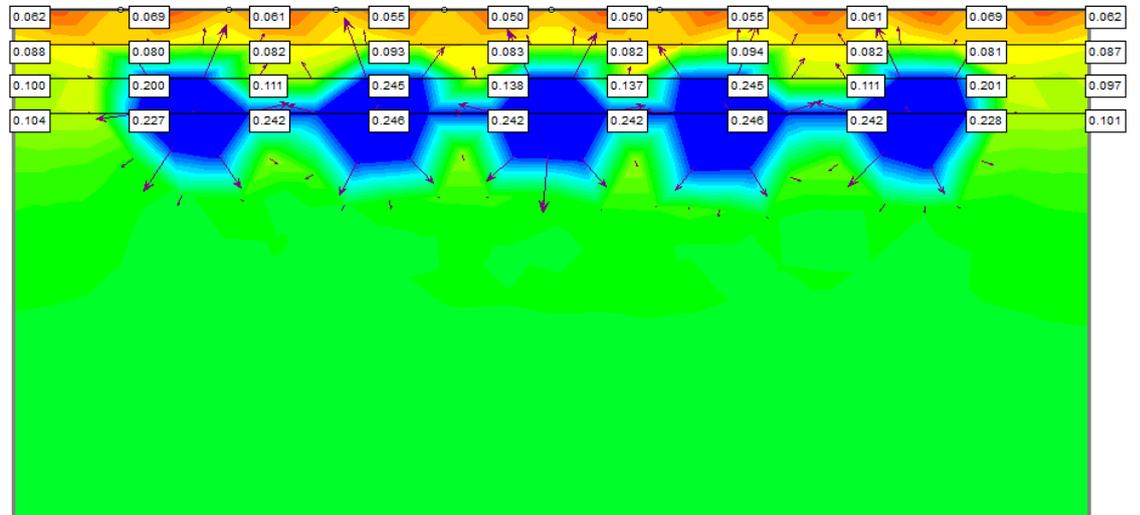
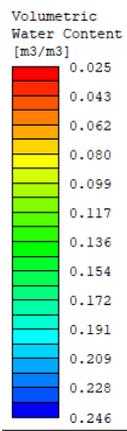
Fonte: Retirado do software SLIDE pela autora, 2020.

Figura 34 – Resultado da simulação durante a irrigação com profundidade do tubo gotejador a 30 cm, 50 cm entre emissores e 30 cm entre plantas. Figura 34A: inicial; Figura 34B: 10 min; Figura 34C: 15 min; Figura 34D: 20 min; Figura 34E: 25 min; Figura 34F: 30 min; Figura 34G: 35 min; Figura 34H: 40 min; Figura 34I: 45 min; Figura 34J: 50 min; Figura 34L: 55 min; Figura 34M: 60 min.

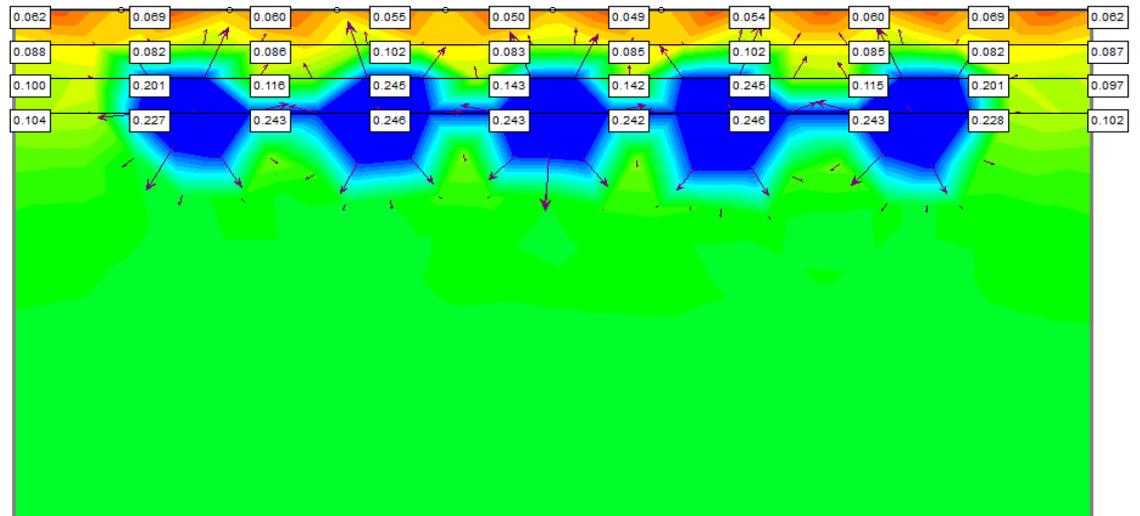
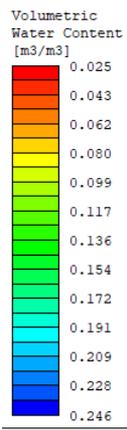




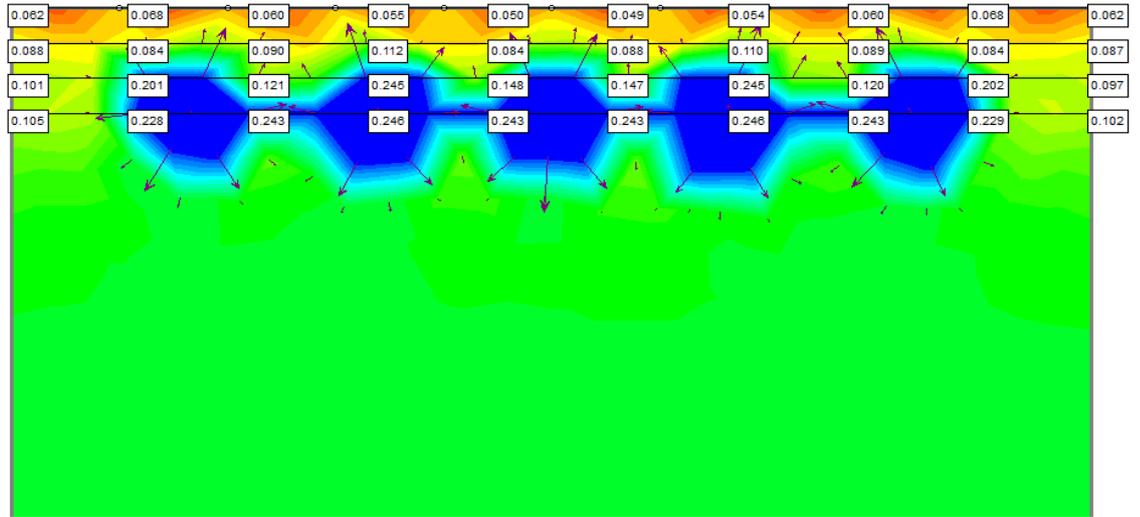
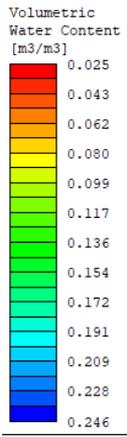
D



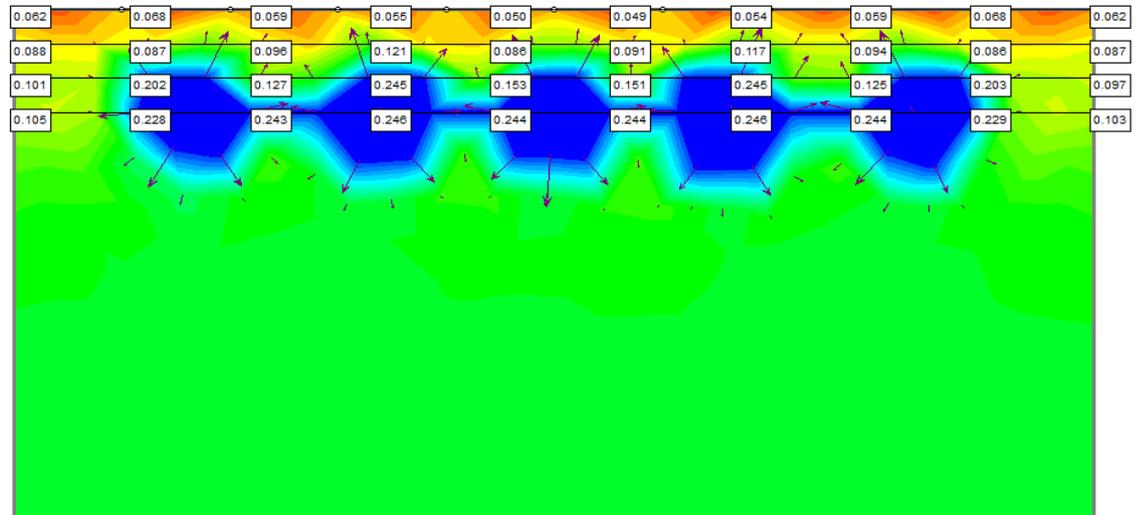
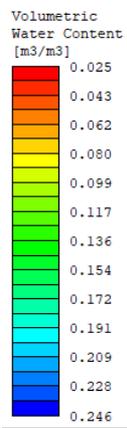
E



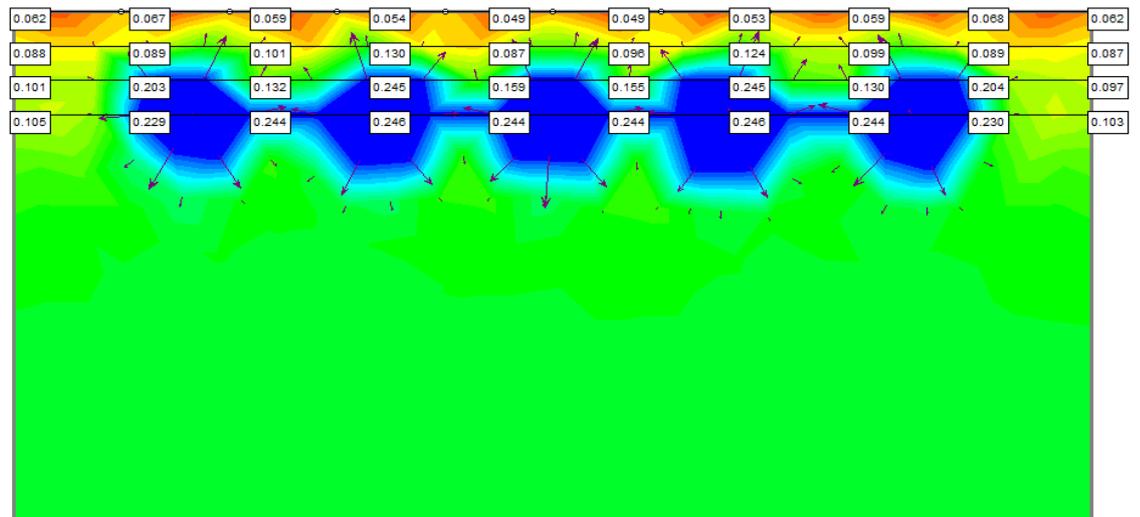
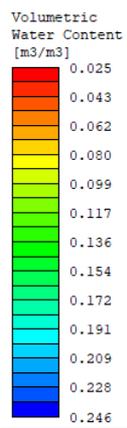
F



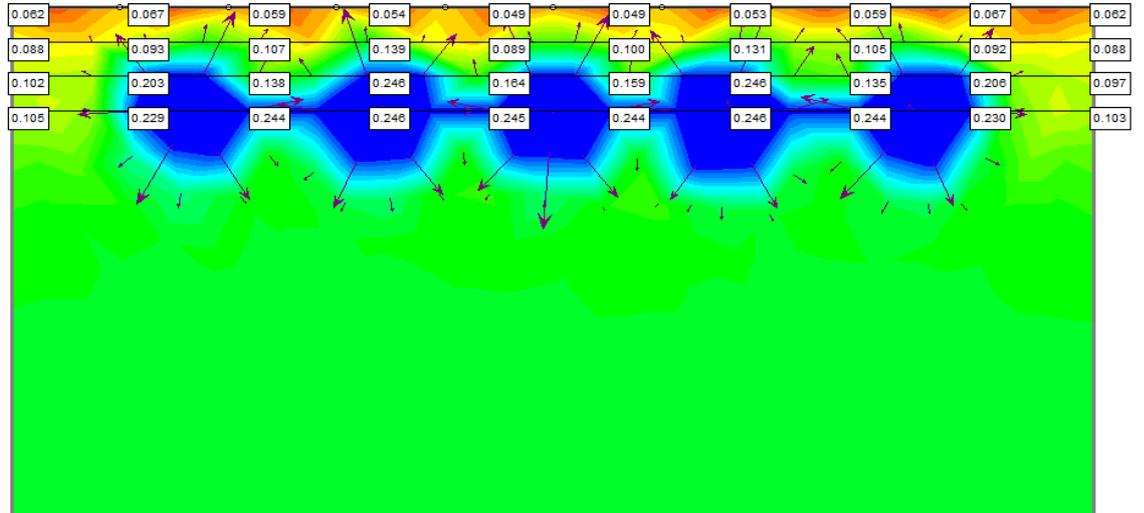
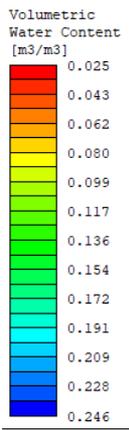
G



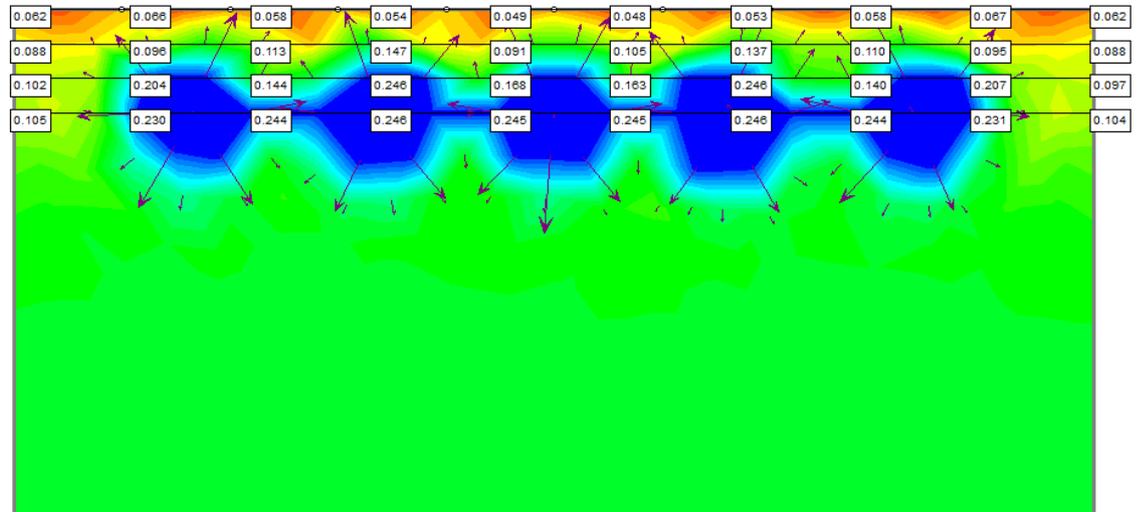
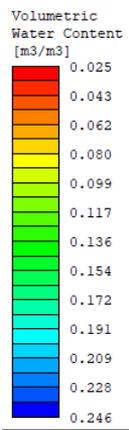
H



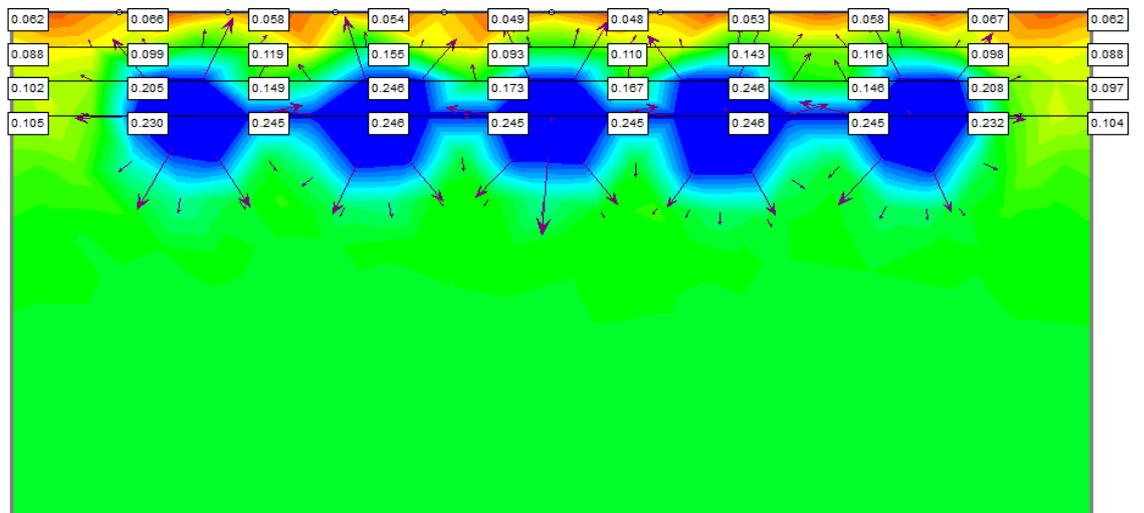
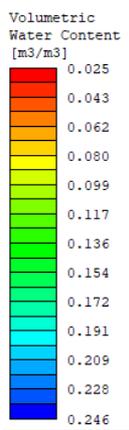
I



J



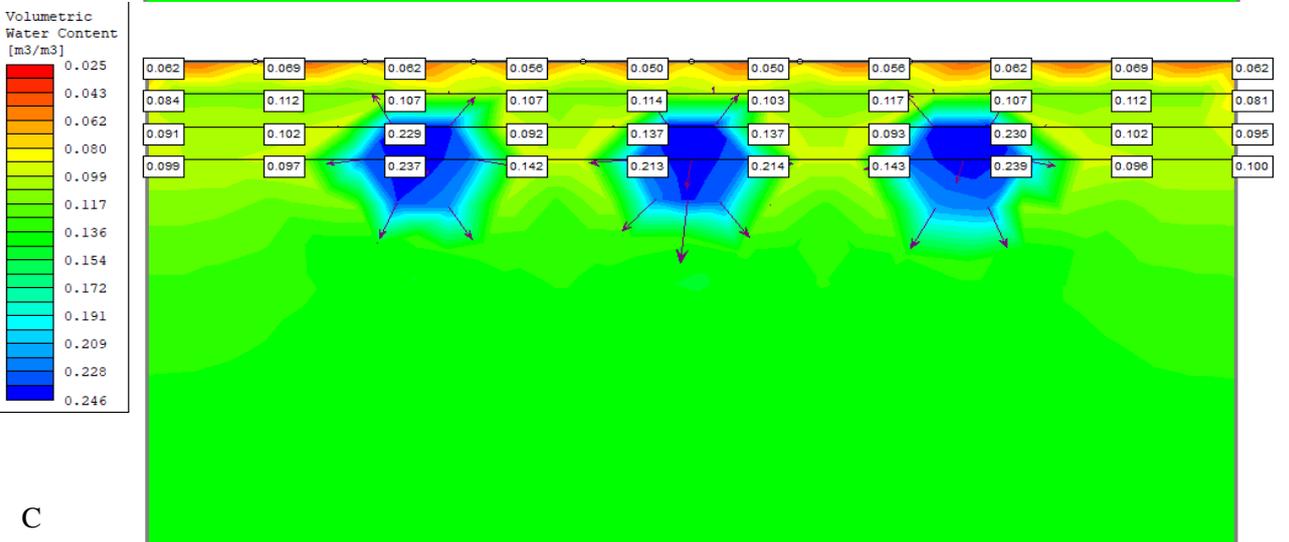
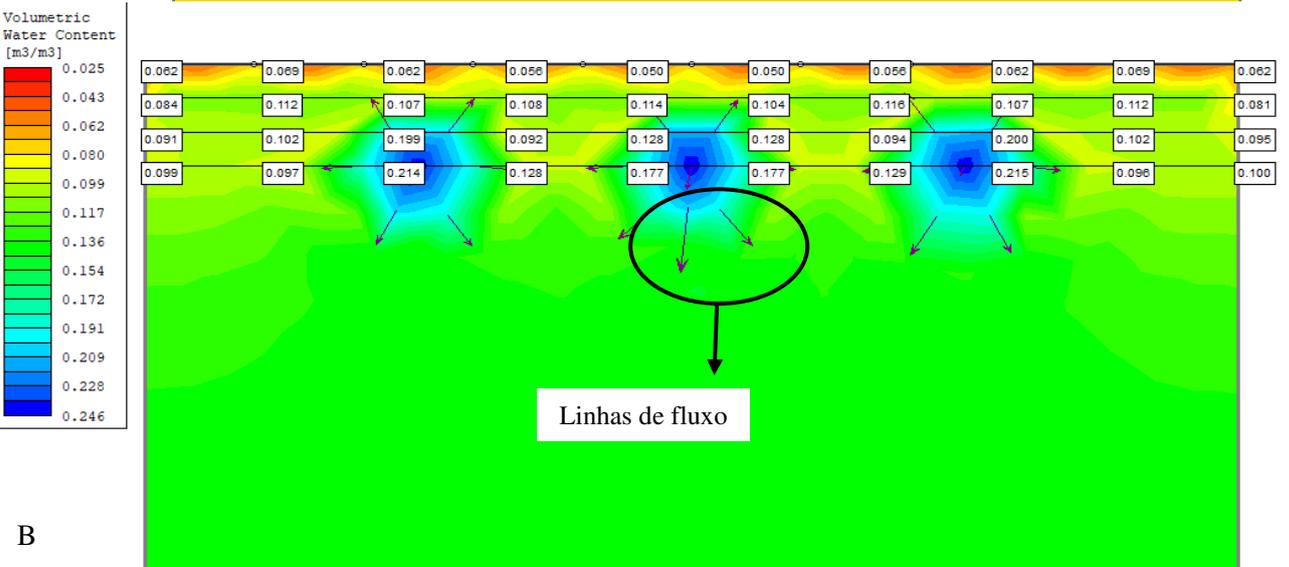
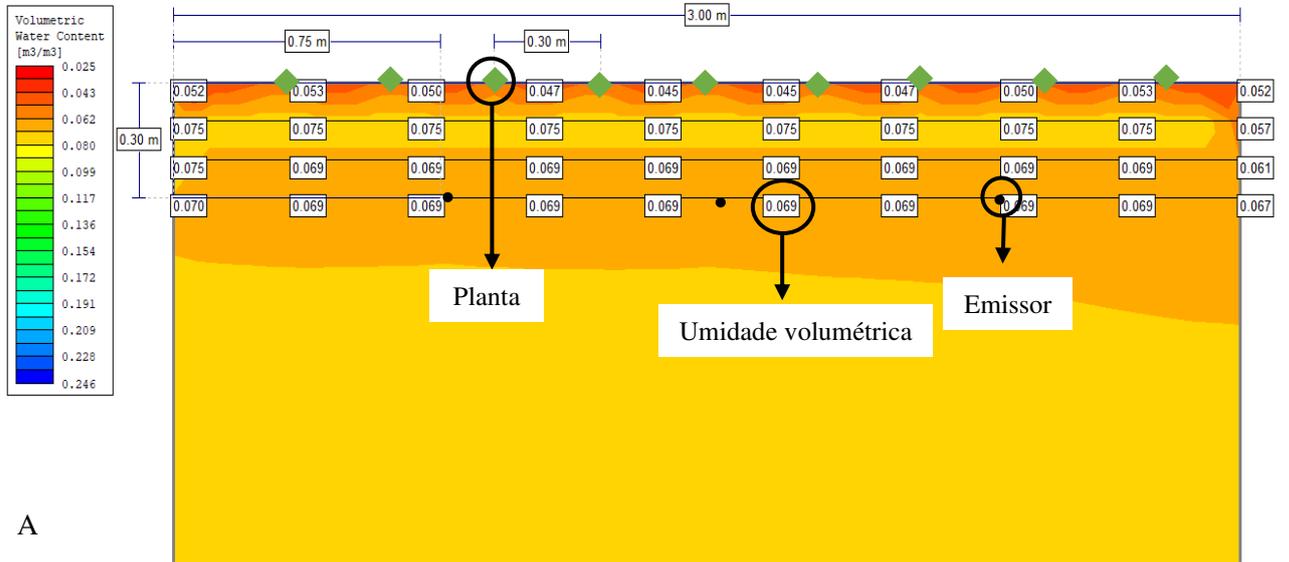
L

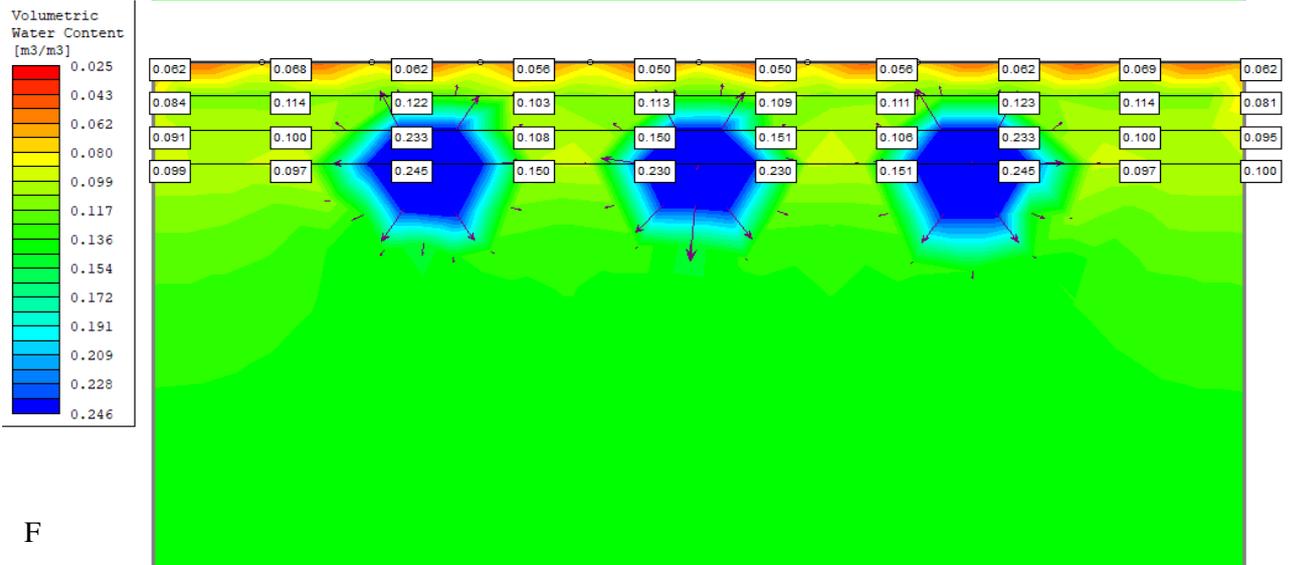
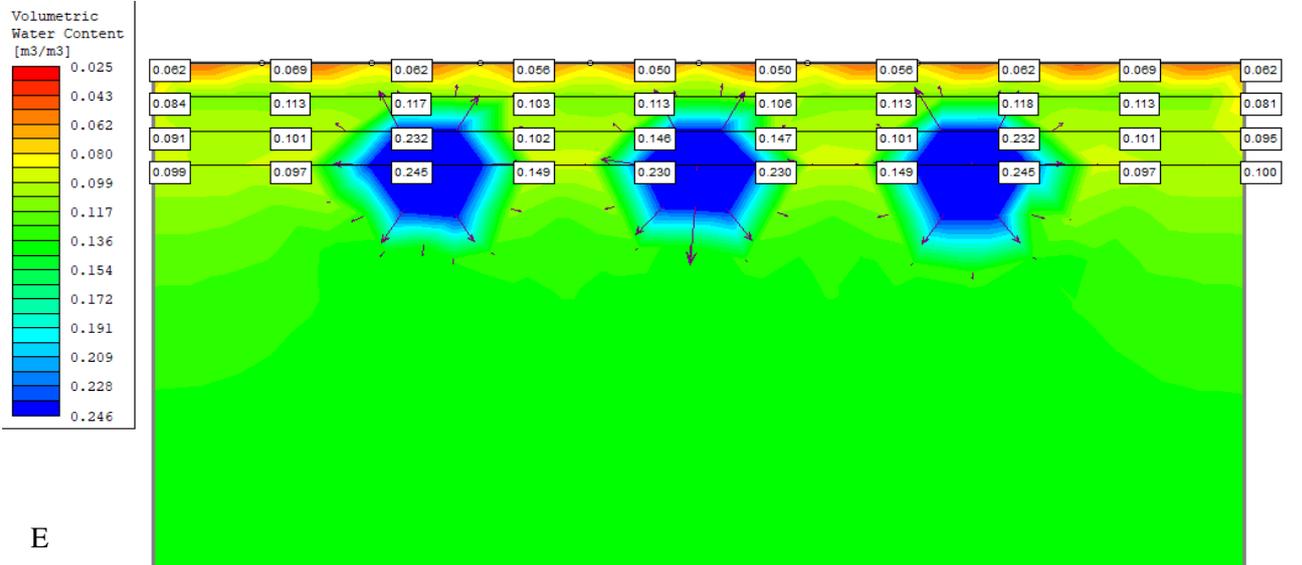
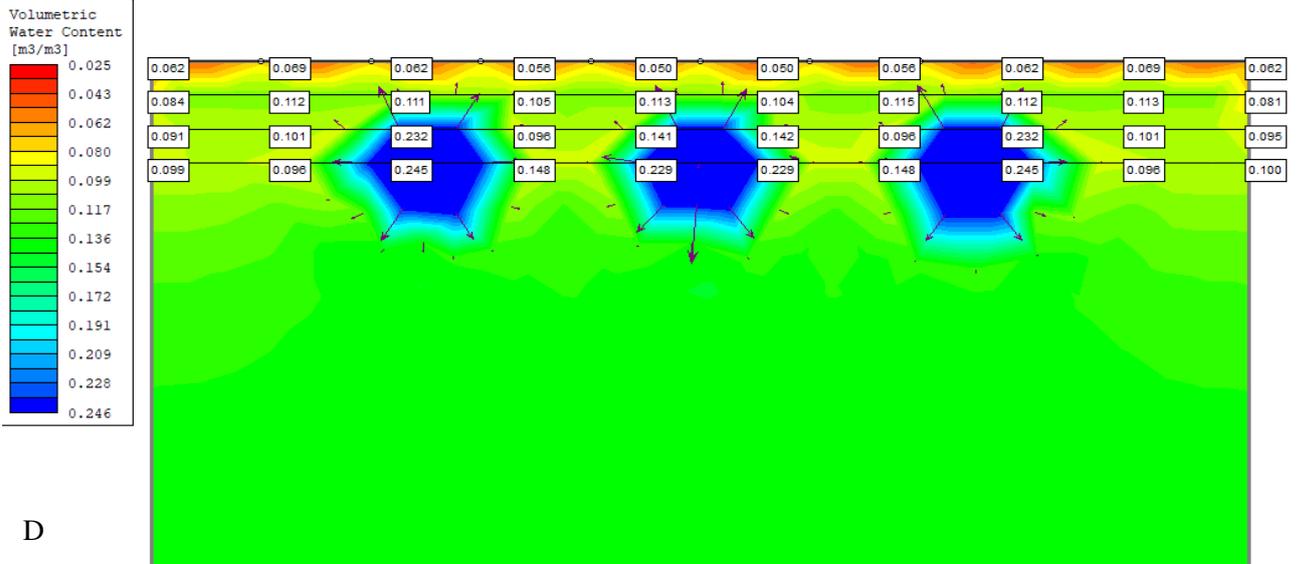


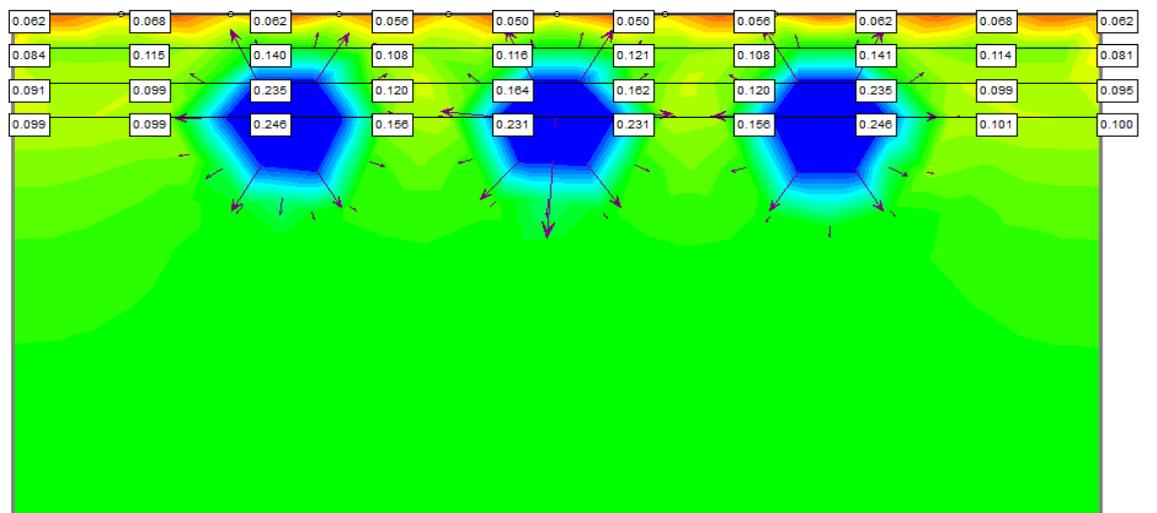
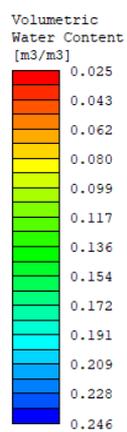
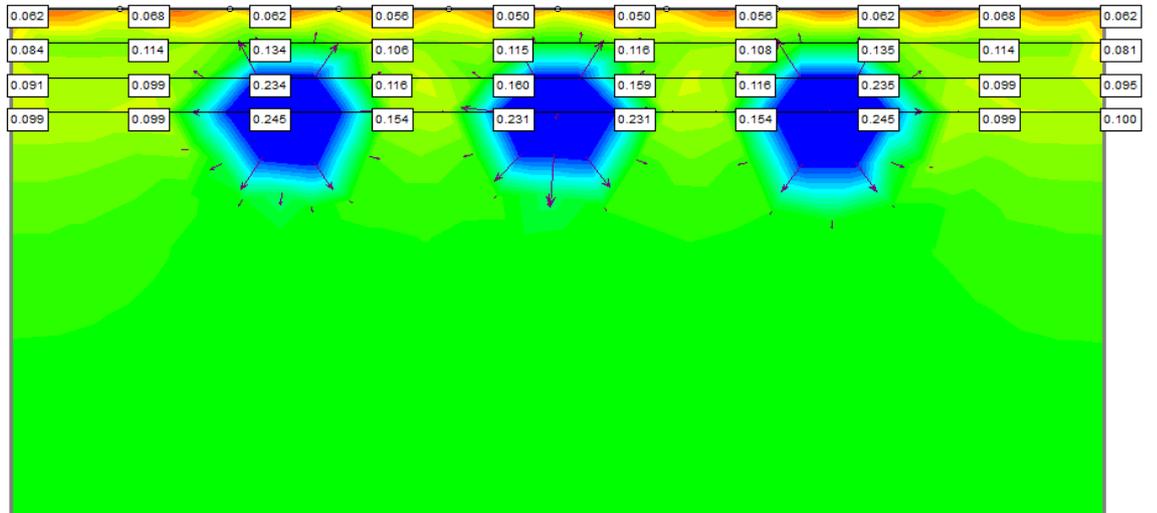
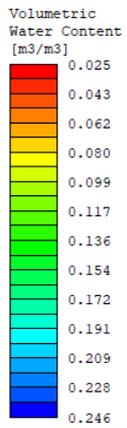
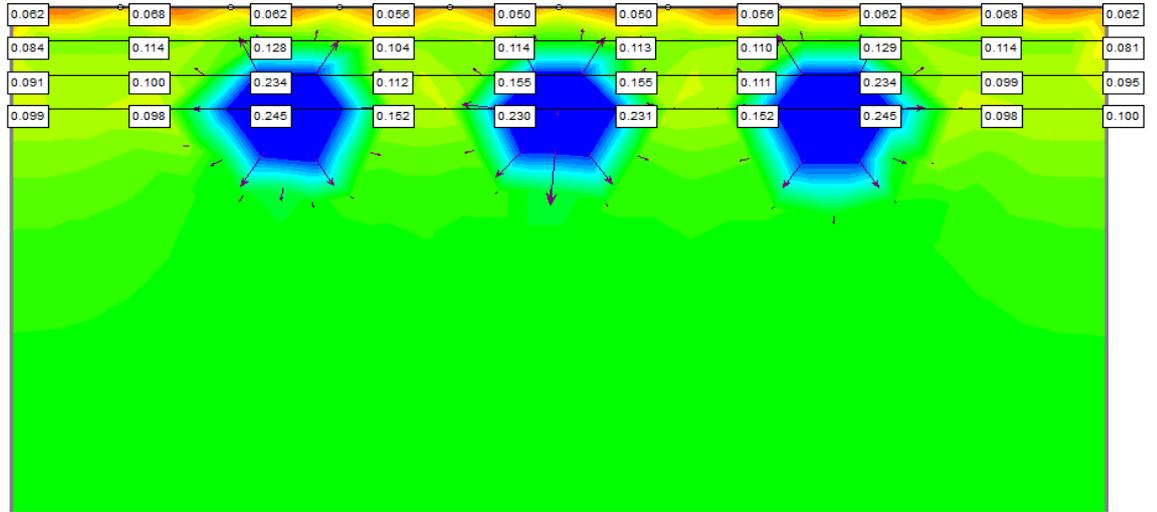
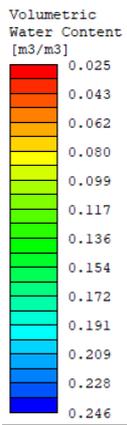
M

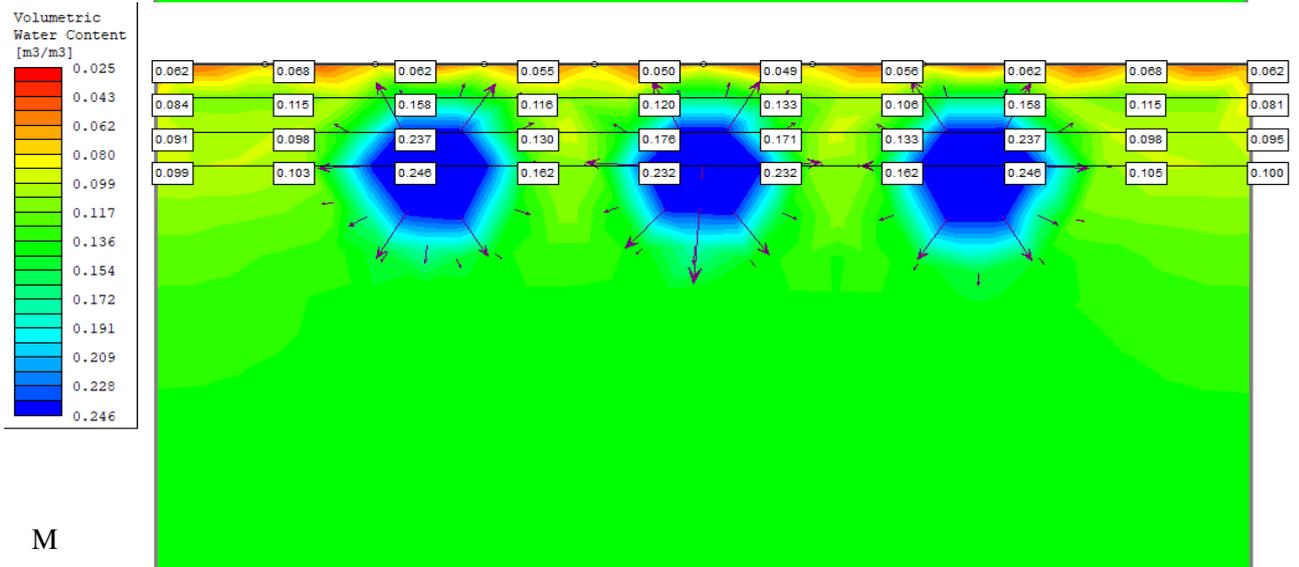
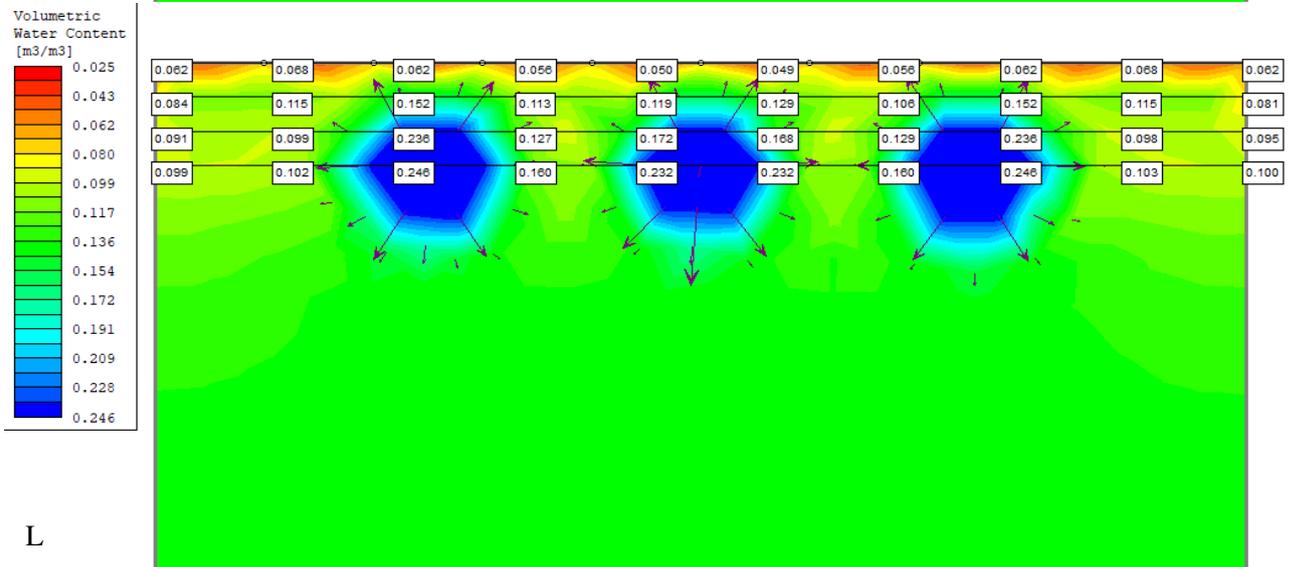
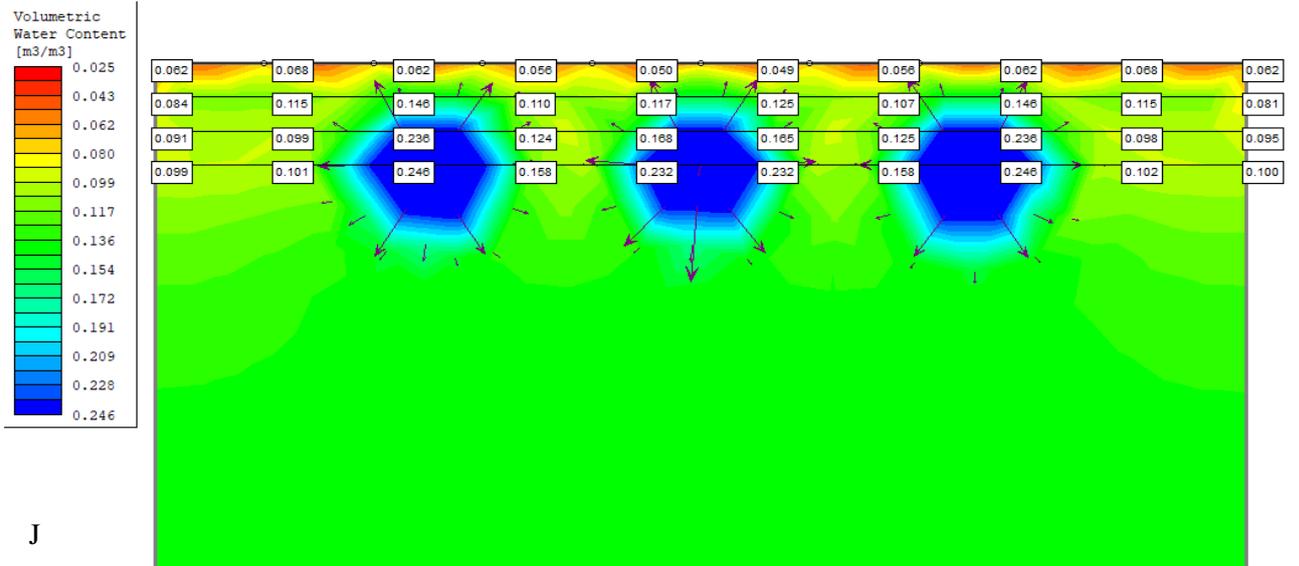
Fonte: Retirado do software SLIDE pela autora, 2020.

Figura 35 – Resultado da simulação durante a irrigação com profundidade do tubo gotejador a 30 cm, 75 cm entre emissores e 30 cm entre plantas. Figura 35A: inicial; Figura 35B: 10 min; Figura 35C: 15 min; Figura 35D: 20 min; Figura 35E: 25 min; Figura 35F: 30 min; Figura 35G: 35 min; Figura 35H: 40 min; Figura 35I: 45 min; Figura 35J: 50 min; Figura 35L: 55 min; Figura 35M: 60 min.



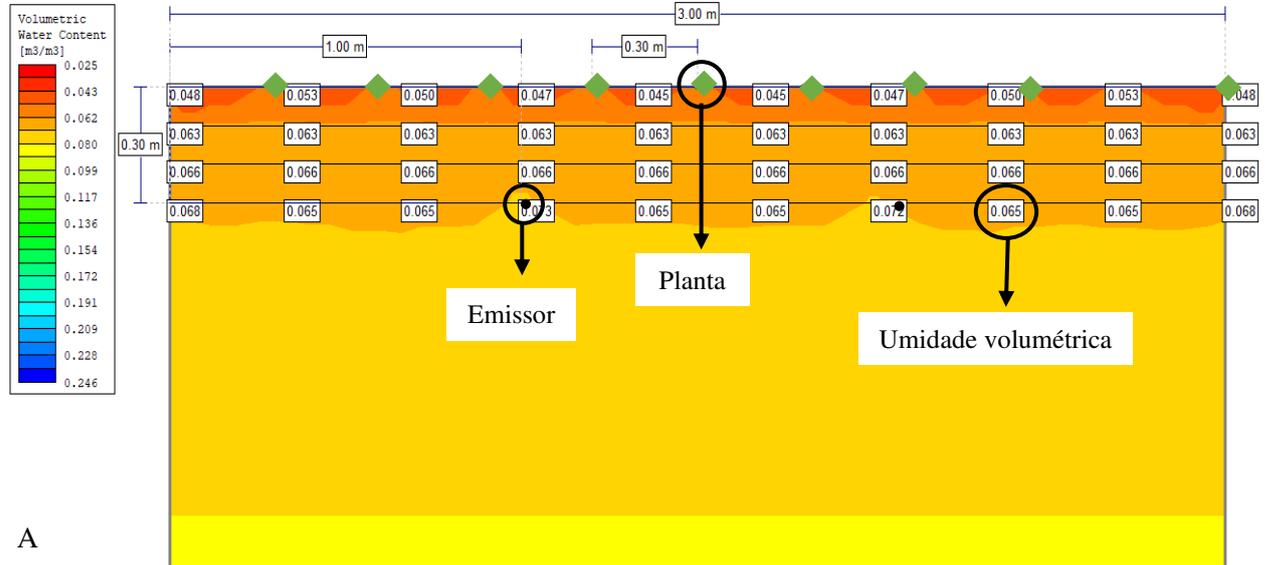




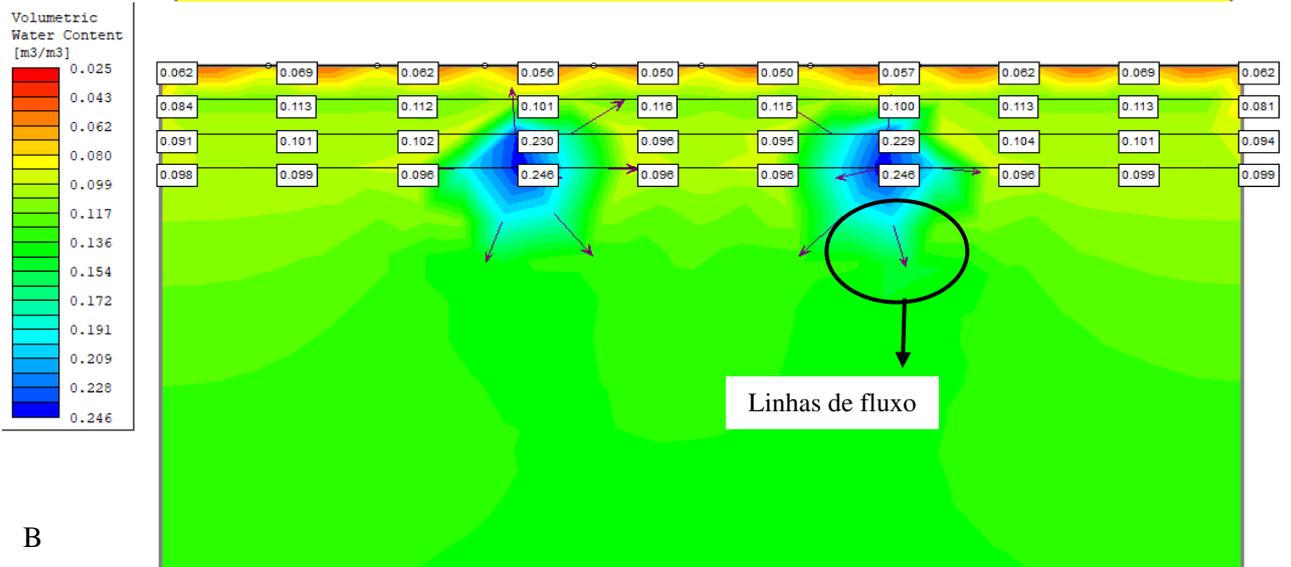


Fonte: Retirado do software SLIDE pela autora, 2020.

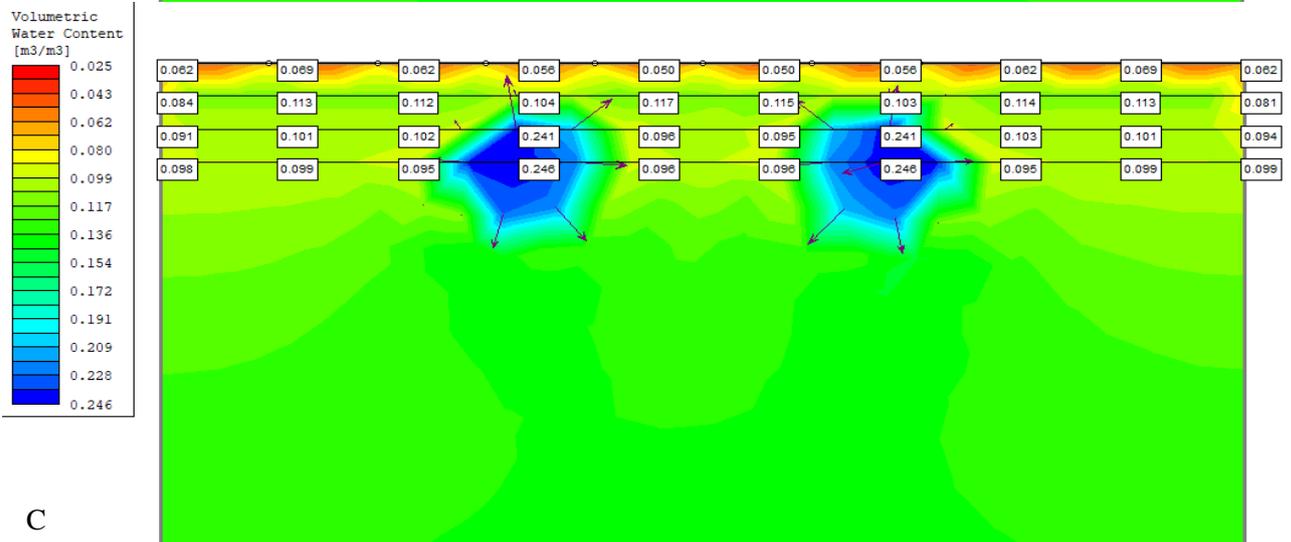
Figura 36 – Resultado da simulação durante a irrigação com profundidade do tubo gotejador a 30 cm, 100 cm entre emissores e 30 cm entre plantas. Figura 36A: inicial; Figura 36B: 10 min; Figura 36C: 15 min; Figura 36D: 20 min; Figura 36E: 25 min; Figura 36F: 30 min; Figura 36G: 35 min; Figura 36H: 40 min; Figura 36I: 45 min; Figura 36J: 50 min; Figura 36L: 55 min; Figura 36M: 60 min.



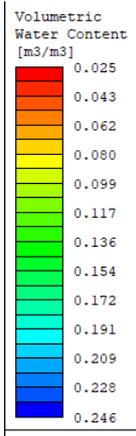
A



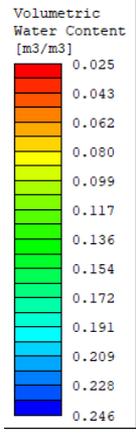
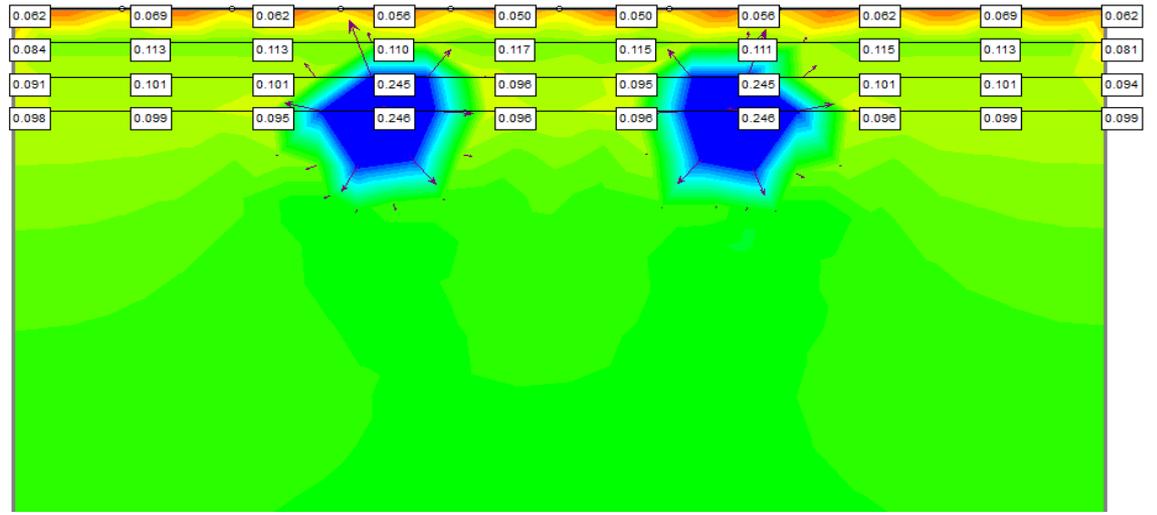
B



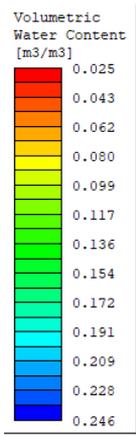
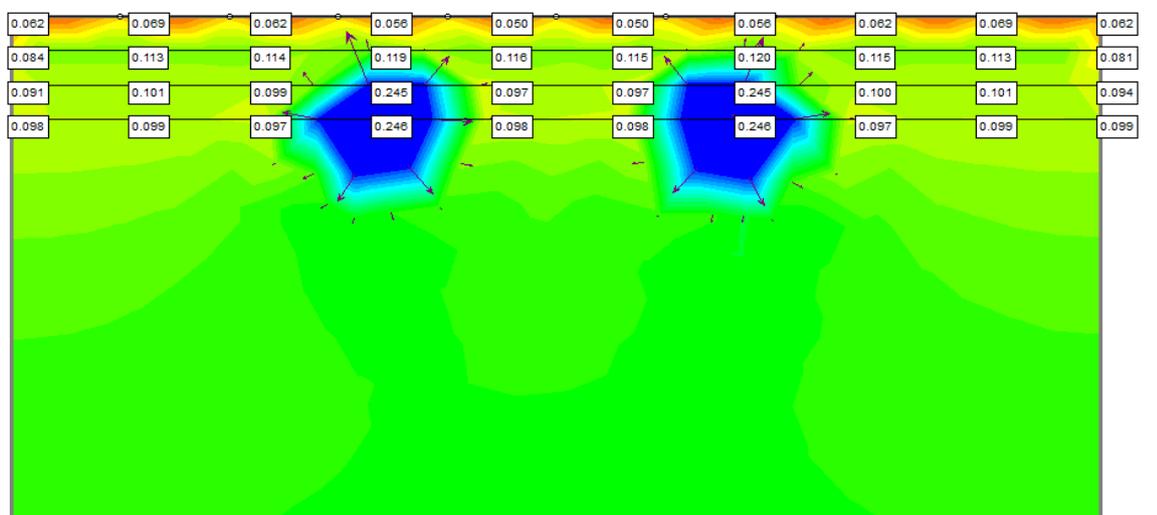
C



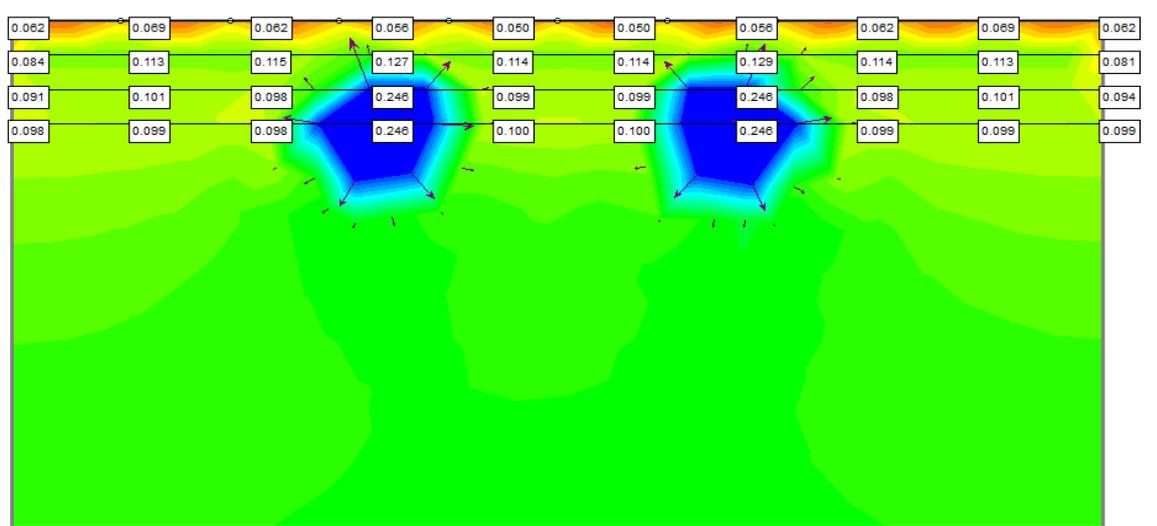
D

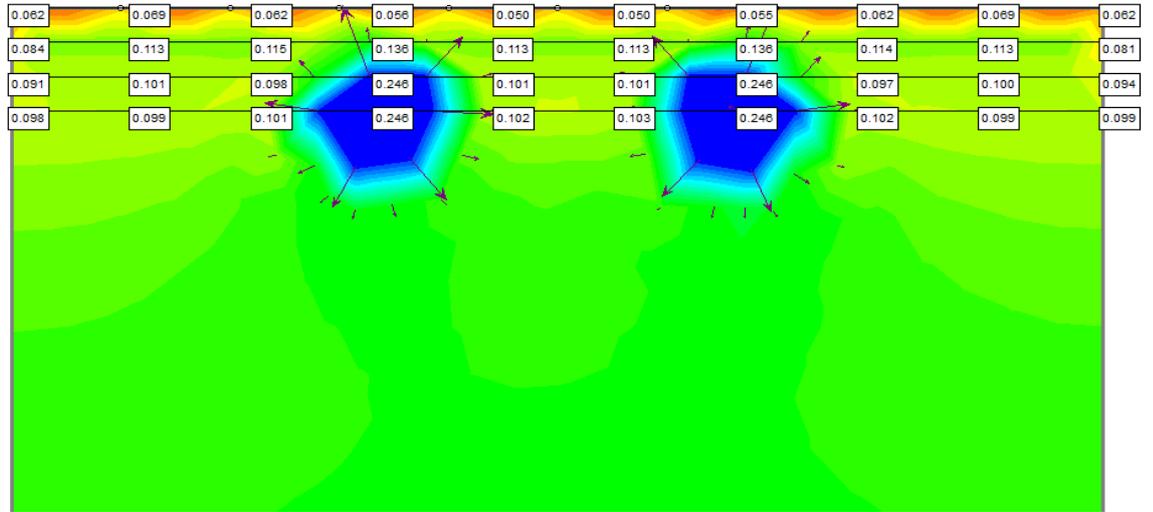
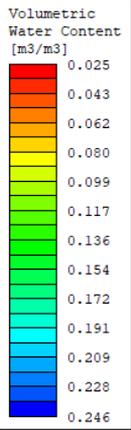


E

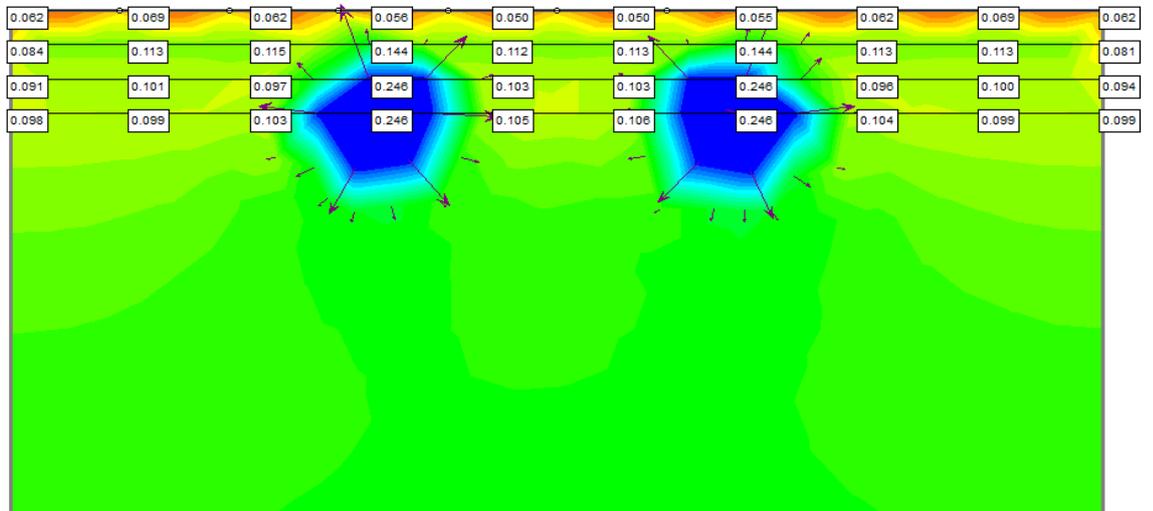
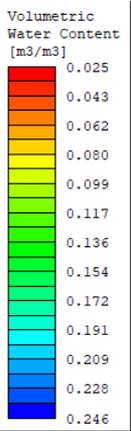


F

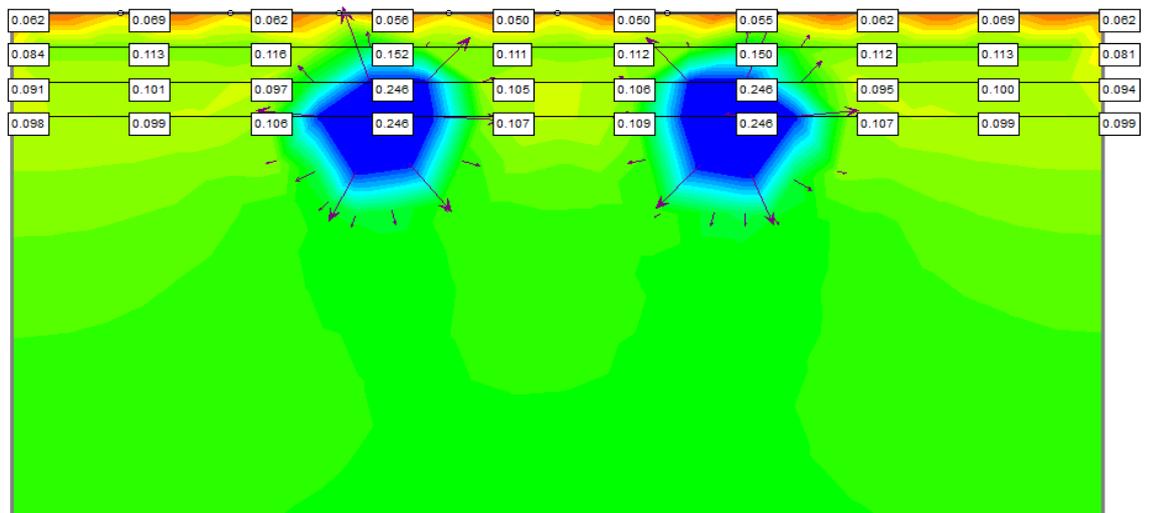
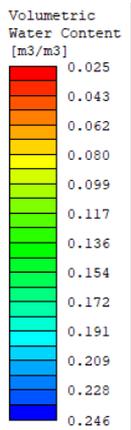




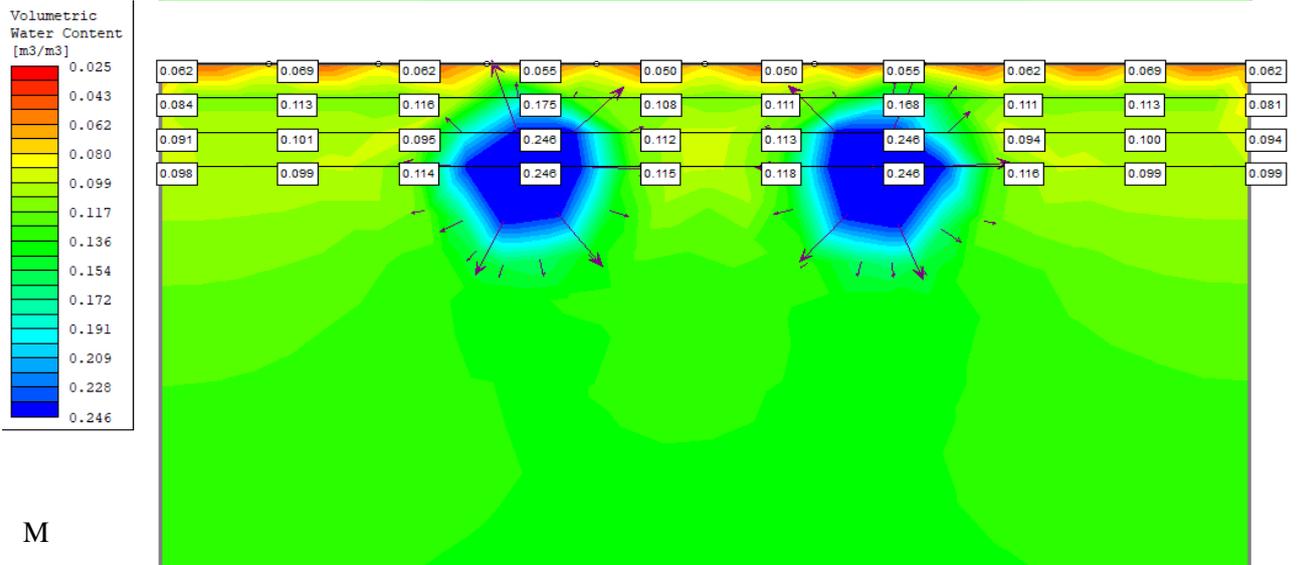
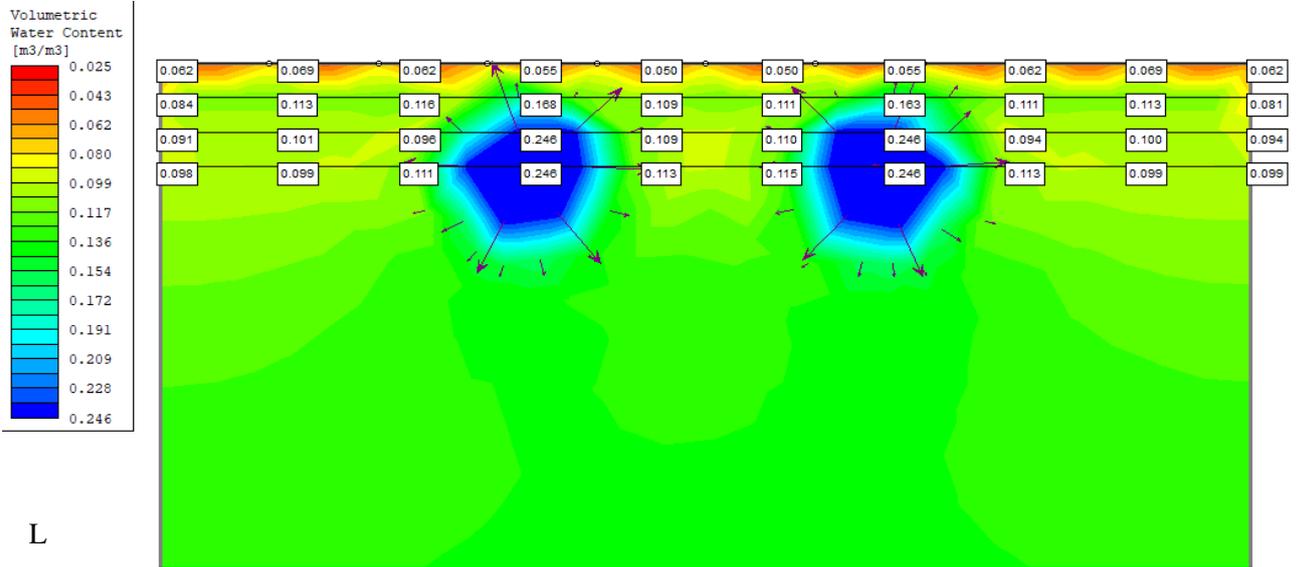
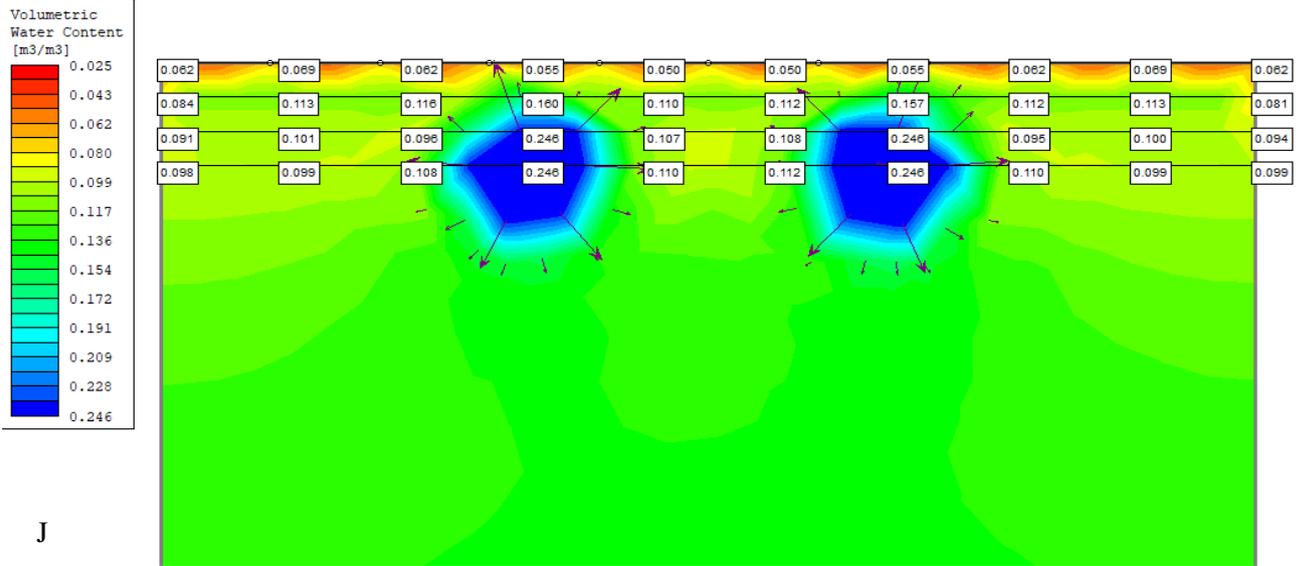
G



H



I



Fonte: Retirado do software SLIDE pela autora, 2020.

Pode-se observar nas figuras que houve um aumento gradativo dos valores de umidade volumétrica ao mesmo tempo que a frente de umedecimento atinge maiores profundidades. Contudo, esta evolução foi mais rápida no início da simulação, pois logo nos 15 primeiros minutos a umidade volumétrica no raio do bulbo úmido já se encontrava na capacidade de campo ( $0,246 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$ ). Valor esse que foi atingido para todas as profundidades de instalação e espaçamentos entre os emissores.

Para a mesma área de estudo e com o mesmo software, Cruz (2015) simulou irrigação por gotejamento em melancia, no entanto, para a medir umidade o autor empregou sensores capacitivos que o levou a observar uma diferença entre o tempo estimado pelo software e estipulado pelos sensores de 10 minutos. Também foi relatado uma evolução mais rápida no início da simulação, atingindo a umidade volumétrica da capacidade de campo com 10 minutos de irrigação.

As imagens das simulações reforçam que a profundidade do molhamento aumenta com a profundidade de instalação do tubo gotejador (SINGH *et al.*, 2006; SIYAL; SKAGGS, 2009). A profundidade da instalação também afeta a posição superior do molhamento frontal ao longo da superfície do solo, mas mantém pouco ou nenhum efeito na extensão do umedecimento horizontal no perfil do solo (SIYAL; SKAGGS, 2009).

A quantidade de água que deve ser aplicada por irrigação é comumente a necessária para que o solo retorne a sua condição de capacidade de campo na camada de solo correspondente à profundidade efetiva do sistema radicular da cultura (MAROUELLI *et al.*, 2011), que de acordo com Arruda, Zullo Júnior e Oliveira (1987) e Moreira (1993) é de 40 a 50 cm para a cultura do milho. Logo, a utilização do software pode auxiliar na decisão do técnico e do irrigante sobre o tempo de irrigação para cada situação do campo. Na Tabela 14, pode-se observar a profundidade atingida pela frente de molhamento para todas as profundidades de instalação do tubo gotejador e os espaçamentos entre os emissores durante a irrigação simulada (60 min, com vazão de  $2 \text{ L h}^{-1}$ ). Nota-se que para as profundidades de instalação do tubo gotejador a 10 cm e a 20 cm, não se chega à capacidade de campo nos 40 cm de profundidade nem com 60 min de irrigação. Já com o tubo gotejador instalado a 30 cm, com 15 min de irrigação a capacidade de campo na profundidade de 40 cm é atingida.

Tabela 14 – Profundidade da frente de molhamento na capacidade de campo de acordo com a profundidade de instalação do tubo gotejador e espaçamento entre emissores durante a irrigação.

Profundidade de instalação do tubo gotejador (cm)	Espaçamento entre emissores (cm)	Tempo de irrigação (min)	Profundidade da frente de molhamento na capacidade de campo (cm)
10	25	60	20
10	50	60	20
10	75	60	20
10	100	60	20
20	25	60	30
20	50	60	30
20	75	60	30
20	100	60	30
30	25	15	40
30	50	15	40
30	75	15	40
30	100	15	40

Fonte: Elaborado pela autora, 2019.

Para avaliar o desempenho do modelo, os teores de água do solo medidos e simulados foram comparados nos cenários simulados (umidade nas diferentes profundidades de instalação do tubo gotejador, espaçamento entre emissores e tempo de irrigação) através do cálculo do coeficiente de determinação ( $R^2$ ) e da raiz do erro médio quadrático (RMSE) (os valores observados e simulados estão no Apêndice A). Na Tabela 15 observam-se estes dois parâmetros estatísticos para cada tratamento. De acordo com a classificação do coeficiente de determinação proposta por Callegari (2009) (Tabela 16), os tratamentos classificaram-se com correlações fortes a muito fortes. O único tratamento que não foi classificado dessa forma foi com a profundidade de instalação do tubo gotejador a 30 cm, espaçamento entre emissores de 75 cm e 10 min de irrigação, que apresentou coeficiente de determinação de 0,598 classificando-se como moderado de acordo com Callegari (2009).

A raiz do erro médio quadrático – RMSE pode ser considerada uma medida análoga ao desvio padrão. Neste estudo, o RMSE para todos os tratamentos ficou bem próximo de zero, podendo considerar que o modelo apresenta uma boa previsão do que acontece no campo.

Tabela 15 – Quadro-resumo coeficiente de determinação ( $R^2$ ) e raiz média do erro quadrado entre os teores de água do solo medidos e simulados para os tratamentos.

Profundidade de instalação do tubo gotejador (cm)	Espaçamento entre emissores (cm)	Tempo de irrigação (min)	$R^2$	RMSE ( $\text{cm}^3\text{cm}^{-3}$ )
10	25	10	0,996	0,003
10	25	30	0,996	0,002
10	25	60	0,730	0,037
10	50	10	0,928	0,007
10	50	30	0,987	0,003
10	50	60	0,997	0,002
10	75	10	0,977	0,003
10	75	30	0,992	0,001
10	75	60	0,944	0,015
10	100	10	0,876	0,005
10	100	30	0,965	0,004
10	100	60	0,935	0,004
20	25	10	0,892	0,007
20	25	30	0,983	0,006
20	25	60	0,921	0,013
20	50	10	0,989	0,004
20	50	30	0,989	0,002
20	50	60	0,994	0,006
20	75	10	0,990	0,001
20	75	30	0,962	0,004
20	75	60	0,981	0,004
20	100	10	0,960	0,007
20	100	30	0,881	0,020
20	100	60	0,966	0,007
30	25	10	0,931	0,005
30	25	30	0,997	0,003
30	25	60	0,952	0,033
30	50	10	0,866	0,011
30	50	30	0,994	0,007
30	50	60	0,987	0,007
30	75	10	0,598	0,015
30	75	30	0,996	0,012
30	75	60	0,994	0,005
30	100	10	0,847	0,034
30	100	30	0,847	0,014
30	100	60	0,713	0,024

Fonte: Elaborado pela autora, 2019.

Tabela 16 – Classificação dos valores do coeficiente de determinação ( $R^2$ )

Coeficiente de determinação ( $R^2$ )	Classificação
0	Nula
$0 < R^2 \leq 0,3$	Fraca
$0,3 < R^2 \leq 0,6$	Moderada
$0,6 < R^2 \leq 0,9$	Forte
$0,9 < R^2 < 1$	Muito forte
$R^2 = 1$	Perfeita

Fonte: CALLEGARI, 2009.

Após as simulações realizadas durante um evento de irrigação de 60 min, foram propostos cenários após o corte da irrigação. Nas Tabelas 17, 18 e 19 estão dispostas as análises estatísticas descritivas dos dados de umidade em relação a profundidade de instalação do tubo gotejador, o espaçamento entre emissores e ao tempo após o corte irrigação, respectivamente.

Tabela 17 – Medidas estatísticas descritivas da umidade medida em campo em relação a profundidade de instalação do tubo gotejador após o corte da irrigação.

Métrica de análise	Profundidade 10 cm	Profundidade 20 cm	Profundidade 30 cm
n	36	36	36
Mínimo	0,170	0,170	0,150
Máximo	0,240	0,250	0,250
Mediana	0,204	0,210	0,185
Média	0,205	0,211	0,188
Desvio padrão	0,018	0,022	0,027
Variância	0,000	0,000	0,001
Assimetria	-0,077	0,039	0,307
Distribuição	Normal	Normal	Normal

Fonte: Elaborado pela autora, 2019.

Ao analisar a Tabela 17, pode-se inferir que para a profundidade de instalação do tubo gotejador a 20 cm, foi encontrada a maior umidade média. O desvio padrão para as profundidades de instalação do tubo gotejador a 10 e a 20 cm ficou em torno de 2%, enquanto para a profundidade de 30 cm ficou em torno de 3%, todas indicando uma baixa dispersão dos dados em relação à média. Todos os dados apresentaram distribuição normal de acordo com o teste de Kolmogorov-Smirnov.

Observando a Tabela 18, conclui-se que a maior umidade média foi encontrada para o espaçamento entre os emissores de 25 cm, o que era esperado pois tem-se mais fontes de água mais próximas umas das outras. O desvio padrão para os 4 espaçamentos ficou em torno de 3% indicando uma baixa dispersão dos dados em relação à média. Todos os tratamentos apresentaram distribuição normal de acordo com o teste de Kolmogorov-Smirnov.

Tabela 18 – Medidas estatísticas descritivas da umidade medida em campo após o corte da irrigação em relação ao espaçamento entre os emissores.

Métrica de análise	Espaçamento 1 (25 cm)	Espaçamento 2 (50 cm)	Espaçamento 3 (75 cm)	Espaçamento 4 (100 cm)
n	27	27	27	27
Mínimo	0,180	0,150	0,150	0,170
Máximo	0,250	0,250	0,240	0,220
Mediana	0,223	0,200	0,193	0,200
Média	0,217	0,200	0,192	0,196
Desvio padrão	0,020	0,027	0,027	0,014
Variância	0,000	0,001	0,001	0,000
Assimetria	-0,421	-0,104	0,028	-0,374
Distribuição	Normal	Normal	Normal	Normal

Fonte: Elaborado pela autora, 2019.

Na Tabela 19 pode-se observar que a maior média de umidade foi encontrada para 10 min após o corte da irrigação, o que era esperado pois com um menor tempo após o corte da aplicação de água, a quantidade de água no solo ainda é grande. A menor média de umidade foi encontrada 60 min após o corte da irrigação, o que também era esperado pois o solo teve mais tempo para perder umidade. O desvio padrão para os três tempos ficou em torno de 2%, indicando uma baixa dispersão dos dados em relação à média. Todos os tratamentos apresentaram distribuição normal de acordo com o teste de Komolgorov-Smirnov.

Tabela 19 – Medidas estatísticas descritivas da umidade medida em campo em relação ao tempo após o corte da irrigação.

Métrica de análise	Tempo 1 (10 min)	Tempo 2 (30 min)	Tempo 3 (60 min)
n	36	36	36
Mínimo	0,170	0,160	0,150
Máximo	0,250	0,230	0,220
Mediana	0,220	0,202	0,181
Média	0,222	0,202	0,180
Desvio padrão	0,018	0,019	0,016
Variância	0,000	0,000	0,000
Assimetria	-0,913	-0,566	-0,345
Distribuição	Normal	Normal	Normal

Fonte: Elaborado pela autora, 2019.

Foi feita a análise de variância para as variáveis profundidade de instalação do tubo gotejador, espaçamento entre os emissores, tempo após o corte da irrigação, umidade e suas interações, o resultado está disposto na Tabela 20.

Tabela 20 - Análise de variância da umidade como variável dependente da profundidade de instalação do tubo gotejador, espaçamento entre os emissores, tempo após o corte da irrigação e a interação entre estes.

FV	GL	QM	F	Sig
Profundidade	2	0,005	101,772	0,000**
Espaçamento	3	0,003	69,002	0,000**
Tempo	2	0,016	329,867	0,000**
Prof. x Esp.	6	0,001	22,505	0,000**
Prof. x Tempo	4	0,000	2,146	0,084
Esp. x Tempo	6	0,000	7,687	0,000**
Prof. x Esp. x Tempo	12	0,000	1,468	0,157

Fonte: Elaborado pela autora, 2019.

Ao analisar a Tabela 20, pode-se inferir que as variáveis (profundidade de instalação do tubo gotejador, espaçamento entre emissores e tempo após o corte da irrigação) e a interação do espaçamento entre emissores e o tempo após o corte da irrigação influenciaram significativamente a umidade volumétrica do solo após o corte da irrigação. Posteriormente foi feito o teste de Tukey a 5% de significância e os resultados estão disposto na Tabela 21.

Tabela 21 – Resultados do Teste de Tukey a 5% de significância para as variáveis profundidade de instalação do tubo gotejador, espaçamento entre emissores e tempo em relação a umidade.

Profundidade (cm)	Média	Espaçamento (cm)	Média	Tempo (min)	Média
10	0,205 b	25	0,217 a	10	0,222 a
20	0,211 a	50	0,200 b	30	0,202 b
30	0,188 c	75	0,192 c	60	0,180 c
		100	0,196 bc		

Fonte: Elaborado pela autora, 2019.

Para a variável profundidade, a menor média foi encontrada para a profundidade de instalação do tubo gotejador a 30 cm. Esse resultado pode ser justificado pela maior proximidade do tubo gotejador da profundidade efetiva das raízes do milho que é de 40 a 50 cm (ARRUDA; ZULLO JÚNIOR; OLIVEIRA, 1987; MOREIRA, 1993), facilitando a absorção da água pelas raízes. A maior umidade encontrada na profundidade de instalação a 20 cm, pode ser justificada pelo acúmulo de argila de 114 g.kg<sup>-1</sup> de argila de 10 a 39 centímetros no perfil do solo e, portanto, a água tende a ficar acumulada nesta camada (VIEIRA, 2013). De acordo com o Teste de Tukey, as profundidades de instalação apresentaram diferença significativa entre as médias de umidade.

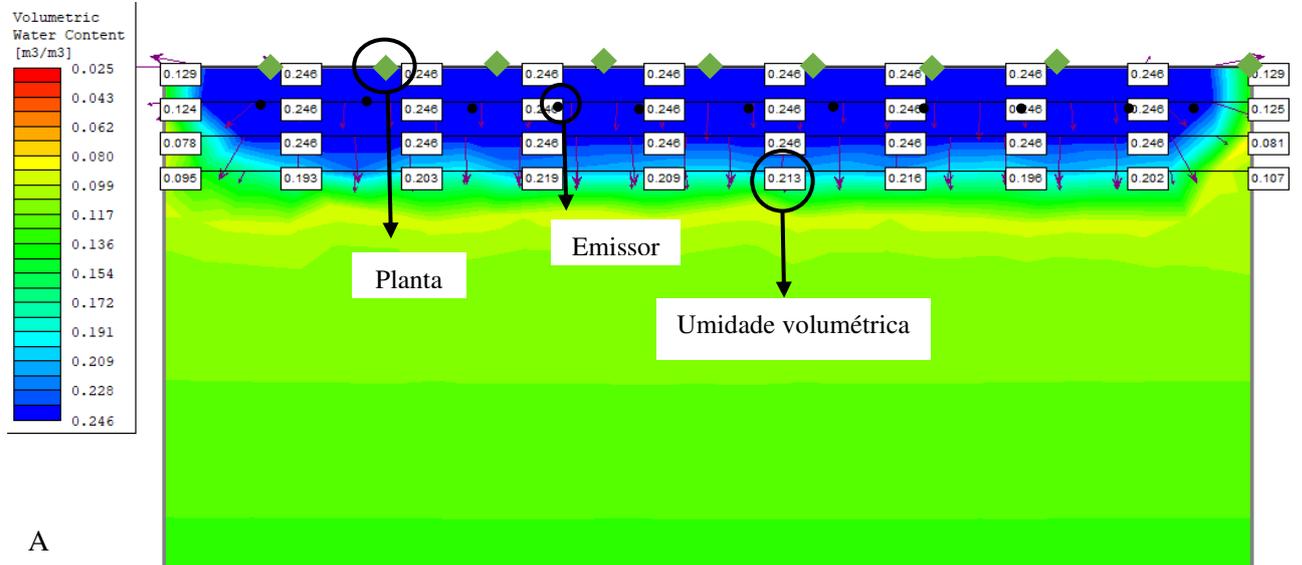
Para a variável espaçamento entre os emissores, o teste de médias indicou a maior média para o espaçamento de 25 cm entre os emissores, assim como nos testes durante a

irrigação. Tal resultado é razoável haja vista a maior proximidade entre as fontes de aplicação de água. De acordo com o Teste de Tukey, os espaçamentos entre emissores de 50 cm e 100 cm, 75 e 100 cm não apresentaram diferença significativa entre eles. Já o espaçamento entre emissores de 25 cm, apresentou diferença significativa em relação a todos os outros. O espaçamento de 75 cm obteve a menor média de umidade dentre os espaçamentos analisados, o que era esperado já que durante a irrigação também teve esse comportamento.

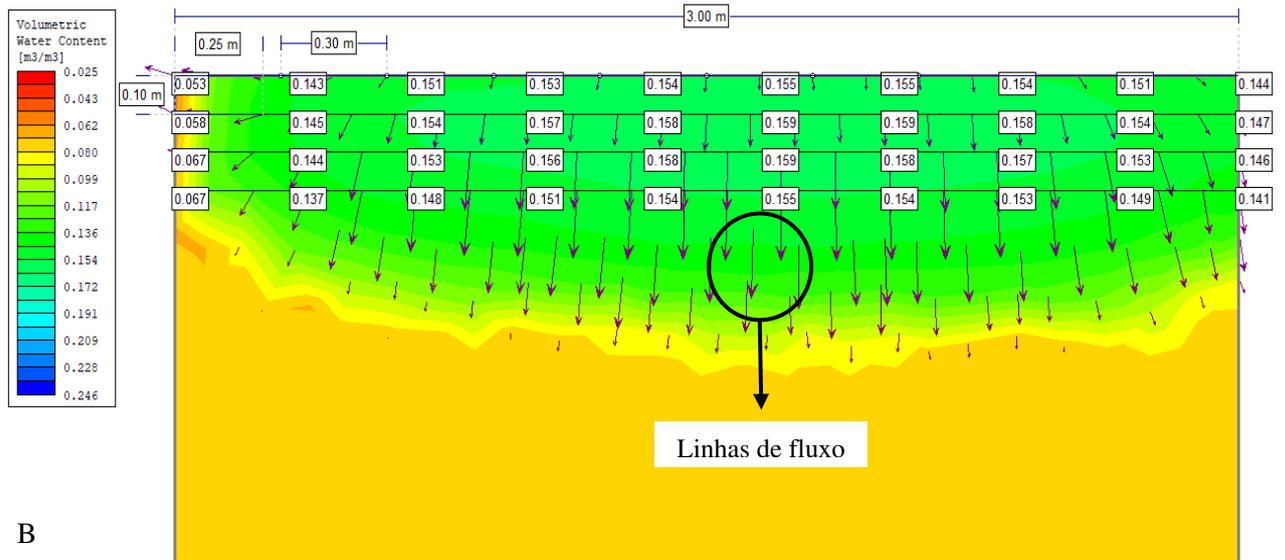
Para a variável tempo após o corte da irrigação, a maior média de umidade foi encontrada no tempo de 10 min, o que pode ser explicado por ser bem próximo do tempo total de aplicação de água, que gera um maior volume de solo úmido (SUBBAUAH; MASHRU, 2013), aumentando o tempo para a distribuição dessa água no solo. De acordo com o Teste de Tukey, os três tempos após o corte da irrigação apresentaram diferença significativa entre as médias, com a maior média sendo apresentada pelo tempo de 10 min após o corte da irrigação.

As simulações foram feitas com as condições encontradas em campo após o corte da irrigação e utilizadas no modelo. O progresso do modelo com os parâmetros adequados pode ser visualizado nas Figuras 37, 38, 39, 40, 41, 42, 43, 44, 45, 46, 47 e 48, que apresentam a evolução da simulação do fluxo de água no solo ( $\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$ ) após um ciclo de irrigação de 60 minutos, com uma vazão de  $2 \text{ L h}^{-1}$ , diferentes profundidades de instalação do tubo gotejador (10, 20 e 30 cm) e diferentes espaçamentos entre os emissores (25, 50, 75 e 100 cm). Nestas figuras constou a condição inicial, que é considerada a condição de umidade atual do sistema logo após o evento de irrigação e mais 11 estágios temporais, que compreendem a condição transiente do modelo (simulação da frente de umedecimento com o tempo), distribuídos em 60, 70, 80, 90, 100, 120 e 150 minutos.

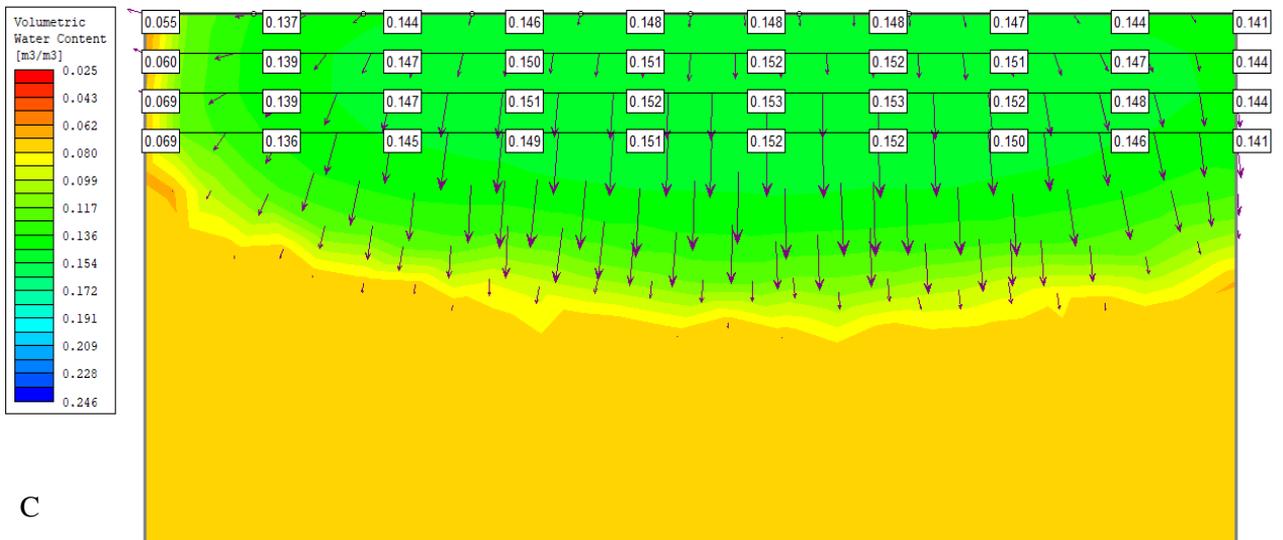
Figura 37 – Resultado da simulação após a irrigação com profundidade do tubo gotejador a 10 cm, 25 cm entre emissores e 30 cm entre plantas. Figura 37A: inicial (60 min); Figura 37B: 70 min; Figura 37C: 80 min; Figura 37D: 90 min; Figura 37E: 100 min; Figura 37F: 120 min; Figura 37G: 150 min.



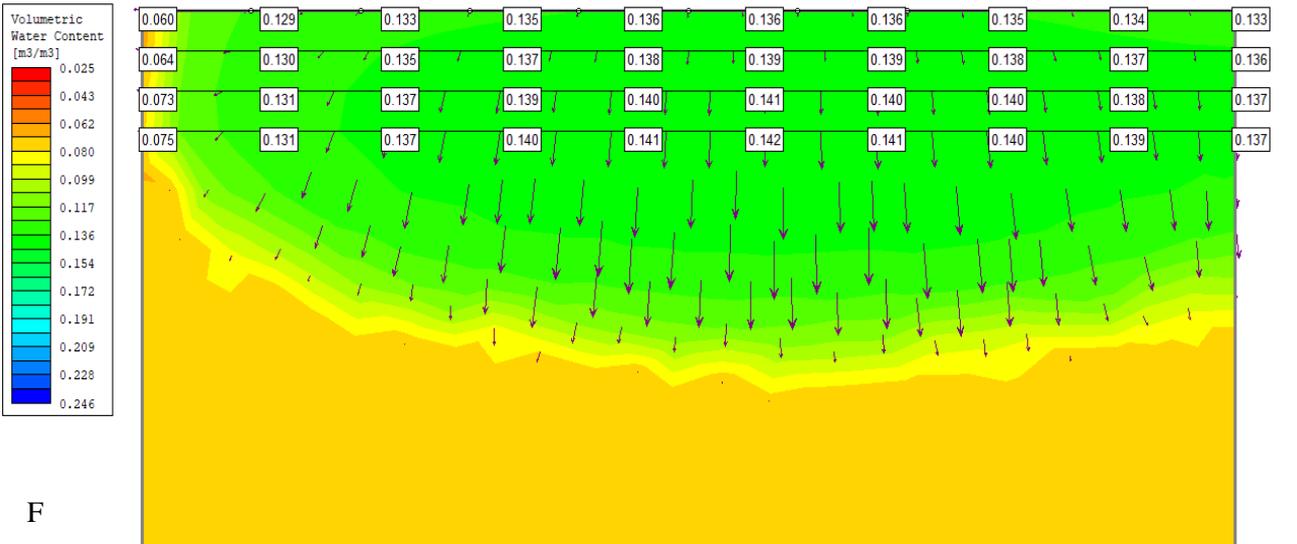
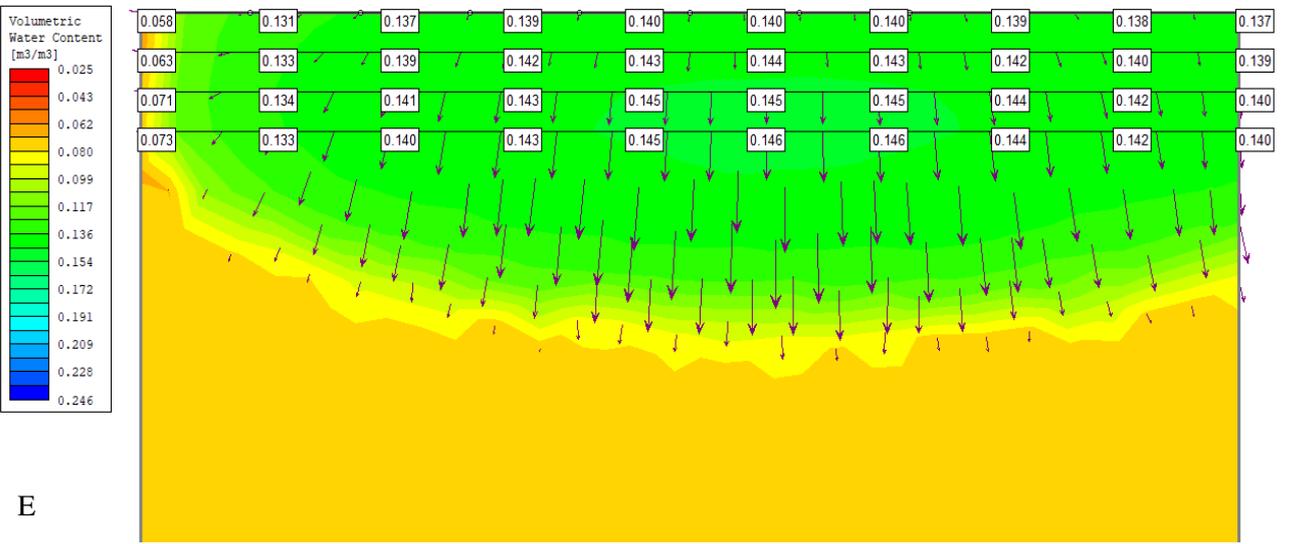
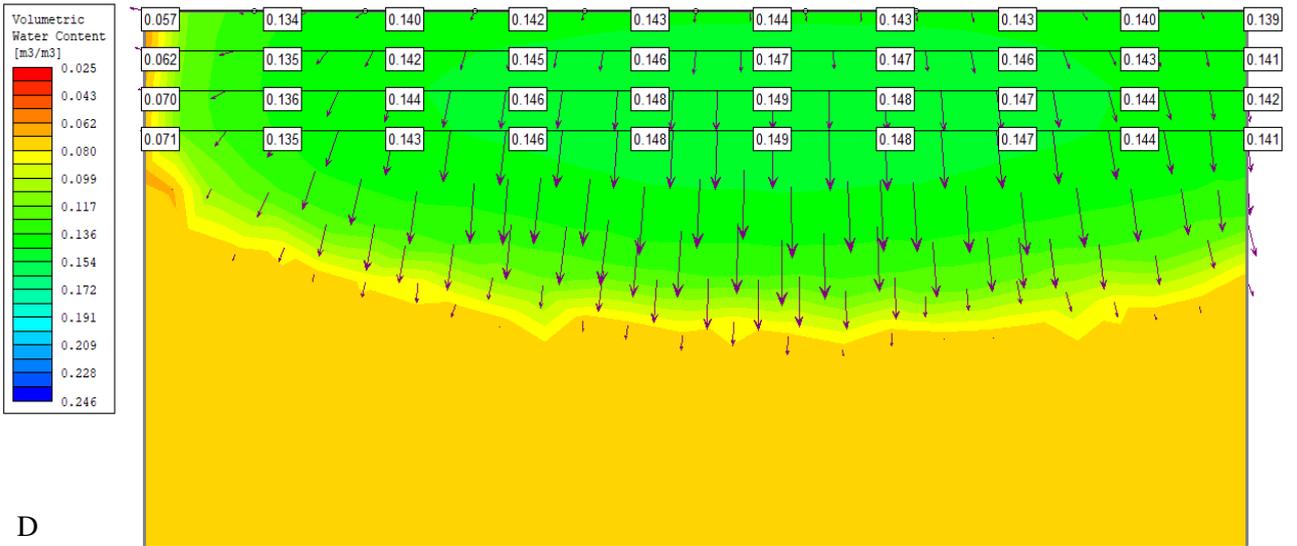
A

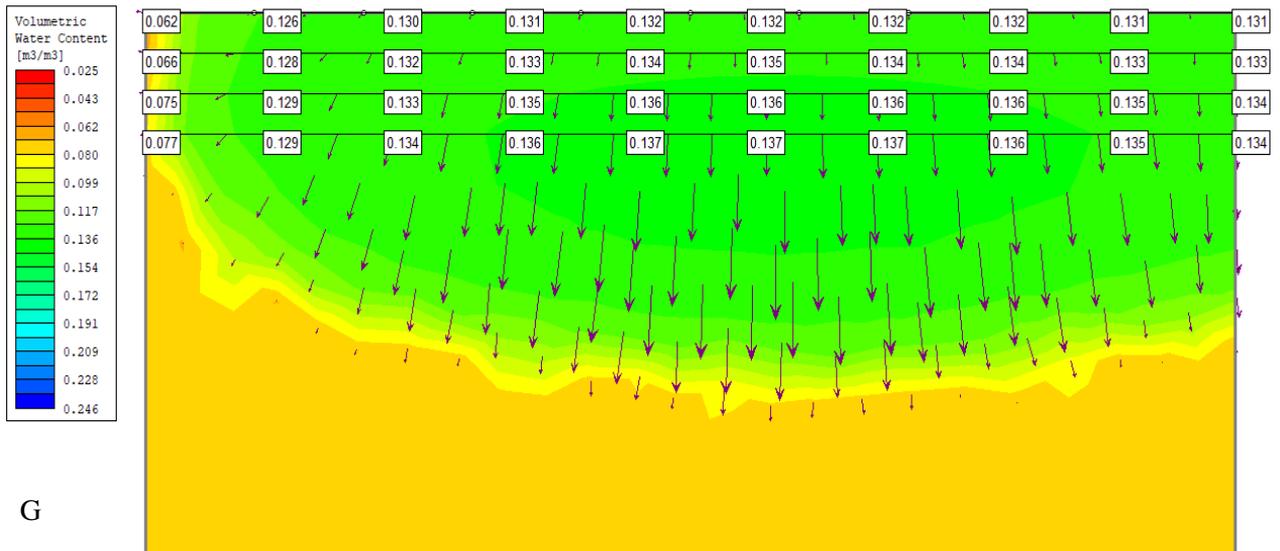


B



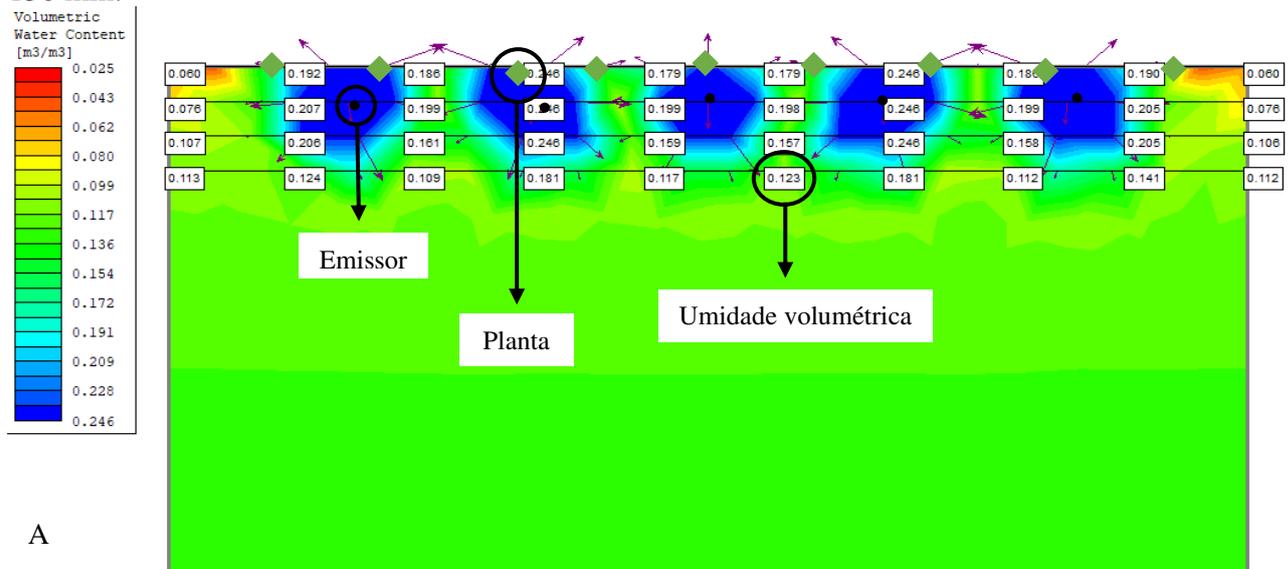
C

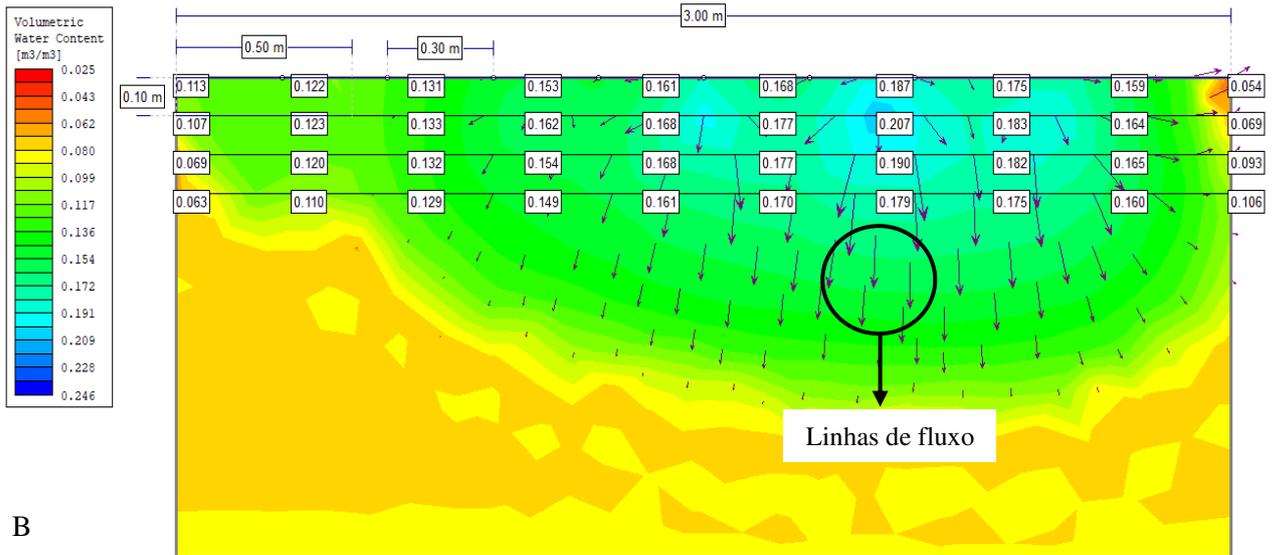




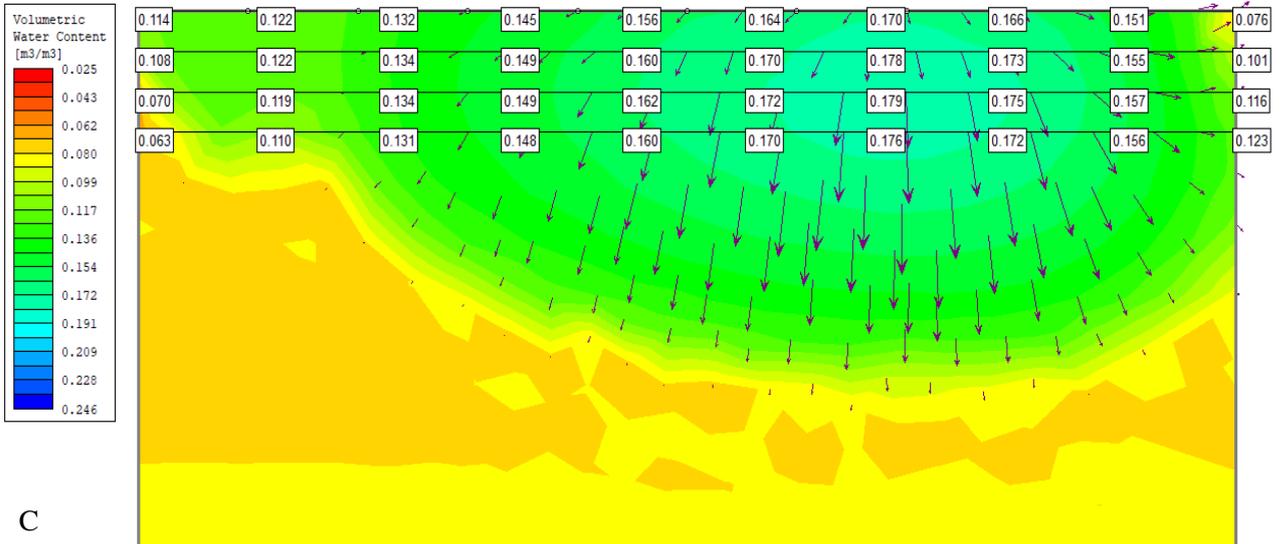
Fonte: Retirado do software SLIDE pela autora, 2020.

Figura 38 – Resultado da simulação após a irrigação com profundidade do tubo gotejador a 10 cm, 50 cm entre emissores e 30 cm entre plantas. Figura 38A: inicial (60 min); Figura 38B: 70 min; Figura 38C: 80 min; Figura 38D: 90 min; Figura 38E: 100 min; Figura 38F: 120 min; Figura 38G: 150 min.

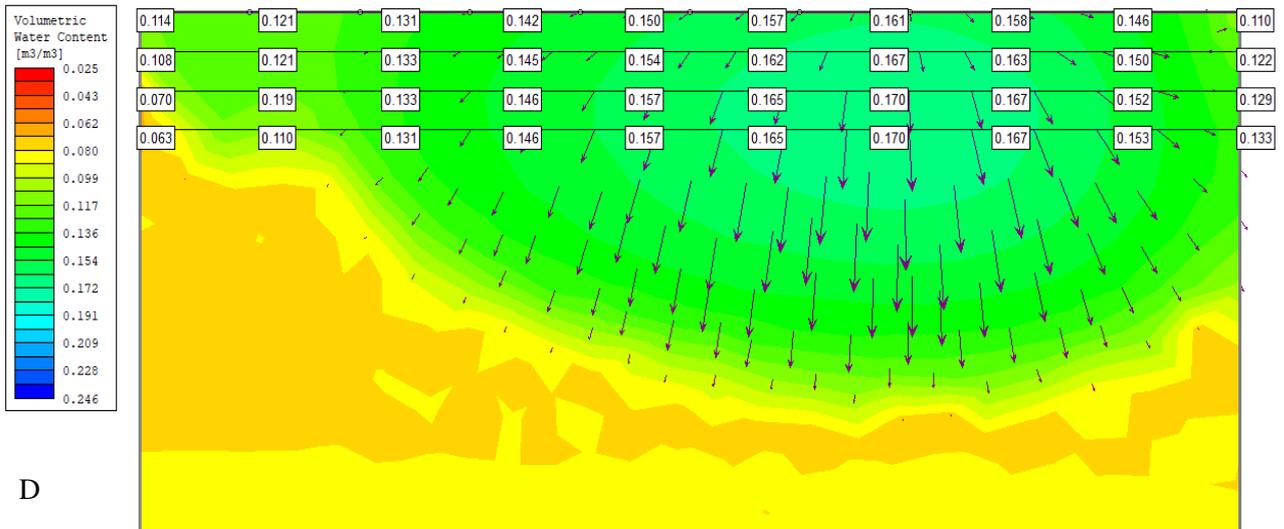




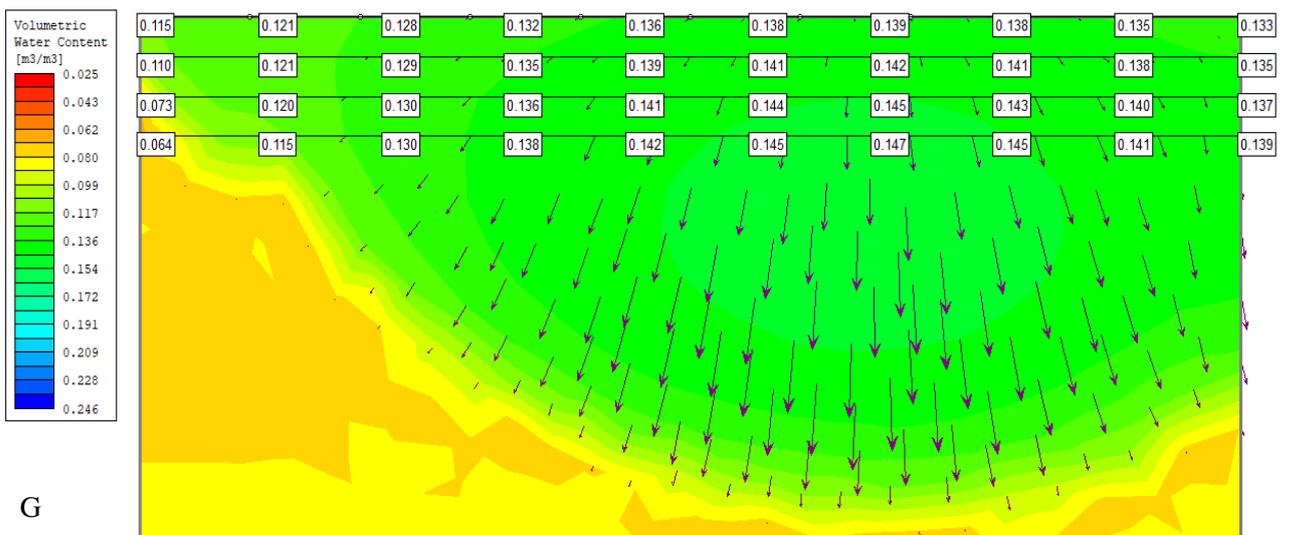
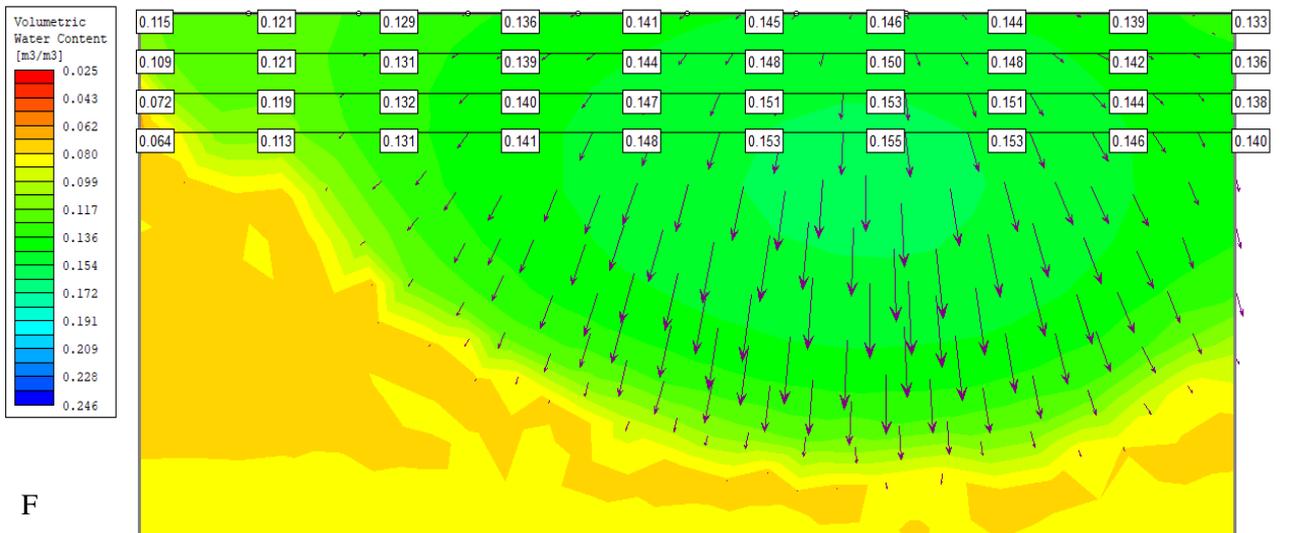
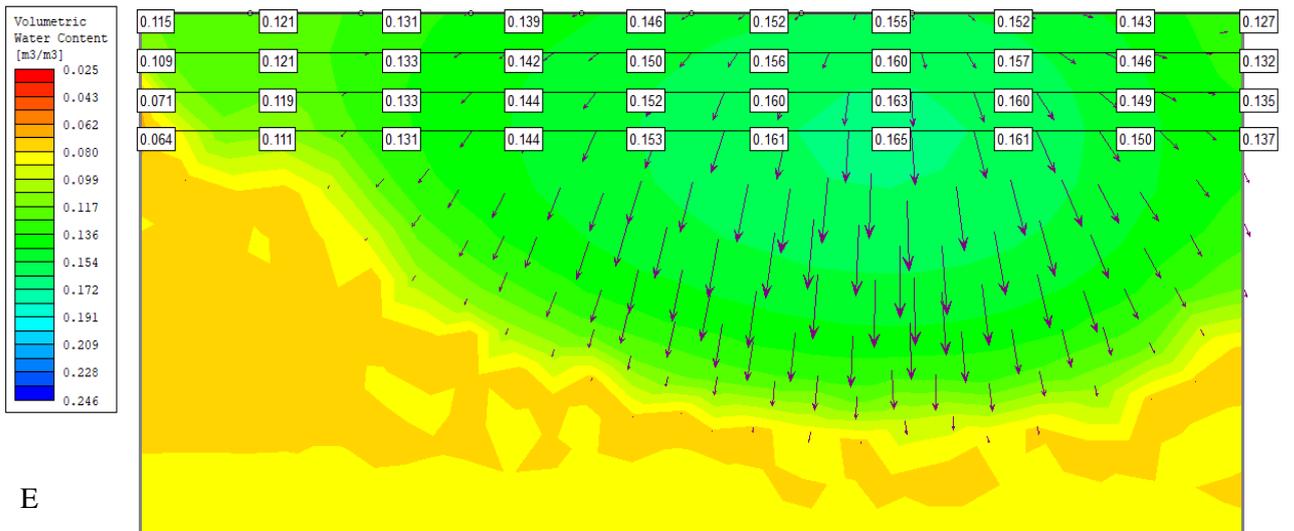
B



C

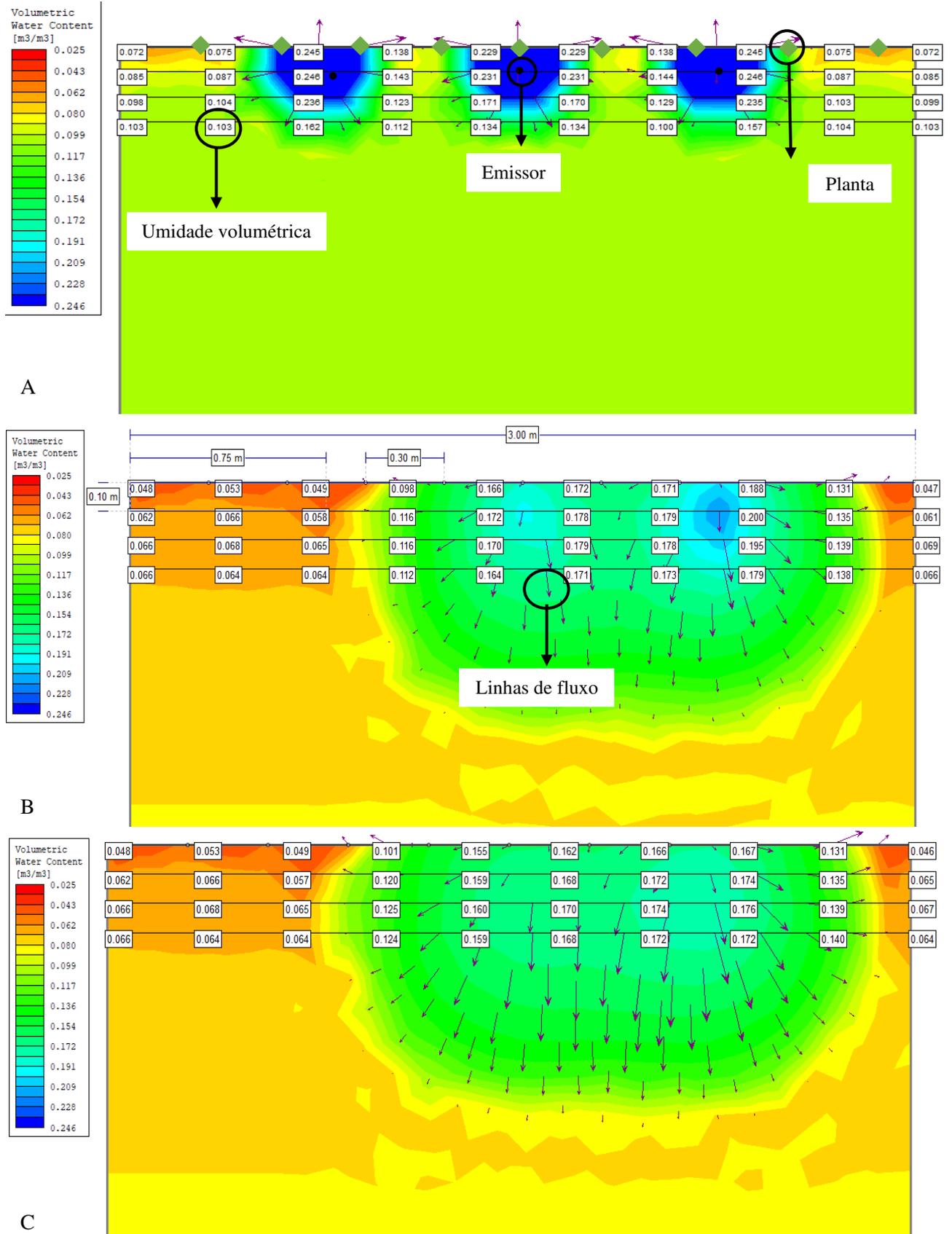


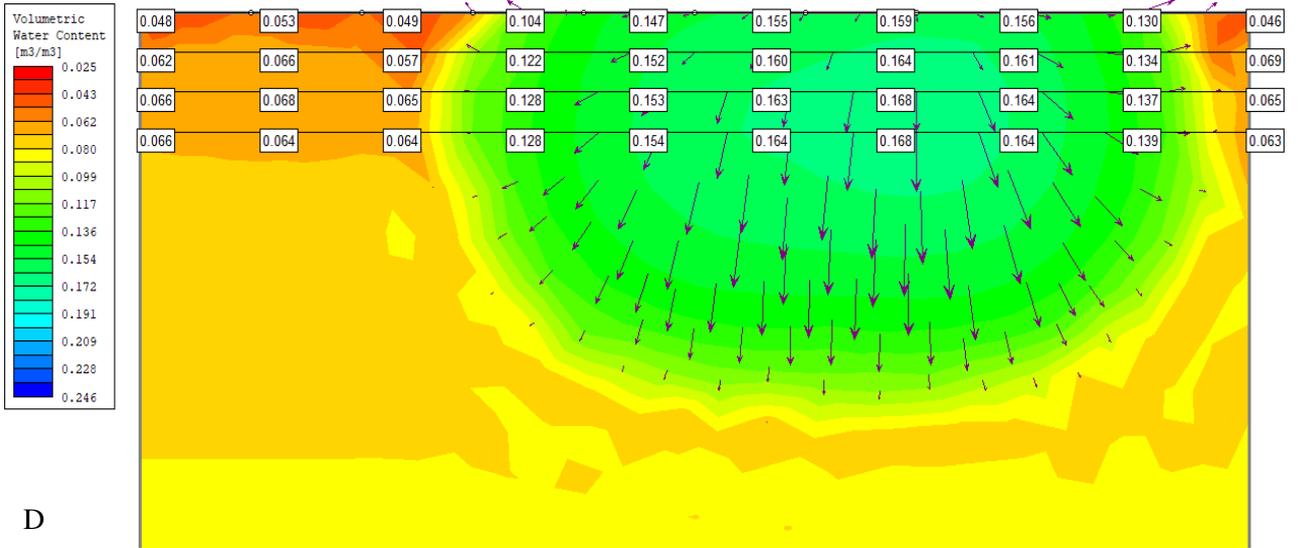
D



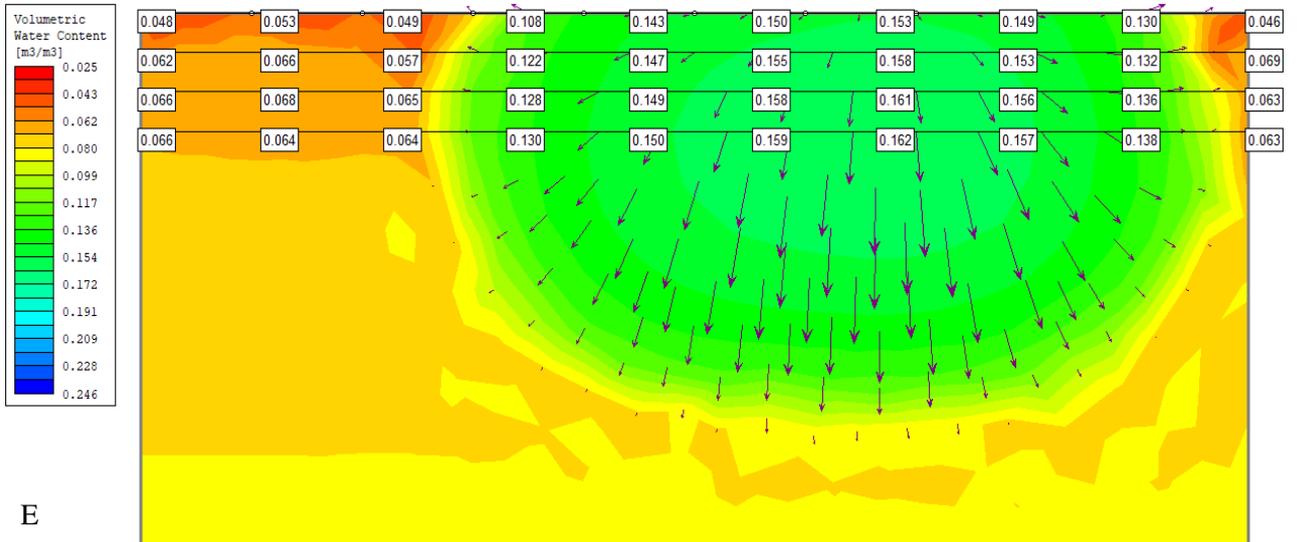
Fonte Retirado do software SLIDE pela autora, 2020.

Figura 39 – Resultado da simulação após a irrigação com profundidade do tubo gotejador a 10 cm, 75 cm entre emissores e 30 cm entre plantas. Figura 39A: inicial (60 min); Figura 39B: 70 min; Figura 39C: 80 min; Figura 39D: 90 min; Figura 39E: 100 min; Figura 39F: 120 min; Figura 39G: 150 min.

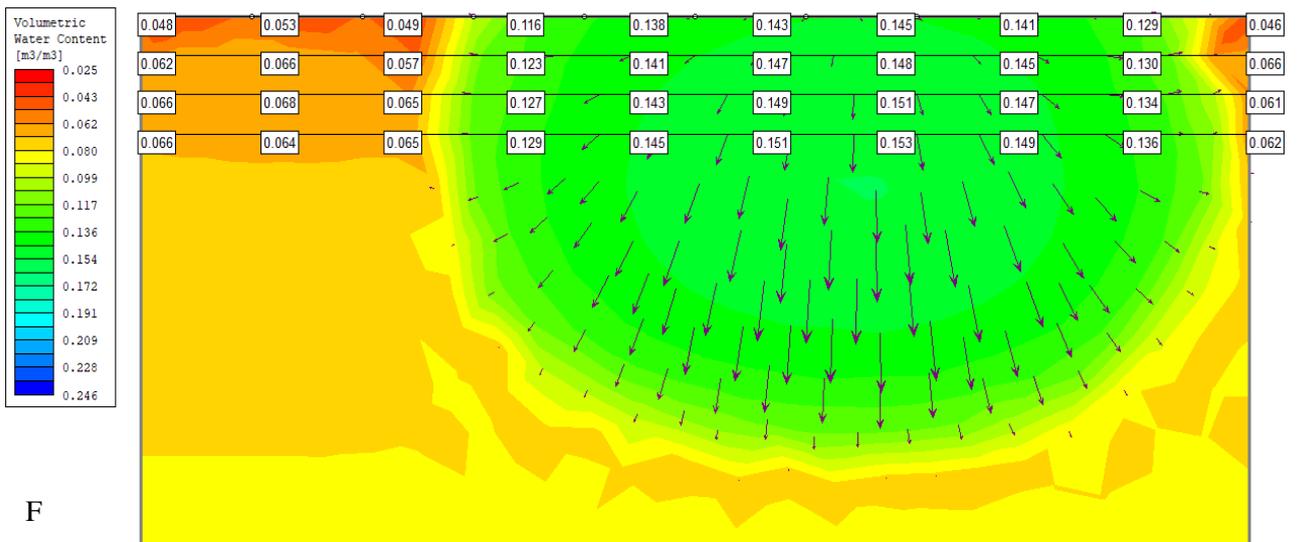




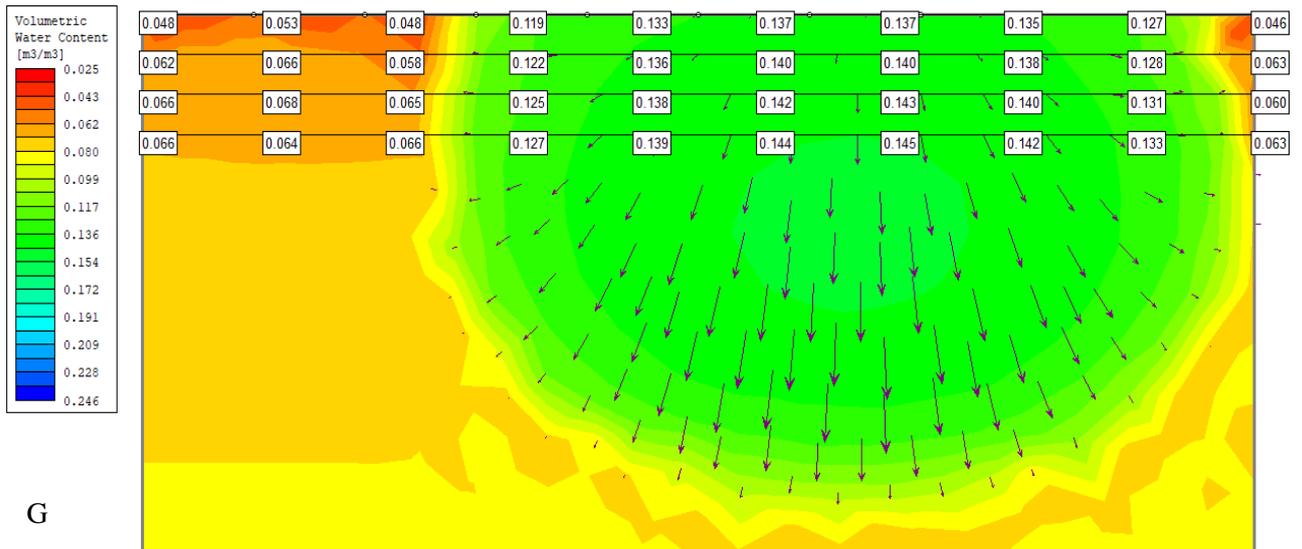
D



E

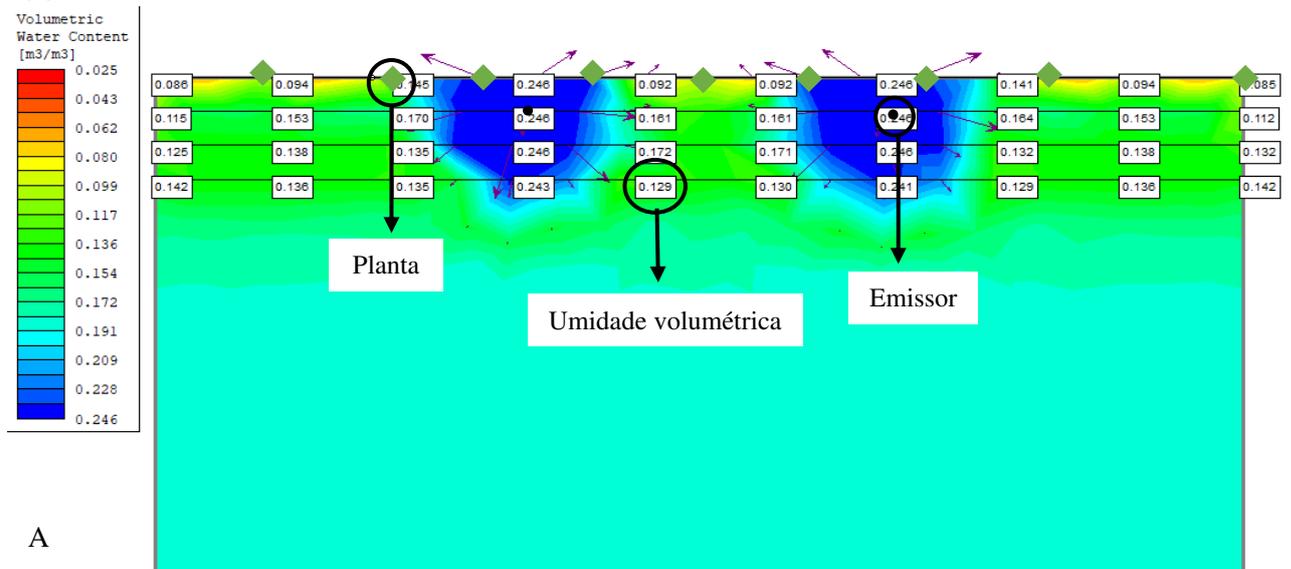


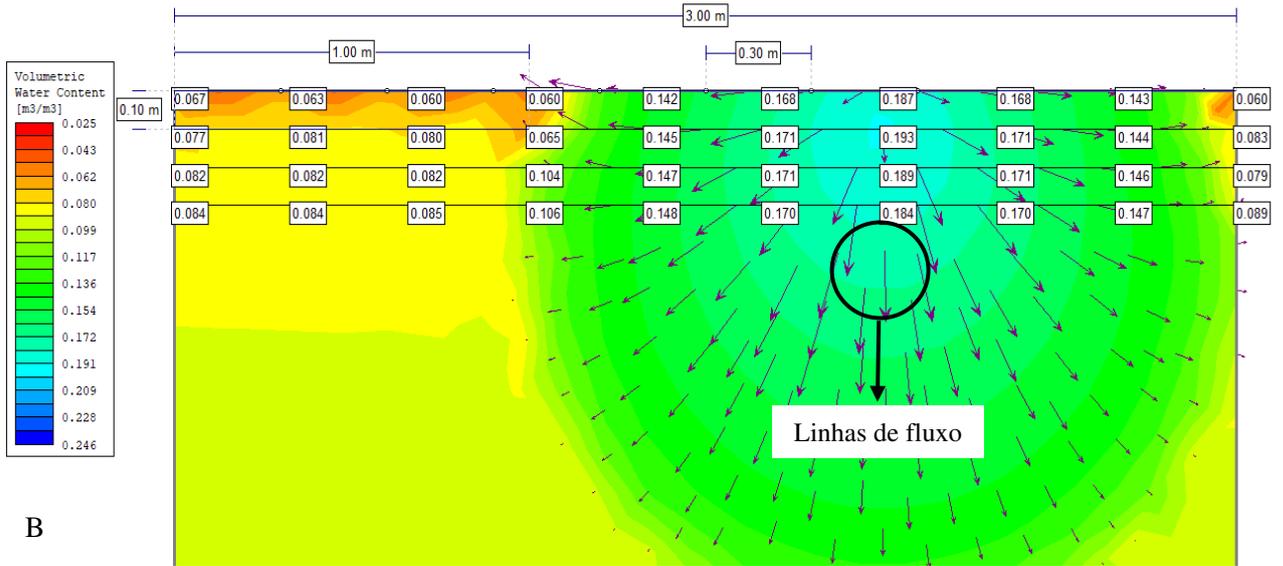
F



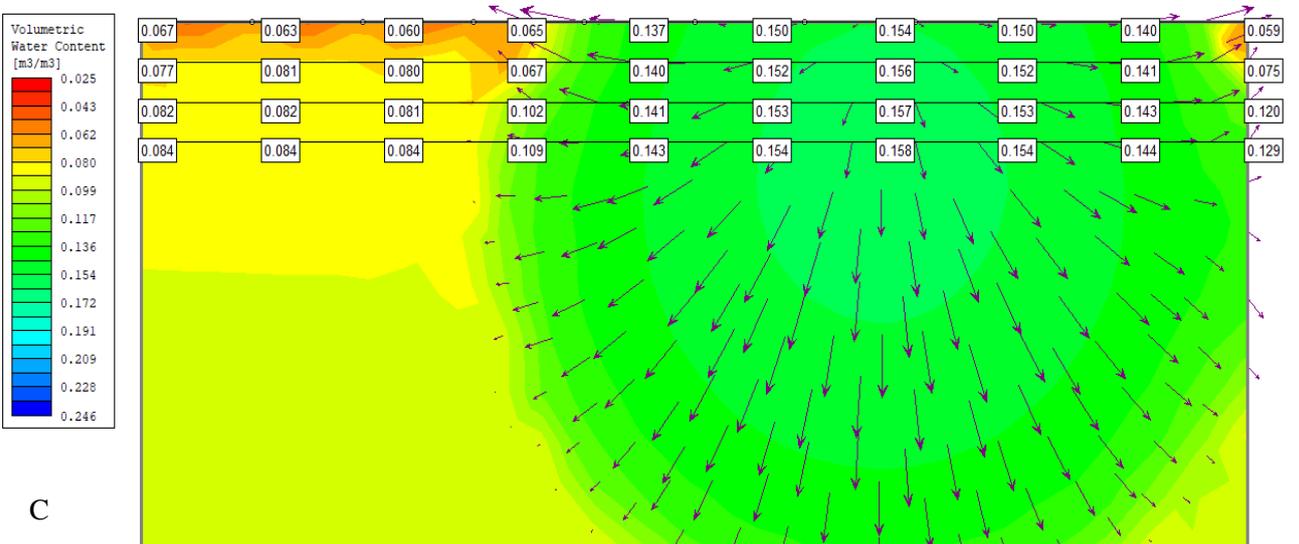
Fonte: Retirado do software SLIDE pela autora, 2020.

Figura 40 – Resultado da simulação após a irrigação com profundidade do tubo gotejador a 10 cm, 100 cm entre emissores e 30 cm entre plantas. Figura 40A: inicial (60 min); Figura 40B: 70 min; Figura 40C: 80 min; Figura 40D: 90 min; Figura 40E: 100 min; Figura 40F: 120 min; Figura 40G: 150 min.

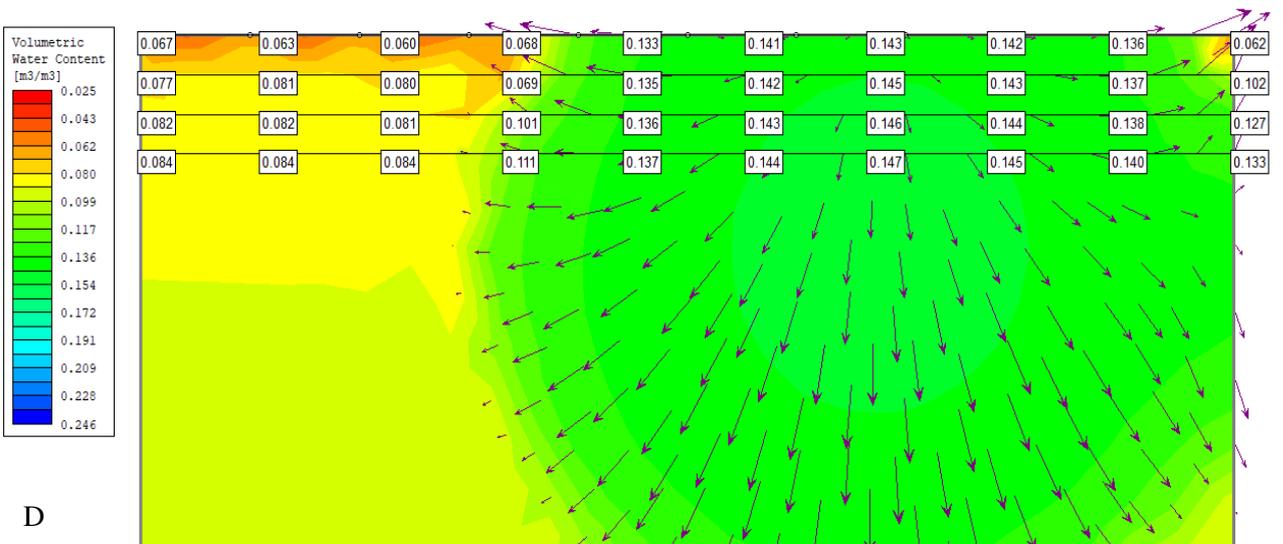




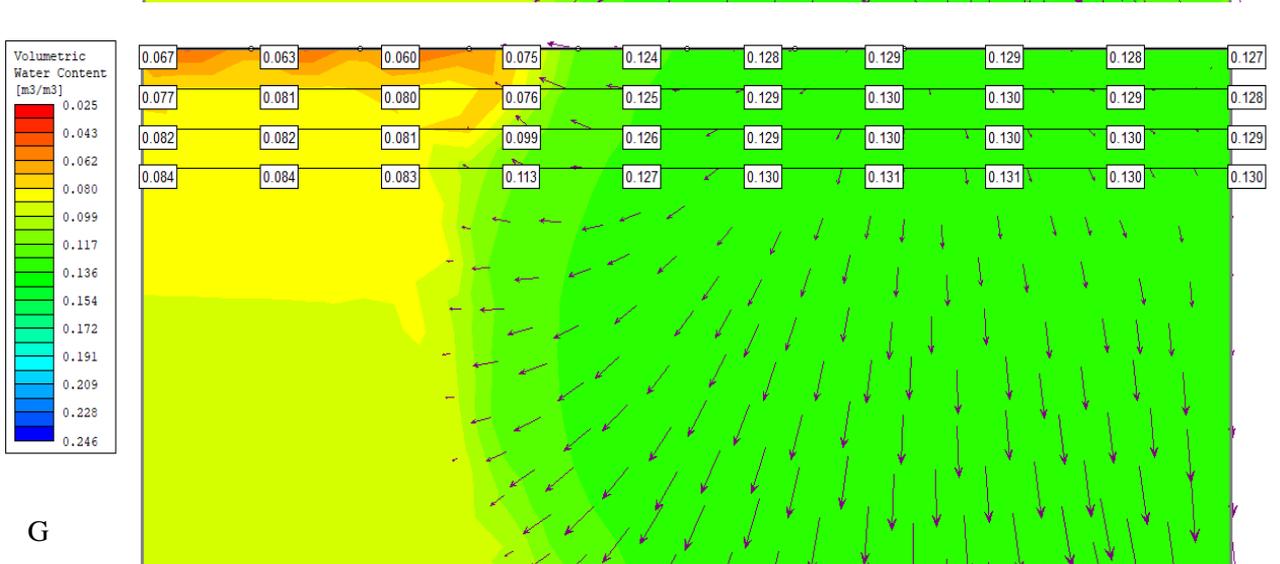
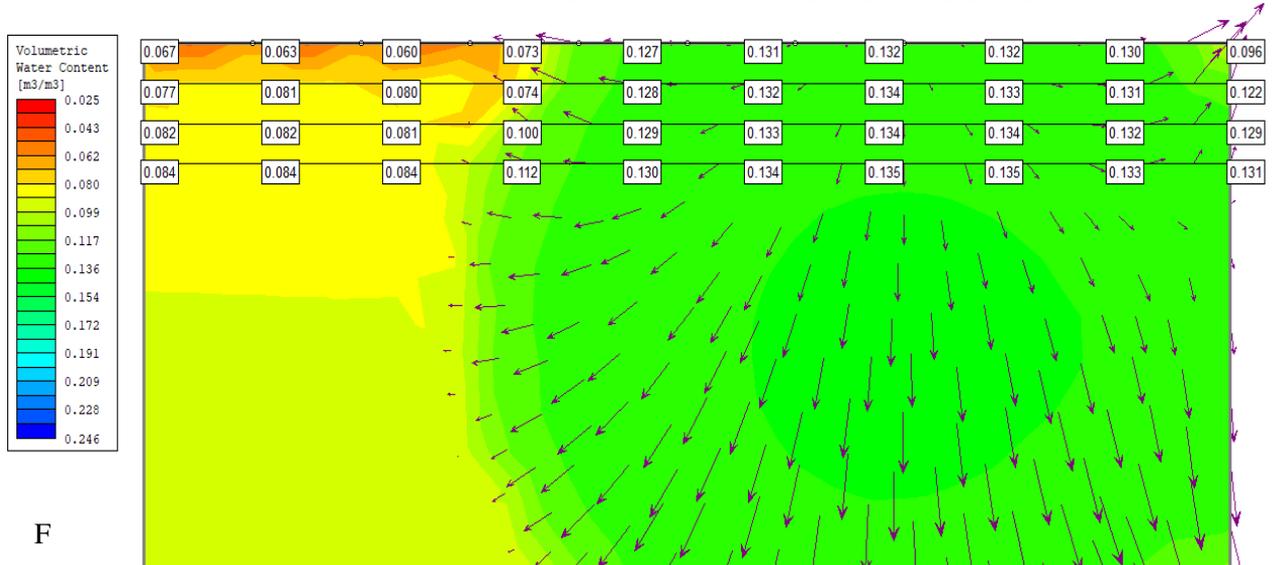
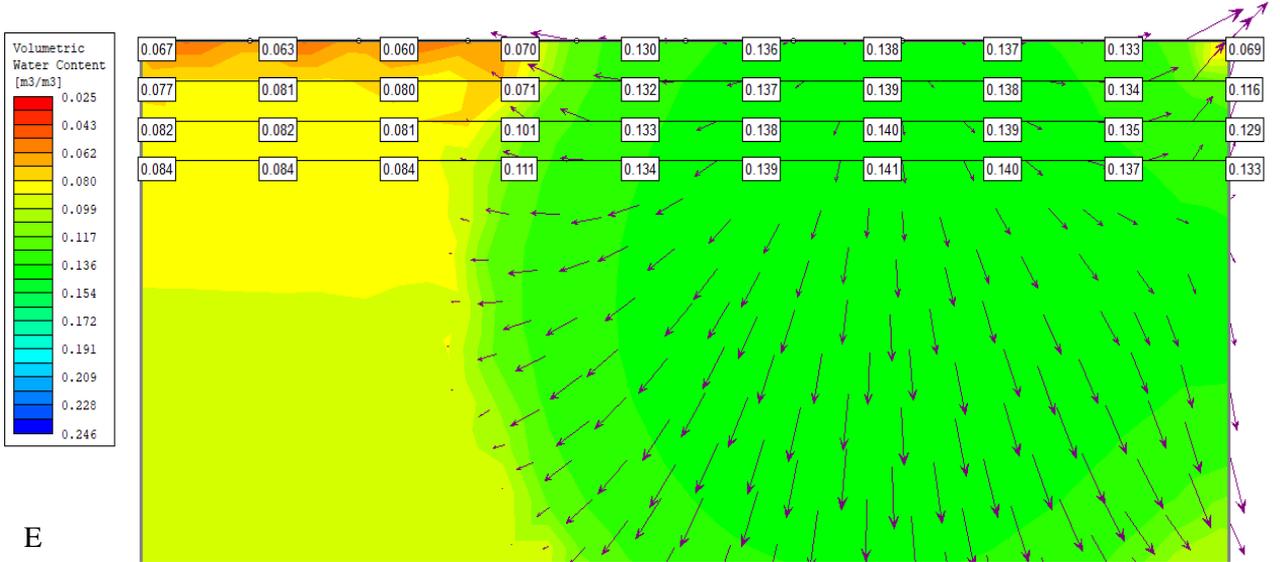
B



C

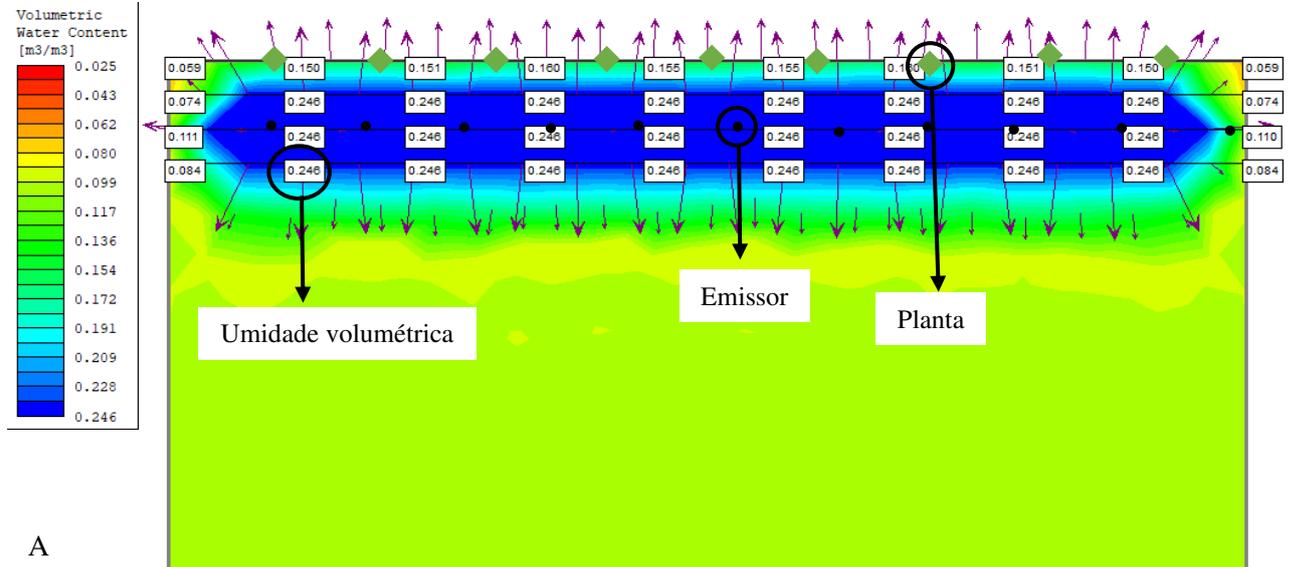


D

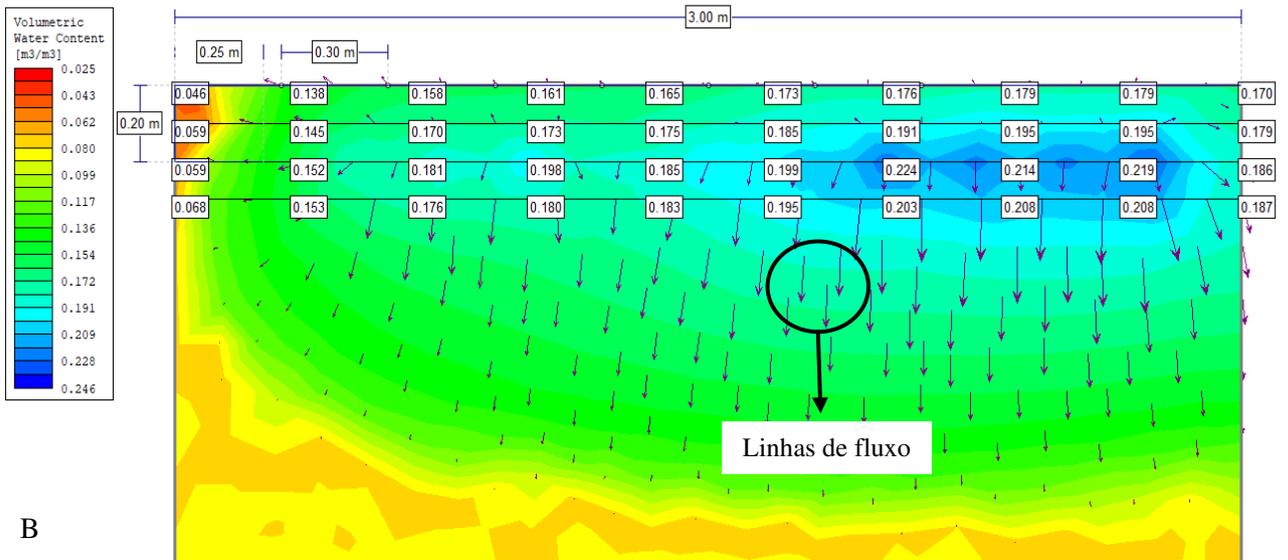


Fonte: Retirado do software SLIDE pela autora, 2020.

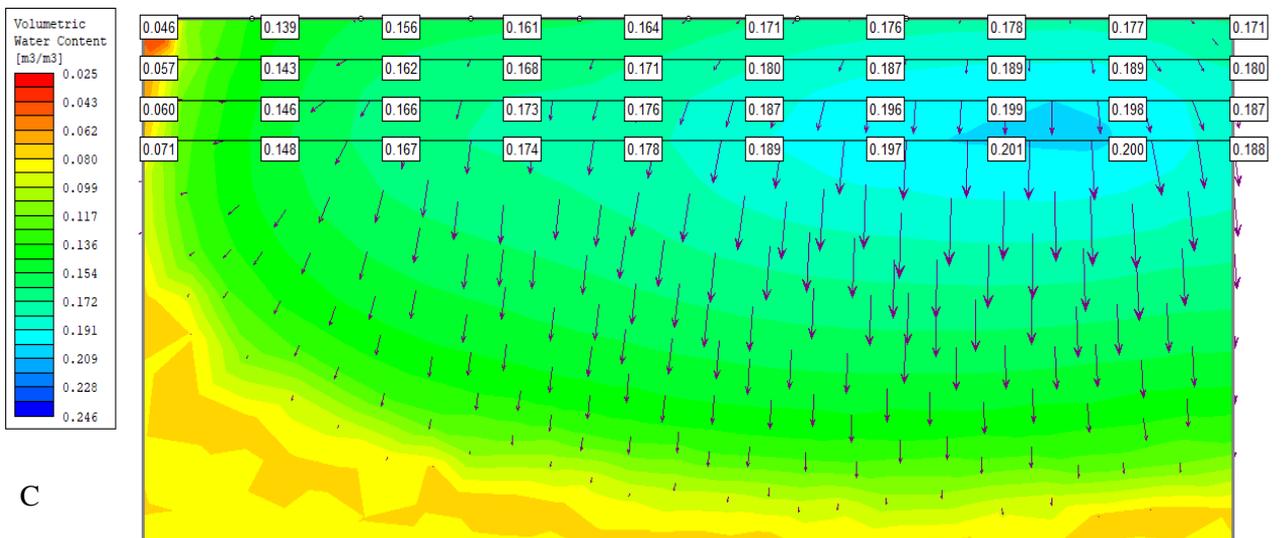
Figura 41 – Resultado da simulação após a irrigação com profundidade do tubo gotejador a 20 cm, 25 cm entre emissores e 30 cm entre plantas. Figura 41A: inicial (60 min); Figura 41B: 70 min; Figura 41C: 80 min; Figura 41D: 90 min; Figura 41E: 100 min; Figura 41F: 120 min; Figura 41G: 150 min.



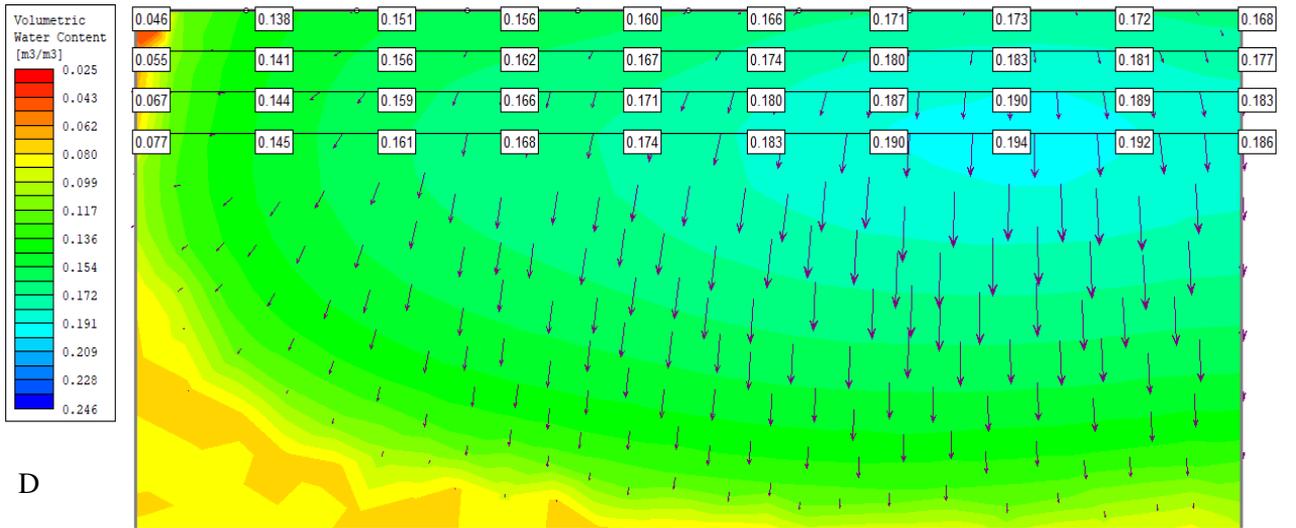
A



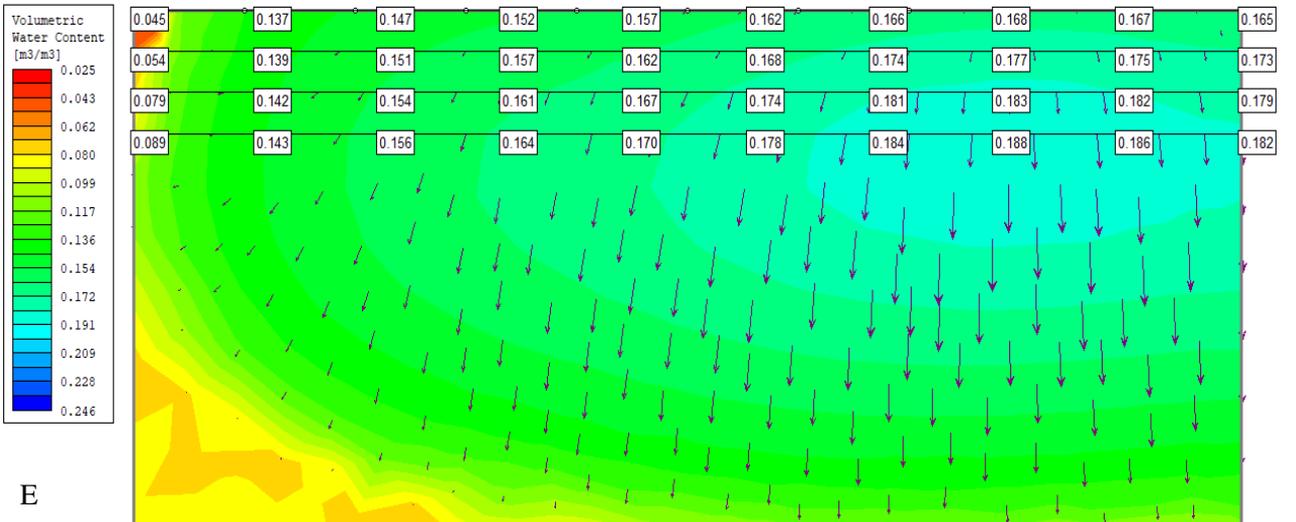
B



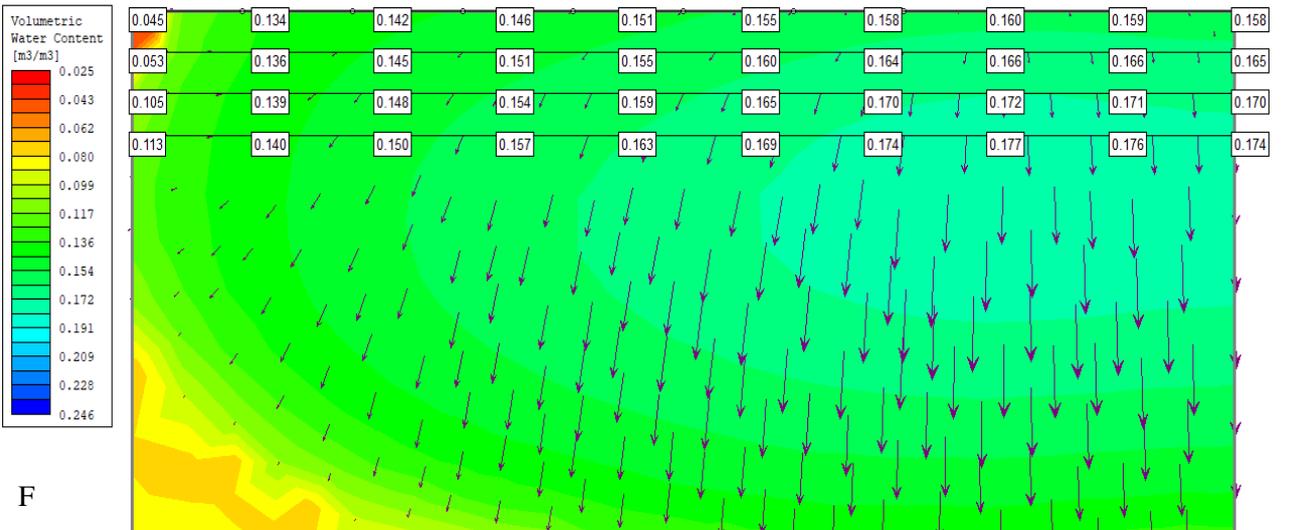
C



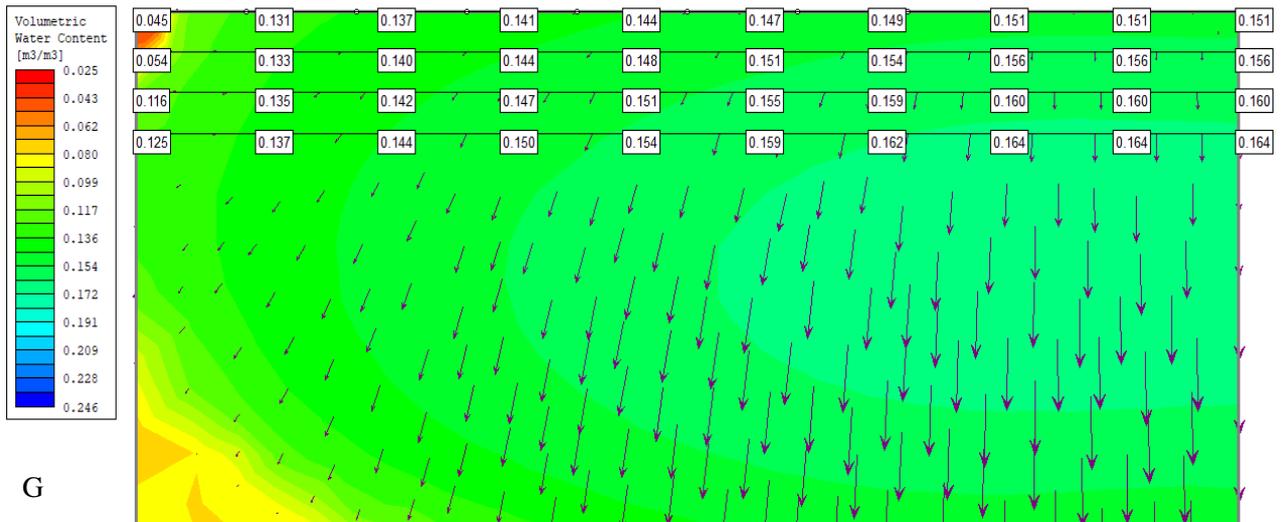
D



E



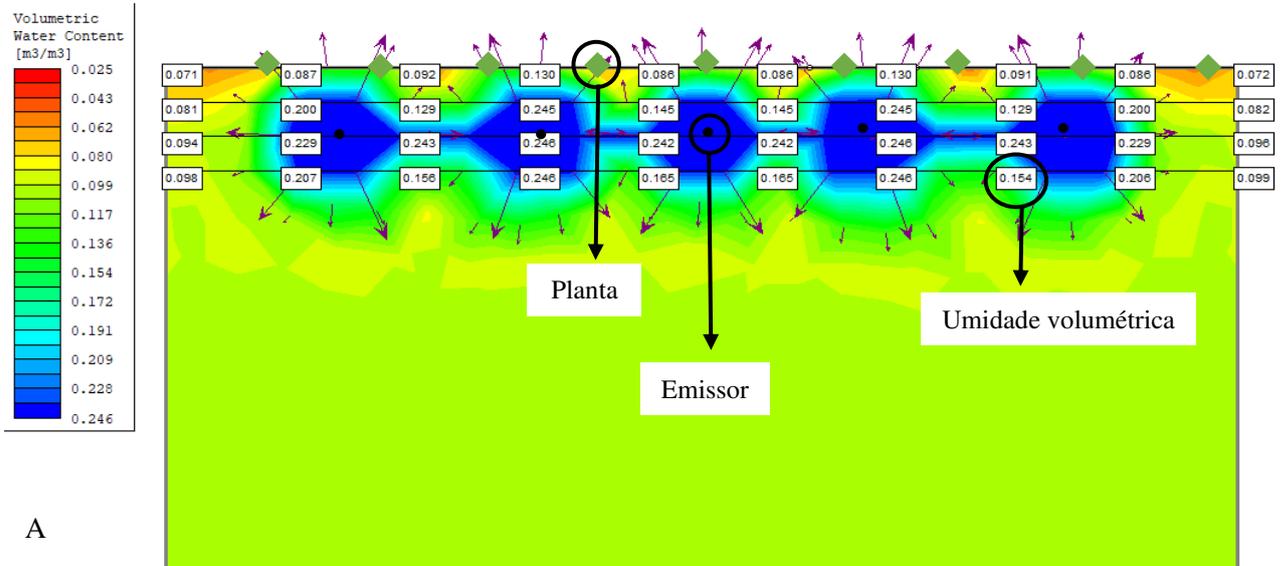
F



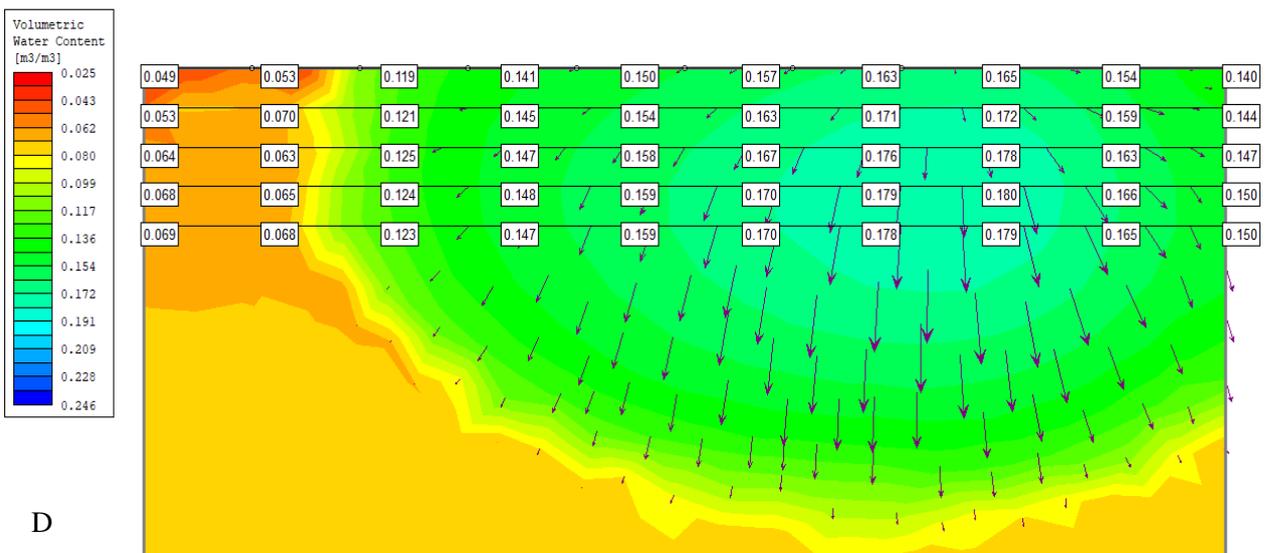
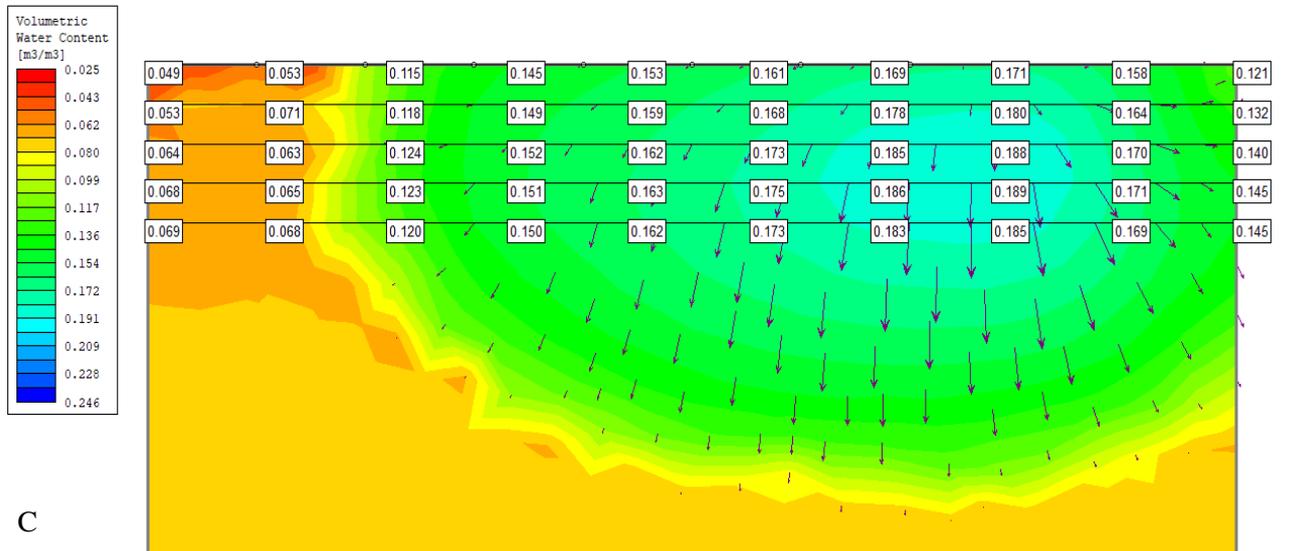
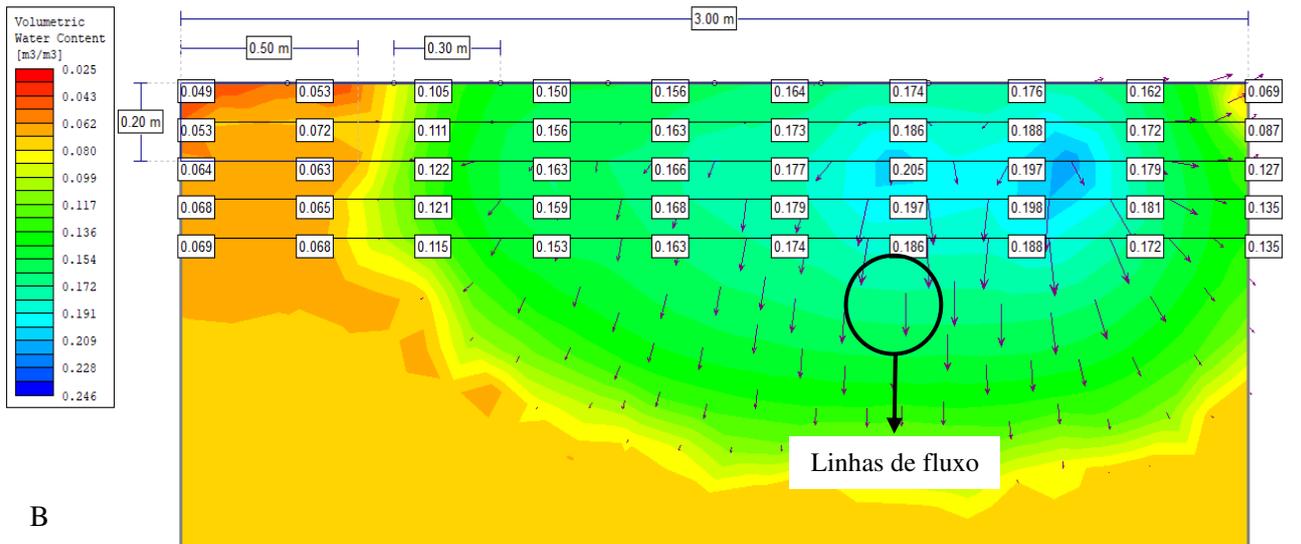
G

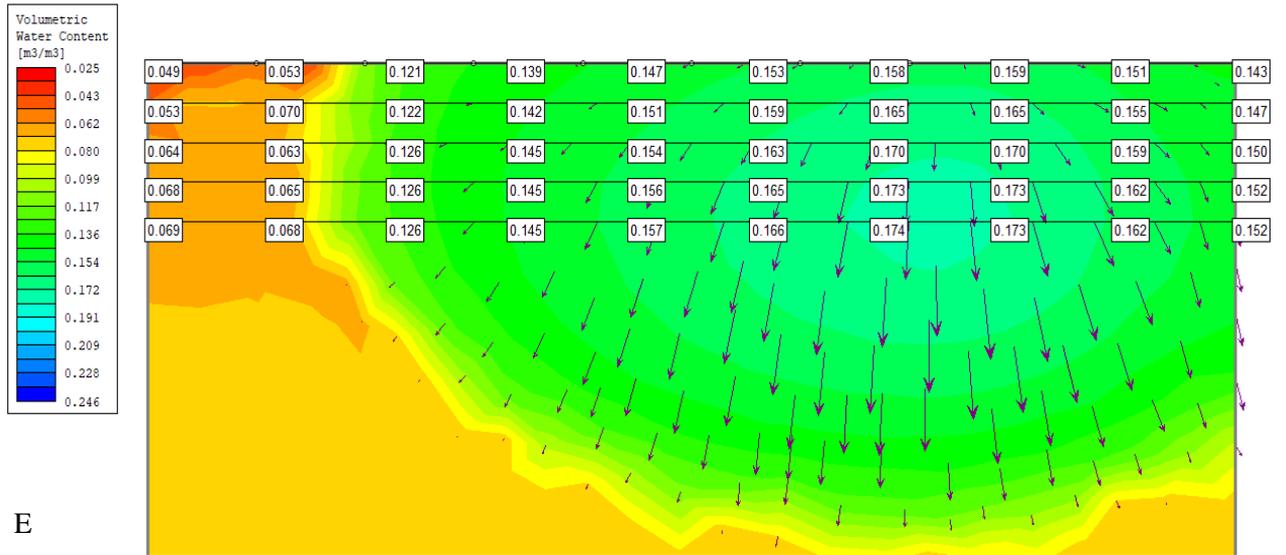
Fonte: Retirado do software SLIDE pela autora, 2020.

Figura 42 – Resultado da simulação após a irrigação com profundidade do tubo gotejador a 20 cm, 50 cm entre emissores e 30 cm entre plantas. Figura 42A: inicial (60 min); Figura 42B: 70 min; Figura 42C: 80 min; Figura 42D: 90 min; Figura 42E: 100 min; Figura 42F: 120 min; Figura 42G: 150 min.

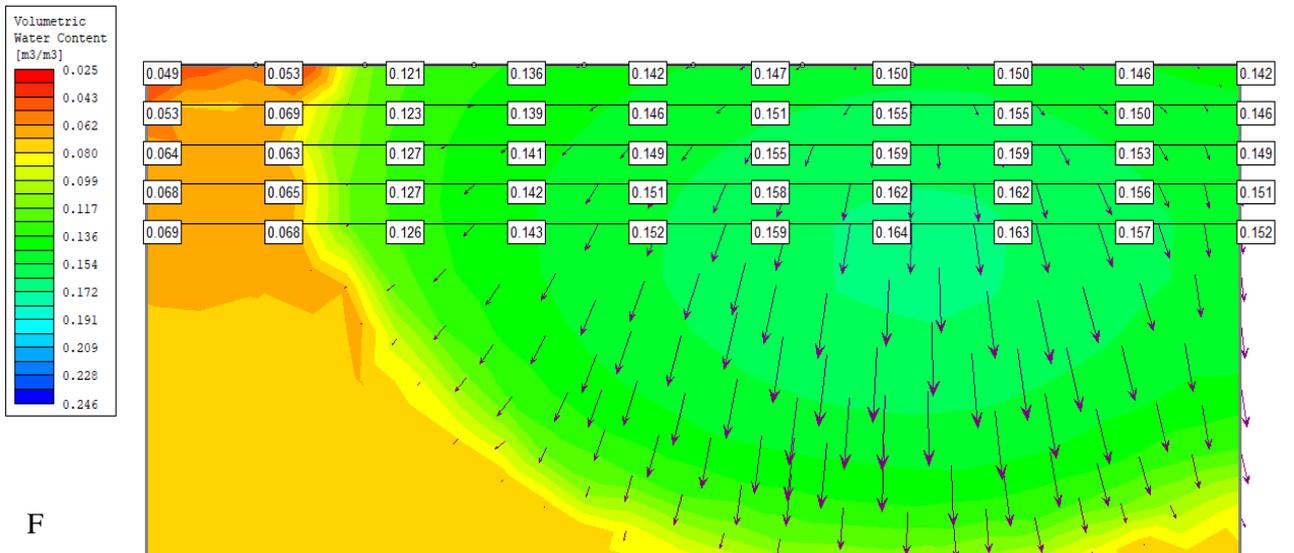


A

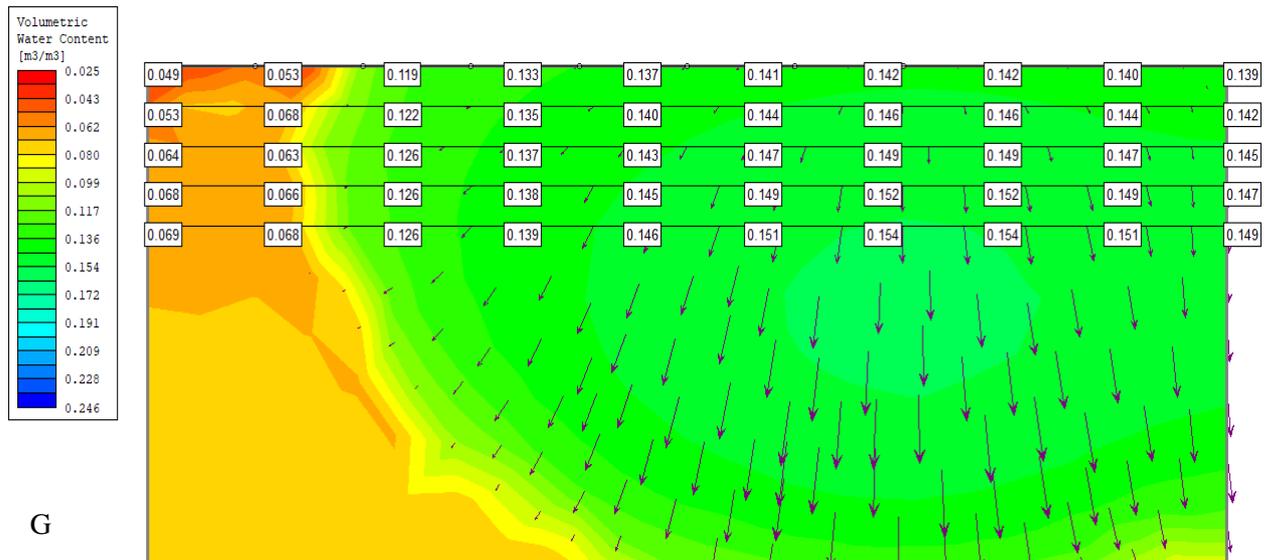




E



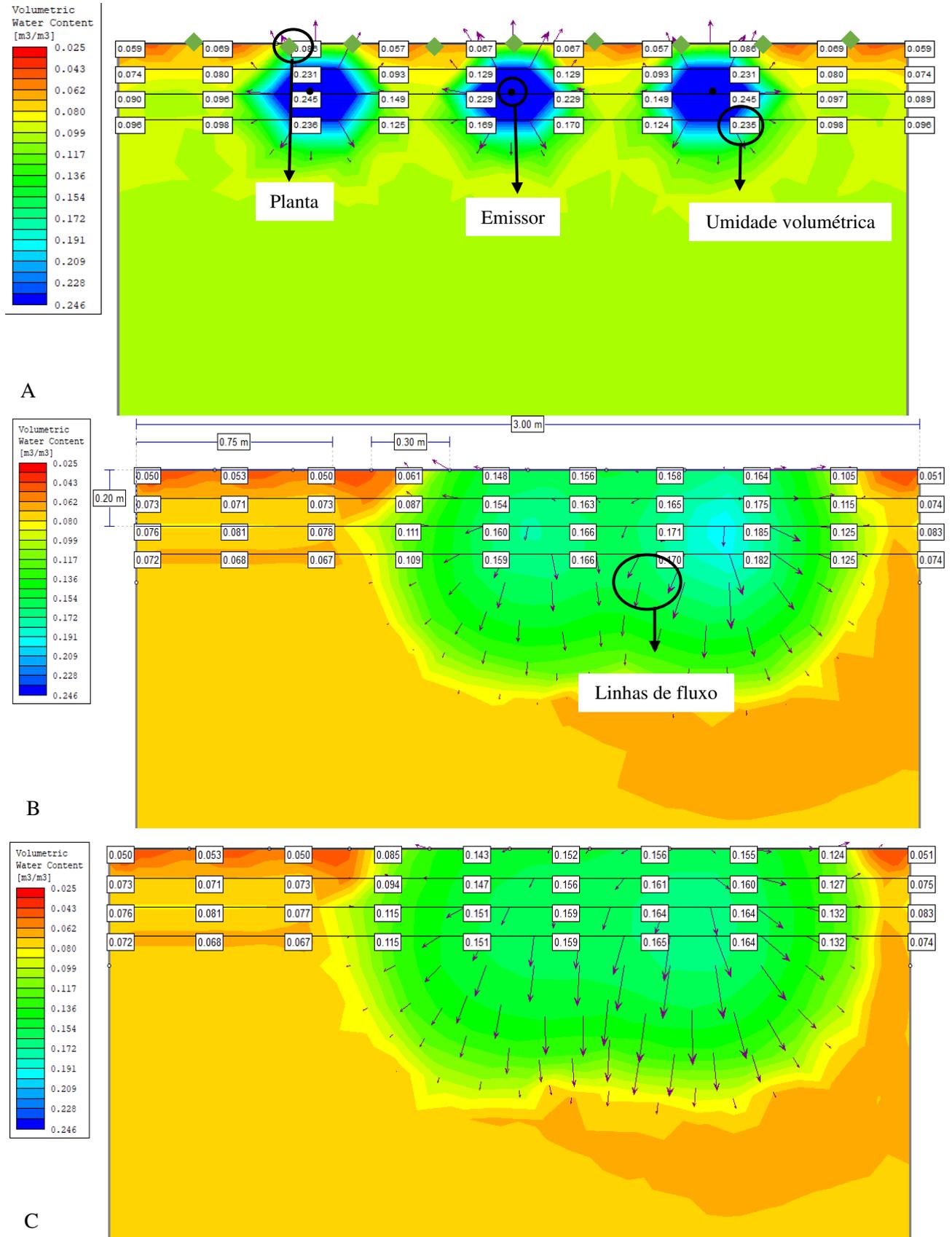
F

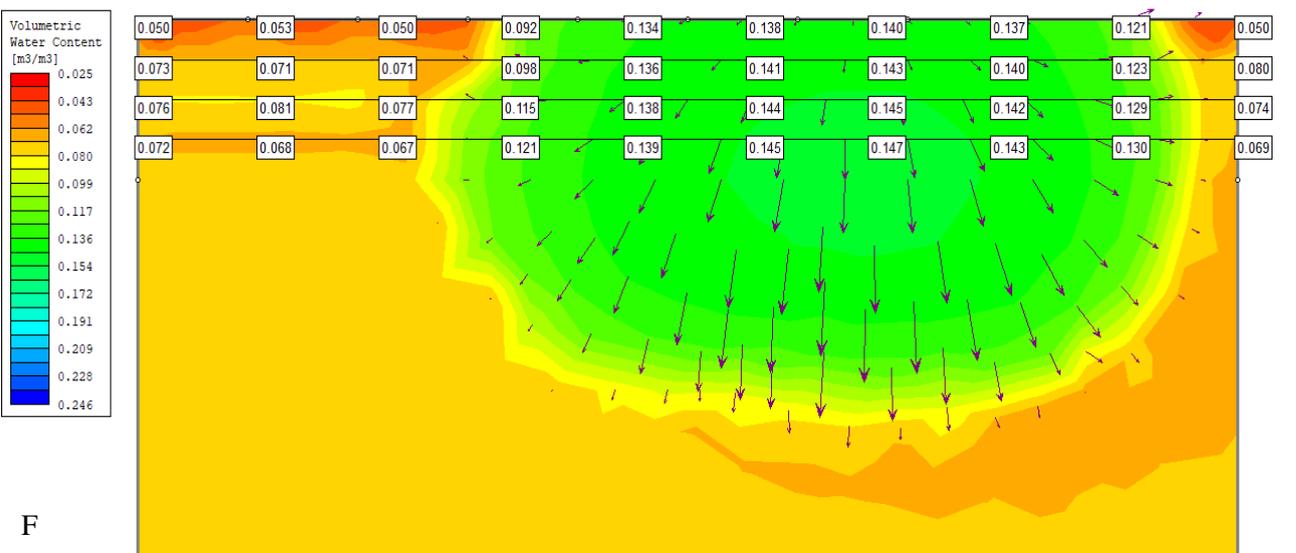
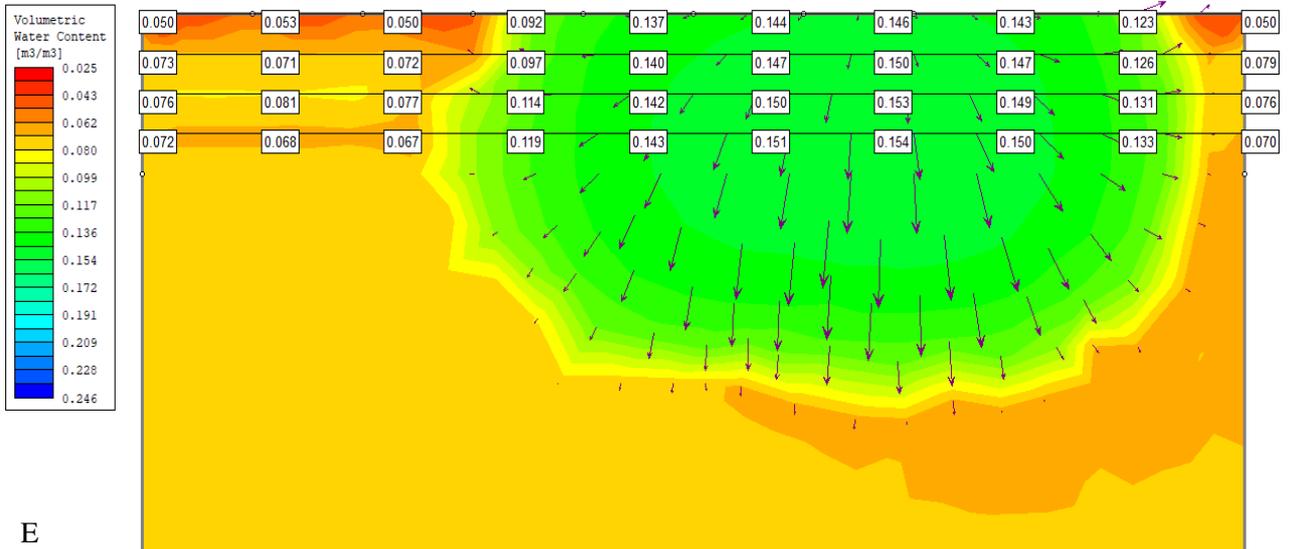
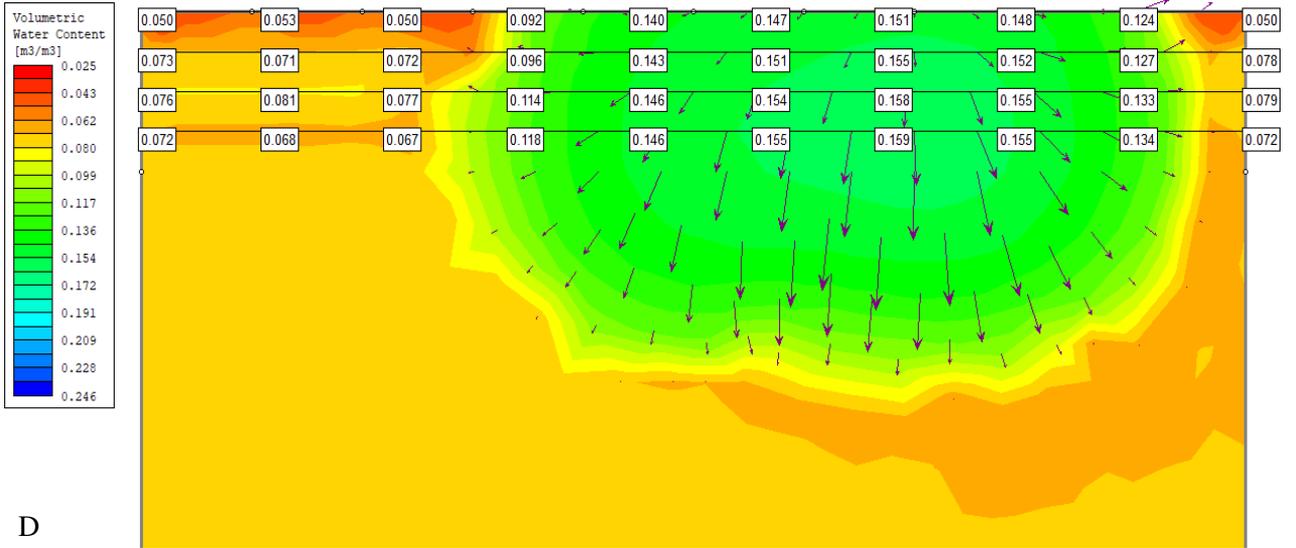


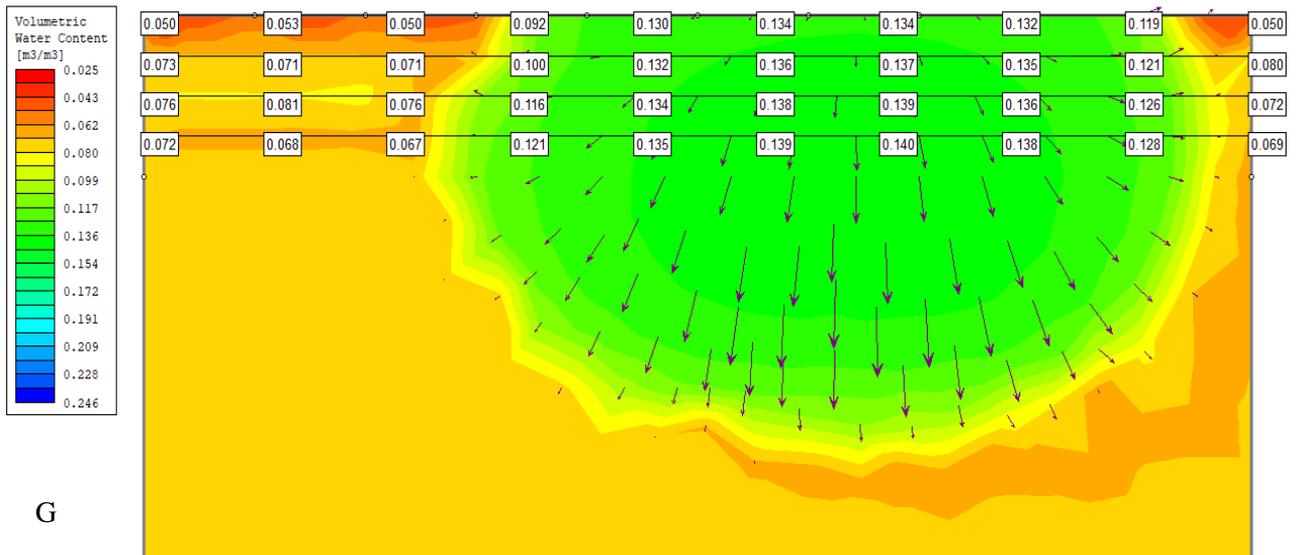
G

Fonte: Retirado do software SLIDE pela autora, 2020.

Figura 43 – Resultado da simulação após a irrigação com profundidade do tubo gotejador a 20 cm, 75 cm entre emissores e 30 cm entre plantas. Figura 43A: inicial (60 min); Figura 43B: 70 min; Figura 43C: 80 min; Figura 43D: 90 min; Figura 43E: 100 min; Figura 43F: 120 min; Figura 43G: 150 min.

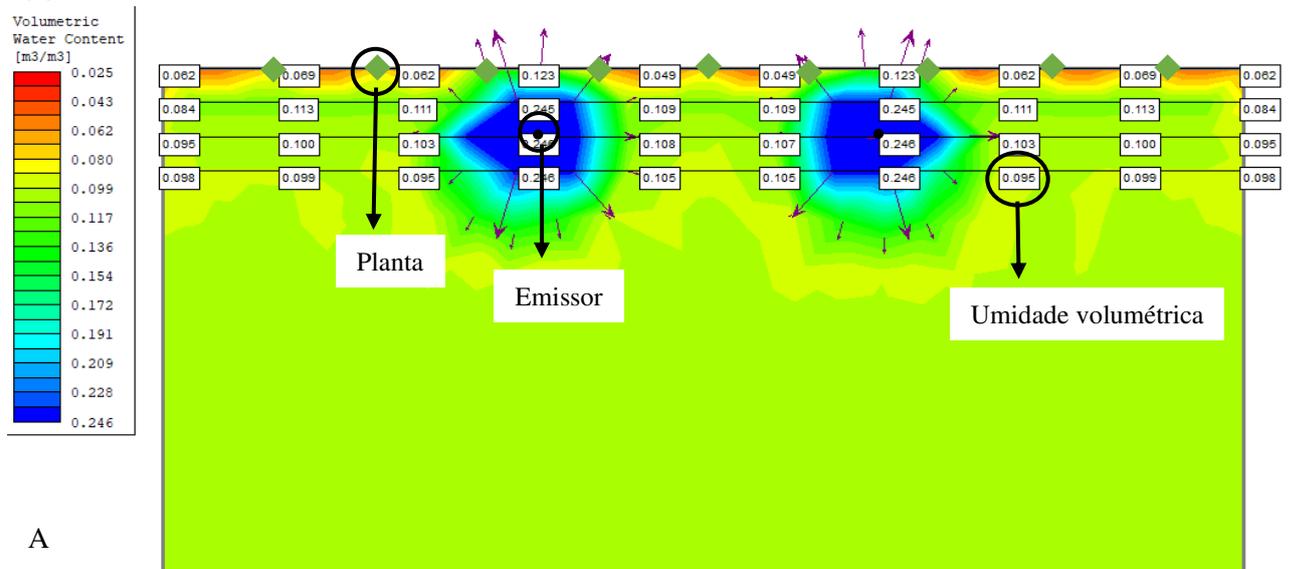


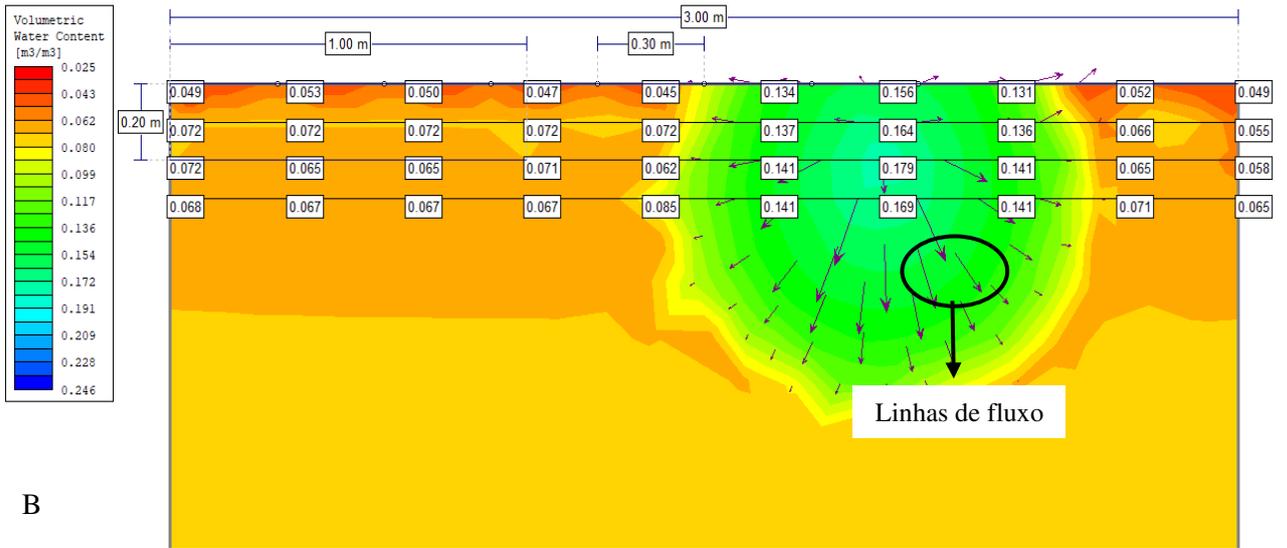




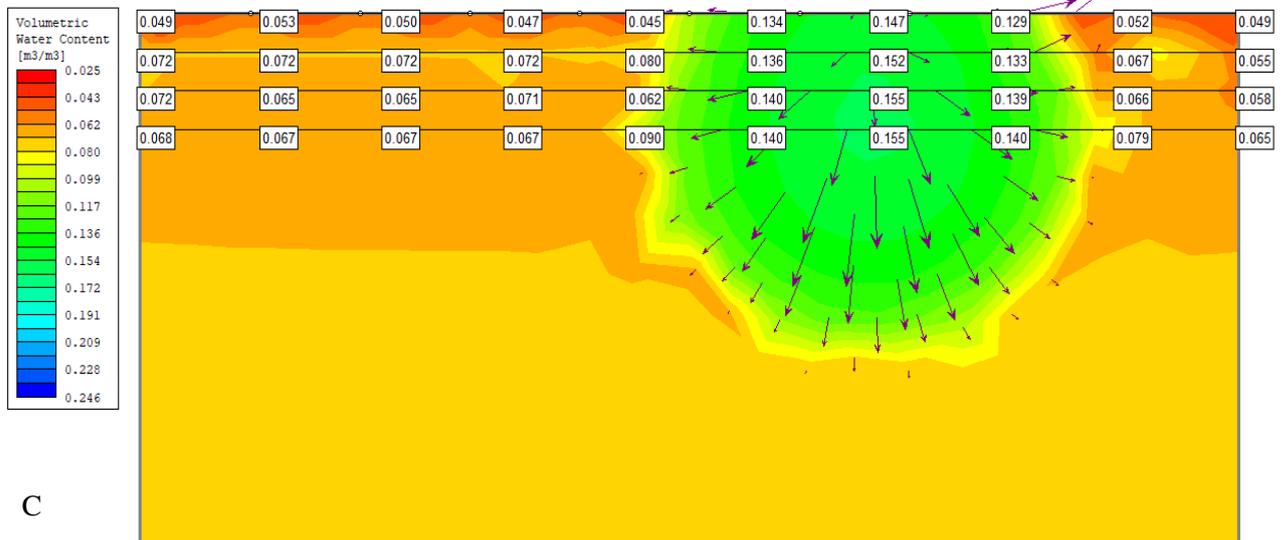
Fonte: Retirado do software SLIDE pela autora, 2020.

Figura 44 – Resultado da simulação após a irrigação com profundidade do tubo gotejador a 20 cm, 100 cm entre emissores e 30 cm entre plantas. Figura 44A: inicial (60 min); Figura 44B: 70 min; Figura 44C: 80 min; Figura 44D: 90 min; Figura 44E: 100 min; Figura 44F: 120 min; Figura 44G: 150 min.

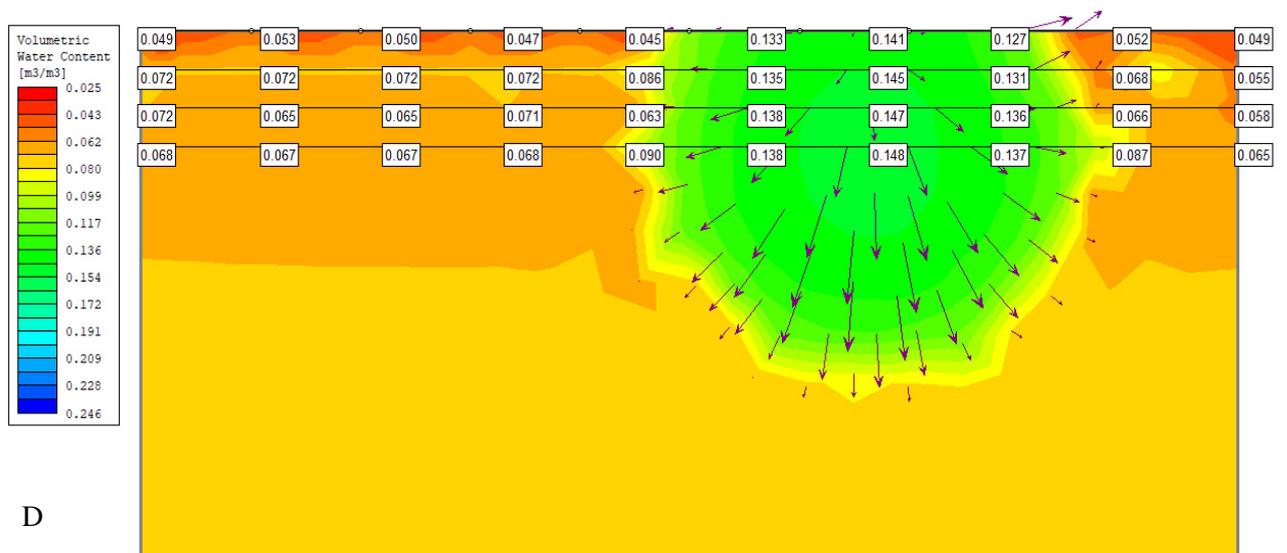




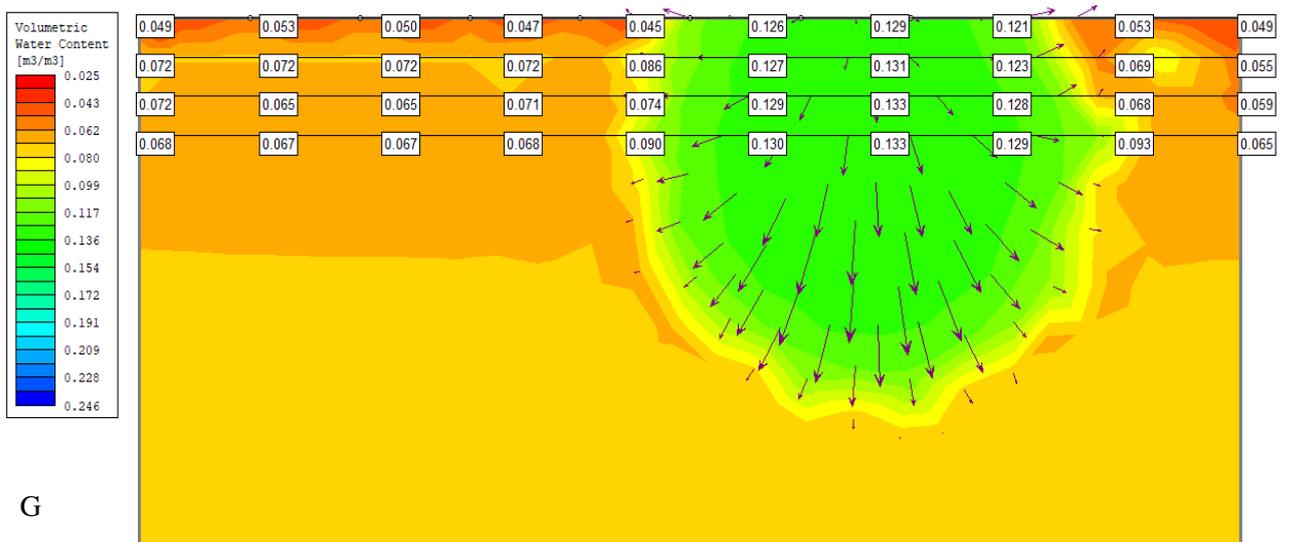
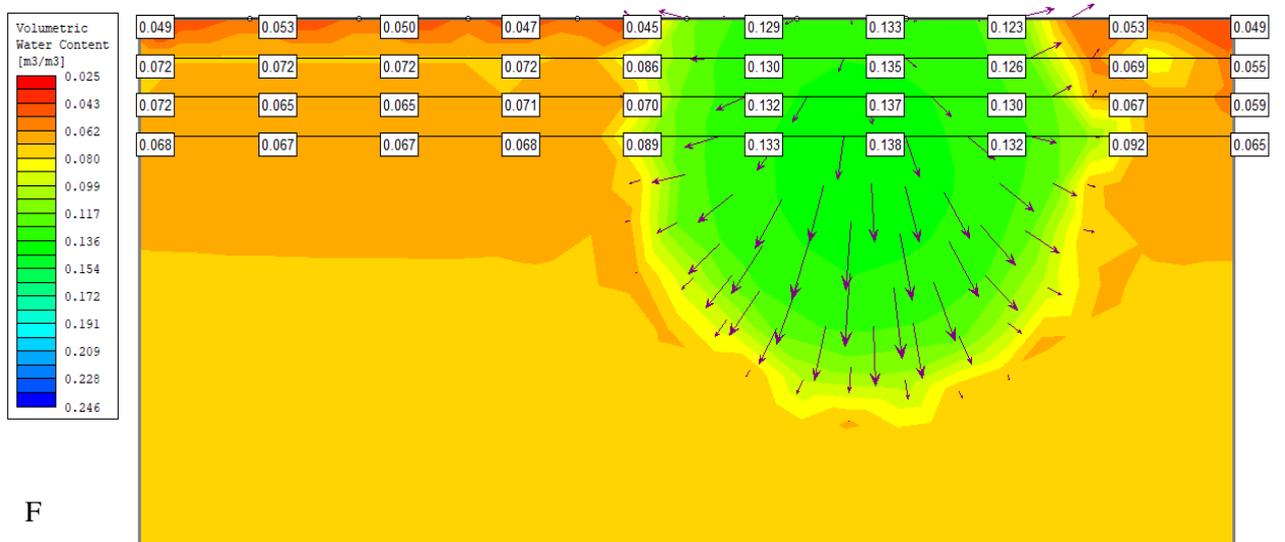
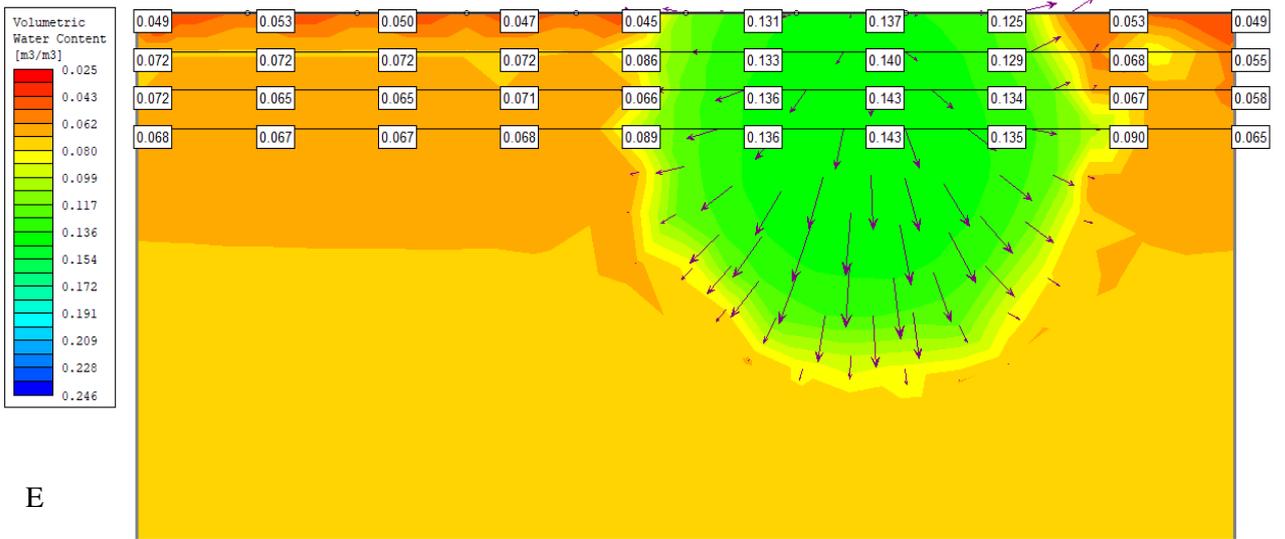
B



C

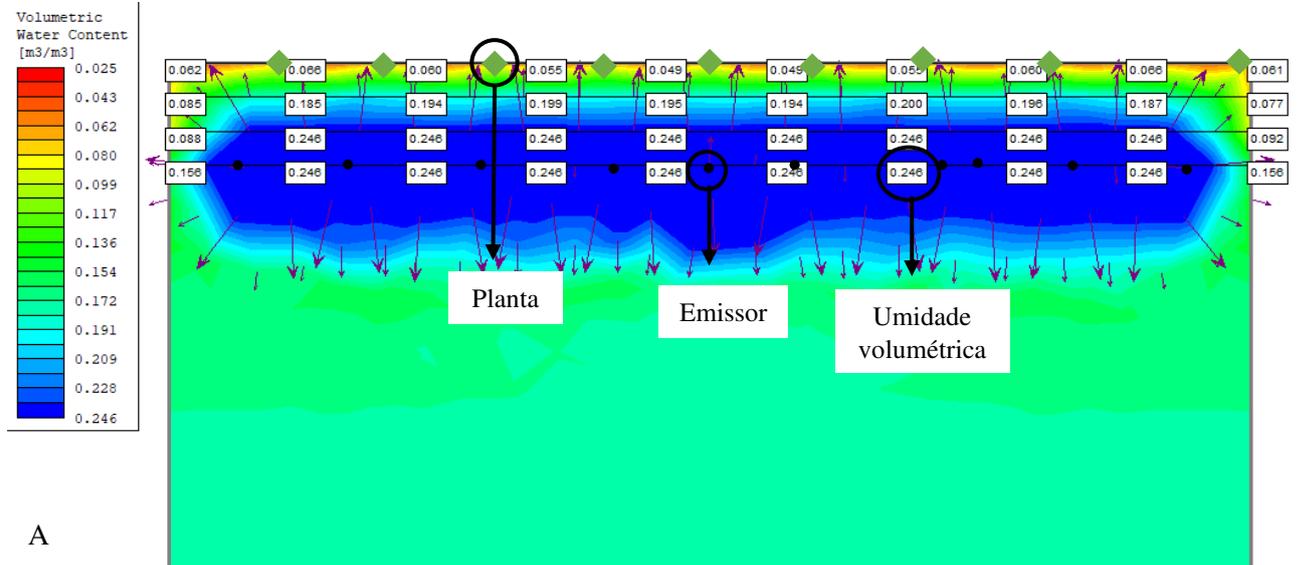


D

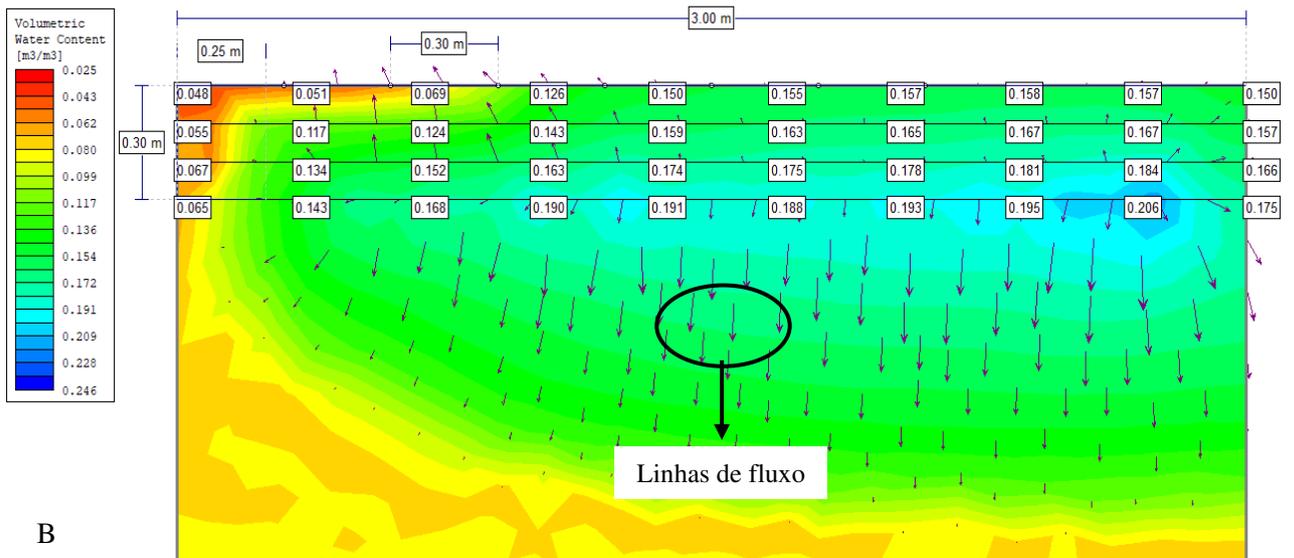


Fonte: Retirado do software SLIDE pela autora, 2020.

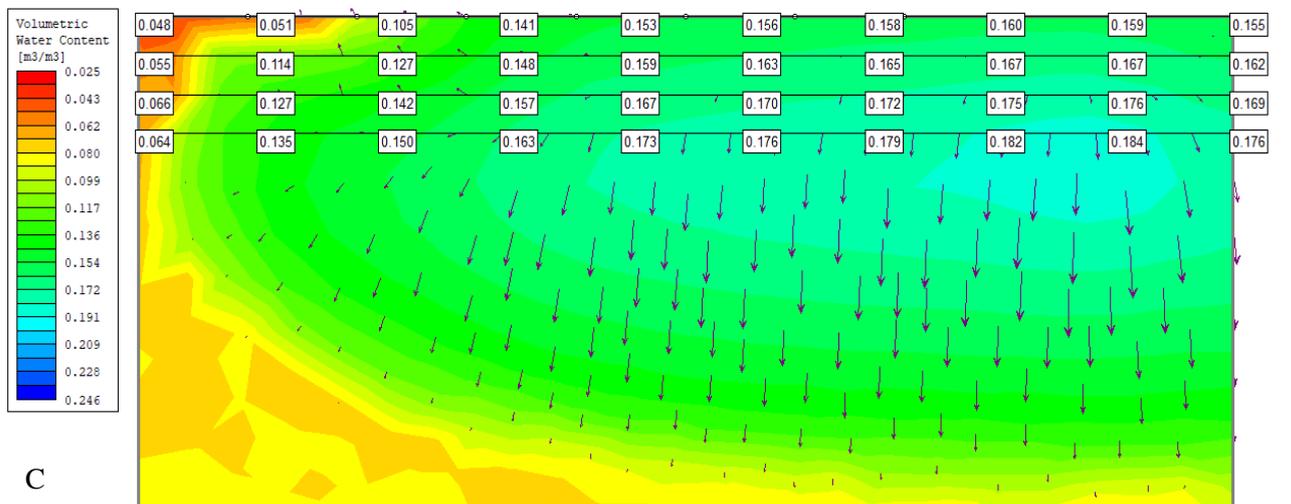
Figura 45 – Resultado da simulação após a irrigação com profundidade do tubo gotejador a 30 cm, 25 cm entre emissores e 30 cm entre plantas. Figura 45A: inicial (60 min); Figura 45B: 70 min; Figura 45C: 80 min; Figura 45D: 90 min; Figura 45E: 100 min; Figura 45F: 120 min; Figura 45G: 150 min.



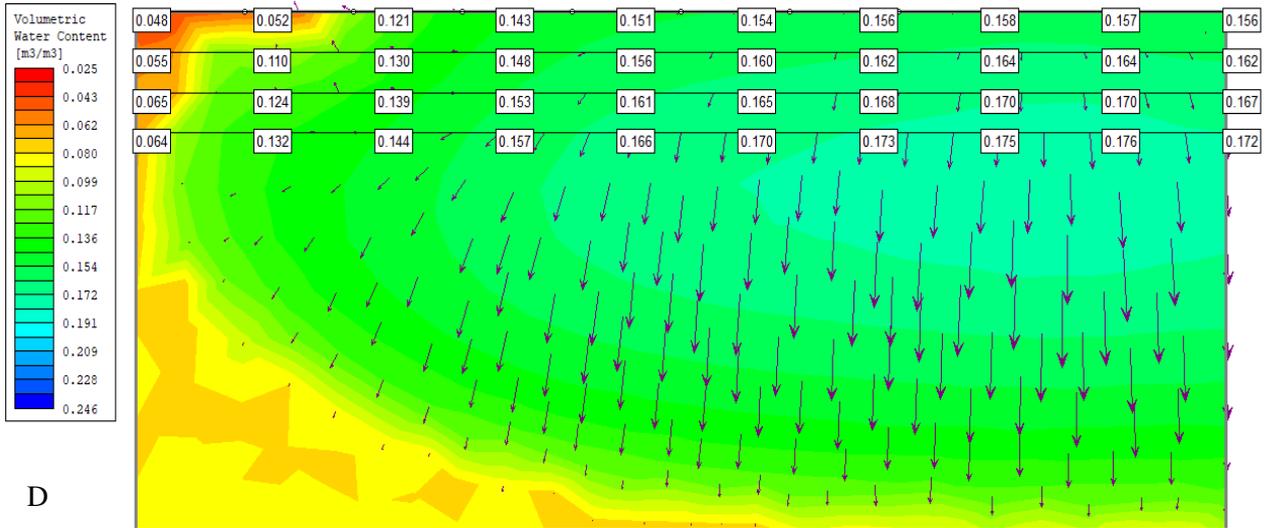
A



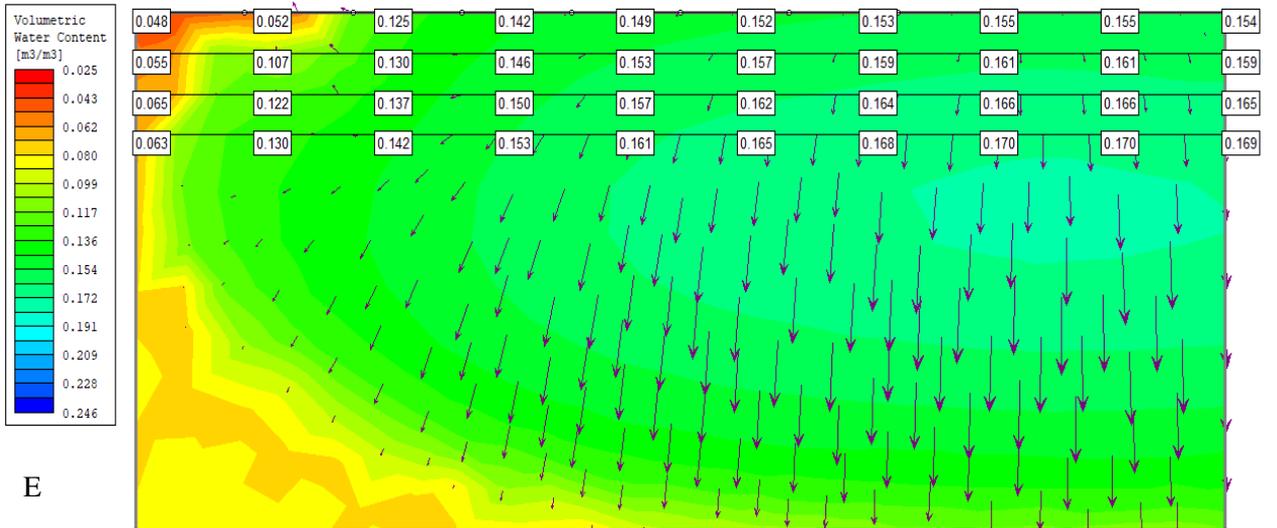
B



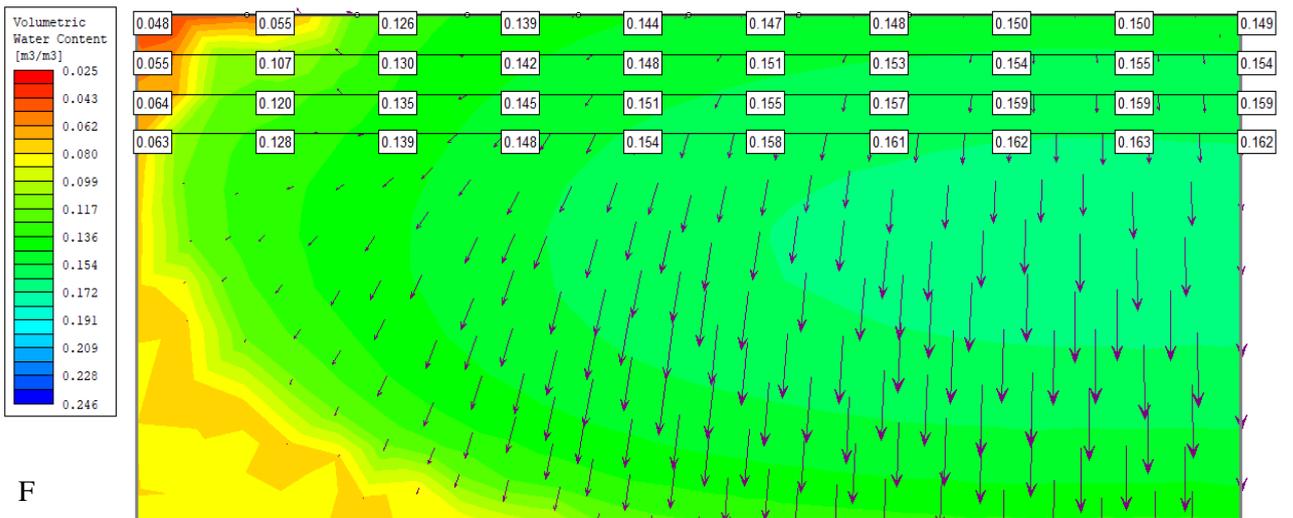
C



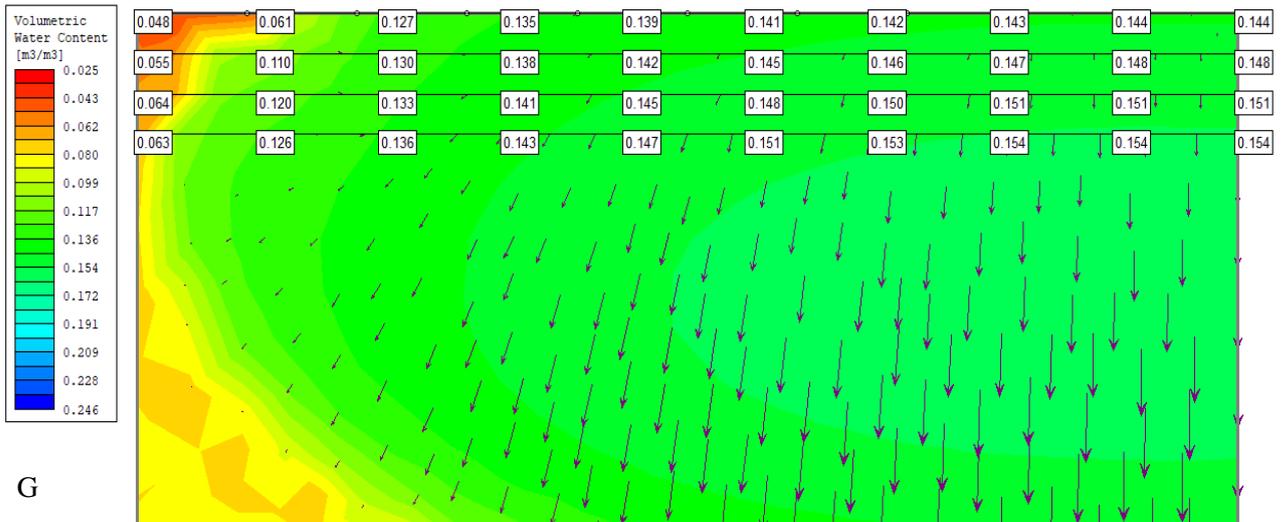
D



E

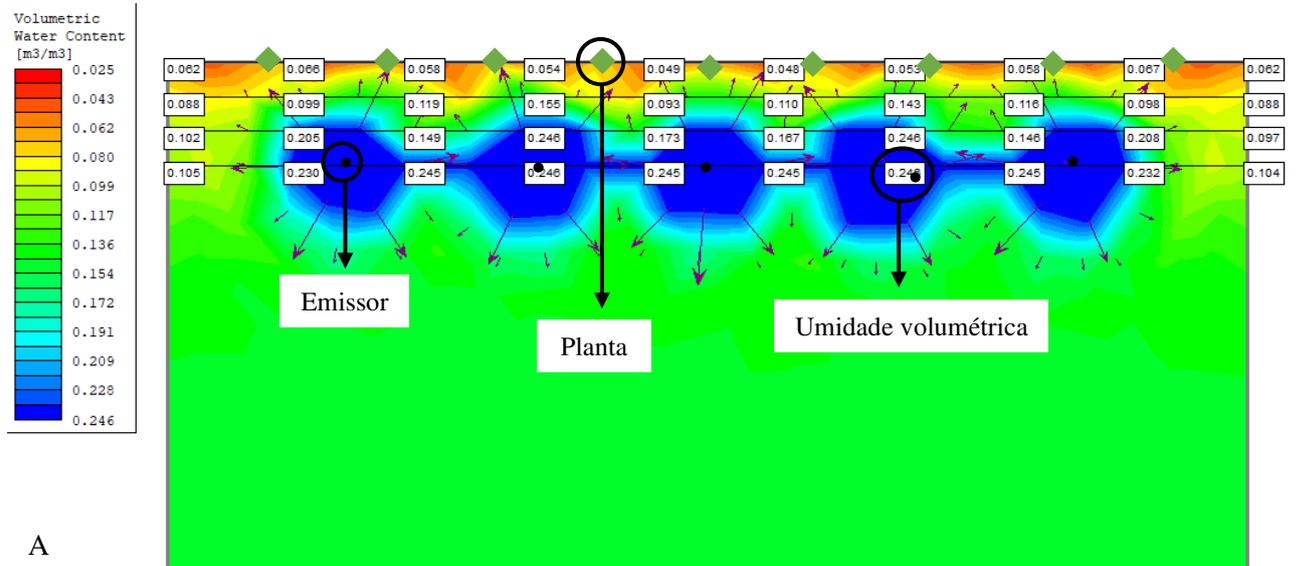


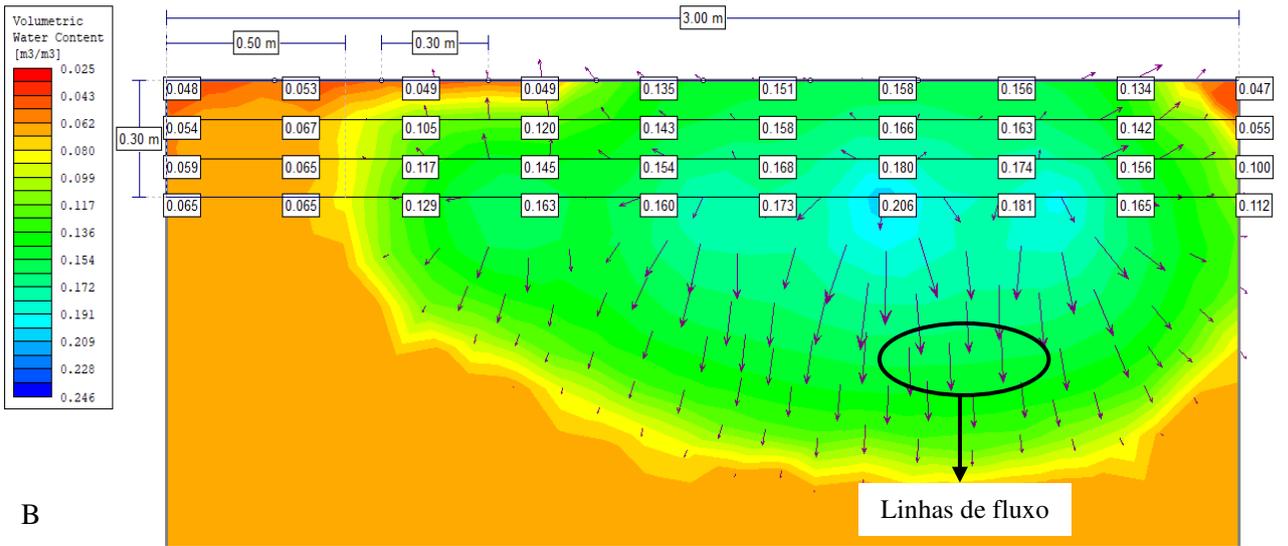
F



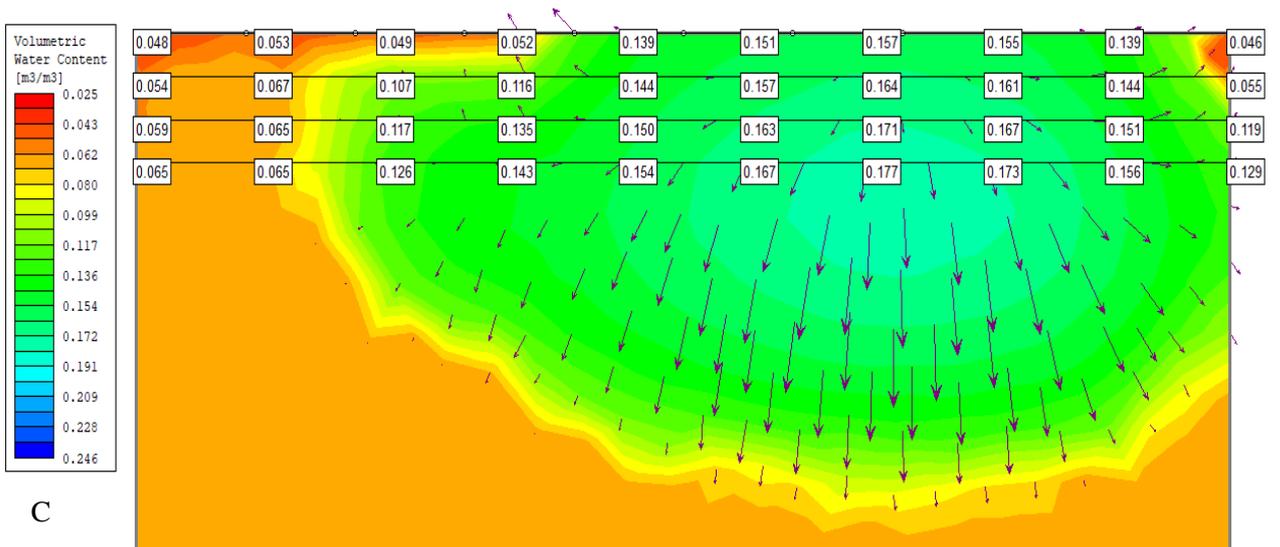
Fonte: Retirado do software SLIDE pela autora, 2020.

Figura 46 – Resultado da simulação após a irrigação com profundidade do tubo gotejador a 30 cm, 50 cm entre emissores e 30 cm entre plantas. Figura 46A: inicial (60 min); Figura 46B: 70 min; Figura 46C: 80 min; Figura 46D: 90 min; Figura 46E: 100 min; Figura 46F: 120 min; Figura 46G: 150 min.

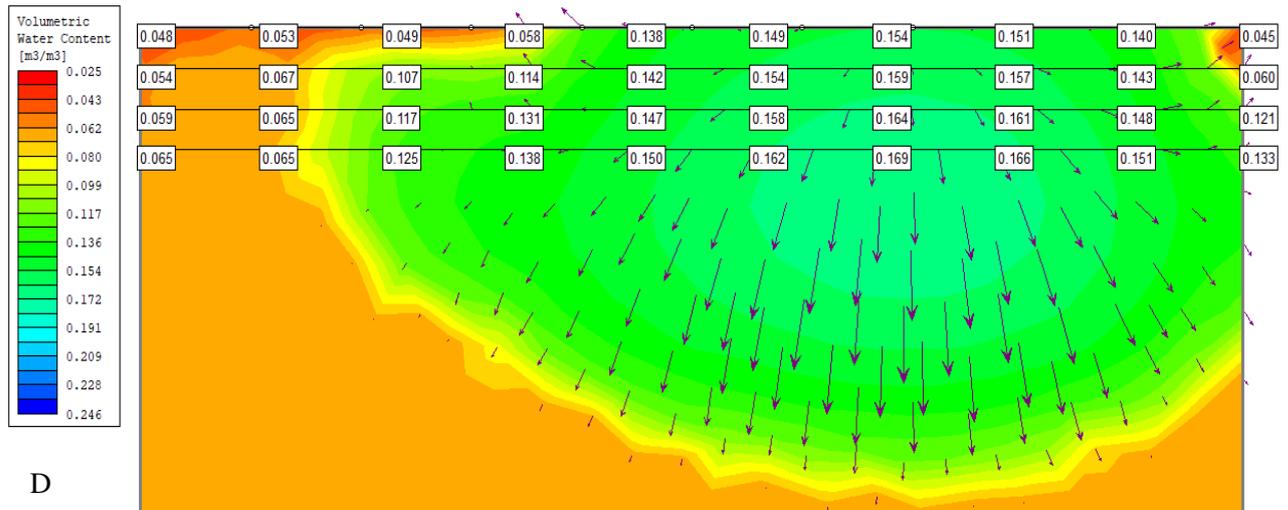




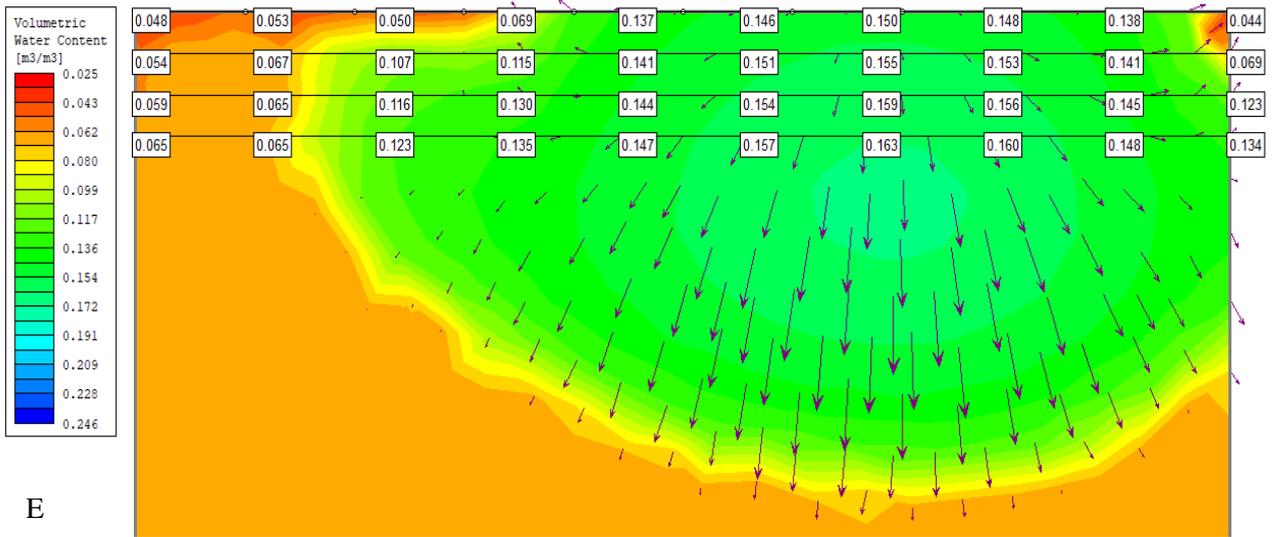
B



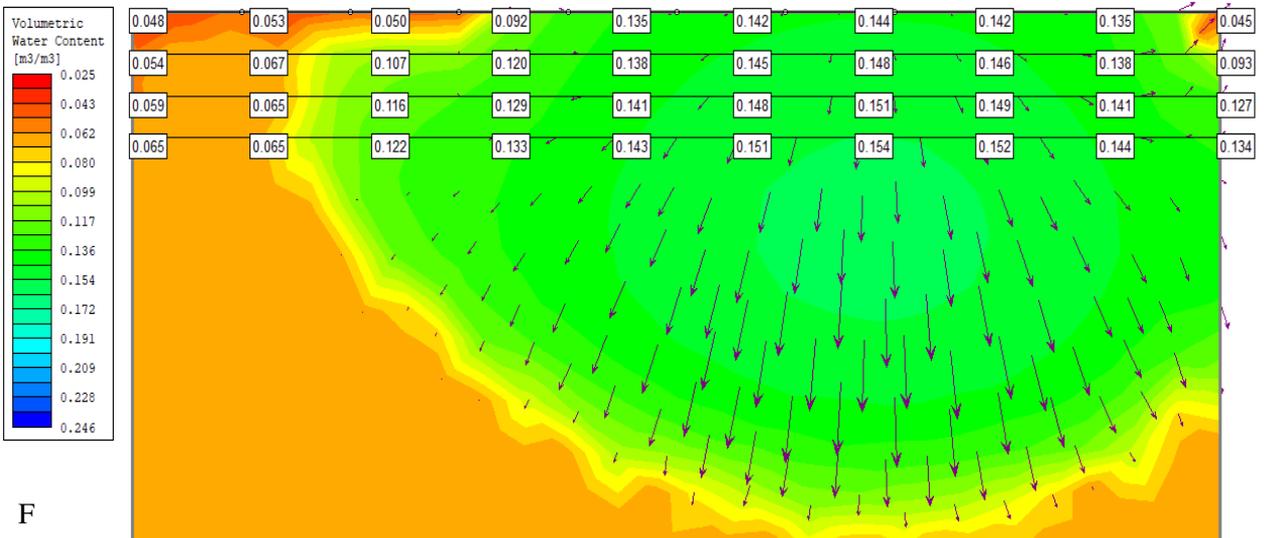
C



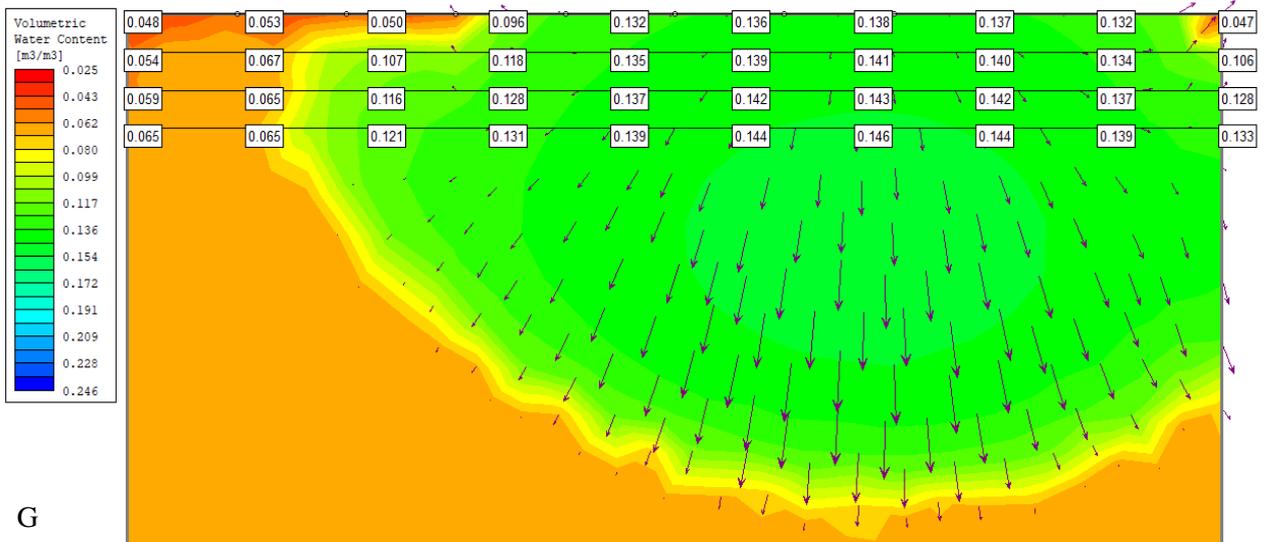
D



E



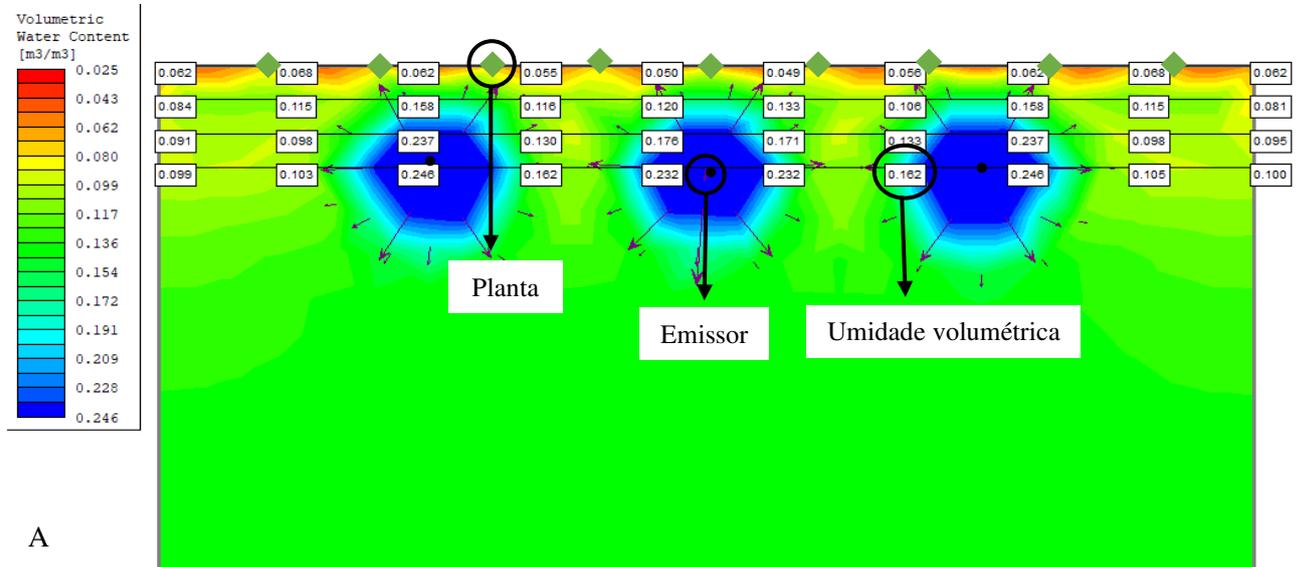
F



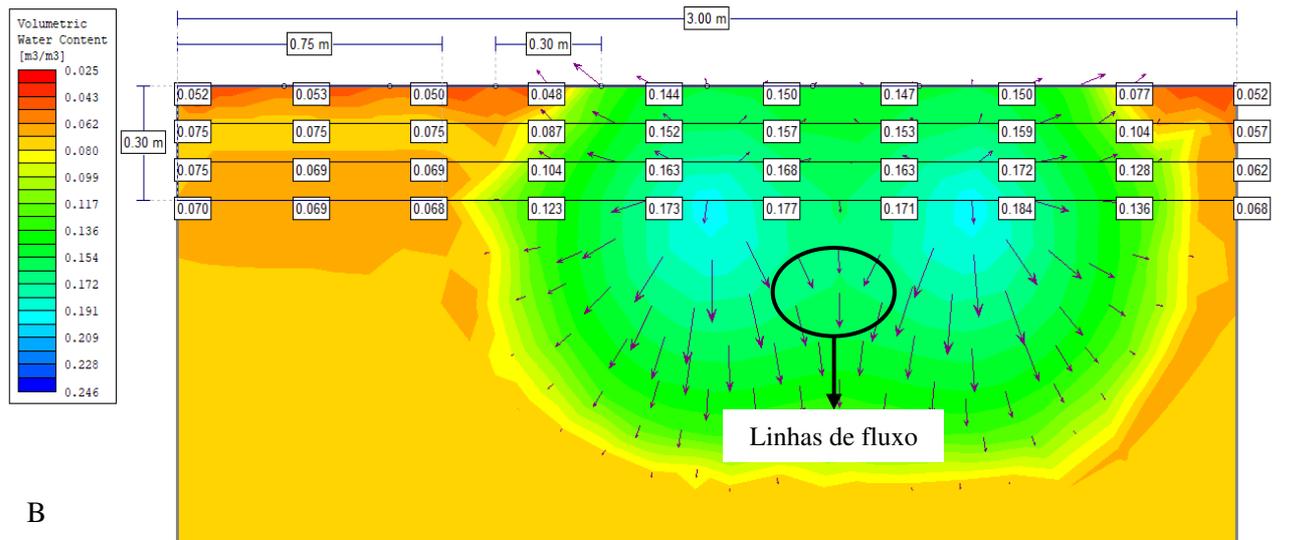
G

Fonte: Retirado do software SLIDE pela autora, 2020.

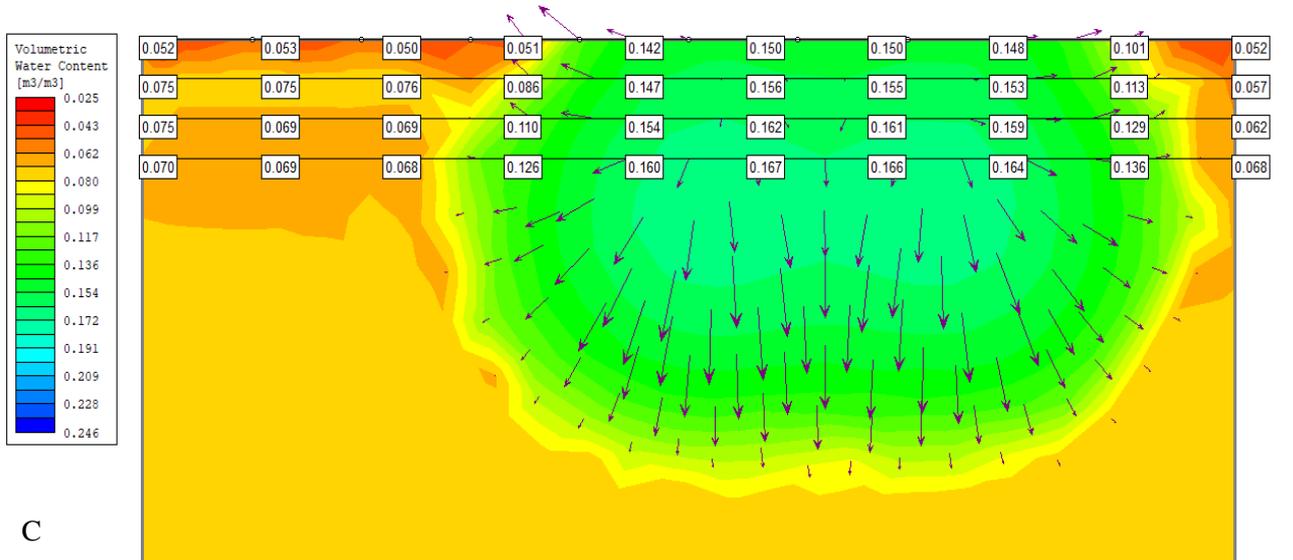
Figura 47 – Resultado da simulação após a irrigação com profundidade do tubo gotejador a 30 cm, 75 cm entre emissores e 30 cm entre plantas. Figura 47A: inicial (60 min); Figura 47B: 70 min; Figura 47C: 80 min; Figura 47D: 90 min; Figura 47E: 100 min; Figura 47F: 120 min; Figura 47G: 150 min.



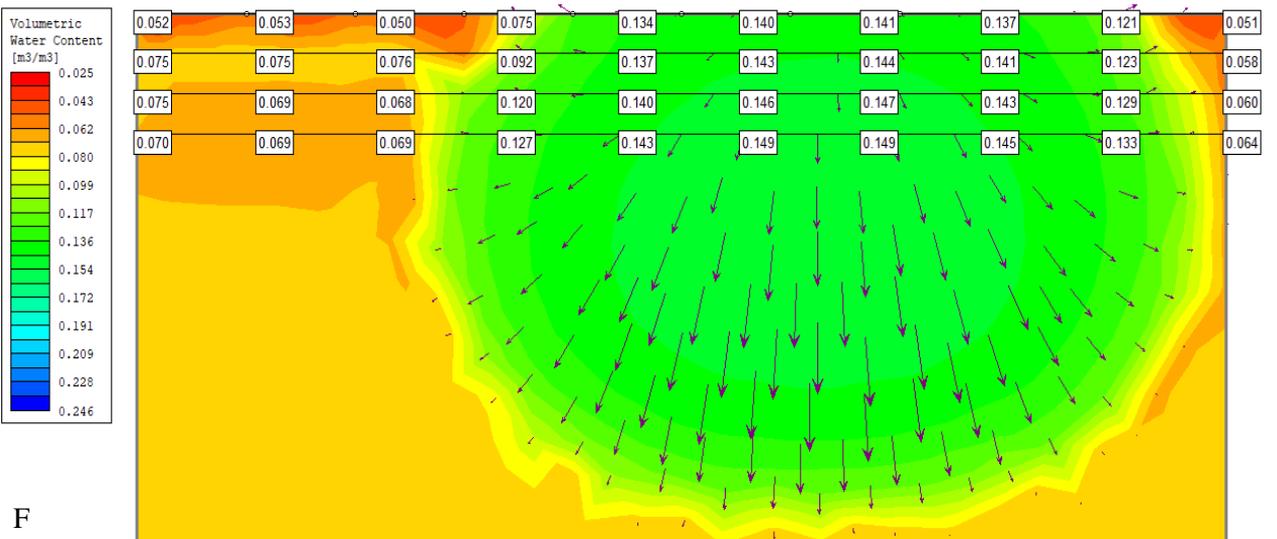
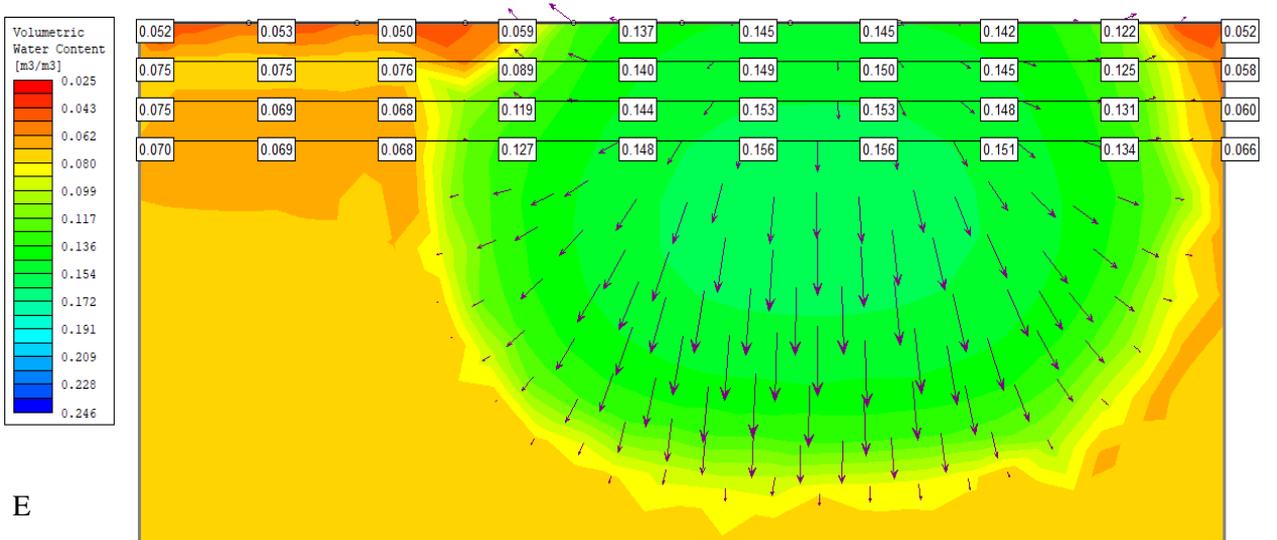
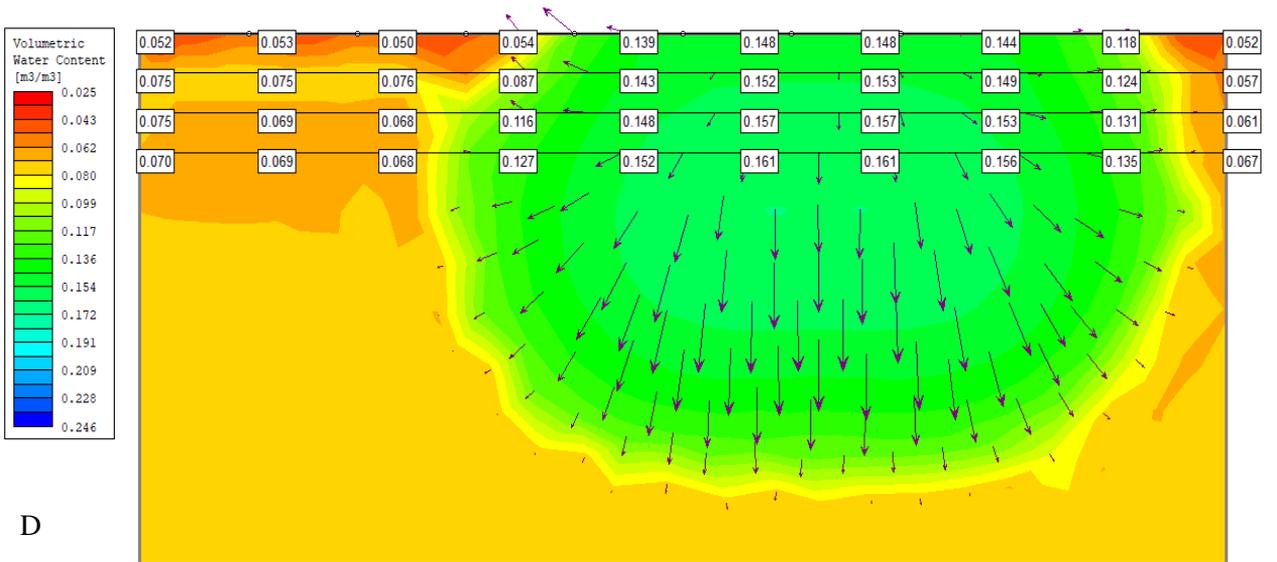
A

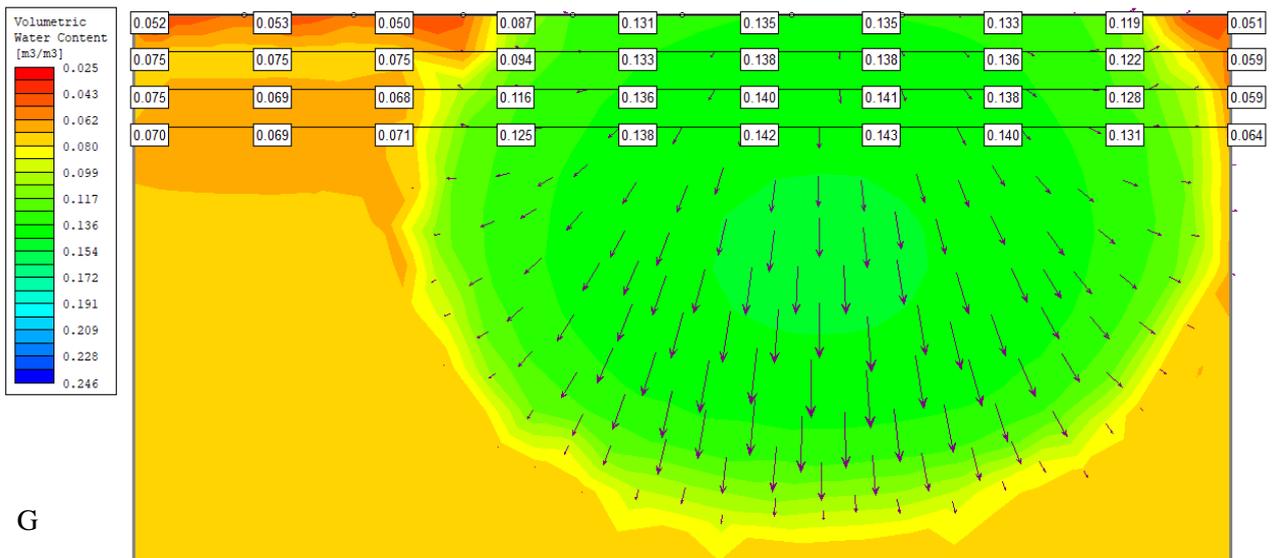


B



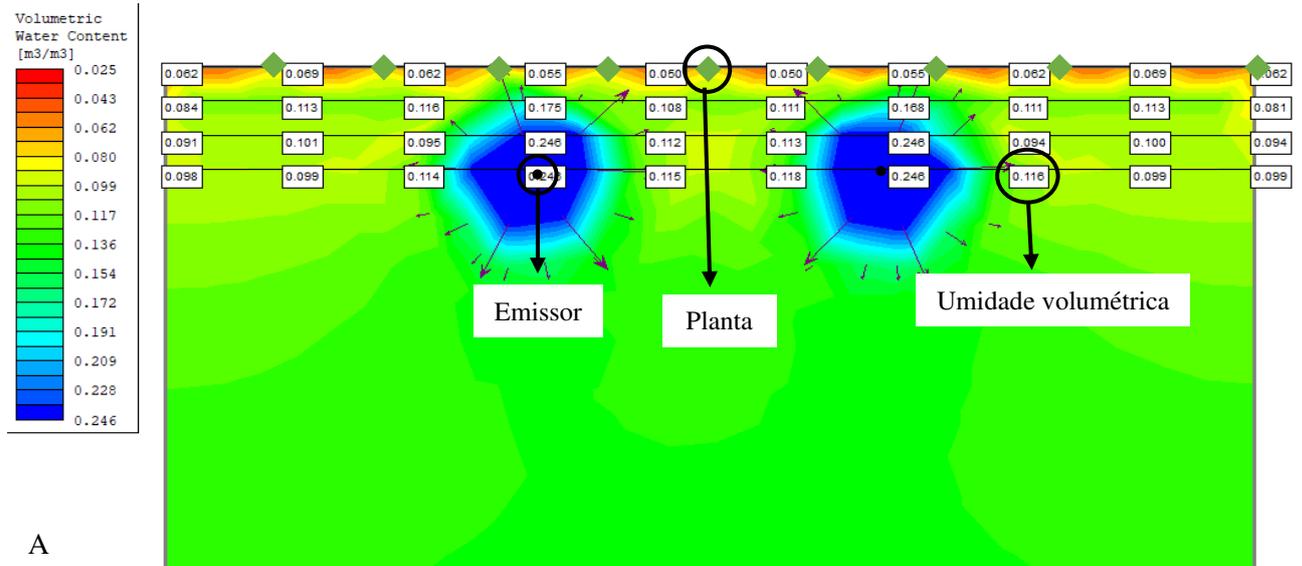
C



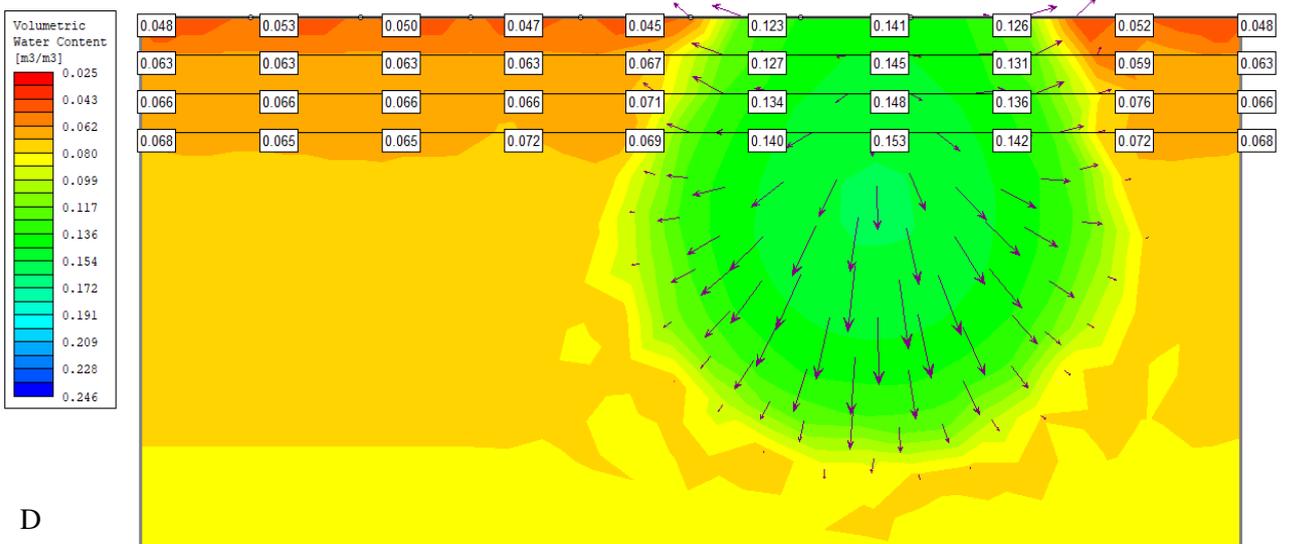
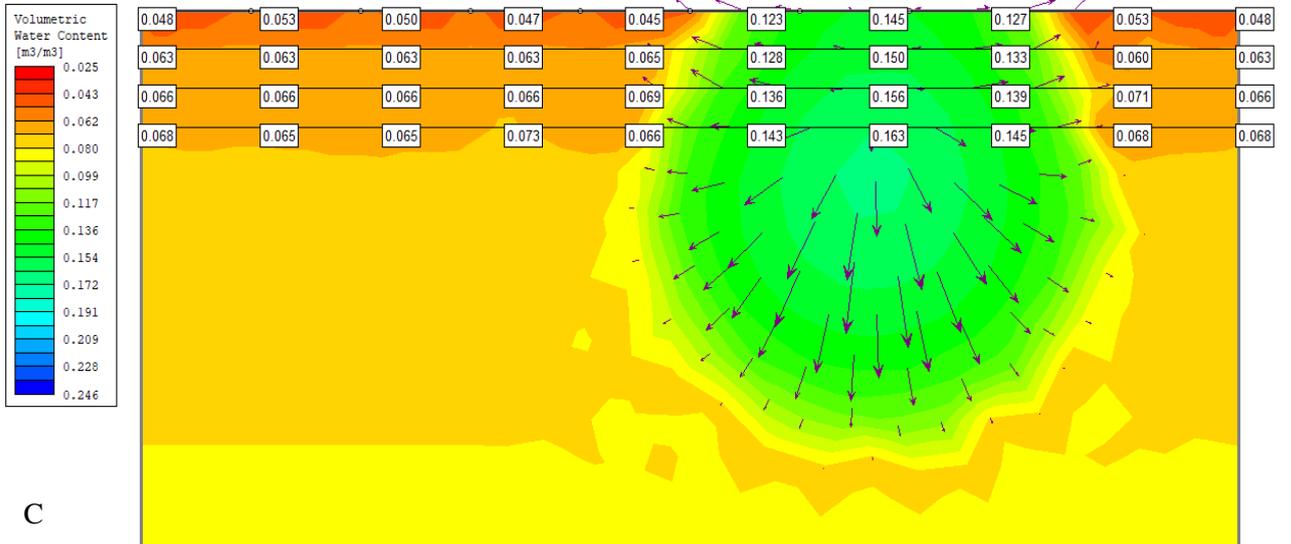
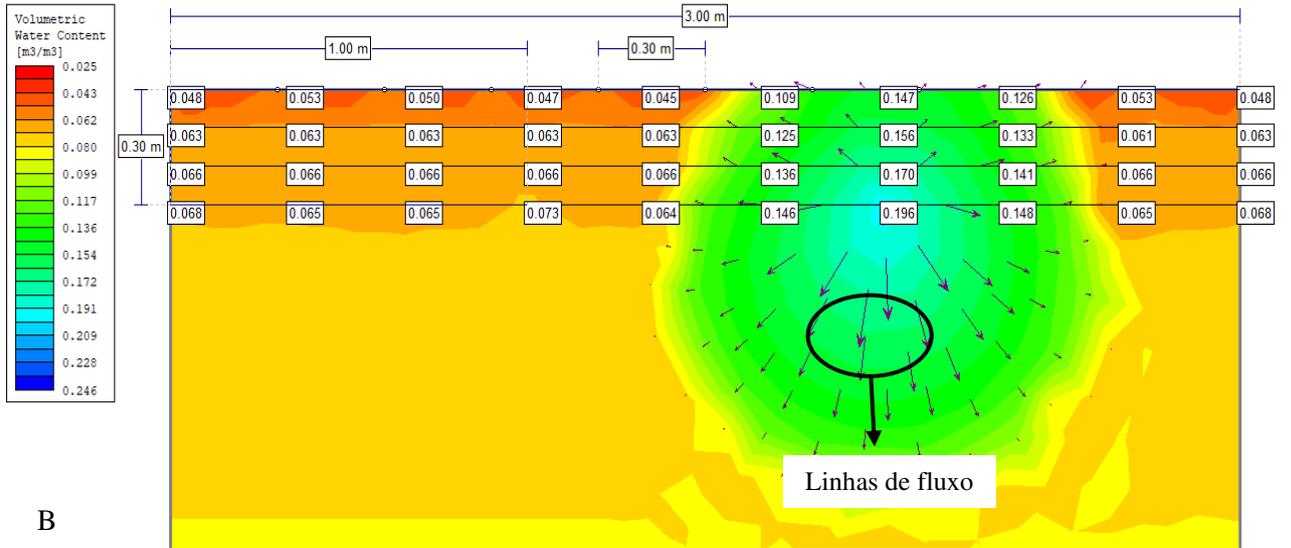


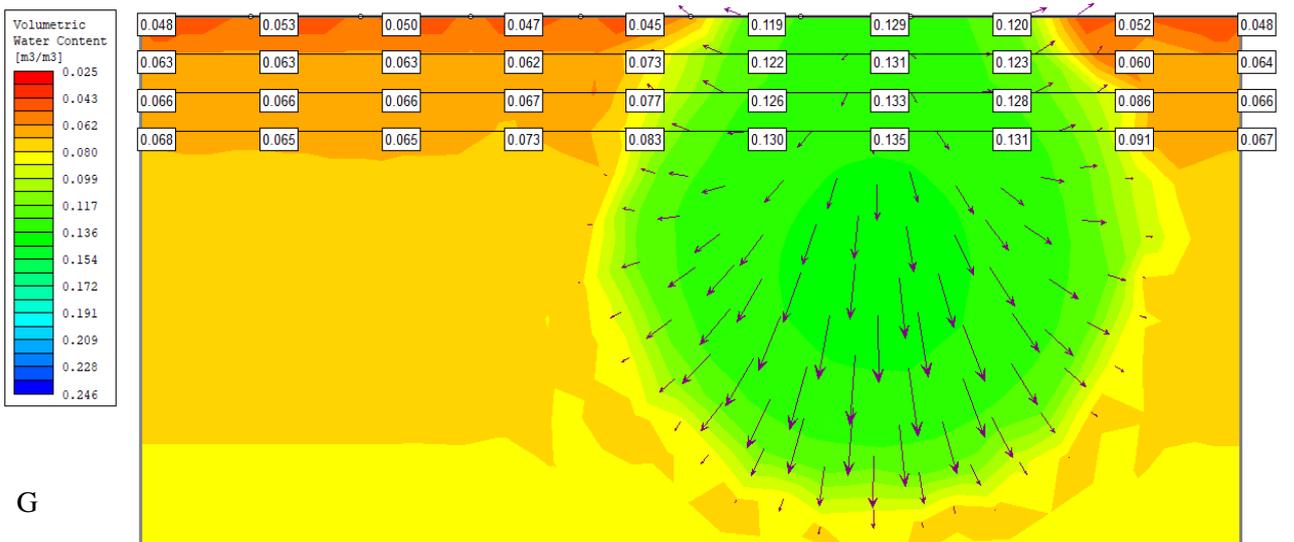
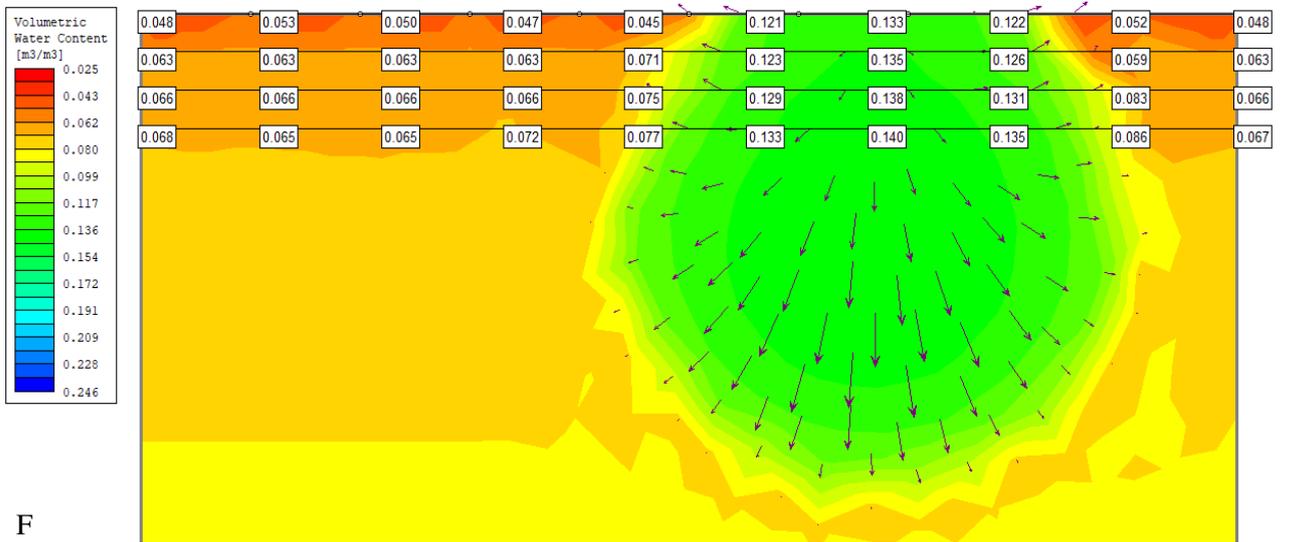
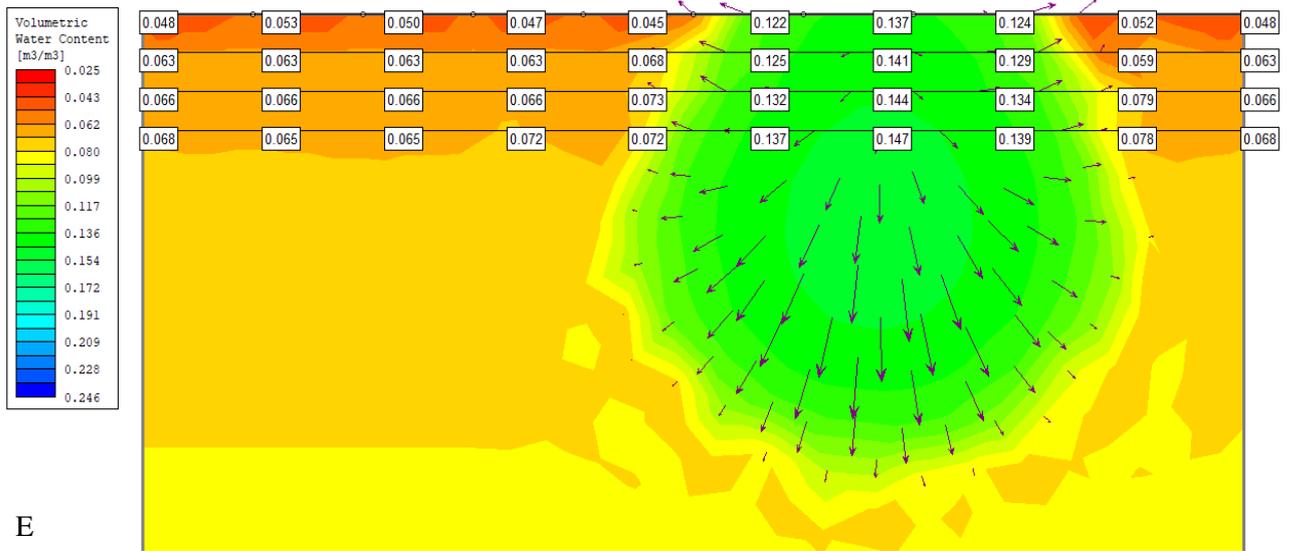
Fonte: Retirado do software SLIDE pela autora, 2020.

Figura 48 – Resultado da simulação após a irrigação com profundidade do tubo gotejador a 30 cm, 100 cm entre emissores e 30 cm entre plantas. Figura 48A: inicial (60 min); Figura 48B: 70 min; Figura 48C: 80 min; Figura 48D: 90 min; Figura 48E: 100 min; Figura 48F: 120 min; Figura 48G: 150 min.



A





Fonte: Retirado do software SLIDE pela autora, 2020.

Pode-se observar nas figuras que houve uma diminuição gradativa dos valores de umidade volumétrica ao mesmo tempo que a frente de umedecimento atinge maiores profundidades e superfície fica mais seca, o que ocorre mais rapidamente nos tratamentos em que a profundidade de instalação do tubo gotejador foi maior e o espaçamento entre os emissores foi menor. As imagens das simulações reforçam que a profundidade do molhamento aumenta com a profundidade de instalação do tubo gotejador, afetando a posição superior do molhamento frontal ao longo da superfície do solo, mas mantém pouco ou nenhum efeito na extensão do umedecimento horizontal no perfil do solo (SINGH *et al.*, 2006; SIYAL; SKAGGS, 2009). Além disso, pode-se observar que com o passar do tempo após o corte da irrigação o tamanho do bulbo úmido aumenta, porém a umidade volumétrica é menor. Isso ocorre, pois a água tende a se movimentar dos locais de maior para os de menor potencial, buscando o equilíbrio (AMARO FILHO; ASSIS JUNIOR; MOTA, 2008) e, portanto, abrangendo uma maior área.

Para avaliar o desempenho do modelo, os teores de água do solo observados e simulados foram comparados nos cenários propostos (umidade nas diferentes profundidades de instalação do tubo gotejador, espaçamento entre emissores e tempo após o corte da irrigação) através do cálculo do coeficiente de determinação ( $R^2$ ) e da raiz do erro médio quadrático (RMSE) (os valores observados e simulados estão no Apêndice B). Na Tabela 22 observam-se estes dois parâmetros estatísticos para cada tratamento. De acordo com a classificação do coeficiente de determinação proposta por Callegari (2009) (Tabela 12), os tratamentos classificaram-se com correlações fortes a muito fortes. Os tratamentos que não se classificaram dessa forma foram os de profundidade de instalação do tubo gotejador a 10 cm, espaçamento entre emissores de 75 cm, 30 e 60 min após o corte da irrigação; profundidade de instalação do tubo gotejador a 20 cm, espaçamento entre emissores de 100 cm, 10 min após o corte da irrigação e profundidade de instalação do tubo gotejador a 30 cm, espaçamento entre emissores de 25 cm, 60 min após o corte da irrigação, todos sendo classificados como correlações moderadas de acordo com Callegari (2009).

Em relação ao RMSE, para a maioria dos tratamentos ficou bem próximo de zero, podendo considerar que o modelo apresenta uma boa previsão do que acontece no campo. Porém, existem casos que este valor não ficou tão próximo de zero, indicando que o modelo tem certas falhas que precisam ser mais aprofundadas em estudos futuros.

Comparando os ensaios durante o evento de irrigação e após o evento de irrigação, nota-se que o modelo apresentou melhor eficácia durante a irrigação. Souza, Coelho e Paz (2007) relataram que no gotejamento subsuperficial a redução dos valores de umidade foi

desuniforme dentro do perfil, mais restrito e próximo ao tronco da planta, indicando a possibilidade da sobreposição entre os bulbos dos gotejadores, com um deslocamento descendente das linhas de maior umidade. O que também pode ter ocorrido neste estudo, diminuindo a eficácia do modelo proposto.

Tabela 22 – Quadro-resumo coeficiente de determinação ( $R^2$ ) e raiz média do erro quadrado para os tratamentos para valores de umidade medidos e simulados.

Profundidade de instalação do tubo gotejador (cm)	Espaçamento entre emissores (cm)	Tempo após corte da irrigação (min)	$R^2$	RMSE ( $\text{cm}^3\text{cm}^{-3}$ )
10	25	10	0,996	0,019
10	25	30	0,982	0,032
10	25	60	0,982	0,016
10	50	10	0,976	0,024
10	50	30	0,837	0,029
10	50	60	0,933	0,022
10	75	10	0,933	0,029
10	75	30	0,451	0,038
10	75	60	0,523	0,022
10	100	10	0,996	0,024
10	100	30	0,946	0,055
10	100	60	0,995	0,064
20	25	10	0,636	0,022
20	25	30	0,936	0,033
20	25	60	0,984	0,016
20	50	10	0,991	0,043
20	50	30	0,997	0,044
20	50	60	0,995	0,035
20	75	10	0,807	0,051
20	75	30	0,992	0,045
20	75	60	0,992	0,038
20	100	10	0,441	0,044
20	100	30	0,903	0,046
20	100	60	0,864	0,046
30	25	10	0,770	0,056
30	25	30	0,838	0,043

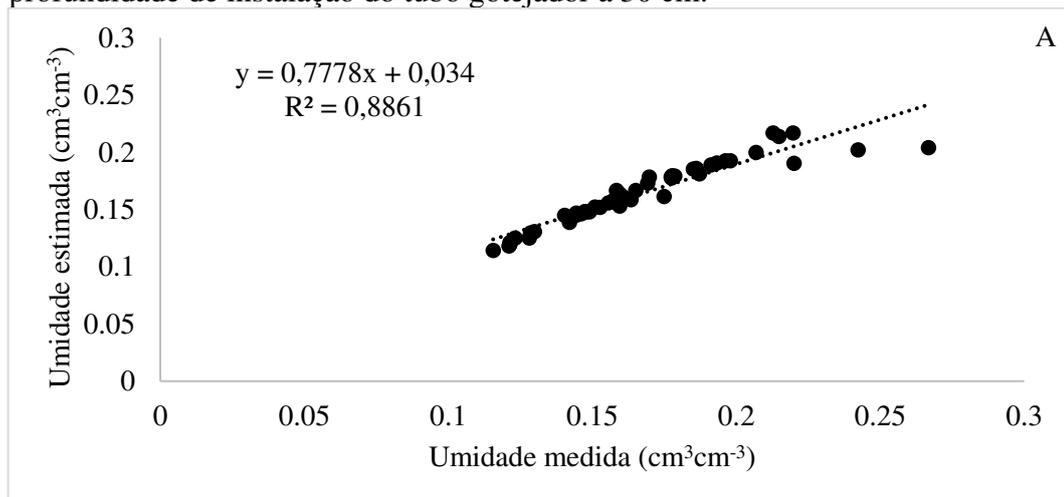
Continua.

30	25	60	0,973	0,028
30	50	10	0,920	0,027
30	50	30	0,471	0,017
30	50	60	0,849	0,005
30	75	10	0,997	0,009
30	75	30	0,750	0,003
30	75	60	0,993	0,004
30	100	10	0,927	0,032
30	100	30	0,706	0,034
30	100	60	0,901	0,033

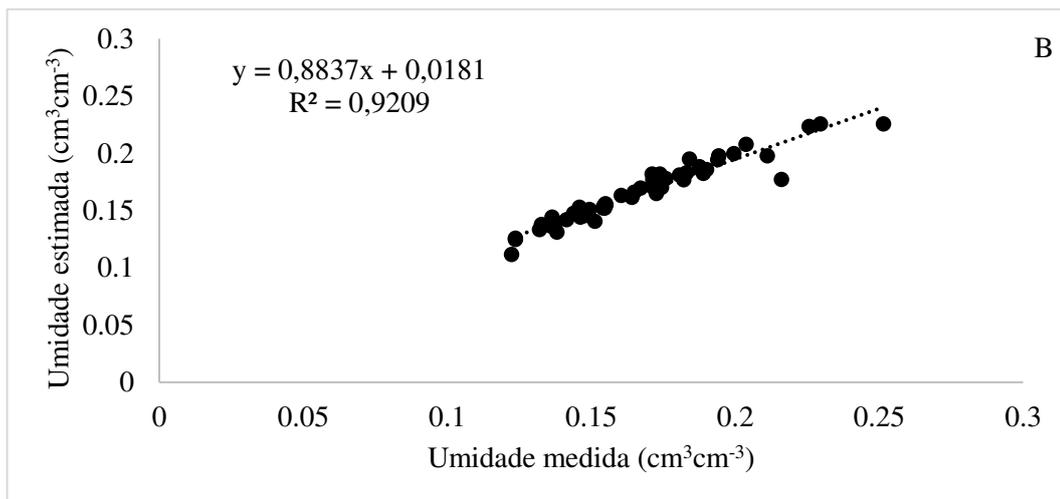
Fonte: Elaborado pela autora, 2019.

O erro médio quadrático (RMSE) fornece uma avaliação direta do erro de modelagem (HANSEN; SCHJOERRING, 2003) expresso com a própria unidade de medida e em média variou mais na validação com dados de campo no tratamento de profundidade de instalação do tubo gotejador de 30 cm, tanto durante (Figura 49) quanto após o corte da irrigação (Figura 50). Essa menor eficácia do modelo pode ter ocorrido devido a presença de um acúmulo de argila de 10 a 39 cm no solo (VIEIRA, 2013), que não foi contemplado pelo modelo.

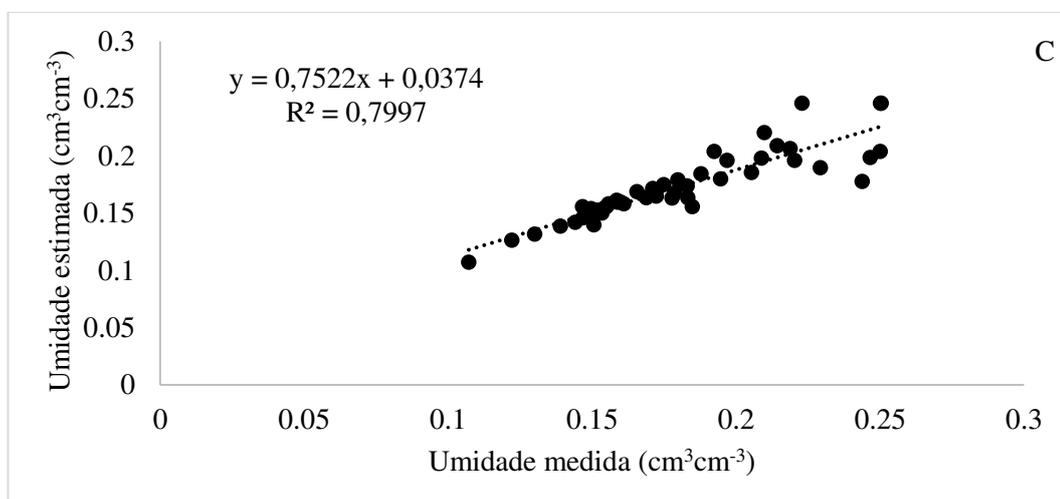
Figura 49 – Validação dos resultados de umidade estimados com os medidos em campo durante a irrigação. Figuras 49A: profundidade do tubo gotejador a 10 cm, Figura 49B: profundidade de instalação do tubo gotejador a 20 cm e Figura 49C: profundidade de instalação do tubo gotejador a 30 cm.



Fonte: Elaborado pela autora, 2019.

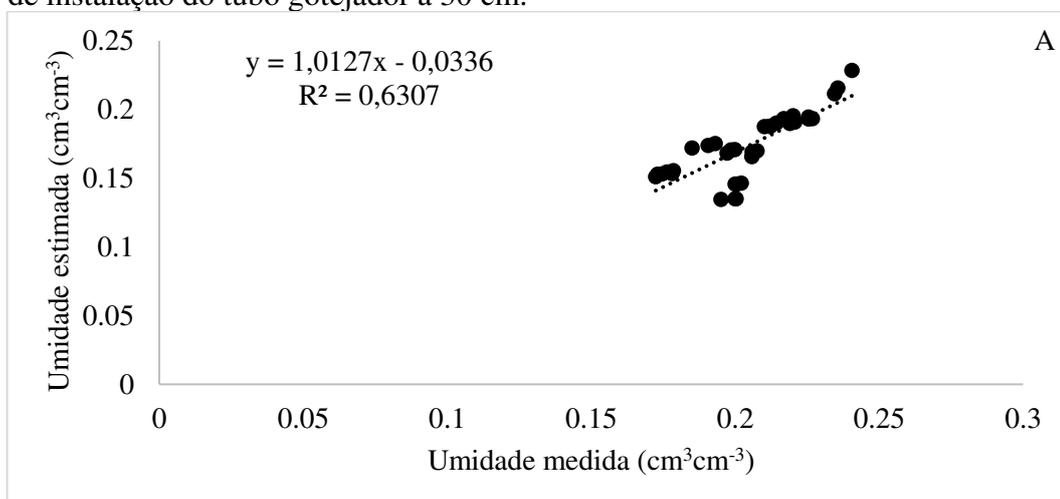


Fonte: Elaborado pela autora, 2019.

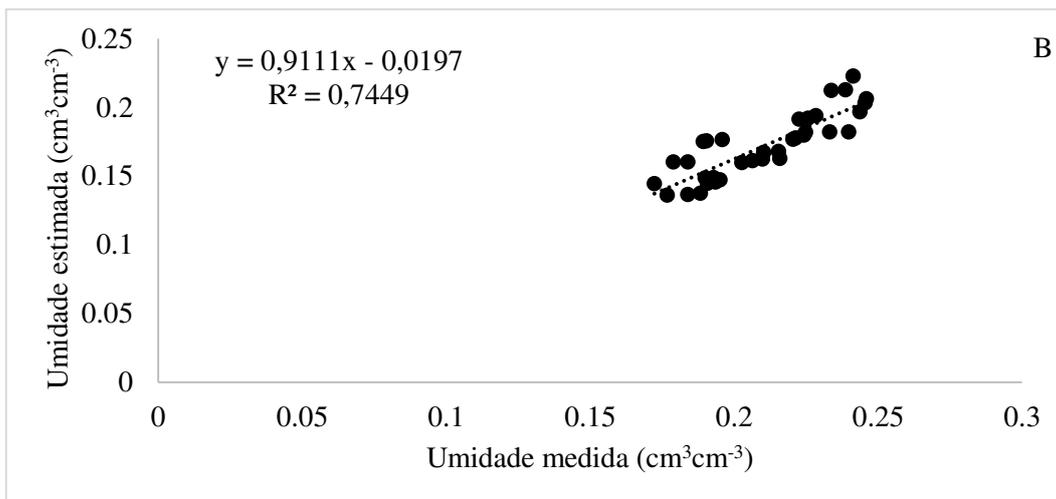


Fonte: Elaborado pela autora, 2019.

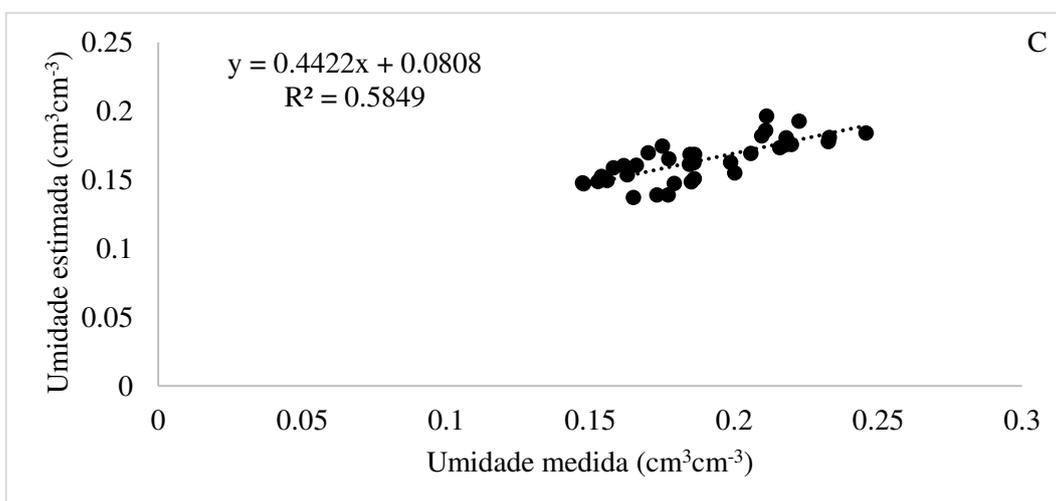
Figura 50 – Validação dos resultados de umidade estimados com os medidos em campo após o corte da irrigação. Figuras 49A: profundidade do tubo gotejador a 10 cm, 49B: profundidade de instalação do tubo gotejador a 20 cm e 49C: profundidade de instalação do tubo gotejador a 30 cm.



Fonte: Elaborado pela autora, 2019.



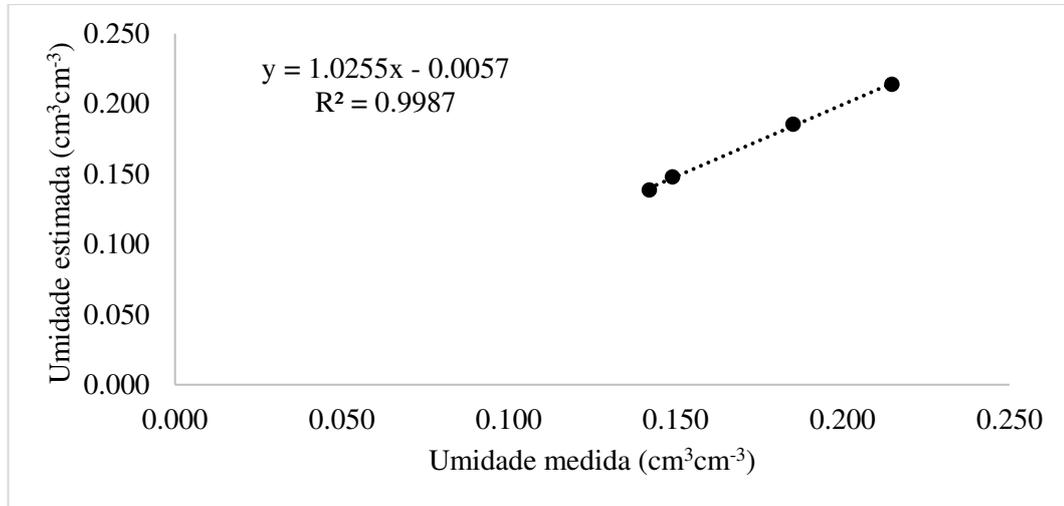
Fonte: Elaborado pela autora, 2019.



Fonte: Elaborado pela autora, 2019.

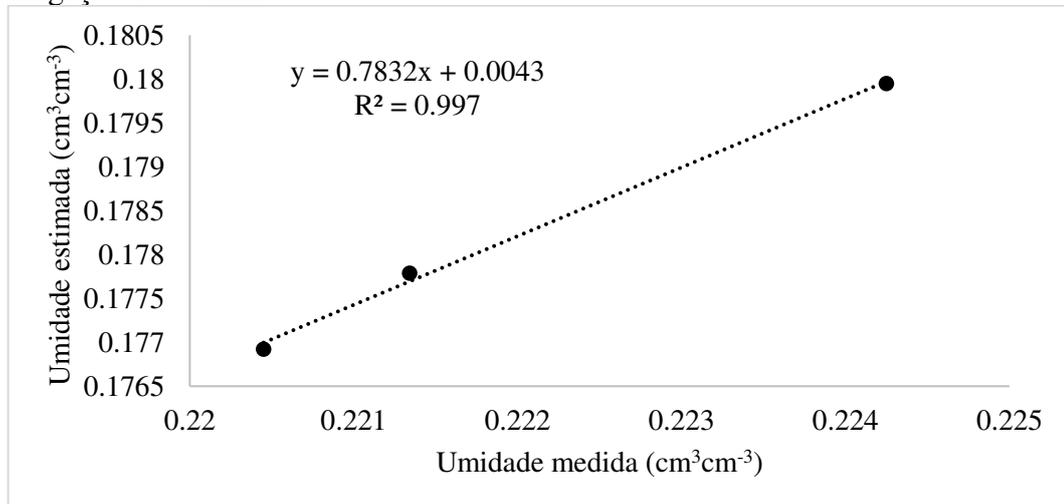
O melhor ajuste do modelo em relação aos dados observados durante a irrigação foi encontrado para o tratamento com profundidade de instalação do tubo gotejador de 10 cm, espaçamento entre emissores de 25 cm e tempo de irrigação de 30 min (Figura 51). Para os dados após o corte da irrigação, o melhor ajuste foi encontrado para o tratamento com profundidade de instalação do tubo gotejador de 20 cm, espaçamento entre emissores de 50 cm e 30 min após o corte da irrigação (Figura 52).

Figura 51 – Validação dos resultados de umidade estimados com os medidos em campo durante a irrigação para o tratamento com profundidade de instalação do tubo gotejador a 10 cm, espaçamento entre emissores de 25 cm e tempo de irrigação de 30 min.



Fonte: Elaborado pela autora, 2019.

Figura 52 – Validação dos resultados de umidade estimados com os medidos em campo após o evento de irrigação para o tratamento com profundidade de instalação do tubo gotejador a 20 cm, espaçamento entre emissores de 50 cm e tempo de irrigação de 30 min.



Fonte: Elaborado pela autora, 2019.

### 13 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

O modelo 2D gerado mostrou-se eficiente na solução da equação de Richards, empregando o método dos elementos finitos em condições de solo não saturado e transiente, sendo aplicável para a simulação da distribuição de água e forma do bulbo úmido resultante de um tubo gotejador subsuperficial ao solo, dada suas propriedades físico-

hídricas (densidade, porosidade, condutividade hidráulica do solo saturado e curva de retenção de água no solo) e os parâmetros do sistema de irrigação (diferentes profundidades de instalação do tubo gotejador e diferentes espaçamento entre emissores).

A etapa mais demorada foi a inclusão dos dados de entrada no software (propriedades físico-hídricas), sendo muito relevante um estudo criterioso com relação aos parâmetros físicos para cada profundidade do solo, pois simplificações adotadas podem gerar resultados imprecisos. Como o software não consegue representar as condições atmosféricas presentes nas condições reais, as condições de contorno também devem ser mais bem avaliadas.

No geral, o modelo gerado mostrou boa eficiência na modelagem do bulbo úmido nos cenários simulados. Porém, o usuário deve ter cautela ao utilizá-lo, pois com base no erro médio calculado, concluiu-se que o modelo subestimou levemente o teor de água no solo. O nível de precisão observado para as previsões do modelo fornece suporte ao uso do SLIDE 6.0 para investigar e projetar sistemas de irrigação subsuperficiais.

Em trabalhos futuros, recomenda-se:

- A) Ao elaborar o modelo no software, incluir as diferentes camadas do solo, como por exemplo a presença de horizonte B textural, para melhor simular o movimento da água no solo.
- B) Caracterizar físico-hidricamente as diferentes camadas de solo existentes na área de estudo.

## 14 CAPÍTULO 3 – RESPOSTAS AGRONÔMICAS E PRODUTIVAS DO MILHO À IRRIGAÇÃO SUBSUPERFICIAL

### RESUMO

O uso da irrigação subsuperficial vem crescendo nas últimas décadas e ainda faltam estudos relacionados a esta prática, principalmente em relação a melhor combinação de profundidade de instalação do tubo gotejador e o melhor espaçamento entre emissores, levando em conta a economia de água na instalação, manejo do projeto e boa produtividade. Assim, o estudo teve como objetivo principal avaliar qual melhor a combinação de profundidade e espaçamento para o cultivo da variedade de milho AG 1051. Os tratamentos foram combinações de 3 profundidades de instalação do tubo gotejador (10, 20 e 30 cm) e 4 espaçamentos entre emissores (25, 50, 75 e 100 cm), com 4 repetições em parcelas subdivididas. Foram analisadas as variáveis: peso da espiga com palha, diâmetro e comprimento das espigas sem palha, massa fresca da planta, altura da planta e diâmetro do colmo. Além disso, foi feita a produtividade total de espigas com palha e espigas comerciais (kg há<sup>-1</sup>). As análises estatísticas demonstraram que a melhor combinação de profundidade de instalação do tubo gotejador e espaçamento entre emissores tanto para as variáveis agronômicas estudadas quanto para a produtividade total de espigas com palha é o tubo gotejador instalado a 30 centímetros de profundidade com 50 centímetros de espaçamento entre emissores.

**Palavras-chave:** Irrigação localizada. Espaçamento entre emissores. Profundidade de instalação tubo gotejador.

### ABSTRACT

The use of subsurface irrigation has been growing in the last decades and studies related to this practice are still lacking, mainly in relation to the best combination of installation depth of the drip tube and the best spacing between emitters, taking into account the water saving in the installation, management design and good productivity. The main objective of the study was to evaluate the best combination of depth and spacing for the cultivation of the AG 1051 corn variety. The treatments were combinations of 3 drip tube installation depths (10, 20 and 30 cm) and 4 spacing between emitters (25, 50, 75 and 100 cm), with 4 repetitions in subdivided plots. The variables were analyzed: cob weight with straw, diameter and length of cobs without straw,

fresh weight of the plant, plant height and stem diameter. In addition, the total productivity of cobs with straw and commercial cobs ( $\text{kg ha}^{-1}$ ) was made. Statistical analyzes have shown that the best combination of installation depth for the drip tube and spacing between emitters for both the agronomic variables studied and for the total productivity of cobs with straw is the dripper tube installed at 30 centimeters in depth with 50 centimeters of spacing between emitters.

**Keywords:** Localized irrigation. Spacing between emitters. Drip pipe installation depth.

## 15 INTRODUÇÃO

Por razões essencialmente econômicas, o milho tem sido plantado principalmente no período chuvoso, uma vez que a cultura demanda um consumo mínimo de 350 a 500 mm para garantir uma produção satisfatória sem necessidade de irrigação. Em condições de clima quente e seco, a cultura do milho raramente excede um consumo de  $3 \text{ mm dia}^{-1}$  de água, já no período que vai da iniciação floral à maturação, o consumo pode atingir de 5 a  $7 \text{ mm dia}^{-1}$ . As maiores produtividades têm ocorrido associadas a consumos de água entre 500 e 800 mm considerando todo o ciclo da cultura (EMBRAPA, 2012).

No Nordeste brasileiro, a irregularidade da precipitação e o manejo inadequado da irrigação podem resultar em baixas produtividades (MOURA *et al.*, 2006). Por isso, o manejo correto da irrigação é uma alternativa viável e importante para otimizar a produção de alimentos, promovendo desenvolvimento sustentável no campo, com geração de emprego e renda, principalmente para pequenos produtores dessa região (SILVA *et al.*, 2012).

Dentre os métodos de irrigação, a microirrigação é um dos mais eficientes no uso da água. O sistema por gotejamento, se destaca pela grande economia de água e energia; necessidade de menor aporte de mão de obra; redução da incidência de pragas e doenças, redução do desenvolvimento de plantas daninhas; otimização do uso de fertilizantes; possibilidade de uso de água com maior salinidade; possibilidade de cultivo em áreas com afloramentos rochosos e, ou, com declividades acentuadas (MANTOVANI; BERNARDO, PALARETTI, 2009).

O uso da irrigação subsuperficial está expandindo e este sistema de irrigação apresenta ainda mais vantagens, principalmente por aplicar a água diretamente na zona radicular e por perder menos água por evaporação. Diante disto, este estudo teve como objetivo

verificar qual a melhor combinação de profundidade de instalação do tubo gotejador e espaçamento entre emissores para a cultura do milho.

## **16 REVISÃO DE LITERATURA**

### **16.1 A cultura do milho**

O milho (*Zea mays* L.) pertence à família Poaceae e é uma espécie originária da América do Norte, com centro de origem genética no México. É uma cultura importante em todo o mundo em termos de produção de grãos, pois pode ser consumido por seres humanos, diretamente ou após o processamento e, na maioria das vezes, é o principal componente da ração animal, além de produzir óleo vegetal, xarope de açúcar e biocombustível (EMBRAPA, 2008). Além de multifuncionalidade, a cultura apresenta alto potencial produtivo quando cultivado em alto nível de manejo.

A planta de milho é utilizada quase que em sua totalidade, sendo aproveitado na alimentação humana, matéria prima básica para uma série de produtos industrializados, assim como para geração de energia de biomassa. Após a comercialização das espigas os restos da planta podem ser aproveitados para posterior incorporação, como cobertura do solo para plantio direto ou sendo triturado para compor a silagem para a alimentação animal (MORAES, 2009).

O USDA (United States Department of Agriculture) prevê uma produção global de 1,10 bilhões de toneladas para a safra mundial de milho 2019/20, contra 1,12 bilhões de toneladas no ciclo anterior. O consumo global do cereal foi estimado para 1,13 bilhões de toneladas (FIESP, 2019).

O Brasil ocupa a terceira posição no ranking mundial de área colhida de grãos de milho, colhendo em média 7 milhões de hectares a cada safra, sendo superado apenas pelo EUA e China (IMEA, 2019). Apesar de estar entre os três maiores produtores, o Brasil não se destaca entre os países com maior nível de produtividade devido ao grande número de produtores que não usam tecnologias que explorem o potencial produtivo da cultura.

Silva (2004) afirma que a baixa produtividade do milho é devido a não adequação de vários fatores como a fertilidade do solo, população, arranjo de plantas, escolha de cultivares adaptada a cada condição de manejo, clima e práticas culturais. Aliado a isso, a qualidade da operação de semeadura torna-se fundamental para o estabelecimento da cultura.

### 16.1.1 Produção de milho verde

No Brasil, o milho verde é bastante consumido e considerado uma tradição, sendo comum sua comercialização em espigas, grãos enlatados e subprodutos, como pamonha, curau e suco (RODRIGUES *et al.*, 2009). As espigas de milho verde atingem maiores preços que o grão de milho comercializado seco (TAVELLA *et al.*, 2017).

Devido ao alto valor agregado e à boa aceitação no mercado, o milho verde é um produto que pode atingir melhores preços que o milho grão, sendo uma boa alternativa para pequenos produtores. Vários fatores colaboram para que isso aconteça, dentre eles a possibilidade de maior retorno de capital por área plantada, pois, além da utilização das espigas, permite o aproveitamento da planta do milho e do restante das espigas não comercializáveis que ficam na área para a alimentação de bovinos. Outra vantagem está no fato da liberação mais cedo da área para outros cultivos, devido ao ciclo mais curto para a produção do milho verde *in natura* (ALBUQUERQUE; VON PINHO; SILVA, 2008, CRUZ *et al.*, 2006).

Dessa forma, as áreas de cultivo com o intuito de produção de milho verde têm tido aumento significativo, devido à maior lucratividade dos grãos verdes, ou seja, quando o grão se encontra no estado leitoso possui maior valor de comercialização, quando comparado ao grão seco (PAIVA *et al.*, 2012).

Para a comercialização do milho verde é necessário que alguns atributos atendam aos interesses da indústria, por exemplo, possibilidade de plantio durante todo o ano, produtividade acima de 12 toneladas ha<sup>-1</sup>, ciclo do milho entre 90 e 110 dias, longevidade no período da colheita e bom empalhamento (PEREIRA FILHO; CRUZ; GAMA, 2003). Pode-se acrescentar ainda como atributos desejáveis a maior porcentagem e peso das espigas comerciais, maior comprimento e diâmetro médio das espigas (ALBUQUERQUE; VON PINHO; SILVA, 2008).

Devido ao grão ser a parte consumida diretamente *in natura* ou na elaboração de pratos, o consumidor tem preferência por espigas de maior comprimento, tornando esse um atributo de relevância na comercialização do milho *in natura* ou para a indústria de enlatados (PINHO *et al.*, 2008).

O milho para consumo *in natura* desperta interesse do produtor, devido a esse produto apresentar demanda durante todo o ano e proporcionar elevada taxa de agregação de renda aos produtores (ARCHANGELO *et al.*, 2007). Nesse sentido, o milho cultivado para a produção de milho verde é cultivado durante todo o ano, para isso é necessário que sejam

supridas as exigências hídricas da cultura por meio de irrigação suplementar nos períodos de déficit hídrico (PAIVA JUNIOR, 1999).

### **16.1.2 Produção de silagem**

O milho é uma planta muito utilizada para a produção de silagem, devido à sua grande produção de forragem e composição da planta, que proporcionará fermentação adequada e grande valor nutritivo de sua forragem. Além da qualidade da silagem formada, o milho possui baixo custo de produção aliado a um elevado potencial produtivo de matéria seca por hectare (PÔSSAS *et al.*, 2015). A silagem de milho é o principal alimento volumoso utilizado nos sistemas de produção animal em confinamento, em outros sistemas, é usada, principalmente, no período de escassez de pastagens (PEREIRA *et al.*, 2007).

O milho é uma planta que tem alto valor energético, boa composição de fibras, além do alto potencial de produção de matéria seca, aliada à produção de grãos que enriquecem a forragem produzida, entretanto a produção dessa forragem é influenciada, dentre outros fatores, pela disponibilidade de água no solo (ALVAREZ; PINHO; BORGES, 2006). No período de estiagem, observa-se carência na produção de volumoso, além de queda na sua qualidade, sendo, portanto, um fator limitante para a produção pecuária (PIRES *et al.*, 2013).

Na colheita do milho verde nem todas as espigas são comercializáveis, mas a produção de palhada e espigas poderá ser utilizada como forragem ou como adubação orgânica. Além das espigas comercializáveis, o milho verde rende, em média, 25 t/ha de matéria fresca, que pode ser utilizada diretamente na alimentação animal. Nesse caso, é recomendável que seu uso seja feito com até cerca de três semanas após a colheita do milho verde, pois, durante esse período, a planta de milho continua ativa, mesmo após a colheita da espiga, acumulando nutrientes no colmo (EMBRAPA, 2008).

## **16.2 Demanda hídrica e irrigação da cultura do milho**

Para uma boa produção, a cultura do milho necessita de 400 a 600 mm de água (MACHADO, 2016), sendo uma das culturas mais eficientes no uso da água, isto é, produz grande quantidade de matéria seca por unidade de água absorvida. A cultura do milho se adapta a todos os métodos de irrigação, logo deve-se procurar o mais viável economicamente para o produtor e que se adapte as condições do local (EMBRAPA, 2008).

Dentre os fatores que influenciam na produtividade do milho, a deficiência hídrica é o que mais frequentemente limita a obtenção de altos rendimentos de grãos no Brasil (SANGOI *et al.*, 2010). Nas condições climáticas brasileiras, devido à ocorrência de déficit hídrico, a produção de milho teve reduções significativas nas safras 1990/91, 1995/96, 1996/97, 1998/99, 1999/00, 2003/04, 2004/05 e 2011/12 (BERGAMASCHI; MATZENAUER, 2014).

A planta só realiza os processos de germinação e emergência na presença de água. A falta de água pode acarretar prejuízos na disponibilidade, absorção e transporte de nutrientes. É de extrema importância o fornecimento de água à cultura, principalmente na fase reprodutiva no período de pendoamento ao espigamento, sendo época crucial 15 dias antes e 15 dias depois do pendoamento (SILVA *et al.*, 2010).

Quando ocorre déficit hídrico no período reprodutivo do milho, pode reduzir em até 51% o rendimento de grãos (MATZENAUER; WESTPHALEN; MALUF, 1986). O efeito do déficit hídrico no período crítico da planta (pendoamento-espigamento), se manifesta, principalmente, nos componentes do rendimento, número de espigas por planta e o número de grãos por espiga (BERGAMASCHI *et al.*, 2004). O número de grãos por espiga é resultado do número de fileiras de grãos na espiga e do número de grãos na fileira (comprimento da espiga). O número de fileiras de grãos na espiga é, principalmente, determinado pelo genótipo, ou seja, a redução do número de grãos por espiga devido à deficiência hídrica deve-se, principalmente, ao decréscimo no comprimento da espiga e não à redução do número de fileiras de grãos (NIELSEN, 2007).

O cultivo do milho irrigado é essencial para aumentar a produção. Visto que, a produtividade dessa cultura, em condições irrigadas, pode ser superior em 30 a 40% em relação à área de sequeiro (BORGES, 2003). Essa redução de produtividade na cultura do milho ocorre pelo fato do déficit hídrico impactar diretamente o desenvolvimento da planta, reduzindo, deste modo, sua área foliar e, em consequência, a fotossíntese e os processos fisiológicos da planta (BERGAMASCHI, 1992). Como resultado do déficit hídrico ocorre decréscimo no acúmulo de matéria seca nas plantas e no índice de área foliar (FRANÇA *et al.*, 1999), fatores fundamentais para se alcançar altos tetos produtivos.

O milho verde, em sua maioria, é produzido em pequenas propriedades, em que o uso de sistemas de irrigação ainda é limitado. As culturas, durante o seu ciclo de desenvolvimento, consomem grande volume de água, sendo que por volta de 98% deste volume passam através da planta, por meio do processo de transpiração (GORDON *et al.*, 1995). Este fluxo de água é necessário para o desenvolvimento vegetal.

A quantidade de água que o milho verde utiliza durante o ciclo é chamada demanda sazonal, podendo variar com as condições climáticas da região onde é cultivado. Há um período durante o ciclo da cultura em que mais água é consumida diariamente. No caso do milho, esse período coincide com o florescimento e o enchimento de grãos e um estresse hídrico nessa fase pode causar diversos prejuízos para o agricultor, notadamente reduzindo a produtividade da cultura (NASCIMENTO *et al.*, 2015).

Ultimamente, o uso da irrigação subsuperficial está expandindo e este sistema de irrigação apresenta ainda mais vantagens, principalmente por aplicar a água diretamente na zona radicular e por perder menos água por evaporação.

## 17 MATERIAL E MÉTODOS

O estudo foi realizado na área experimental do Laboratório de Hidráulica e Irrigação da Universidade Federal do Ceará, Campus do Pici. A cultivar utilizada foi a AG 1051, o espaçamento entre plantas foi de 30 centímetros em linhas de irrigação com 3 metros de comprimento, profundidades de instalação do tubo gotejadores de 10, 20 e 30 cm (P1, P2 e P3) e espaçamento entre emissores de 25, 50, 75 e 100 cm (E1, E2, E3 e E4), com 4 repetições em parcelas sub-subdivididas, denominados de tratamento citados na Tabela 23 a seguir.

Tabela 23 – Tratamentos analisados.

Tratamento	Profundidade de instalação do tubo gotejador (cm)	Espaçamento entre emissores (cm)
1	10	25
2	10	50
3	10	75
4	10	100
5	20	25
6	20	50
7	20	75
8	20	100
9	30	25
10	30	50
11	30	75
12	30	100

Fonte: Elaborado pela autora, 2019.

A adubação foi realizada de acordo com o resultado de análise química e a necessidade da cultura. Como fonte de nitrogênio foi utilizada a ureia, como fonte de potássio o cloreto de potássio e como fonte de fósforo foi utilizado o MAP. Foram aplicados por

adubação convencional (a primeira de fundação) e as outras parceladas em 4 vezes de 10 em 10 dias, iniciando com 10 dias após o plantio, com exceção do MAP que foi aplicado apenas na fundação. Foi aplicado também um complexo de micronutrientes com 20% de zinco no mesmo dia da aplicação da 2ª parcela (Tabela 24). O plantio foi realizado no dia 03/07/2019 e o replantio das falhas foi feito no dia 24/07/2019.

Tabela 24 – Quantidades e datas de aplicação dos adubos utilizados.

<u>Adubo</u>	<u>Data da aplicação</u>	<u>Quantidade aplicada (g/planta)</u>
Ureia	02/07/2019 (fundação)	13
	13/07/2019 (parcela 1)	13
	23/07/2019 (parcela 2)	13
	02/08/2019 (parcela 3)	13
	12/08/2019 (parcela 4)	13
KCl	02/07/2019 (fundação)	7
	13/07/2019 (parcela 1)	7
	23/07/2019 (parcela 2)	7
	02/08/2019 (parcela 3)	7
	12/08/2019 (parcela 4)	7
MAP	02/07/2019 (fundação)	20
Ubyfol	23/07/2019 (parcela única)	0,1

Fonte: Elaborado pela autora, 2019.

A semeadura foi realizada utilizando-se três sementes por cova, em covas de 5 cm de profundidade, resultando em uma população de aproximadamente 480 plantas (após o desbaste) em 0,05 há, equivalente a 66.666 plantas/há (50 cm entre linhas x 30 cm entre plantas). A porcentagem de área molhada (PAM) foi calculada utilizando a Equação 14. Para o cálculo da primeira lâmina de irrigação, utilizou-se a equação da irrigação real necessária para irrigação localizada (Equação 15), supondo que o solo estava no ponto de murcha permanente. Para o cálculo da irrigação total necessária para irrigação localizada foi utilizada a Equação 16, considerando a eficiência do sistema de 90%. Para as irrigações seguintes, utilizou-se dados gerados pelo software SLIDE, utilizado da modelagem numérica realizada no capítulo 2 e pela determinação da umidade volumétrica através do método termogravimétrico (Equação 17). O fator de disponibilidade de água no solo utilizado foi de 0,5 (MANTOVANI; BERNARDO; PALARETTI, 2009).

$$PAM = \frac{AMe * 100}{AT} \quad \text{Equação 14}$$

$$IRN_{loc} = \frac{U_{CC} - U_{PMP}}{10} * ds * z * f * \frac{PAM}{100} \quad \text{Equação 15}$$

$$ITN_{loc} = \frac{IRN_{loc}}{Ea}$$

Equação 16

$$IRN_{loc} = \frac{(U_{CC} - Ua)}{10} * ds * z * \frac{PAM}{100}$$

Equação 17

Onde:  $AM_e$  = área molhada pelo emissor,  $m^2$ ;  $AT$  = área total da planta,  $m^2$ ;  $U_{CC}$  = umidade na capacidade de campo, % em peso;  $U_{PMP}$  = umidade no ponto de murcha permanente, % em peso;  $ds$  = densidade global do solo,  $g\ cm^{-3}$ ;  $z$  = profundidade efetiva do sistema radicular,  $cm$ ;  $f$  = fator de disponibilidade de água no solo, adimensional;  $PAM$  = porcentagem de área molhada, %;  $Ea$  = eficiência do sistema de irrigação;  $Ua$  = umidade atual,  $cm^3\ cm^{-3}$ .

Durante o ciclo da cultura foram feitas as análises: altura da planta e diâmetro do colmo. A altura foi considerada da folha mais nova até o solo e a partir do momento que a folha bandeira surgiu, foi feita da folha bandeira até o solo. O diâmetro foi medido com um paquímetro (Figura 53).

Figura 53 – Medida da altura e do diâmetro das plantas.



Fonte: Elaborado pela autora, 2019.

Estas duas variáveis eram feitas a cada 7 dias e esse procedimento foi realizado 3 vezes durante o ciclo, iniciando com 45 DAP, sendo coletados os dados de 36 plantas por tratamento.

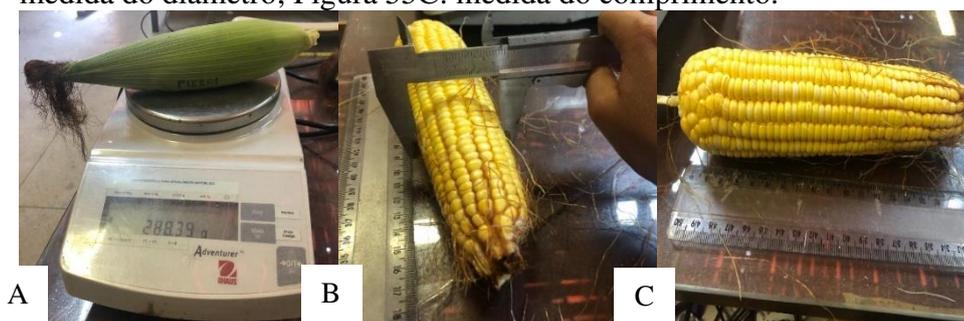
A colheita iniciou-se com 72 DAP (Figura 54). Foram coletadas 40 espigas de cada tratamento, totalizando 480 amostras. As espigas foram pesadas com palhas e foram medidos o diâmetro e o comprimento de cada uma delas depois de despalhadas (Figura 55). Depois de 7 dias após a primeira colheita foram iniciadas a retirada das plantas para a massa fresca, foram coletadas 144 plantas, 12 para cada tratamento. As plantas foram cortadas com 10 cm de altura em relação ao solo e pesadas em balança de precisão (Figura 56). Após coletadas as 40 espigas e medidos os comprimentos e diâmetros, foi feita a seleção das espigas comerciais sem palha aquelas com comprimento superior a 15,0 cm, conforme Moreira *et al.* (2010), e com diâmetro médio superior a 3,0 cm, granadas e isentas de injúrias causadas por insetos-praga e doenças.

Figura 54 – Colheita



Fonte: Elaborado pela autora, 2019.

Figura 55 – Figura 55A: pesagem das espigas com palha; Figura 55B: medida do diâmetro; Figura 55C: medida do comprimento.



Fonte: Elaborado pela autora, 2019.

Figura 56 – Pesagem da massa fresca.



Fonte: Elaborado pela autora, 2019.

## 18 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Nas Tabelas 25 e 26 estão dispostas as análises estatísticas descritivas dos dados da variável peso da espiga com palha em relação a profundidade de instalação do tubo gotejador e ao espaçamento entre emissores, respectivamente.

Tabela 25 – Medidas estatísticas descritivas do peso da espiga com palha (gramas) em relação a profundidade de instalação do tubo gotejador.

Métrica de análise	Profundidade 10 cm	Profundidade 20 cm	Profundidade 30 cm
N	160	160	160
Mínimo	32,50	62,83	62,77
Máximo	594	576,55	609
Mediana	277,850	273,180	300,515
Média	270,503	279,195	304,435
Desvio padrão	13,235	12,401	13,862
Variância	1,751	1,537	1,921
Assimetria	0,165	0,206	0,308
Distribuição	Normal	Normal	Normal

Fonte: Elaborado pela autora, 2019.

Ao analisar a Tabela 25, pode-se inferir que para a profundidade de instalação do tubo gotejador a 30 cm, foi encontrada maior média para o peso da espiga. O desvio padrão para as 3 profundidades ficou em torno de 15%, essa dispersão dos dados em relação à média pode ter sido ocasionada pela ocorrência de pragas nas espigas. Os dados apresentaram distribuição normal de acordo com o teste e Kolmogorov-Smirnov.

Tabela 26 – Medidas estatísticas descritivas do peso da espiga com palha (gramas) em relação ao espaçamento entre emissores.

Métrica de análise	Espaçamento 1 (25 cm)	Espaçamento 2 (50 cm)	Espaçamento 3 (75 cm)	Espaçamento 4 (100 cm)
n	120	120	120	120
Mínimo	39,40	62,83	62,77	32,50
Máximo	609	608,16	594	585,20
Mediana	327,355	284,445	292,570	230,965
Média	308,340	291,588	285,090	253,826
Desvio padrão	13,858	12,813	13,926	12,700
Variância	1,920	1,641	1,714	1,613
Assimetria	-0,129	0,371	0,266	0,529
Distribuição	Normal	Normal	Normal	Normal

Fonte: Elaborado pela autora, 2019.

Ao analisar a Tabela 26, pode-se inferir que para o espaçamento entre emissores de 25 cm, foi encontrada maior média para o peso da espiga. O desvio padrão para os 4 espaçamentos ficou em torno de 13%, essa dispersão dos dados em relação à média pode ter sido ocasionada pela ocorrência de pragas nas espigas. Os dados apresentaram distribuição normal de acordo com o teste e Kolmogorov-Smirnov. Foi feita a análise de variância para a variável peso das espigas com palha em relação a profundidade de instalação do tubo gotejador ao espaçamento entre os emissores e suas interações, o resultado está disposto na Tabela 27.

Tabela 27 - Análise de variância do peso da espiga com palha (gramas) como variável dependente da profundidade de instalação do tubo gotejador, espaçamento entre os emissores e a interação entre estes.

	FV	GL	QM	F	Sig
Profundidade	2	49705,650	2,924	0,055	
Espaçamento	3	62385,744	3,670	0,012*	
Prof. X Esp.	6	24024,054	1,413	0,208	

Fonte: Elaborado pela autora, 2019.

Sig \*5%; \*\*1%

Analisando o quadro da ANOVA, pode-se concluir que apenas o espaçamento influenciou significativamente o peso das espigas com 5% de significância. Diante deste resultado foi feito o Teste de Tukey com 5% de significância (Tabela 28) para saber quais médias diferem entre si.

O espaçamento entre emissores de 25 cm se destacou com a maior média, mas não diferiu significativamente dos espaçamentos 50 e 75 cm. O espaçamento de 100 cm apresentou

a menor média entre os demais, porém não diferiu significativamente dos espaçamentos 50 e 75 cm. O espaçamento 25 cm se diferenciou estatisticamente do espaçamento a 100 cm.

Tabela 28 – Resultados do Teste de Tukey a 5% de significância para a variável espaçamento entre emissores em relação ao peso das espigas (gramas).

Espaçamento (cm)	Média (g)
25	308,340 a
50	291,588 ab
75	285,090 ab
100	253,826 b

Fonte: Elaborado pela autora, 2019.

Nas Tabelas 29 e 30 estão dispostas as análises estatísticas descritivas dos dados da variável diâmetro da espiga sem palha em relação a profundidade de instalação do tubo gotejador e espaçamento entre emissores.

Tabela 29 – Medidas estatísticas descritivas do diâmetro da espiga (cm) sem palha em relação a profundidade de instalação do tubo gotejador.

Métrica de análise	Profundidade 10 cm	Profundidade 20 cm	Profundidade 30 cm
n	160	160	160
Mínimo	2,20	2,30	2,70
Máximo	5,40	5,50	5,60
Mediana	4,0	4,025	4,30
Média	3,821	3,857	4,234
Desvio padrão	0,721	0,740	0,701
Variância	0,519	0,548	0,491
Assimetria	-0,445	-0,490	-0,139
Distribuição	Normal	Normal	Normal

Fonte: Elaborado pela autora, 2019.

Ao analisar a Tabela 29, pode-se inferir que para a profundidade de instalação do tubo gotejador a 30 cm, foi encontrada maior média para o diâmetro da espiga sem palha. O desvio padrão para as 3 profundidades ficou em torno de 1%, indicando uma dispersão bem pequena dos dados em relação à média. Os dados apresentaram distribuição normal de acordo com o teste e Kolmogorov-Smirnov.

Tabela 30 – Medidas estatísticas descritivas do diâmetro da espiga (cm) sem palha em relação ao espaçamento entre emissores.

Métrica de análise	Espaçamento 1 (25 cm)	Espaçamento 2 (50 cm)	Espaçamento 3 (75 cm)	Espaçamento 4 (100 cm)
N	40	40	40	40
Mínimo	2,20	2,40	2,23	2,20
Máximo	5,60	5,60	5,50	5,60
Mediana	4,130	4,035	4,20	3,81
Média	4,025	4,040	4,052	3,765
Desvio padrão	0,673	0,735	0,711	0,816
Variância	0,454	0,541	0,505	0,666
Assimetria	-0,582	-0,260	-0,429	-0,063
Distribuição	Normal	Normal	Normal	Normal

Fonte: Elaborado pela autora, 2019.

Na Tabela 30, pode-se observar que para o espaçamento entre emissores de 75 cm, foi encontrada maior média para o diâmetro da espiga sem palha. O desvio padrão para os 4 espaçamentos entre emissores ficou em torno de 1%, indicando uma dispersão bem pequena dos dados em relação à média. Os dados apresentaram distribuição normal de acordo com o teste e Kolmogorov-Smirnov. Foi feita a análise de variância para a variável diâmetro das espigas sem palha em relação a profundidade de instalação do tubo gotejador ao espaçamento entre os emissores e suas interações, o resultado está disposto na Tabela 31.

Tabela 31 - Análise de variância do diâmetro da espiga sem palha (cm) como variável dependente da profundidade de instalação do tubo gotejador, espaçamento entre os emissores e a interação entre estes.

	FV	GL	QM	F	Sig
Profundidade	2	8,360	16,679	0,000**	
Espaçamento	3	2,267	4,523	0,004**	
Prof. X Esp.	6	1,067	2,129	0,049*	

Fonte: Elaborado pela autora, 2019. Sig \*5%; \*\*1%

Analisando o quadro da ANOVA, pode-se concluir que a profundidade de instalação do tubo gotejador, o espaçamento entre emissores e a interação entre eles influenciaram significativamente o diâmetro das espigas. Diante deste resultado foi feito o Teste de Tukey com 5% de significância (Tabela 32) para saber quais médias diferem entre si. Em relação a profundidade de instalação do tubo gotejador, a maior média foi encontrada com 30 cm de profundidade, diferindo significativamente das outras profundidades. As profundidades

10 e 20 cm não diferiram entre si. Para o espaçamento a maior média do diâmetro foi encontrada com 75 cm entre emissores, não diferindo significativamente dos espaçamentos 25 e 50 cm. O espaçamento de 100 cm entre emissores apresentou a menor média dentre os outros, diferindo significativamente.

Tabela 32 – Resultados do Teste de Tukey a 5% de significância para as variáveis profundidade de instalação do tubo gotejador e espaçamento entre emissores em relação ao diâmetro das espigas (cm).

Profundidade (cm)	Média (cm)	Espaçamento (cm)	Média (cm)
10	3,821 b	25	4,025 a
20	3,857 b	50	4,040 a
30	4,234 a	75	4,052 a
		100	3,765 b

Fonte: Elaborado pela autora, 2019.

Na Tabelas 33 e 34 estão dispostas as análises estatísticas descritivas dos dados da variável comprimento da espiga sem palha em relação a profundidade de instalação do tubo gotejador e espaçamento entre emissores.

Tabela 33 – Medidas estatísticas descritivas do comprimento da espiga (cm) sem palha em relação a profundidade de instalação do tubo gotejador.

Métrica de análise	Profundidade 10 cm	Profundidade 20 cm	Profundidade 30 cm
n	160	160	160
Mínimo	6,50	6,40	7,20
Máximo	24,50	25	23,50
Mediana	17,00	17	18
Média	16,205	16,528	16,721
Desvio padrão	4,341	4,161	4,022
Variância	18,843	17,313	16,180
Assimetria	-0,439	-0,430	-0,529
Distribuição	Normal	Normal	Normal

Fonte: Elaborado pela autora, 2019.

Na Tabela 33, pode-se observar que para o espaçamento entre emissores de 75 cm, foi encontrada maior média para o diâmetro da espiga sem palha. O desvio padrão para as 3 profundidades ficou em torno de 4%, indicando uma baixa dispersão dos dados em relação à média. Os dados apresentaram distribuição normal de acordo com o teste e Kolmogorov-Smirnov.

Tabela 34 – Medidas estatísticas descritivas do comprimento da espiga (cm) sem palha em relação ao espaçamento entre os emissores.

Métrica de análise	Espaçamento 1 (25 cm)	Espaçamento 2 (50 cm)	Espaçamento 3 (75 cm)	Espaçamento 4 (100 cm)
n	40	40	40	40
Mínimo	6,50	6,50	6,50	6,40
Máximo	23,50	25,00	25,00	23,00
Mediana	19,00	17,00	17,00	16,00
Média	17,652	16,134	16,590	15,563
Desvio padrão	3,879	4,112	4,275	4,185
Variância	15,044	16,911	18,276	17,513
Assimetria	-1,027	-0,455	-0,450	-0,066
Distribuição	Normal	Normal	Normal	Normal

Fonte: Elaborado pela autora, 2019.

Na Tabela 34, pode-se observar que para o espaçamento entre emissores de 25 cm, foi encontrada maior média para o comprimento da espiga sem palha. O desvio padrão para aos 4 espaçamentos ficou em torno de 4%, indicando uma dispersão pequena dos dados em relação à média. Os dados apresentaram distribuição normal de acordo com o teste e Kolmogorov-Smirnov. Foi feita a análise de variância para a variável comprimento das espigas sem palha em relação a profundidade de instalação do tubo gotejador ao espaçamento entre os emissores e suas interações, o resultado está disposto na Tabela 35.

Tabela 35 - Análise de variância do comprimento da espiga sem palha (cm) como variável dependente da profundidade de instalação do tubo gotejador, espaçamento entre os emissores e a interação entre estes.

FV	GL	QM	F	Sig
Profundidade	2	10,881	0,640	0,528
Espaçamento	3	93,849	5,520	0,001**
Prof. X Esp.	6	13,924	0,819	0,555

Fonte: Elaborado pela autora, 2019. Sig \*5%; \*\*1%

Analisando o quadro da ANOVA, pode-se concluir que apenas o espaçamento entre emissores influenciou significativamente o comprimento das espigas. Diante deste resultado foi feito o Teste de Tukey com 5% de significância (Tabela 36) para saber quais médias diferem entre si. A maior média de diâmetro da espiga foi encontrada para o espaçamento entre emissores de 25 cm, diferindo significativamente dos espaçamentos de 50 e 100 cm. O espaçamento de 75 cm não diferiu significativamente de nenhum dos outros espaçamentos.

Tabela 36 – Resultados do Teste de Tukey a 5% de significância para a variável espaçamento entre emissores em relação ao comprimento das espigas (cm).

Espaçamento (cm)	Média (cm)
25	17,652 a
50	16,134 b
75	16,590 ab
100	15,563 b

Fonte: Elaborado pela autora, 2019.

As Tabelas 37 e 38 apresentam as estatísticas descritivas para a massa fresca das plantas em relação a profundidade de instalação do tubo gotejador e o espaçamento entre emissores, respectivamente.

Tabela 37 – Medidas estatísticas descritivas da massa fresca das plantas (gramas) em relação a profundidade de instalação do tubo gotejador.

Métrica de análise	Profundidade 10 cm	Profundidade 20 cm	Profundidade 30 cm
n	48	48	48
Mínimo	320,95	152,90	296,27
Máximo	746,59	855,26	793,14
Mediana	553,515	486,660	495,140
Média	536,512	509,604	513,634
Desvio padrão	11,507	16,463	12,939
Variância	1,324	2,710	1,674
Assimetria	-0,317	0,049	0,442
Distribuição	Normal	Normal	Normal

Fonte: Elaborado pela autora, 2019.

Ao analisar a Tabela 37, pode-se inferir que para a profundidade de instalação do tubo gotejador a 10 cm, foi encontrada a maior média para a massa fresca das plantas. O desvio padrão para as 3 profundidades ficou em torno de 16%, essa dispersão dos dados em relação à média pode ter sido ocasionada pela ocorrência de pragas nas plantas. Os dados apresentaram distribuição normal de acordo com o teste e Kolmogorov-Smirnov.

Tabela 38 – Medidas estatísticas descritivas da massa fresca das plantas (gramas) em relação ao espaçamento entre emissores.

Métrica de análise	Espaçamento 1 (25 cm)	Espaçamento 2 (50 cm)	Espaçamento 3 (75 cm)	Espaçamento 4 (100 cm)
n	36	36	36	36
Mínimo	283,14	339,44	158,54	152,9
Máximo	793,14	855,26	741,1	799,43
Mediana	480,345	570,775	479,925	561,945
Média	471,883	574,599	498,673	534,244
Desvio padrão	11,138	14,468	12,980	14,464
Variância	1,240	2,093	1,684	2,092
Assimetria	0,602	0,036	-0,082	-0,707
Distribuição	Normal	Normal	Normal	Normal

Fonte: Elaborado pela autora, 2019.

Ao analisar a Tabela 38, pode-se inferir que para o espaçamento entre emissores de 50 cm, foi encontrada a maior média para a massa fresca das plantas. O desvio padrão para os espaçamentos ficou abaixo de 20%, essa dispersão dos dados em relação à média pode ter sido ocasionada pela ocorrência de pragas nas espigas. Os dados apresentaram distribuição normal de acordo com o teste e Kolmogorov-Smirnov. Foi feita a análise de variância para a variável massa fresca das plantas em relação a profundidade de instalação do tubo gotejador ao espaçamento entre os emissores e suas interações, o resultado está disposto na Tabela 39.

Tabela 39 - Análise de variância da massa fresca (gramas) como variável dependente da profundidade de instalação do tubo gotejador, espaçamento entre os emissores e a interação entre estes.

FV	GL	QM	F	Sig
Profundidade	2	9951,288	0,586	0,558
Espaçamento	3	71446,795	4,209	0,007**
Prof. X Esp.	6	38047,251	2,241	0,043

Fonte: Elaborado pela autora, 2019.

Sig \*5%; \*\*1%

Analisando o quadro da ANOVA, pode-se concluir que apenas o espaçamento entre emissores influenciou significativamente a massa fresca das plantas. Diante deste resultado foi feito o Teste de Tukey com 5% de significância (Tabela 40) para indicar quais médias diferem entre si. A maior média de massa fresca foi encontrada para o espaçamento entre emissores de 50 cm, diferindo significativamente apenas do espaçamento de 25 cm. O espaçamento de 25 cm apresentou a menor média de massa fresca dentre os demais, porém não diferiu significativamente dos espaçamentos 75 e 100 cm.

Tabela 40 – Resultados do Teste de Tukey a 5% de significância para a variável espaçamento entre emissores em relação a massa fresca das plantas (gramas).

Espaçamento (cm)	Média (g)
25	471,883 b
50	574,599 a
75	498,673 ab
100	534,244 ab

Fonte: Elaborado pela autora, 2019.

As Tabelas 41 e 42 apresentam as estatísticas descritivas para a altura das plantas em relação a profundidade de instalação do tubo gotejador e o espaçamento entre emissores, respectivamente.

Tabela 41 – Medidas estatísticas descritivas da altura das plantas (cm) em relação a profundidade de instalação do tubo gotejador.

Métrica de análise	Profundidade 10 cm	Profundidade 20 cm	Profundidade 30 cm
n	144	144	144
Mínimo	20,00	17,50	13,00
Máximo	170,40	154,60	164,10
Mediana	97,50	96,75	107,25
Média	92,624	92,217	95,180
Desvio padrão	37,732	35,686	39,981
Variância	1423,718	1273,503	1598,520
Assimetria	-0,220	-0,364	-0,547
Distribuição	Normal	Normal	Normal

Fonte: Elaborado pela autora, 2019.

De acordo com a Tabela 41, pode-se inferir que a maior média de altura foi encontrada com os tubos instalados a 30 cm, o que pode ser explicado pela proximidade da fonte de água da profundidade efetiva das raízes. O desvio padrão para todas as profundidades ficou acima de 30%, indicando uma dispersão alta dos dados em relação à média.

Tabela 42 – Medidas estatísticas descritivas da altura das plantas (cm) em relação ao espaçamento entre emissores.

Métrica de análise	Espaçamento 1 (25 cm)	Espaçamento 2 (50 cm)	Espaçamento 3 (75 cm)	Espaçamento 4 (100 cm)
n	108	108	108	108
Mínimo	33,50	29,50	17,50	13,00
Máximo	155	164,10	160,50	170,40
Mediana	109,0	118,50	85,00	58,50
Média	108,352	112,323	82,432	70,254
Desvio padrão	24,442	30,259	37,939	39,323
Variância	597,518	915,616	1439,387	1546,322
Assimetria	-0,371	-0,892	0,004	0,443
Distribuição	Normal	Normal	Normal	Normal

Fonte: Elaborado pela autora, 2019.

Observando-se a Tabela 42, pode-se inferir que a maior média para a altura das plantas foi encontrada para o espaçamento entre emissores de 50 cm. O desvio padrão ficou entre 30 e 40%, indicando uma alta dispersão dos dados em relação à média. Foi feita a análise de variância para a variável altura das plantas em relação a profundidade de instalação do tubo gotejador ao espaçamento entre os emissores e suas interações, o resultado está disposto na Tabela 43.

Tabela 43 - Análise de variância da altura das plantas (cm) como variável dependente da profundidade de instalação do tubo gotejador, espaçamento entre os emissores e a interação entre estes.

FV	GL	QM	F	Sig
Profundidade	2	371,420	0,351	0,704
Espaçamento	3	44556,057	42,128	0,000**
Prof. X Esp.	6	6069,352	5,738	0,000**

Fonte: Elaborado pela autora, 2019.

Sig \*5%; \*\*1%

Analisando o quadro da ANOVA, pode-se concluir que o espaçamento entre emissores e a interação entre espaçamento e profundidade de instalação do tubo gotejador influenciaram significativamente a altura das plantas. Diante deste resultado foi feito o Teste de Tukey com 5% de significância (Tabela 44) para saber quais médias diferem entre si. A maior média de altura foi encontrada para o espaçamento entre emissores de 50 cm, diferindo significativamente dos espaçamentos de 75 e 100 cm. O espaçamento de 100 cm apresentou a menor média de massa fresca dentre os demais, diferindo significativamente dos outros espaçamentos.

Tabela 44 – Resultados do Teste de Tukey a 5% de significância para a variável espaçamento entre emissores em relação à altura das plantas (cm).

Espaçamento (cm)	Média (cm)
25	108,352 a
50	112,323 a
75	82,432 b
100	70,254 c

Fonte: Elaborado pela autora, 2019.

As Tabelas 45 e 46 apresentam as estatísticas descritivas para o diâmetro do colmo das plantas em relação a profundidade de instalação do tubo gotejador e o espaçamento entre emissores, respectivamente.

Tabela 45 – Medidas estatísticas descritivas do diâmetro do colmo (cm) em relação a profundidade de instalação do tubo gotejador.

Métrica de análise	Profundidade 10 cm	Profundidade 20 cm	Profundidade 30 cm
n	144	144	144
Mínimo	20,32	12,30	6,70
Máximo	48,00	47,32	53,30
Mediana	28,80	27,285	28,075
Média	30,257	27,647	27,414
Desvio padrão	6,198	6,791	8,004
Variância	38,412	46,124	64,067
Assimetria	0,982	0,251	-0,271
Distribuição	Normal	Normal	Normal

Fonte: Elaborado pela autora, 2019.

Observando-se a Tabela 45, pode-se inferir que a maior média para os diâmetros dos colmos foi encontrada para a profundidade de instalação do tubo de gotejador de 10 cm. O desvio padrão ficou entre 7 e 8%, indicando uma baixa dispersão dos dados em relação à média.

Tabela 46 – Medidas estatísticas descritivas do diâmetro do colmo (cm) em relação ao espaçamento entre emissores.

Métrica de análise	Espaçamento 1 (25 cm)	Espaçamento 2 (50 cm)	Espaçamento 3 (75 cm)	Espaçamento 4 (100 cm)
n	108	108	108	108
Mínimo	15,83	19,70	9,90	6,70
Máximo	41,51	47,32	53,30	48,00
Mediana	27,305	30,20	27,585	27,335
Média	27,708	30,398	28,009	27,643
Desvio padrão	4,649	5,602	8,311	9,152
Variância	21,617	25,624	69,072	83,756
Assimetria	0,435	0,449	0,418	-0,069
Distribuição	Normal	Normal	Normal	Normal

Fonte: Elaborado pela autora, 2019.

Observando-se a Tabela 46, pode-se inferir que a maior média para o diâmetro do colmo foi encontrada para o espaçamento entre emissores de 50 cm. O desvio padrão ficou entre 20 e 30%, para os espaçamentos 25 e 50 cm, indicando uma alta dispersão dos dados em relação à média. Já para os espaçamentos 75 e 100 cm entre emissores, ficou entre 70 e 85% indicando uma dispersão dos dados altíssima em relação à média. Foi feita a análise de variância para a variável diâmetro do colmo em relação a profundidade de instalação do tubo gotejador ao espaçamento entre os emissores e suas interações, o resultado está disposto na Tabela 47.

Tabela 47 - Análise de variância do diâmetro do colmo (cm) como variável dependente da profundidade de instalação do tubo gotejador, espaçamento entre os emissores e a interação entre estes.

FV	GL	QM	F	Sig
Profundidade	2	358,795	8,274	0,000**
Espaçamento	3	186,831	4,308	0,005**
Prof. X Esp.	6	413,124	9,527	0,000**

Fonte: Elaborado pela autora, 2019. Sig \*5%; \*\*1%

Analisando o quadro da ANOVA, pode-se concluir que a profundidade de instalação do tubo gotejador, o espaçamento entre emissores e a interação entre eles influenciaram significativamente o diâmetro do colmo. Diante deste resultado foi feito o Teste de Tukey com 5% de significância (Tabela 48) para saber quais médias diferem entre si. Em relação a profundidade, a maior média do diâmetro do colmo foi encontrada para a profundidade de instalação de 10 cm, diferindo significativamente das demais. Para os

espaçamentos entre emissores, a maior média foi encontrada para o espaçamento de 50 cm entre emissores, diferindo significativamente dos demais.

Tabela 48 – Resultados do Teste de Tukey a 5% de significância para as variáveis profundidade de instalação do tubo gotejador e espaçamento entre emissores em relação ao diâmetro do colmo (cm).

Profundidade (cm)	Média (cm)	Espaçamento (cm)	Média (cm)
10	30,257 a	25	27,708 b
20	27,647 b	50	30,398 a
30	27,414 b	75	28,009 b
		100	27,643 b

Fonte: Elaborado pela autora, 2019.

Nas Tabelas 49 e 50 estão expostas a produtividade total de espigas com palha (kg há<sup>-1</sup>) e a produtividade total de espigas comerciais com palha (kg há<sup>-1</sup>), além da quantidade de espigas comerciais para cada tratamento (espigas com comprimento maior que 15 cm e diâmetro superior a 3 cm). Importante salientar que foi considerado que todas as plantas produziram uma espiga, o que pode ter superestimado levemente o resultado da produtividade.

Tabela 49 – Peso médio das espigas com palha (gramas) e produtividade total de espigas com palha (kg ha<sup>-1</sup>) para cada tratamento (profundidade tubo gotejador x espaçamento entre emissores).

Profundidade tubo gotejador (cm)	Espaçamento entre emissores (cm)	Peso médio espiga com palha (g)	Produtividade total de espigas com palha (kg ha <sup>-1</sup> )
10	25	263,1	17.538,6
10	50	299,6	19.974,7
10	75	276,7	18.449,5
10	100	242,6	16.171,3
20	25	321,0	21.400,8
20	50	288,4	19.228,7
20	75	281,9	18.794,9
20	100	255,4	17.027,7
30	25	340,9	22.728,5
30	50	286,7	19.114,3
30	75	296,6	19.773,6
30	100	293,5	19.566,2
<b>Média</b>		<b>287,2</b>	<b>19.147,4</b>
<b>CV (%)</b>		<b>9,0</b>	<b>9,0</b>

Fonte: Elaborado pela autora, 2019.

Tabela 50 – Peso médio das espigas comerciais com palha (gramas) e produtividade total de espigas comerciais com palha ( $\text{kg ha}^{-1}$ ) para cada tratamento (profundidade tubo gotejador x espaçamento entre emissores).

Profundidade tubo gotejador (cm)	Espaçamento entre emissores (cm)	Número de espigas comerciais	Peso médio espigas comerciais com palha (g)	Produtividade total de espigas comerciais com palha ( $\text{kg ha}^{-1}$ )
10	25	26	321,29	21.419,33
10	50	27	351,13	23.408,67
10	75	20	373,15	24.876,67
10	100	20	348,72	23.248,00
20	25	31	371,14	24.742,67
20	50	23	367,06	24.470,67
20	75	27	336,61	22.440,67
20	100	14	322,44	21.496,00
30	25	32	399,09	26.606,00
30	50	22	365,74	24.382,67
30	75	25	382,83	25.522,00
30	100	24	365,25	24.350,00
<b>Média</b>			<b>358,70</b>	<b>23.913,61</b>
<b>CV (%)</b>			<b>6,28</b>	<b>6,28</b>

Fonte: Elaborado pela autora, 2019.

Favarato (2016) trabalhando com o híbrido AG 1051 em Latossolo Vermelho Amarelo distrófico argiloso, atingiu produtividade total de espigas com palha  $16.877 \text{ kg ha}^{-1}$  assemelhando-se aos valores encontrados neste estudo. Albuquerque (2008) obteve em média  $22.085 \text{ kg ha}^{-1}$  para produtividade total de espigas com palha também para o híbrido AG 1051.

Dentre as variáveis agronômicas analisadas para as profundidades de instalação do tubo gotejador a 10 cm e a 30 cm, não houve diferenças significativas. Já em relação ao espaçamento entre os emissores, o tratamento que se destacou foi o de espaçamento 50 cm. Em relação a produtividade total de espigas com palha e produtividade de espigas comerciais com palha, o tratamento que se destacou foi o tubo gotejador instalado a 30 cm e espaçamento entre emissores de 25 cm. Visando uma recomendação baseada em análises estatísticas foi realizada a análise de variância (Tabela 51) para a produtividade total das espigas com palha, o que indicou que a profundidade de instalação do tubo gotejador não influenciou significativamente a produtividade. Entretanto o espaçamento entre emissores influenciou, indicando a necessidade do teste de Tukey a 5% (Tabela 52) para saber se as médias diferiam entre si. Para a produtividade de espigas comerciais com palha, nem a profundidade de instalação, nem o espaçamento entre emissores influenciaram significativamente.

Tabela 51 - Análise de variância da produtividade total de espigas ( $\text{kg ha}^{-1}$ ) como variável dependente da profundidade de instalação do tubo gotejador, espaçamento entre os emissores e a interação entre estes.

FV	GL	QM	F	Sig
Profundidade	2	220.914.090,339	2,924	0,054
Espaçamento	3	277.272.979,858	3,670	0,012*
Prof. X Esp.	6	106.774.176,947	1,413	0,207

Fonte: Elaborado pela autora, 2019.

Sig \*5%; \*\*1%

Tabela 52 – Resultados do Teste de Tukey a 5% de significância para as variáveis profundidade de instalação do tubo gotejador e espaçamento entre emissores em relação a produtividade total de espigas com palha ( $\text{kg ha}^{-1}$ ).

Espaçamento (cm)	Média produtividade total ( $\text{kg ha}^{-1}$ )
25	20.556,01 a
50	19.439,23 ab
75	19.005,99 ab
100	16.921,74 c

Fonte: Elaborado pela autora, 2019.

Analisando a Tabela 52, pode-se inferir que a maior média de produtividade total foi encontrada para o espaçamento entre emissores de 25 cm, não diferindo significativamente dos espaçamentos 50 e 75 cm. O espaçamento de 100 cm obteve a menor média de produtividade, diferindo significativamente dos demais.

Tanto para as variáveis agronômicas analisadas, quanto para a produtividade, o tubo gotejador instalado a 30 cm obteve maior destaque. Porém, em relação ao espaçamento entre emissores para as variáveis agronômicas destacou-se o espaçamento 50 cm e para produtividade o espaçamento 25 cm entre emissores. Entretanto visto que não houve diferença significativa entre os espaçamentos de 25 e 50 cm para a produtividade total das espigas com palha, pode-se considerar usar o espaçamento de 50 cm entre emissores.

## 19 CONCLUSÕES

Pode-se concluir que o melhor tratamento para a variedade AG 1051 com espaçamento de 30 cm entre plantas, com uso de irrigação subsuperficial para as variáveis agronômicas peso da espiga com palha, diâmetro e comprimento da espiga sem palha, altura da planta, diâmetro do colmo e massa fresca da planta é o tubo instalado a 10 ou 30 cm com espaçamento entre emissores de 50 cm. Em relação a produtividade o tratamento que obteve

melhor resultado foi o tubo gotejador instalado a 30 cm e espaçamento entre emissores de 25 cm. Levando-se em conta as variáveis agronômicas analisadas, a produtividade total e comercial, pode-se concluir que a melhor opção é o tubo gotejador instalado a 30 cm e o espaçamento entre emissores de 50 cm.

## **20 CONCLUSÃO GERAL**

Diante da execução das atividades propostas dentro de cada capítulo, pode-se modelar o fluxo de água no solo para simular a distribuição de água e forma do bulbo úmido em irrigação subsuperficial utilizando os dados físico-hídricos do solo determinados (densidade, porosidade, condutividade hidráulica do solo saturado e curva de retenção de água no solo) e parâmetros do sistema de irrigação (diferentes profundidades de instalação do tubo gotejador e diferentes espaçamentos entre emissores) com posterior validação do modelo feita com dados obtidos em campo. Além disso, pode-se recomendar a melhor profundidade de instalação do tubo gotejador e o melhor espaçamento entre emissores para milho híbrido AG 1051 considerando algumas variáveis agronômicas e produtividade total e comercial.

## REFERÊNCIAS

**A cultura do milho-verde** / [editor técnico, Israel Alexandre Pereira Filho]. – Brasília, DF: Embrapa Informação Tecnológica, 2008. 61 p.: il. – (Coleção Plantar, 59).

AGUIAR, M. I. **Qualidade física do solo em sistemas agroflorestais**. 2008. 79p. Dissertação (Mestrado em solos e Nutrição de Plantas) – Universidade Federal de Viçosa, 2008.

ALBUQUERQUE, C. J. B.; VON PINHO, R. G.; BORGES, I. D.; SOUZA FILHO, A. X. de.; FIORINI, I. V. A. Desempenho de híbridos experimentais e comerciais de milho para produção de milho verde. **Ciência e Agrotecnologia**, Lavras, v. 32, n. 3, p.768-775, maio 2008.

ALBUQUERQUE, C. J. B.; VON PINHO, R. G.; SILVA, R. Produtividade de híbridos de milho verde experimentais e comerciais. **Bioscience Journal**, Uberlândia, v. 24, n. 2, p. 69-76, 2008.

AL-CHALABI, R. **Thermal resistance of u-tube borehole heat exchanger system: numerical study (Manchester, N.H.)**. 2013. 60 f. Thesis (Máster of Engineering and Physical Sciences) – University of Manchester, New Hampshire, 2013.

AL-KHAFRAF, S.; HANKS, R.J. Evaluation of the filter paper method for estimating soil water potential. **Soil Sci.**, 117:194-199, 1974.

ALMEIDA, E. L. de. **Medida da condutividade hidráulica e curva de retenção de água por diferentes métodos e predição de atributos físicos do solo pela krigagem**. 2013. 109 f. Dissertação (Mestrado) – Curso de Agronomia, Ciências do Solo, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2013.

ALMEIDA, E. L. de; TEIXEIRA, A. S. dos; SILVA FILHO, F. C. da; ASSIS JÚNIOR, R. N. de; LEÃO, R. A. O. de. Filter Paper Method for the Determination of the Soil Water Retention Curve. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, [s.l.], v. 39, n. 5, p.1344-1352, out. 2015. FapUNIFESP (SciELO).

ALVAREZ, C. G. D.; PINHO, R. G. V.; BORGES, I. D. Avaliação de características agrônomicas e de produção de forragem e grãos de milho em diferentes densidades de semeadura e espaçamentos entre linhas. **Ciência e Agrotecnologia**, v. 30, n. 3, p. 402-408, 2006.

ALVES, M. C.; SUZUKI, L. G. A.; SUZUKI, L. E. A. S. Densidade do solo e infiltração de água como indicadores da qualidade física de um latossolo vermelho distrófico em recuperação. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, MG, v. 31, p. 617-625, 2007.

ALVES, M.C. **Sistemas de rotação de culturas com plantio direto em Latossolo Roxo: Efeitos nas propriedades físicas e químicas**. Piracicaba, Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, 1992. 173p. (Tese de Doutorado).

AMARO FILHO, J.; ASSIS JUNIOR, R. N. de; MOTA, J. C. A. **Física do solo: Conceitos e aplicações**. Fortaleza: Imprensa Universitária, 2008.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING MATERIALS – ASTM. **Standard test method for measurement of soil potential (suction) using filter paper**. 2003, 6p. ASTM-D 5298-03.

ANGELOTTI NETTO, A.; FERNANDES, E. J. Condutividade hidráulica de um Latossolo Vermelho em pousio e cultivo intensivo. **Pesq. Agropec. Bras.** Brasília, v. 40, n. 8, 2005.

ANJOS, J.T.; UBERTI, A.A.A.; VIZZOTO, V.J.; LEITE, G.B.; KRIEGER, M. Propriedades físicas em solos sob diferentes sistemas de uso e manejo. **R. Bras. Ci. Solo**, 15:139-145, 1994.

ARCHANGELO, E. R.; COIMBRA, R. R.; BARRETO, P. C. N.; CARDOSO, E. A.; NAOE, L. K. Avaliação de cultivares de milho para a produção de milho verde na região de Palmas TO. **Revista Ciência Agroambiental**, Alta Floresta, v. 2, n. 1, p. 1-8, 2007.

ARRAES, F. D. D. **Modelagem bidimensional do movimento da água em condições de solo não saturado**. 2014. 86 f. Tese (Doutorado) - Curso de Pós-graduação em Engenharia de Biosistemas, Universidade de São Paulo Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Piracicaba, 2014.

ARRUDA, F. B.; ZULLO JÚNIOR, J.; OLIVEIRA, J. B. de. Parâmetros de solo para cálculo da água disponível baseado na textura do solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v. 11, p. 11-15, 1987.

BAKER, F.G.; VENEMAN, P.L.M.; BOUMA, J. Limitations of the instantaneous profile method for field measurement of unsaturated hydraulic conductivity. **Soil Sci. Soc. Am. Proc.**, 38:885-888, 1974.

BARROS, A. C. **Estudo da distribuição da solução no solo aplicado por gotejamento enterrado e superficial**. 2007. 61 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Agronomia, Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Piracicaba, 2007.

BEN-ASHER, J.; PHENE, C. J. Analysis of surface and subsurface drip irrigation using a numerical model. In: **Workshop subsurface drip irrigation, theory, practices and application**, 1993b, California. Proceedings...California: California State University, 1993. p.185-202. (Publication. no 92 1001).

BERGAMASCHI, H. Desenvolvimento do déficit hídrico em culturas. In: BERGAMASCHI, H. (Coord.). **Agrometeorologia aplicada à irrigação**. Porto Alegre: Editora da UFRGS, 1992. p. 25-32.

BERGAMASCHI, H.; DALMAGO, G. A.; BERGONCI, J. I.; BIANCHI, C. A. M.; MULLER, A. G.; COMIRAN, F.; HECKLER, B. M. Distribuição hídrica no período crítico do milho e produção de grãos. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 39, n. 9, p. 831-839, 2004.

BERGAMASCHI, H.; MATZENAUER, R. **O milho e o clima**. Porto Alegre: Emater/RS-Ascar, 2014. 84 p.

- BEUTLER, A.N.; CENTURION, J.F.; SOUZA, Z.M.; ANDRIOLI, I.; ROQUE, C.G. Retenção de água em dois tipos de Latossolos sob diferentes usos. **R. Bras. Ci. Solo**, 26:829-834, 2002.
- BICALHO, K.V.; CORREIA, A.G.; FERREIRA, S.; FLEUREAU, J.M.; MARINHO, F.A.M. The use of filter paper method for matric suction measurement of an unsaturated compacted silty sand. In: Simposio Brasileiro de Solos Saturados, Salvador, 2007. **Anais...** Salvador, Associação Brasileira de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica, 2007. P.215-219.
- BIZARI, D. R.; GRECCO, K. L.; SOUZA, C. F. Bulbo molhado estimado pela técnica da TDR na irrigação por gotejamento subsuperficial. **Revista Brasileira de Agricultura Irrigada**, [s.l.], v. 10, n. 2, p.477-485, 29 abr. 2016. INOVAGRI.
- BORGES, I. D. **Avaliação de épocas de aplicação da cobertura nitrogenada, fontes de nitrogênio e de espaçamento entre fileiras na cultura do milho**. 2003. 73 p. Dissertação (Mestrado em Fitotecnia) Universidade Federal de Lavras, Lavras, MG.
- BOTREL, T. **Simulação da distribuição espacial da água em solo irrigado com gotejador**. 1988. 80 f. 1988. 80 p. Tese (Doutorado em Solos e Nutrição de Plantas)-Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Universidade de São Paulo, Piracicaba, 1988.
- BRESLER, E.; RUSSO, D. Two-dimensional solutes transfer during nonsteady infiltration: laboratory test of mathematical model. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 39, n. 3, p. 585-587, 1975.
- BROOKS, R.H.; COREY, A.T. Hydraulic properties of porous media. In: COREY, A.T.; DILS, R.E.; YEVDJEVICH, V.M. **Hydrology papers**. Fort Collins:: Colorado State University, 1964. p.1-29.
- BULUT, R.; LYTTON, R.L.; WRAY, W.K. Soil suction measurements by filter paper. In: GEO-INSTITUTE SHALLOW FOUNDATION AND SOIL PROPERTIES, Houston, 2001. **Proceedings...** Houston, Geo-Institute of the American Society of Civil Engineers, 2001. P.243-261.
- CAJAZEIRA, J. P. **Caracterização e variabilidade espacial de atributos físicos em um Argissolo Amarelo no Estado do Ceará**. 2007. 96 f. Dissertação (Mestrado) – Curso de Pós-graduação em Ciência do Solo, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2007.
- CALLEGARI, J. S. M. **Bioestatística: princípios e aplicações**. Tradução. [s.l.] Artmed Editora, 2009.
- CAMP, C. R. 1998. **Subsurface drip irrigation: A review**. Trans. ASAE 41(5):1353-1367.
- CAMP, C. R.; LAMM, F. R. **Microirrigation for crop production: Subsurface drip irrigation**. F.R. Lamm, J.E. Ayars and F.S. Nakayama (Editors). 2007 Elsevier B.V. All rights reserved.
- CARDUCCI, C. E.; OLIVEIRA, G. C. de.; SEVERIANO, E. C. da.; ZEVIANI, W. M. Modelagem da curva de retenção de água de latossolos utilizando a equação duplo van Genuchten. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 35, p.77-86, 2011.

CHAGAS, G. S. da. **Estudo experimental do comportamento mecânico de estrato silto-argiloso (massapê) para fundações superficiais**. 2014. 112 f. Dissertação (Mestrado) – Curso de Engenharia Civil, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2014.

CHANDLER, R. J.; CRILLY, M. S.; MONTGOMERY-SMITH, G. A low-cost method of assessing clay desiccation for low-rise-buildings. **Proceeding of the Institute of Civil Engineering**, v. 92, n. 2, p. 82-89, 1992.

CHILDS, E. C. The use of soil moisture characteristics in soil studies. **Soil Sci.** 50, 239-252. 1940.

CHRYSTELLO, A. C. **Avaliação de curvas de calibração do método do papel filtro tipo Whatman nº42 utilizadas para estimar sucção matricial em solos não saturados**. 2017. 136 f. Dissertação (Mestrado) – Curso de Engenharia Civil, Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória, 2017.

CICHOTA, R.; JONG van LIER, Q. Análise da variabilidade espacial de pontos amostrais da curva de retenção de água no solo. **R. Bras. Ci. Solo**, 28:585-596, 2004.

CLEMENT, T.; WISE, W.R.; MOLZ, F.J. A physically based, two-dimensional, finitedifference algorithm for modeling variably saturated flow. **Journal of Hydrology**, Amsterdam, v. 161, n. 1, p. 71-90, 1994.

COMSOL 4.2ª, Multiphysics, **User's Guide**, COPYRIGHT 1998-2011. COMSOL AB.

CORRÊA, M. M.; KER, J. C.; BARRÓN, V.; TORRENT, J.; CURI, N.; TORRES, T. C. P. Caracterização química, física, mineralógica e micromorfológica de horizontes coesos e fragipãs de solos vermelhos e amarelos do ambiente tabuleiros costeiros. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 32, p. 297-313, 2008.

CORREA, M. R. **Métodos de elementos finitos estabilizados para escoamentos de Darcy e de Stokes-Darcy acoplados**. 2006. 197 f. Tese (Doutorado em modelagem computacional) - Laboratório Nacional de Computação Científica, Petrópolis, 2006.

CORRÊA, M.M. **Desenvolvimento e teste de modelo de transporte unidimensional de solutos no solo**. 2001. 104 p. Tese (Doutorado em Engenharia Agrícola) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2001

COSTA, M. J.; ROSA JÚNIOR, E. J.; ROSA, Y. B. C. J.; DE SOUZA, L. C. F.; ROSA, C. B. J. Atributos químicos e físicos de um latossolo sendo influenciados pelo manejo do solo e efeito da gessagem. **Acta Scientiarum. Agronomy**, v. 29, n. 5, p. 701-708, 2007.

COSTA, S.N.; MARTINEZ, M.A.; MARTINS, J.H.; FERREIRA, P.A. SIMASS – modelo para simular o transporte de água e solutos no solo I: Desenvolvimento e teste de sensibilidade. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 3, n. 2, p. 183-189, 1999.

- CRUZ, J. C.; KONZEN, E.A.; FILHO, I. A. P.; MARRIEL, I.E.; CRUZ, E.; DUARTE, J.O.; OLIVEIRA, M.F.; ALVARENGA, R.C. **Produção de milho orgânico na agricultura Familiar**. Comunicado Técnico 81 – EMBRAPA, Sete Lagoas: Embrapa- NPMS, 17p. 2006.
- CRUZ, T. M. L. **Aplicação de modelo para fluxo de água no solo visando a automação de sistema de irrigação**. 2015. 99 f. Tese (Doutorado) - Curso de Agronomia, Engenharia Agrícola, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2015.
- CURI, N.; LARACH, J. O. I.; KAMPF, N.; MONIZ, A. C.; FONTES, M. E. F. **Vocabulário da ciência do solo**, Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, Campinas, 1993, 90p.
- DABACH, S.; LAZAROVITCH, N.; ŠIMŮNEK, J.; SHANI, U. Numerical investigation of irrigation scheduling based on soil water status. **Irrigation Science**, Heidelberg, v. 31, n. 1, p. 27-36, 2011.
- DANTAS, J. S.; MARQUES JUNIOR, J.; MARTINS FILHO, M. V.; RESENDE, J. M. A.; CAMARGO, L. A. BARBOSA, R. S. Gênese de solos coesos do leste maranhense: relação solo-paisagem. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 38, p. 1039-1050, 2014.
- DE JONG VAN LIER, Q.; DOURADO NETO, D.; METSELAAR, K. Modeling of transpiration reduction in van Genuchten–Mualem type soils. **Water Resources Research**, Washington, v. 45, n. 2, p. 1-9, 2009.
- DEXTER, A. R. Soil physical quality. Part I. Theory, effects of soil texture, density, and organic matter, and effects on root growth. **Geoderma**, 120:201-214, 2004.
- DEXTER, A.R.; BIRD, N.R.A. Methods for predicting the optimum and the range of soil water contents for tillage based on the water retention curve. **Soil Till. Res.**, 57:203- 212, 2001.
- DI BARTOLO, L. **Modelagem sísmica anisotrópica através do método das diferenças finitas utilizando sistemas de equações em segunda ordem**. 2010. 241 p. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) - Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós-Graduação e Pesquisa de Engenharia, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2010.
- DI RADO, H. A.; BENEYTO, P. A.; MROGINSKI, J. L.; AWRUCH, A. M. Influence of the saturation-suction relationship in the formulation of non-saturated soil consolidation models. **Journal of Mathematical and Computer Modelling**, v.49, p.1058-1070, 2009.
- DOURADO NETO, D.; NIELSEN, D. R.; HOPMANS, J. W.; REICHARDT, K.; BACCHI, O. O. S.; LOPES, P. P. **Programa para confecção da curva de retenção de água no solo, modelo Van Genuchten**. Soil Water Retention Curve, SWRC (version 3,00 beta). Universidade de São Paulo, Piracicaba, SP, Brasil, 2001.
- DUARTE, L. R. de S.; VIEIRA, J. M.; ROMERO, R. E.; MOTA, J. A.; FERREIRA, T. O.; SILVA, D. M. Contribuição de compostos amorfos na coesão de solos dos Tabuleiros Costeiros do Ceará. In: XXXIV CONGRESSO BRASILEIRO DE CIÊNCIA DO SOLO, 34., 2013, Florianópolis. **Ciência do Solo: Para que e para quem? Programa & Resumos**. Florianópolis: Epagri e Sbc, 2013. P. 1 – 4.

ELMALOGLOU, S.; DIAMANTOPOULOS, E. Simulation of soil water dynamics under subsurface drip irrigation from line sources. **Agricultural Water Management**, [s.l.], v. 96, n. 11, p.1587-1595, nov. 2009. Elsevier BV.

FAVARATO, L. F.; SOUZA, J. L.; GALVÃO, J. C. C.; SOUZA, C. M. de; GUARCONI, R. C.; BALBINO, J. M. S. de. Crescimento e produtividade do milho-verde sobre diferentes coberturas de solo no sistema plantio direto orgânico. **Bragantia**, [s.l.], v. 75, n. 4, p.497-506, 22 set. 2016. FapUNIFESP (SciELO).

FEITOSA, C. E. L. **Análise de sensibilidade no processamento de dados de perfil instantâneo em classes texturais de solos**. 2017. 58 f. Dissertação (Mestrado) – Curso de Pós-graduação em Ciência do Solo, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2017.

FERREIRA, M. F. **Caracterização Física do Solo**. In: Quirijn de Jong van Lier (Ed). (Org.). Física do Solo. 1 ed. Viçosa, MG: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, v. 1, p. 1-27, 2010.

FERREIRA, M. M.; DIAS JUNIOR, M. S.; MESQUITA, M. G. B. F.; ALVES, E. A. B. F. **Física do Solo**. Lavras, UFLA, 2003. 79p.

FIESP (Federação das Indústrias do Estado de São Paulo) – Informativo de Agro, Safra Mundial de Milho 2019/20, **5º Levantamento do USDA**, Setembro 2019.

FLINT, A.L.; FLINT, L.E. Particle density. In: DANE, J.H; TOPP, G.C. (Ed). **Methods of soil analysis: part 4 – physical methods**. Madison: American Society of America, 2002. P.229-240.

FRANÇA, S.; BERGAMASCHI, H.; ROSA, L. M. G. Modelagem do crescimento de milho em função da radiação fotossinteticamente ativa e do acúmulo de graus-dia, com e sem irrigação. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, Santa Maria, v. 7, n. 1, p. 59-66, 1999.

FREDLUND, D. G.; XING, A. Equations for the Soil-Water characteristic Curve. **Canadian Geotechnical Journal**, v. 31, n. 4, p.521-532, 1994.

FREIRE, M. B. G. dos S.; RUIZ, H. A; RIBEIRO, M. R.; FERREIRA, P. A.; ALVAREZ, V. H.; FREIRE, F. J. Condutividade hidráulica de solos de Pernambuco em resposta à condutividade elétrica e RAS da água de irrigação. **Ver. Bras. Eng. Agríc. 202ambiente**. 2003, vol.7, n.1, pp. 45-52.

GARDNER, W. R. Some steady state solutions of the unsaturated moisture flow equation with application to evaporation from a water table. **Soil Science**, v.85, p.228-232, 1958.

GEO-SLOPE International Ltd. **Seepage modeling with seep/w**. Calgary, Alberta, Canada. 2009.

GIACHETI, H. L.; FERREIRA, C. V.; LOBO, A. S. da.; MARQUES, M. E. M. A condutividade hidráulica de um solo arenoso determinada a partir de ensaios de campo e de laboratório. In: XXVII Congresso Interamericano de Engenharia Sanitária e Ambiental, 2000, Porto Alegre. **Anais...** Porto Alegre: Asociación Interamericana de Ingeniería Sanitaria y Ambiental, 2000. CD-ROM.

GIAROLA, N. F. B.; SILVA, A. P.; IMHOFF, S.; DEXTER, A. R. Contribution of natural soil compaction on hardsetting behavior. **Geoderma**, v. 113, p. 95-108, 2003.

GOMES, H. P. **Engenharia de irrigação: hidráulica dos sistemas pressurizados aspersão e gotejamento**. Joao Pessoa: UFPB, 1994. 344 p.

GOMES, J.E.S. **Estudo sobre os fatores que influenciam a acurácia do método do papel-filtro**. São Paulo, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 2007. 111p. (Tese de Mestrado).

GONÇALVES, A. D. M. de A.; LIBARDI, P. L. Análise da determinação da condutividade hidráulica do solo pelo método do perfil instantâneo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 37, p.1174-1184, 2013.

GONG, D.; KANG, S.; ZHANG, L.; DU, T.; YAO, L. A two-dimensional model of root water uptake for single apple trees and its verification with sap flow and soil water content measurements. **Agricultural Water Management**, Amsterdam, v. 83, n. 1/2, p. 119-129, 2006.

GRECCO, K. L. **Caracterização do volume de solo molhado em diferentes fases de desenvolvimento da cana-de-açúcar sob gotejamento subsuperficial**. 2016. 126 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia de Sistemas Agrícolas, Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Piracicaba, 2016.

GUARIZ, H. R.; CAMPANHARO, W. A.; PICOLI, M. H. S.; CECÍLIO, R. A. HOLLANDA, M. P. de. Variação da umidade e da densidade do solo sob diferentes coberturas vegetais. **Anais do XIV Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto**, Natal, Brasil, 25-30 abril de 2009, INPE, p. 7709-7716.

GUPTA, S.C.; LARSON, W.E. Estimating soil water retention characteristics from particle size distribution, organic matter percent, and bulk density. **Water Res. Res.**, 15:1633- 1635, 1979.

HAMBLIN, A. P. Filter paper method for routine measurement of field water potential. **Journal of Hydrology**, v. 53, n. 3-4, p. 355-360,1981.

HAO, A.; HARAGUCHI, T.; MARUI, A.; NAKANO, Y. 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.

HILLEL, D. **Environmental soil physics: fundamentals, applications, and environmental considerations**. San Diego: Academic Press, 1998. 494 p.

HILLEL, D. **Fundamentals of soil physics**. New York: Academic, 1980. 413 p.

HILLEL, D.A.; KRENTOS, V.K.; STILIANOV, Y. Procedure and test of an internal drainage method for measuring soil hydraulic characteristics in situ. **Soil Science**, v. 114, p. 395-400, 1972.

IMEA - Instituto Matogrossense de Economia Agropecuária. **Entendendo o mercado do milho**. 2019.

JONG van LIER, Q.; LIBARDI, P.L. Variabilidade dos parâmetros da equação que relaciona a condutividade hidráulica com a umidade do solo no método do perfil instantâneo. **Revista Brasileira Ciências do Solo**, v. 23, p. 1005-1014, 1999.

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

KELLER, J. **Sprinkler and trickle irrigation**. Logan: Utah State University, 1984, 281p.

KLUTE, A. **Tillage effects on the hydraulic properties of soil: a review**. In: VAN DOREN, D.M.; ALLMARAS, R.R.; LINDEN, D.R.; WHISLER, F.D. (Ed.) Predicting tillage effects on soil physical properties and processes. Madison: ASA, 1982. Cap.3, p.29-43.

KLUTE, A.; DIRKSEN, C. **Hydraulic conductivity and diffusivity: Laboratory methods**. In: KLUTE, A., ed. Methods of soil analysis. Madison, Soil Science Society of America, 1986. P.697-734.

KUKLIK, V.; HOANG, T.D. Soil moisture regimes under point irrigation. **Agricultural Water Management**, Amsterdam, v. 134, p. 42-49, 2014.

KUNZ, J.; ÁVILA, V. S. de; PETRY, M. Distribuição temporal e espacial da umidade do solo em sistemas de irrigação por gotejamento subsuperficial. **Revista Monografias Ambientais**: Revista do Centro do Ciências Naturais e Exatas - UFSM, Santa Maria, v. 13, n. 5, p.3963-3976, dez. 2014.

LAL, R.; SHUKLA, M.K. **Principles of soil physics**. New York: Marcel Dekker, 2004. 682 p.

LEONG, E.C.; HE, L.; RAHARDJO, H. **Factors affecting the filter paper method for total and matric suction measurements**. J. Geotech. Test., 25:322-333, 2002.

LETEY, J. Relationship between soil physical properties and crop production. **Advances in Soil Science**, v.1, p.277-294. 1985.

LI, J.; ZHANG, J.; RAO, M. Wetting patterns and nitrogen distributions as affected by fertigation strategies from a surface point source. **Agricultural Water Management**, v. 67, n. 02, p.89-104, 2004.

LIBARDI, P. L. **Água no solo**. In: Quirijn de Jong van Lier (Ed). (Org.). Física do Solo. 1 ed. Viçosa, MG: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2010, v. 1, p. 103-152.

LIBARDI, P.L. **Determinação da condutância hidráulica e da pressão de borbulhamento de cápsulas porosas para tensiômetros**. Piracicaba, Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, 1999. (Nota de aula)

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

- LIBARDI, P.L; REICHARDT, K., NIELSEN, D. R.; BIGGA, J. W. Simple field methods for estimating hydraulic conductivity. **Soil Science Society of American Journal**, Madison, v.44, p.3-7, 1980.
- LIMA, H. V.; SILVA, A. P.; SANTOS, M. C.; COOPER, M.; ROMERO, R. E. Micromorphology and image analysis of a hardsetting Ultisol (Argissolo) in the state of Ceará (Brazil). **Geoderma**, v. 132, p. 416– 426, 2006.
- MACHADO, J. R. A. **O excesso de chuvas e a cultura do milho**. Embrapa Milho e Sorgo, Sete Lagoas. 1-2.) 2016.
- MARINHO, F.A.M.; OLIVEIRA, O.M. **The filter paper method revisited**. *Geotech. Test. J.*, 29:1-9, 2006.
- MARION, J.M.; OR, D.; ROLSTON, D.E.; KAVVAS, M.L.; BIGGAR, J.W. Evaluation of methods for determining soilwater retentivity and unsaturated hydraulic conductivity. **Soil Sci.**, 158:1-13, 1994.
- MAROUELLI, W. A.; OLIVEIRA, A. S. de; COELHO, E. F.; NOGUEIRA, L. C.; MATZENAUER, R.; WESTPHALEN, S. L.; MALUF, J. R. T. Efeito de períodos de irrigação sobre o rendimento e desenvolvimento do milho, em diferentes épocas de semeadura – 1985/86. In: REUNIÃO TÉCNICA ANUAL DO MILHO, 31., 1986, Porto Alegre. **Ata...** Porto Alegre: IPAGRO; EMATER/RS, 1986, p. 37-41.
- MENEZES, A. S. **Morfologia e funcionalidade da rede porosa de horizontes com e sem caráter coeso em solos de tabuleiro costeiro**. 2016. 76 f. Dissertação (Mestrado) – Curso de Pós-graduação em Ciência do Solo, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2016.
- MESQUITA, M. da G. B. de F.; MORAES, S. O. A dependência entre a condutividade hidráulica saturada e atributos físicos do solo. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 34, n. 3, p.963-969, jun. 2004.
- MIRANDA, J.H. **Modelo para simulação da dinâmica de nitrato em colunas verticais de solo não saturado**. 2001. 79 p. Tese (Doutorado em Irrigação e Drenagem) - Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2001.
- MIRLISENNA, G. **Método dos Elementos Finitos: o que é?** 2016. Disponível em: <<https://www.esss.co/blog/metodo-dos-elementos-finitos-o-que-e/>>.
- MIYAZAKI, T. **Water flow in soils**. 2nded. New York: CRC Press, 2005. 418 p.
- MOHANTY, B.P.; SKAGGS, T.H.; VAN GENUCHTEN, M.T. Impact of saturated hydraulic conductivity on the prediction of tile flow. **Soil Science Society of America Journal**, v.62, p.1522-1529, 1998.
- MONTENEGRO, S. M. G. L.; MACKAY, R.; MONTENEGRO, A. A. E. A. Análise estocástica de fluxo e transporte em solos não saturados para avaliação de risco de salinização. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v.7, n.2, p.17-34, 2002.
- MORAES, A. R. A. de. **A cultura do milho verde**. 2009.

MOREIRA, H. J. C. S.A.A.C.I. – **Sistema Agroclimatológico para o Acompanhamento das Culturas Irrigadas**: manual prático para o manejo da irrigação. Brasília: Secretaria Nacional de Irrigação, 1993. 86 p.

MOREIRA, J. N.; SILVA, P. S. L.; SILVA, K. M. B., DOMBROSKI, J. L. D.; CASTRO, R. S. (2010). Effect of detasseling on baby corn, green ear and grain yield of two maize hybrids. **Horticultura Brasileira**, 28, 406-411.

MOURA, E.G.; TEIXEIRA, A.P.R.; RIBEIRO, V.S.; AGUIAR, A.C.F.; FARIAS, M. F. (2006); Crescimento e produtividade da cultura do milho (*Zea mays*) submetido a vários intervalos de irrigação, na região da Pré-Amazônia. **Irriga**, Botucatu v.11, p.169-177.

NASCIMENTO, F. N.; BASTOS, E. A.; CARDOSO, M. J.; ANDRADE JÚNIOR. A. S.; RIBEIRO, V. Q. Parâmetros fisiológicos e produtividade de espigas verdes de milho sob diferentes lâminas de irrigação. **Revista Brasileira de Milho e Sorgo**, v. 14, n. 2, p. 167-181, 2015.

NEZHAD, M. M.; JAVADI, A. A.; ABBASI, F. Stochastic finite element modeling of water flow in variably saturated heterogeneous soils. **International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics**, v.35, n.6, p.1-20, 2010.

NIELSEN, R. L. A fast & accurate pregnancy test for corn. **Corny News Network**. Purdue University, IN., 2007.

OLIVEIRA, A. S. **Desenvolvimento de modelo numérico de fluxo de água subterrânea no município de São Paulo – Jurubatuba**. 2008. 87 f. Monografia (Graduação em Engenharia Ambiental) – Universidade de São Paulo, São Carlos, 2008.

OLIVEIRA, G.C.; DIAS JUNIOR, M.S.; RESCK, D.V.S.; CURI, N. Caracterização química e físico-hídrica de um Latossolo Vermelho após vinte anos de manejo e cultivo do solo. **R. Bras. Ci. Solo**. 28:327-336, 2004.

PAIGE, G.B.; HILLEL, D. Comparison of three methods for assessing soil hydraulic properties. **Soil Science**, v. 155, p. 175-189,1993.

PAIVA JUNIOR, M. C. **Desempenho de cultivares para produção de milho verde em diferentes épocas e densidades de semeadura**. 1999. 66 f. Dissertação (Mestrado em Fitotecnia) – Universidade Federal de Lavras, Lavras, MG. 1999.

PAIVA, A. Q.; SOUZA, L. S.; RIBEIRO, A. C.; COSTA, L. M. Propriedades físico-hídricas de solos de uma topossequência de Tabuleiro do estado da Bahia. **Revista Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 35, p. 2295-2302, 2000.

PAIVA, M. R. F. C.; SILVA, G. F.; OLIVEIRA, F. H. T.; PEREIRA, R. G.; QUEIROGA, F. M. Doses de nitrogênio e de fósforo recomendadas para produção econômica de milho-verde na Chapada do Apodi-RN. **Revista Caatinga**, Mossoró, v. 25, n. 4, p. 1-10, 2012.

PAVERO, J. **Subsurface drip irrigation: Is it a good choice for your operation?** Published by University of Nebraska and the U.S. Department of Agriculture, 2002.

PEREIRA FILHO, I. A.; CRUZ, J. C.; GAMA, E. E. G. Cultivares para o consumo verde. O cultivo do milho verde. **Embrapa Informação tecnológica**, Brasília, p. 17-30, 2003.

PEREIRA, E.S.; MIZUBUTI, I.Y.; PINHEIRO, S.M.; VILLAROEL, A.B.S.; CLEMENTINO, R.H. Avaliação nutricional de silagens de milho. **Caatinga**, Mossoró, v. 20, n. 3, p. 8-12, 2007.

PHILIP, J.R., 1968. Steady infiltration from buried point sources and spherical cavities. **Water Resour. Res.** 4 (5), 1039–1047.

PINHO, L.; PAES, M. C. D.; ALMEIDA, A. C.; COSTA, C. A. Qualidade de milho verde cultivado em sistemas de produção orgânico e convencional. **Revista Brasileira de Milho e Sorgo**, Sete Lagoas, v. 07, n. 03, p. 279-290, 2008.

PIRES, D. A. A.; ROCHA JÚNIOR, V. R.; SALES, E. C. J.; REIS, S. T.; JAYME, D. G.; CRUZ, S. S.; LIMA, L. O. B.; TOLENTINO, D. C.; ESTEVES, B. L. C. Características das silagens de cinco genótipos de sorgo cultivados no inverno. **Revista Brasileira de Milho e Sorgo**, v. 12, n. 1, p. 68-77, 2013.

PIRES, L. F.; BORGES, J. A. R.; BACCHI, O. O. S.; REICHARDT, K. Twenty-five years of computed tomography in soil physics: A literature review of the Brazilian contribution. **Soil and Tillage Research**, v. 110, n. 2, p. 197-210, 2010.

PIRES, L. F.; ROSA, J. A.; TIMM, L. C. Comparação de métodos de medida da densidade do solo. **Acta Scientiarum**. Agronomy, [s.l.], v. 33, n. 1, p.161-170, 2 mar. 2011. Universidade Estadual de Maringá.

PIZARRO, M.L.P. **Simulação de fluxo de água e transporte de solutos na zona não-saturada do solo pelo método de elementos finitos adaptativo**. 2009. 193 p. Tese (Engenharia Ambiental) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2009.

PÔSSAS, F. P.; GONÇALVES, L. C.; PEREIRA, L. G. R.; MACHADO, F. S.; JAYME, D. G.; RODRIGUES, J. A. S.; RODRIGUEZ, N. M.; TOMICH, T. R. Cinética de fermentação ruminal das silagens de três híbridos de milho comerciais em diferentes estádios de maturação. **Arquivo Brasileiro de Medicina Veterinária e Zootecnia**, v. 67, n. 1, p. 159-165, 2015.

PREVEDELLO, B.M.S.; PREVEDELLO, C.L.; LIBARDI, P.L. Simplificação analítica do método do perfil instantâneo para obtenção da condutividade hidráulica não saturada em condições de campo. **R. Bras. Ci. Solo**, 5:93-97, 1981.

PREVEDELLO, J.; VOGELMANN, E. S.; KAISER, D. R. REINERT, D. J. A funcionalidade do sistema poroso do solo em floresta de eucalipto sob Argissolo. **Scientia Forestalis**, Piracicaba, v. 41, n. 100, p.557-566, dez. 2013.

RANDO, E.M. **Alterações nas características e propriedades físicas de um Latossolo Roxo distrófico, ocasionadas pelo cultivo convencional**. Lavras, Escola Superior de Agricultura de Lavras, 1981. 161p. (Dissertação de Mestrado).

RAVICHANDRAN, N. Fully coupled finite element model of dynamics of partially saturated soils. **Journal of Soil Dynamics and Earthquake Engineering**, v.29, p.1294-1304, 2009.

REICHARDT, K. **A água em sistemas agrícolas**. São Paulo: Editora Manoele Ltda, 1990.

REICHARDT, K.; TIMM, L.C. **Solo, planta e atmosfera: conceitos, processos e aplicações**. Barueri: Manole, 2008. 478 p.

REINERT, D. J.; REICHERT, J. M. **Propriedades físicas do solo**. Universidade Federal de Santa Maria, Centro de Ciências Rurais. Santa Maria, 2006.

REYNOLDS, W.D; BOWMANB, B. T.; BRUNKEB, R. R., DRURYA, C. F.; TANA C. S. Comparison of tension infiltrometer, pressure infiltrometer, and soil core estimates of saturated hydraulic conductivity. **Soil Science Society of America Journal**, v.64, p.478-484, 2000.

RICHARDS, L.A.; WEAVER, L.R. Fitten-atmosphere percentage as related to the permanent wilting percentage. **Soil Sci.**, 56:331-339, 1943.

RIVERA, R.N.C.; DUARTE, S.N.; MIRANDA, J.H.; BOTREL, T.A. Modelagem da dinâmica do potássio no solo sob irrigação por gotejamento: validação do modelo. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v. 26, n. 2, p. 388-394, 2006.

ROCSCIENCE INC. 2010, **Slide Version 6.0** – 2D Limit Equilibrium Slope Stability Analysis. www.rocscience.com, Toronto, Ontario, Canada.

RODRIGUES, F.; VON PINHO, R. G.; ALBUQUERQUE, C. J. B.; FARIA FILHO, E. M.; GOULART, J. C. Capacidade de combinação entre linhagens de milho visando à produção de milho verde. **Bragantia**, Campinas, v. 68, n. 01, p. 75-84, 2009.

SANCHEZ, E. **Propriedades físicas do solo e produtividade de soja em sucessão a plantas de cobertura de inverno**. 2012. 48p. DISSERTAÇÃO (Mestrado em Agronomia) – Universidade Estadual do Centro-Oeste, 2012.

SANGOI, L.; SILVA, P. R. F. da; ARGENTA, G.; RAMBO, L. **Ecofisiologia da cultura do milho para altos rendimentos**. Lages: Graphel, 2010. 87 p.

SANTANA, M. B.; SOUZA, L. S.; SOUZA, L. D.; FONTES, L. E. F. Atributos físicos dos solos e distribuição do sistema radicular de citros como indicadores de horizontes coesos em dois solos de Tabuleiros Costeiros do Estado da Bahia. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 30, p. 1-12, 2006.

SANTOS, L. N. S.; MATSURA, E. E.; GONÇALVES, I. Z.; BARBOSA, E. A. A.; NAZÁRIO, A. A.; TUTA, N. F.; ELAIUY, M. C. L.; FEITOSA, D. R. C.; SOUZA, A. C. M. Water storage in the soil profile under subsurface drip irrigation: Evaluating two installation depths of emitters and two water qualities. **Agricultural Water Management**, [s.l.], v. 170, p.91-98, maio 2016. Elsevier BV.

SASAL, M. C.; ANDRIULO, A.E.; TABOADA, M. A. Soil porosity characteristics and water movement under zero tillage in silty soils in Argentinian Pampas. **Soil & Tillage Research**, v. 87, p. 9-18, 2006.

SATCHITHANANTHAM, S.; KRAHN, V.; SRI RANJAN, R.; SAGER, S. Shallow groundwater uptake and irrigation water redistribution within the potato root zone. **Agricultural Water Management**, Amsterdam, v. 132, p. 101-110, 2014.

SATO, L. M.; SOUZA, C. F.; PERES, J. G. Avaliação dos modelos matemáticos para dimensionamento do bulbo molhado na irrigação por gotejamento. **Irriga**, Botucatu, v.18, n.1, p. 99-112, 2013.

SCHAAP, M. G. e VAN GENUCHTEN, M. T. H. (2005). "A Modified Mualem-van Genuchten Formulation for Improved Description of the Hydraulic Conductivity Near Saturation". **Vadose Zone Journal** 5:27-34.

SCHWARTZMAN, M.; ZUR, B. Emitter spacing and geometry of wetted soil volume. **Journal of Irrigation and Drainage Engineering**, v.3, p.242-253, 1986. (Paper ASCE 112).

SCORZA JÚNIOR, R. P.; SILVA, J. P.; RIGITANO, R. L. O. Simulation of moisture profiles in a latossol in Dourados Region, in the State of Mato Grosso do Sul, Brazil. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v.30, n.1, p.22-32, 2010.

SILVA, C. P. da. **Gênese do caráter coeso: relação da resistência tênsil com atributos físicos e químicos do solo**. 2019. 65 f. Tese (Doutorado) – Curso de Pós-graduação em Ciência do Solo, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2019.

SILVA, J.R.L.; MONTENEGRO, A.A.A.; SANTOS, T.E.M. Caracterização física e hidráulica de solos em bacias experimentais do semiárido brasileiro, sob manejo conservacionista. **R. Bras. Eng. Agríc. Amb.**, 16:27-36, 2012b.

SILVA, M.R.R.; VANZELA, L.S.; VAZQUEZ, G.H.; SANCHES, A.C. (2012); Influência da irrigação e cobertura morta do solo sobre as características agronômicas e produtividade de milho. **Irriga**, Botucatu, Edição Especial, p. 170-180.

SILVA, P.R.A.; BENEZ, S.H.; MAHAL, D.; GERMINO, R. Avaliação da potência e área mobilizada de hastes sulcadoras em semeadoras-adubadoras diretas. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA AGRÍCOLA, 33., 2004, São Pedro. **Anais...**Jaboticabal: Sociedade Brasileira de Engenharia Agrícola, 2004.

SILVA, R. F. da.; OLIVEIRA, E. C. de.; JUSTINO, F. B. e; GROSSI, M. C. Influência das mudanças climáticas na cultura do milho na área da Amazônia Legal. **XVI Congresso Brasileiro de Meteorologia**. Set. Pará, 2010.

SIMÕES, W. L.; OLIVEIRA, A. R. de; CALGARO, M. Teste do Bulbo Molhado para o Plantio de Cana-de-açúcar com irrigação localizada: **Instruções Técnicas da Embrapa Semiárido**. Petrolina: Embrapa Semiárido, 2016.

SIMUNEK, J., van GENUCHTEN, M. Th., SEJNA, M. **The HYDRUS Software Package for Simulating Two- and Three-Dimensional Movement of Water, Heat, and Multiple**

**Solutes in Variably-Saturated Media**, Technical Manual, Version 1.0, PC Progress, Prague, Czech Republic, pp. 241, 2006.

SINGH, D.K.; RAJPUT, T.B.S.; SINGH, D.K.; SIKARWAR, H.S.; SAHOO, R.N.; AHMAD, T. Simulation of soil wetting pattern with subsurface drip irrigation from line source **Agricultural Water Manage**, Amsterdam, v. 83, p. 130-134, 2006.

SIYAL, A.A.; SKAGGS, T.H. Measured and simulated soil wetting patterns under porous clay pipe sub-surface irrigation. **Agricultural Water Management**, Amsterdam, v. 96, n. 6, p. 893-904, 2009.

SOUSA, V. F. de. Manejo da água de irrigação. In: SOUSA, V. F. de; MAROUELLI, W. A.; COELHO, E. F.; PINTO, J. M.; COELHO FILHO, M. A. (Ed.). Irrigação e fertirrigação em fruteiras e hortaliças. Brasília, DF: **Embrapa Informação Tecnológica: Embrapa Hortaliças**; São Luís: Embrapa Cocais; Cruz das Almas: Embrapa Mandioca e Fruticultura; Petrolina: Embrapa Semiárido, 2011. p. 159-232.

SOUZA FILHO, P. S. e. **Parâmetros físicos e hídricos relacionados com o avanço da frente de molhamento**. 2011. 87 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia Agrícola, Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2011.

SOUZA, C. F. **A utilização da reflectometria no domínio do tempo (TDR) na modelagem do bulbo molhado do solo irrigado por gotejamento**. 2002. 124 f. Tese (Doutorado em Engenharia Agrícola) – Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2002.

SOUZA, C. F.; MATSURA, E. E. Distribuição da água no solo para o dimensionamento da irrigação por gotejamento. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.8, no.1, p.7-15, 2004.

TAN, X.; SHAO, D.; LIU, H. Simulating soil water regime in lowland paddy fields under different water managements using HYDRUS-1D. **Agricultural Water Management**, Amsterdam, v. 132, p. 69-78, 2014.

TAVARES, M.H.F.; FELICIANO, J.J.S.; VAZ, C.M.P. Análise comparativa de métodos para determinação da curva de retenção de água em solos. **Irriga**, 13:517-524, 2008.

TAVELLA, L. B.; SILVA, P. S. L.; MONTEIRO, A. L.; OLIVEIRA, V. R.; FERNANDES, P. L. O. *Gliricidia sepium* intercropping for weed management in immature corn ear production. **Revista Ciência Agronômica**, Fortaleza, v. 48, n. 4, p, 650-656, 2017.

TEIXEIRA, P. C.; DONAGEMMA, G. K.; FONTANA, A.; TEIXEIRA, W. G. (Ed.). **Manual de métodos de análise de solo**. 3. Ed. ver. E ampl. Brasília: EMBRAPA-CNPS, 2017. 573 p. (EMBRAPA-CNPS).

THORBURN, P. J., F. J. COOK, and K. L. BRISTOW. 2003. Soil-dependent wetting from trickle emitters: implications for trickle design and management. **Irrigation Science**, 22(3-4): 121-127.

TIMM, L. C.; PIRES, L. F.; ROVERATTI, R.; ARTHUR, R. J. C.; REICHARDT, K.; OLIVEIRA, J. C. M.; BACCHI, O. O. S. Field spatial and temporal patterns of soil water content and bulk density changes. **Scientia Agricola**, v. 63, n. 2, p. 55-64, 2006.

TOGNON, A. A. **Propriedades físico-hídricas do Latossolo Roxo da região de Guairá-SP sob diferentes sistemas de cultivo**. 1991. 85 f. Dissertação (Mestrado) Escola Superior de Agricultura de Luiz de Queiroz, Piracicaba, 1991.

TOLENTINO JUNIOR, J. B.; MARINHO, L. B.; SOUZA, C. F.; FRIZZONE, J. A. Desenvolvimento de um modelo numérico para modelagem do bulbo molhado em irrigação por gotejamento. **Irriga**, Botucatu, Edição Especial 01, p.11-20, 2014.

TORMENA, C.A.; SILVA, A.P. Incorporação da densidade no ajuste de dois modelos à curva de retenção de água no solo. **R. Bras. Ci. Solo**, 26:305-314, 2002.

van GENUCHTEN, M.T. A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 44, n. 5, p. 892-898, 1980.

VEIGA, M.; BASSIL, L.; ROSSO, A. **Degradação do solo e da água: Manual de uso, manejo e conservação do solo e da água**. 2.ed. Florianópolis, Secretaria da Agricultura e Abastecimento, 1994. 384p.

VIEIRA, J. M. **Contribuição de compostos amorfos na coesão de solos dos Tabuleiros Costeiros do Ceará**. 2013. 113 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Pós-graduação em Ciência do Solo, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2013.

WARRICK, A. \_\_\_\_\_. **Soil water dynamics**. New York: Oxford University Press, 2003. 391 p.

WARRICK, A.W., LOMEN, D.O., AMOOZEGAR-FARD, A., 1980. Linearized moisture flow with root extraction for three dimensional, steady conditions. **Soil Sci. Soc. Am. J.** 44 (5), 911–914.

WARRICK, A.W.; NIELSEN, D.R. **Spatial variability of soil physical properties in the field**. In: HILLEL, D., ed. Applications of soil physics. New York, Academic Press, p.319-344. 1980.

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

**APÊNDICE A – DADOS MEDIDOS E ESTIMADOS DURANTE A IRRIGAÇÃO**

Profundidade de instalação do tubo gotejador (cm)	Espaçamento entre emissores (cm)	Tempo de irrigação (min)	Umidade medida ( $\text{cm}^3\text{cm}^{-3}$ )	Umidade estimada ( $\text{cm}^3\text{cm}^{-3}$ )
10	25	10	0,116	0,114
10	25	10	0,130	0,131
10	25	10	0,140	0,145
10	25	10	0,169	0,173
10	25	30	0,142	0,139
10	25	30	0,149	0,148
10	25	30	0,185	0,185
10	25	30	0,215	0,214
10	25	60	0,186	0,186
10	25	60	0,207	0,200
10	25	60	0,242	0,202
10	25	60	0,267	0,204
10	50	10	0,121	0,121
10	50	10	0,147	0,148
10	50	10	0,156	0,156
10	50	10	0,175	0,161
10	50	30	0,121	0,118
10	50	30	0,144	0,145
10	50	30	0,178	0,179
10	50	30	0,187	0,181
10	50	60	0,128	0,125
10	50	60	0,158	0,156
10	50	60	0,177	0,178
10	50	60	0,193	0,191
10	75	10	0,121	0,120
10	75	10	0,151	0,152
10	75	10	0,158	0,159
10	75	10	0,163	0,159
10	75	30	0,129	0,130
10	75	30	0,144	0,147
10	75	30	0,153	0,152
10	75	30	0,161	0,161
10	75	60	0,123	0,125
10	75	60	0,146	0,146
10	75	60	0,160	0,164
10	75	60	0,220	0,190
10	100	10	0,148	0,148
10	100	10	0,160	0,153
10	100	10	0,170	0,178
10	100	10	0,177	0,178
10	100	30	0,158	0,167
10	100	30	0,165	0,167
10	100	30	0,179	0,179
10	100	30	0,191	0,189
10	100	60	0,196	0,193

10	100	60	0,198	0,193
10	100	60	0,213	0,217
10	100	60	0,220	0,217
20	25	10	0,164	0,161
20	25	10	0,174	0,170
20	25	10	0,194	0,198
20	25	10	0,211	0,198
20	25	30	0,151	0,141
20	25	30	0,181	0,181
20	25	30	0,204	0,208
20	25	30	0,226	0,223
20	25	60	0,176	0,178
20	25	60	0,199	0,200
20	25	60	0,230	0,226
20	25	60	0,251	0,226
20	50	10	0,124	0,126
20	50	10	0,141	0,142
20	50	10	0,155	0,154
20	50	10	0,173	0,165
20	50	30	0,155	0,155
20	50	30	0,171	0,170
20	50	30	0,183	0,183
20	50	30	0,190	0,186
20	50	60	0,122	0,112
20	50	60	0,167	0,170
20	50	60	0,188	0,188
20	50	60	0,194	0,194
20	75	10	0,124	0,125
20	75	10	0,136	0,136
20	75	10	0,149	0,151
20	75	10	0,154	0,152
20	75	30	0,132	0,133
20	75	30	0,144	0,147
20	75	30	0,171	0,177
20	75	30	0,182	0,177
20	75	60	0,133	0,138
20	75	60	0,148	0,145
20	75	60	0,165	0,166
20	75	60	0,189	0,182
20	100	10	0,138	0,140
20	100	10	0,155	0,152
20	100	10	0,171	0,182
20	100	10	0,174	0,182
20	100	30	0,136	0,144
20	100	30	0,146	0,144
20	100	30	0,160	0,163
20	100	30	0,216	0,177
20	100	60	0,138	0,131
20	100	60	0,146	0,153
20	100	60	0,155	0,156

20	100	60	0,184	0,195
30	25	10	0,144	0,142
30	25	10	0,159	0,160
30	25	10	0,171	0,171
30	25	10	0,183	0,174
30	25	30	0,160	0,160
30	25	30	0,175	0,175
30	25	30	0,188	0,184
30	25	30	0,214	0,209
30	25	60	0,195	0,180
30	25	60	0,205	0,186
30	25	60	0,229	0,190
30	25	60	0,247	0,198
30	50	10	0,139	0,139
30	50	10	0,151	0,140
30	50	10	0,169	0,164
30	50	10	0,183	0,164
30	50	30	0,153	0,150
30	50	30	0,172	0,165
30	50	30	0,209	0,198
30	50	30	0,250	0,246
30	50	60	0,152	0,153
30	50	60	0,159	0,161
30	50	60	0,219	0,206
30	50	60	0,250	0,246
30	75	10	0,122	0,126
30	75	10	0,147	0,156
30	75	10	0,155	0,156
30	75	10	0,185	0,156
30	75	30	0,130	0,132
30	75	30	0,147	0,146
30	75	30	0,156	0,158
30	75	30	0,223	0,246
30	75	60	0,107	0,107
30	75	60	0,150	0,150
30	75	60	0,180	0,179
30	75	60	0,210	0,220
30	100	10	0,150	0,148
30	100	10	0,161	0,158
30	100	10	0,179	0,168
30	100	10	0,244	0,178
30	100	30	0,154	0,154
30	100	30	0,178	0,163
30	100	30	0,197	0,196
30	100	30	0,220	0,196
30	100	60	0,150	0,154
30	100	60	0,166	0,169
30	100	60	0,192	0,204
30	100	60	0,250	0,204

---

### APÊNDICE B – DADOS MEDIDOS E ESTIMADOS APÓS A IRRIGAÇÃO

Profundidade de instalação do tubo gotejador (cm)	Espaçamento entre emissores (cm)	Tempo após o corte da irrigação (min)	Umidade medida ( $\text{cm}^3\text{cm}^{-3}$ )	Umidade estimada ( $\text{cm}^3\text{cm}^{-3}$ )
10	25	10	0,236	0,216
10	25	10	0,235	0,212
10	25	10	0,240	0,228
10	25	30	0,227	0,193
10	25	30	0,225	0,193
10	25	30	0,221	0,191
10	25	60	0,185	0,172
10	25	60	0,191	0,174
10	25	60	0,193	0,175
10	50	10	0,214	0,190
10	50	10	0,217	0,193
10	50	10	0,220	0,196
10	50	30	0,199	0,171
10	50	30	0,200	0,171
10	50	30	0,197	0,168
10	50	60	0,176	0,155
10	50	60	0,179	0,155
10	50	60	0,175	0,153
10	75	10	0,219	0,190
10	75	10	0,219	0,191
10	75	10	0,225	0,195
10	75	30	0,206	0,169
10	75	30	0,206	0,166
10	75	30	0,208	0,170
10	75	60	0,173	0,153
10	75	60	0,172	0,151
10	75	60	0,178	0,153
10	100	10	0,210	0,188
10	100	10	0,212	0,188
10	100	10	0,212	0,188
10	100	30	0,201	0,146
10	100	30	0,200	0,146
10	100	30	0,202	0,147
10	100	60	0,195	0,135
10	100	60	0,200	0,135
10	100	60	0,200	0,135
20	25	10	0,239	0,213
20	25	10	0,234	0,212
20	25	10	0,241	0,223
20	25	30	0,228	0,194
20	25	30	0,226	0,192
20	25	30	0,223	0,191
20	25	60	0,189	0,175
20	25	60	0,196	0,177
20	25	60	0,190	0,176

20	50	10	0,246	0,206
20	50	10	0,244	0,197
20	50	10	0,245	0,203
20	50	30	0,220	0,177
20	50	30	0,221	0,178
20	50	30	0,224	0,180
20	50	60	0,184	0,160
20	50	60	0,179	0,160
20	50	60	0,216	0,163
20	75	10	0,233	0,182
20	75	10	0,225	0,182
20	75	10	0,240	0,182
20	75	30	0,210	0,163
20	75	30	0,206	0,161
20	75	30	0,203	0,160
20	75	60	0,172	0,145
20	75	60	0,193	0,149
20	75	60	0,190	0,149
20	100	10	0,215	0,168
20	100	10	0,210	0,163
20	100	10	0,210	0,167
20	100	30	0,195	0,147
20	100	30	0,191	0,145
20	100	30	0,193	0,146
20	100	60	0,188	0,138
20	100	60	0,184	0,137
20	100	60	0,177	0,136
30	25	10	0,233	0,181
30	25	10	0,233	0,178
30	25	10	0,246	0,184
30	25	30	0,220	0,176
30	25	30	0,216	0,174
30	25	30	0,218	0,175
30	25	60	0,199	0,163
30	25	60	0,184	0,162
30	25	60	0,186	0,163
30	50	10	0,211	0,186
30	50	10	0,210	0,182
30	50	10	0,223	0,193
30	50	30	0,185	0,169
30	50	30	0,177	0,165
30	50	30	0,186	0,169
30	50	60	0,163	0,154
30	50	60	0,154	0,153
30	50	60	0,147	0,148
30	75	10	0,211	0,197
30	75	10	0,175	0,175
30	75	10	0,170	0,170
30	75	30	0,162	0,161
30	75	30	0,158	0,159

30	75	30	0,166	0,161
30	75	60	0,156	0,150
30	75	60	0,153	0,149
30	75	60	0,148	0,147
30	100	10	0,200	0,155
30	100	10	0,206	0,169
30	100	10	0,218	0,181
30	100	30	0,186	0,151
30	100	30	0,185	0,149
30	100	30	0,179	0,147
30	100	60	0,173	0,139
30	100	60	0,177	0,139
30	100	60	0,165	0,137

---