



**UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ**  
**CENRO DE CIENCIAS AGRÁRIAS**  
**DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA AGRÍCOLA**  
**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA AGRÍCOLA**

**TADEU MACRYNE LIMA CRUZ**

**APLICAÇÃO DE MODELO PARA FLUXO DE ÁGUA NO SOLO VISANDO A  
AUTOMAÇÃO DE SISTEMA DE IRRIGAÇÃO**

**FORTALEZA**

**2015**

TADEU MACRYNE LIMA CRUZ

APLICAÇÃO DE MODELO PARA FLUXO DE ÁGUA NO SOLO VISANDO A  
AUTOMAÇÃO DE SISTEMA DE IRRIGAÇÃO

Tese submetida à Coordenação do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola, da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial para obtenção do grau de Doutor em Engenharia Agrícola.

Área de concentração: Irrigação e Drenagem

Orientador: Prof. Ph.D. Adunias dos Santos  
Teixeira

FORTALEZA

2015

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)

---

- C965a Cruz, Tadeu Macryne Lima.  
Aplicação de modelo para fluxo de água no solo visando a automação de sistema de irrigação / Tadeu Macryne Lima Cruz. – 2015.  
97 f. : il. color.
- Tese (doutorado) – Universidade Federal do Ceará, Centro de Ciências Agrárias, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola, Fortaleza, 2015.  
Orientação: Prof. Dr. Adunias dos Santos Teixeira.  
Coorientação: Prof. Dr. Francisco Chagas da Silva Filho.
1. Sistema de aquisição de dados. 2. Reflectometria no domínio de frequência. 3. Modelo numérico. I. Título.

CDD 630

---

TADEU MACRYNE LIMA CRUZ

APLICAÇÃO DE MODELO PARA FLUXO DE ÁGUA NO SOLO VISANDO A  
AUTOMAÇÃO DE SISTEMA DE IRRIGAÇÃO

Tese submetida à Coordenação do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola, da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial para obtenção do grau de Doutor em Engenharia Agrícola. Área de concentração: Irrigação e Drenagem

Aprovado em: 26 de fevereiro de 2015

BANCA EXAMINADORA

---

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

---

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

---

Dr. Francisco José Firmino Canafistula (Conselheiro)  
Universidade Federal do Ceará - UFC

---

Prof. Dr. Clemilson Costa dos Santos (Conselheiro)  
Universidade Federal do Ceará – UFC

---

Dr. Silvio Carlos Ribeiro Vieira Lima (Conselheiro)  
Instituto de Pesquisa e Inovação na Agricultura Irrigada – INOVAGRI

---

Prof. Dr. Luiz Clenio Jario Moreira (Conselheiro)  
Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Ceará – IFCE

A Deus, Jesus Cristo e Nossa Senhora  
A minha querida Raísa Holanda Queiroz;  
Aos meus queridos pais Maria Goret e José Moreira;  
Aos meus irmãos Tarcito e Thiago e  
A minha querida avó Maria Malveira

## **AGRADECIMENTOS**

A Deus, Jesus e Nossa Senhora que nos proporcionam forças para vencer os obstáculos e conquistar os objetivos.

A minha querida Raísa Holanda Queiroz que esteve sempre do meu lado ajudando a vencer as dificuldades, demonstrando carinho e atenção.

A minha família pela ajuda e incentivo nos estudos, acreditando sempre no meu potencial.

Ao professor Adunias dos Santos Teixeira que tive o prazer de ser seu orientado e pelos conhecimentos compartilhados.

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pelo o apoio financeiro para realizar os trabalhos.

Ao Professor Francisco Chagas da Silva Filho pelos ensinamentos a mim proferidos e a participação da minha defesa.

Aos membros e amigos que participaram da minha banca de doutorado: Francisco José Firmino Canafistula, Clemilson Costa dos Santos, Luis Clenio Jário Moreira e Silvio Carlos Ribeiro Vieira Lima.

Aos colegas do grupo de pesquisa: Henrique, Lúcio, Amnon, Alípio, Odílio, Eurileny e Lucas por toda ajuda e colaboração para o desenvolvimento deste trabalho.

## RESUMO

O conhecimento atual sobre a dinâmica da água no solo relacionada à sua dimensão temporal e espacial é muito importante no estabelecimento de metodologias adequadas no manejo de irrigação. Neste âmbito, simulações por meio de modelagem computacional permite a previsão de redistribuição da água no solo através da diferença da densidade de fluxo de água que atravessa a camada de solo em função do tempo, auxiliando na identificação e caracterização dos fatores que interferem no movimento de água em seu perfil. Nesta tese é avaliado um modelo de fluxo de água no solo, utilizando o método dos elementos finitos, como técnica para simular e determinar o tempo de irrigação necessário. Considerando a importância do monitoramento físico da umidade do solo ( $\theta$ ) foi desenvolvida uma placa de aquisição de dados que permitiu a multiplexação de 15 sensores capacitivos instalados em forma de malha no perfil do solo. A placa de aquisição de dados multiplexadora possibilitou avaliar a formação do bulbo úmido e estimar as dimensões do solo molhado com irrigação por gotejamento. Com a avaliação do bulbo molhado e de posse das propriedades e parâmetros físicos do solo, foi aplicado um modelo computacional que utiliza a técnica dos elementos finitos para prever fluxo de água vertical em solo não saturado. Na parametrização do solo buscou-se aproximar as condições iniciais de controle de simulação, bem como os valores de umidade sobre o qual o modelo processaria os resultados a fim de compor a mesma situação encontrada no campo. A placa multiplexadora desenvolvida mostrou-se eficiente para realizar as aquisições de dados de umidade do solo, utilizando os sensores capacitivos FDR, apresentando versatilidade e robustez contra as intempéries climáticas e possibilitou avaliar a formação do bulbo molhado no solo. Os mapas de fluxo de água no solo, após a calibração do modelo, disponibilizaram simulações satisfatórias em regime transiente da dinâmica de água no solo, permitindo sua utilização na definição do tempo de irrigação.

**Palavras-chave:** Sistema de aquisição de dados. Reflectometria no domínio de frequência. Modelo numérico.

## ABSTRACT

The Knowledge of the water flow into the soil is very important to establish an appropriate water management. This thesis was divided into three chapters whose general objective is to apply a water flow model on the ground in real time by the finite element method to simulate and determine the required irrigation time. Considering the importance of physical soil moisture monitoring was developed a multiplexed data acquisition system analysis tool as the water content in the soil profile. For monitoring soil moisture ( $\theta$ ) were installed 15 capacitance sensors arranged in grid form in the soil profile. The multiplexer board allowed us to evaluate the formation of the wet bulb and estimate the dimensions of wet soil with drip irrigation. With the evaluation of the wet bulb and data of the properties and soil physical parameters were applied a model a computer model that uses the technique of finite elements to provide vertical water flow in unsaturated soil. In soil parameter sought to approximate the initial conditions of simulation control and soil moisture values on which the model would process the results in order to compose the same situation encountered in the field. The multiplexer board developed was efficient to make acquisitions of soil moisture data, using capacitance sensors FDR, with versatility and robustness against bad weather and allowed us to evaluate the formation of the wet bulb in the soil. The maps of the ground water flow, after calibration of the model, simulations have provided satisfactory transient dynamics of the water in the soil, allowing its use in determining the irrigation time.

**Keywords:** Data acquisition system. Frequency domain reflectometry. Numerical model.



## LISTA DE FIGURAS

|           |   |    |
|-----------|---|----|
| FIGURA 1  | Fluxograma em blocos do desenvolvimento da placa multiplexadora .....   | 18 |
| FIGURA 2  | Circuito da placa multiplexadora simulado via Proteus .....   | 19 |
| FIGURA 3  | Esboço de circuito impresso desenhado por auxílio de computador .....   | 20 |
| FIGURA 4  | Microcontrolador PIC18F4550 e a descrição da sua pinagem .....  | 21 |
| FIGURA 5  | Memória EEPROM 24LC512.....   | 22 |
| FIGURA 6  | Diagrama de composição e processamento da placa multiplexadora.....   | 22 |
| FIGURA 7  | Relé ML2RC2 e o seu diagrama elétrico visto de baixo .....  | 23 |
| FIGURA 8  | Conexão do relé ML2RC2 na placa multiplexadora.....   | 23 |
| FIGURA 9  | Conector placa-cabo de 4 vias .....   | 24 |
| FIGURA 10 | Interface de obtenção e tradução dos dados da memória.....  | 24 |
| FIGURA 11 | Placa multiplexadora de dados de umidade do solo .....  | 25 |
| FIGURA 12 | Banca de testes da placa multiplexadora realizada em laboratório.....   | 26 |
| FIGURA 13 | Valores de umidade do solo da 1ª camada coletados durante 11 dias .....   | 28 |
| FIGURA 14 | Valores de umidade do solo da 2ª camada coletados durante 11 dias .....   | 29 |
| FIGURA 15 | Valores de umidade do solo da 3ª camada coletados durante 11 dias .....   | 29 |
| FIGURA 16 | Comprimento médio da raiz no bulbo úmido em diferentes profundidades e distâncias de gotejadores em ( T1 ) uma linha gotejadora, ( T2 ), duas linhas gotejadoras e ( T3 ) quatro linhas gotejadoras por linha de plantio em Laranjeira..... | 39 |
| FIGURA 17 | Sensor capacitivo FDR (A) e seu desenho esquemático (B) .....   | 42 |
| FIGURA 18 | Esquema ilustrativo da distribuição desordenada das moléculas de água (A) e após a polarização (B) .....  | 43 |
| FIGURA 19 | Esquema da disposição dos sensores no perfil do solo para monitoramento do bulbo molhado no sistema de gotejamento superficial.....   | 44 |
| FIGURA 20 | Malha de sensores capacitivos instalada no perfil do solo (A) e painel fotovoltaico (B), ambos conectados ao multiplexador (C).....   | 45 |
| FIGURA 21 | Projeção bidimensional do mapa de contorno da umidade do solo.....  | 47 |
| FIGURA 22 | Umidade volumétrica em função da frequência na calibração de campo para a 1ª camada .....   | 48 |
| FIGURA 23 | Umidade volumétrica em função da frequência na calibração de campo para a 2ª camada .....   | 49 |
| FIGURA 24 | Umidade volumétrica em função da frequência na calibração de campo para a 3ª camada .....   | 49 |
| FIGURA 25 | Umidade volumétrica observada e estimada em função das respostas dos sensores capacitivos FDR para a 1ª camada.....   | 50 |
| FIGURA 26 | Umidade volumétrica observada e estimada em função das respostas dos sensores capacitivos FDR para a 2ª camada.....   | 51 |
| FIGURA 27 | Umidade volumétrica observada e estimada em função das respostas dos sensores capacitivos FDR para a 3ª camada.....   | 51 |
| FIGURA 28 | Mapas de contorno dos valores de umidade do solo ( $\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$ ) com 10 minutos (A), 1 hora (B), 25 horas (C), 49 horas (D), 72 horas (E) e 97 horas (F) após o fim da irrigação.....                                      | 54 |
| FIGURA 29 | Área superficial formada pelo gotejador para uma vazão de 2L/h.....   | 55 |
| FIGURA 30 | Representação do bulbo úmido, (A) antes da irrigação e (B) depois da irrigação .....  | 56 |
| FIGURA 31 | Mapa de contorno de umidade do solo ( $\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$ ) no início da irrigação .....   | 57 |

|           |  |    |
|-----------|--|----|
| FIGURA 32 | Mapa de contorno de umidade do solo ( $\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$ ) para 30 minutos de irrigação .....  | 58 |
| FIGURA 33 | Mapa de contorno de umidade do solo ( $\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$ ) para 1 hora de irrigação ....   | 58 |
| FIGURA 34 | Mapa de contorno de umidade do solo ( $\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$ ) para 3 horas de irrigação...  | 59 |
| FIGURA 35 | Mapa de contorno de umidade do solo ( $\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$ ) para 6 horas de irrigação...  | 59 |
| FIGURA 36 | Mapa de contorno de umidade do solo ( $\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$ ) 1 hora após o fim da irrigação .....  | 60 |
| FIGURA 37 | Mapa de contorno de umidade do solo ( $\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$ ) 3 horas após o fim da irrigação .....   | 60 |
| FIGURA 38 | Mapa de contorno de umidade do solo ( $\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$ ) 6 horas após o fim da irrigação .....   | 61 |
| FIGURA 39 | Mapas de contorno da frente de umedecimento do solo: (1) início da irrigação; (2) 30 minutos de irrigação; (3) 1 hora de irrigação; (4) 3 horas de irrigação; (5) 6 horas de irrigação; (6) 1 hora após o fim da irrigação; (7) 3 horas após o fim da irrigação; (8) 6 horas após o fim da irrigação ..... | 62 |
| FIGURA 40 | Método de fluxo de água do software Slide® .....   | 72 |
| FIGURA 41 | Tela de informações requeridas pelo software Slide® .....  | 73 |
| FIGURA 42 | Ensaio de permeâmetro de carga contínua.....   | 73 |
| FIGURA 43 | Tela de informações temporais requeridas pelo software Slide® .....  | 74 |
| FIGURA 44 | Malha triangular formada pelo software Slide® .....  | 75 |
| FIGURA 45 | Execução da simulação no software Slide® .....   | 75 |
| FIGURA 46 | Simulação do fluxo de água no solo: (A) condição inicial; (B) 10 minutos; (C) 40 minutos; (D) 60 minutos; (E) 120 minutos e (F) 240 minutos .....  | 77 |
| FIGURA 47 | Simulação do fluxo de água no solo para condição inicial.....  | 79 |
| FIGURA 48 | Simulação do fluxo de água no solo para o tempo de 1 minuto .....  | 79 |
| FIGURA 49 | Simulação do fluxo de água no solo para o tempo de 10 minutos.....   | 80 |
| FIGURA 50 | Simulação do fluxo de água no solo para o tempo de 20 minutos.....   | 80 |
| FIGURA 51 | Simulação do fluxo de água no solo para o tempo de 30 minutos.....   | 81 |
| FIGURA 52 | Simulação do fluxo de água no solo para o tempo de 40 minutos.....   | 81 |
| FIGURA 53 | Simulação do fluxo de água no solo para o tempo de 60 minutos.....   | 82 |
| FIGURA 54 | Simulação do fluxo de água no solo para o tempo de 120 minutos.....  | 82 |
| FIGURA 55 | Simulação do fluxo de água no solo para o tempo de 240 minutos.....  | 83 |
| FIGURA 56 | Simulação do fluxo de água no solo para o tempo de 480 minutos.....  | 83 |
| FIGURA 57 | Comparação dos dados de umidade volumétrica medidas em campo pelos sensores capacitivos com os fornecidos pela simulação do programa Slide® para profundidade de 10 cm .....   | 84 |
| FIGURA 58 | Comparação dos dados de umidade volumétrica medidas em campo pelos sensores capacitivos com os fornecidos pela simulação do programa Slide® para profundidade de 23 cm .....   | 85 |
| FIGURA 59 | Comparação dos dados de umidade volumétrica medidas em campo pelos sensores capacitivos com os fornecidos pela simulação do programa Slide® para profundidade de 36 cm .....   | 85 |
| FIGURA 60 | Conteúdo de água observado durante dois eventos de irrigações nas profundidades de 10 cm, 23 cm e 36 cm .....  | 87 |
| FIGURA 61 | Condição inicial de umidade do solo nas profundidades de 10, 23 e 36 cm ....   | 88 |
| FIGURA 62 | Simulação do fluxo de água no solo após 1 minuto de irrigação.....   | 89 |
| FIGURA 63 | Simulação do fluxo de água no solo após 5 minutos de irrigação .....   | 89 |

|           |   |    |
|-----------|---|----|
| FIGURA 64 | Simulação do fluxo de água no solo após 10 minutos de irrigação ..... | 90 |
| FIGURA 65 | Simulação do fluxo de água no solo após 15 minutos de irrigação ..... | 90 |
| FIGURA 66 | Simulação do fluxo de água no solo após 20 minutos de irrigação ..... | 91 |
| FIGURA 67 | Simulação do fluxo de água no solo após 25 minutos de irrigação ..... | 91 |
| FIGURA 68 | Simulação do fluxo de água no solo após 30 minutos de irrigação ..... | 92 |

## LISTA DE TABELAS

|          |  |    |
|----------|--|----|
| TABELA 1 | Características da placa multiplexadora.....   | 27 |
| TABELA 2 | Ajuste do modelo potencial para unidade volumétrica em função da<br>frequência, nas diferentes camadas do solo ..... | 52 |

## SUMÁRIO

|      |  |    |
|------|--|----|
| 1    | INTRODUÇÃO .....   | 13 |
| 2    | HIPÓTESES.....   | 15 |
| 3    | DESENVOLVIMENTO DE PLACA MULTIPLEXADORA DE DADOS DE UMIDADE DO SOLO.....                             | 16 |
| 4    | REVISÃO DE LITERATURA. ....  | 17 |
| 5    | MATERIAL E MÉTODOS. ....   | 19 |
| 5.1  | Desenvolvimento do sistema de aquisição de dados multiplexado .....                                  | 19 |
| 5.2  | Programa da placa multiplexadora.....  | 21 |
| 5.3  | Teste do protótipo em laboratório.....   | 26 |
| 6    | RESULTADOS E DISCUSSÃO .....   | 27 |
| 6.1  | Aferição da placa multiplexadora .....   | 27 |
| 6.2  | Aferição da placa multiplexadora.....  | 28 |
| 7    | CONCLUSÕES .....   | 32 |
|      | REFERÊNCIAS .....  | 33 |
|      | APÊNDICE A .....   | 35 |
| 8    | UTILIZAÇÃO DA REFLECTOMETRIA NO DOMÍNIO DE FREQUÊNCIA (FDR) NA AVALIAÇÃO DO BULBO ÚMIDO DO SOLO..... | 38 |
| 9    | REVISÃO DE LITERATURA . ....   | 39 |
| 10   | MATERIAL E MÉTODOS . ....  | 42 |
| 10.1 | Sensores capacitivos FDR . ....  | 42 |
| 10.2 | Montagem da malha de sensores. ....  | 44 |
| 10.3 | Calibração da malha de sensores. ....  | 47 |
| 10.4 | Avaliação do bulbo úmido . ....  | 48 |
| 11   | RESULTADOS E DISCUSSÃO . ....  | 49 |
| 11.1 | Calibração da malha de sensores. ....  | 49 |
| 11.2 | Avaliação do bulbo úmido . ....  | 58 |
| 12   | CONCLUSÕES . ....  | 64 |
|      | REFERÊNCIAS . ....   | 65 |
| 13   | APLICAÇÃO DE MODELO NUMÉRICO PARA DETERMINAÇÃO DA FRENTE DE UMEDECIMENTO DO SOLO .....               | 67 |
| 14   | REVISÃO DE LITERATURA .....  | 68 |

|             |  |           |
|-------------|--|-----------|
| <b>14.1</b> | <b>Fluxo de água no solo .</b>                                       | <b>68</b> |
| <b>14.2</b> | <b>Fluxo de água em solos não saturados .</b>                        | <b>68</b> |
| <b>14.3</b> | <b>Modelagem numérica.....</b>                                       | <b>69</b> |
| <b>14.4</b> | <b>Programas computacionais para modelagem numérica .</b>            | <b>71</b> |
| <b>15</b>   | <b>MATERIAL E MÉTODOS .</b>  | <b>73</b> |
| <b>15.1</b> | <b>Modelagem computacional 2 D.....</b>                              | <b>73</b> |
| <b>15.2</b> | <b>Calibração do modelo.....</b>                                     | <b>77</b> |
| <b>16</b>   | <b>RESULTADOS E DISCUSSÃO .</b>                                      | <b>78</b> |
| <b>16.1</b> | <b>Calibração do modelo .</b>  | <b>78</b> |
| <b>16.2</b> | <b>Aplicação do modelo para determinação do tempo de irrigação .</b> | <b>89</b> |
| <b>17</b>   | <b>CONCLUSÕES.....</b>   | <b>94</b> |
|             | <b>REFERÊNCIAS .</b>   | <b>95</b> |

## 1 INTRODUÇÃO

A aplicação de tecnologias nos sistemas agrícolas brasileiros tem se intensificado muito nos últimos anos, principalmente por conta da escassez hídrica, necessitando de práticas e métodos que viabilize o uso racional de água, sobretudo na agricultura irrigada, uma vez que os sistemas de irrigação demandam, periodicamente, quantidades significativas de água. Por isso, o manejo de irrigação requer procedimentos mais precisos que auxiliem na determinação da quantidade de água necessária as culturas agrícolas.

O fornecimento de água, na quantidade apropriada às plantas, pode ser efetivado quando se usufrui de equipamentos adequados para tal função. O advento da eletrônica na agricultura tem ajudado nesse sentido, proporcionando um grande progresso no registro de dados ambientais, possibilitando, por exemplo, gravar as respostas de vários sensores instalados em diversos locais no campo, contribuindo ainda mais para a evolução da tecnologia necessária no manejo de irrigação. Neste contexto, os sensores devem ser robustos e disponibilizar respostas mais precisas e em tempo real, e ainda apresentar baixo custo. No entanto, os equipamentos mais precisos são de elevado custo, o que inibe sua ampla aplicação.

O que se observa na prática é o uso de controladores importados e geralmente dedicados apenas ao controle dos mecanismos de aplicação da água, não considerando regras de manejo para a tomada de decisão (QUEIROZ, 2007). Dessa forma, o uso de tecnologias apropriadas torna o manejo de irrigação mais fácil, ampliando as soluções para as consequentes decisões a respeito de um manejo específico em uma área agrícola.

O manejo adequado de irrigação é aquele que prioriza o uso racional da água no meio agrícola, uma vez que, as áreas agrícolas estão sujeitas ao fenômeno de percolação no perfil do solo. Portanto, tem-se direcionado estudos utilizando programas baseados em modelagem matemática, pois o fluxo de água faz parte de uma investigação mais abrangente, que caracteriza a complexidade do comportamento da água no solo, onde o modelo numérico é parte essencial para se atingir estes objetivos. Assim, a simulação do movimento de água no solo através de uma análise numérica passa a ter um papel fundamental, com a possibilidade de fornecer ferramentas úteis no entendimento tanto da redistribuição de água no solo, como no mapeamento da variabilidade espacial do mesmo, auxiliando nas tomadas de decisões na irrigação.

Este trabalho foi dividido em três capítulos cujo objetivo geral foi avaliar um modelo de fluxo de água no solo em tempo real para simular o tempo de irrigação com base nos dados de umidade do solo, como alternativa de manejo em sistemas de irrigação.

O capítulo 1 trata do desenvolvimento de uma placa de aquisição de dados multiplexada. Já o capítulo 2 refere-se a uma avaliação do bulbo úmido do solo utilizando sensores capacitivos FDR. E por fim, o capítulo 3 aborda a utilização de um software numérico como aplicação de modelo de fluxo de água no solo.

O trabalho tem como objetivos específicos:

- Desenvolver uma placa de aquisição de dados que realize a coleta de umidade, em um perfil de solo, por uma malha de 15 sensores capacitivos FDR;
- Avaliar o desempenho da placa de aquisição de dados de umidade do solo;
- Analisar a dimensão do bulbo úmido no solo com irrigação por gotejamento;
- Viabilizar a aplicação de um modelo numérico computacional para o fluxo de água no solo;
- Definir o tempo de irrigação por meio das simulações de umidade do solo utilizando modelagem computacional.



## 2 HIPÓTESES

Diante das questões levantadas foram estabelecidas as seguintes hipóteses da pesquisa:

- 1) A utilização de um multiplexador para coletar dados de umidade do solo contribui na medição mais apurada em um perfil de solo sob irrigação.
- 2) A determinação do bulbo molhado do solo por meio do uso de sensores capacitivos FDR permite uma avaliação mais apurada da dinâmica da água no solo.
- 3) O software numérico é capaz de simular o movimento de água no solo estimar o tempo de irrigação em tempo real, utilizando como critério de entrada a condutividade hidráulica saturada e a umidade do solo.

### 3 DESENVOLVIMENTO DE PLACA MULTIPLEXADORA DE DADOS DE UMIDADE DO SOLO.

O monitoramento do conteúdo de água no solo se tornou uma atividade de essencial, pois se busca hoje um manejo mais preciso nos sistemas de irrigação. Neste enfoque, a eletrônica tem contribuído muito para evolução da agricultura irrigada, pois tem disponibilizado equipamentos cada vez mais precisos para elaborar estratégias de manejo de irrigação. Entretanto, muitos destes procedimentos necessitam de dados coletados por sensores, os quais auxiliam na determinação e avaliação de alguns fenômenos físicos como, por exemplo, a umidade do solo, e devem ser armazenados para posteriores avaliações. Neste sentido, o Sistema de Aquisição de Dados (SAD) é um método bastante utilizado e capaz de transformar as grandezas físicas do ambiente de estudo, predominantemente analógicas, para o formato digital, padrão esse que os computadores ou microprocessadores trabalham. É importante enfatizar a importância e a contribuição que tem o desenvolvimento de um SAD, pois os produtos comerciais apresentam custos elevados e algumas restrições na hora da compra.

A maioria dos sistemas de aquisição de dados permite avaliar o estado atual do ambiente, auxiliando no funcionamento de um sistema físico de forma segura. Este SAD ajuda no monitoramento de tarefas rotineiras, que se tornariam morosas e inviáveis sem o uso de tais equipamentos. Contudo, existe hoje no mercado uma grande variedade e modelos de sistemas de aquisição de dados, comumente conhecido por *data loggers*. A escolha do mais adequado vai levar em consideração as necessidades do pesquisador e o tipo de grandeza a ser medida. Dependendo do objetivo, muitos dos dados podem ser medidos e armazenados no computador. Além disso, os dados podem apresentar grande estabilidade nas medidas, tornando o monitoramento dos parâmetros físicos de forma mais prolongada (VOLTAN, 2012). No entanto, muitos destes *data loggers* são onerosos e por vezes complexos. Alguns não permitem acesso às configurações e ainda utilizam uma sintaxe de programação que dificulta sua operação.

Considerando a importância do monitoramento físico da umidade do solo num sistema de irrigação, o objetivo deste capítulo foi desenvolver um sistema de aquisição de dados multiplexado, adaptado aos sensores capacitivos FDR de alta frequência, como ferramenta de análise do conteúdo de água no perfil do solo.

## 4 REVISÃO DE LITERATURA

Muitos dos experimentos de campo precisam coletar uma grande quantidade de dados provenientes de sensores para avaliar o comportamento de um determinado fenômeno, o que demanda muitas vezes de um SAD para garantir um número bem representativo de medições. É o que tem referido Helfrick e Cooper (1994), aludindo que um SAD, conhecido também como *data logger*, é exigido quando se pretende adquirir um grande número de medições, eliminar possíveis erros cometidos pelo observador e realizar um determinado número de medições num intervalo de tempo muito curto. De acordo com Inamasu et al. (1996), os principais componentes que constituem um SAD são:

- Sensor/Transdutor: elemento que fica em contato com o mundo real, transformando um sinal a ser medido em outro tipo (geralmente elétrico).
- Elemento conversor de sinal: converte uma variável em outra. Exemplo: rotação em sinal elétrico, sinal analógico em digital, voltagem em corrente, etc. Em sensores, é o elemento que incorpora o princípio da transdução.
- Elemento armazenador de dados: armazena os dados digitais, possibilitando arquivar os mesmos.
- Elemento de processamento de dados: os microprocessadores ou microcontroladores programáveis são responsáveis pelo processamento dos dados.

Uma explicação mais técnica e sintética foi apresentada por TAYLOR (1997), em que o mesmo enfatizou que um SAD é constituído por condicionadores de sinais, conversores analógicos/digitais (A/D), interface de comunicação para transferência das informações digitais e programa computacional para o gerenciamento e processamento dos dados.

As oportunidades e possibilidades decorrentes de um sistema de aquisição de dados favorecem o desenvolvimento de técnicas que aperfeiçoam o monitoramento da umidade do solo, induzindo um manejo de irrigação mais eficiente. De acordo com Johnson et al. (1983 apud STAFFORD, 2000), algumas informações do solo podem ser adquiridas em diferentes pontos no campo por meio de um computador ou um microprocessador, que por sua vez pode ser programado para tomar decisões com base em dados pertinentes ao desenvolvimento de qualquer cultura, como por exemplo a umidade do solo.

Conforme discutido anteriormente, a maneira mais prática de evitar erros de medições e ao mesmo tempo garantir a precisão na coleta de vários dados é o uso de um SAD. É importante enfatizar que, erros de medição são provocados mais pelo operador do que pelo próprio equipamento quando se trabalha com quantidade elevadas de dados, em virtude do mau uso dos dispositivos ou sobrecarga dos instrumentos, podendo ocasionar medidas falsas (BASTOS, 2002). Contudo, determinadas situações exigem que as coletas dos dados que se pretende realizar sejam todas efetuadas em um curto intervalo de tempo, por exemplo, o movimento de água no perfil do solo. Neste caso, a multiplexação é o método mais adequado para realizar este tipo de procedimento, sendo uma técnica bastante difundida para medir diversos sinais com um único equipamento de medição. O multiplexador passa a ser a solução mais viável para monitorar vários sensores capacitivos de umidade FDR instalados no solo (CANAFÍSTULA, 2013), uma vez que esse dispositivo de medição permite uma avaliação mais apurada, durante as irrigações, do comportamento do fluxo de água e da redistribuição da mesma no solo, auxiliando na caracterização do bulbo úmido que se forma no perfil de um solo com bastante precisão (ROCHA NETO et al., 2009).

Tem-se como modelo comercial o multiplexador AM16/32B, produzido pela Campbell Scientific, com capacidade de multiplexar até 32 sensores de uma vez. No entanto, este multiplexador deve estar interligado ao *data logger* para que se possa realizar a coleta dos dados, isto é, necessita comprar o multiplexador juntamente com o *data logger*, o que aumenta ainda mais o custo. Para ter uma ideia, os preços do *data logger* CR1000 e do multiplexador AM16/32B, ambos da Campbell Scientific, estão em torno de R\$ 6.530,00 e R\$ 2.584,00, respectivamente. Isso sem contar os acessórios, como teclado, display e módulo de memória, que somados custam em torno de R\$ 2.400,00 (CAMPBELL SCIENTIFIC PRODUCTS, 2014). O total destes custos poderá sair por aproximadamente R\$ 11.600,00, isso sem contar com as taxas cobradas pela importação desses produtos.

Um SAD pode ser considerado simples do ponto de vista da flexibilidade na hora da montagem e da programação, que pode ser adaptado para ambientes peculiares com tipos e números diferentes de sensores, sendo útil na coleta de dados por longos períodos (PALMIERI et al., 2014).

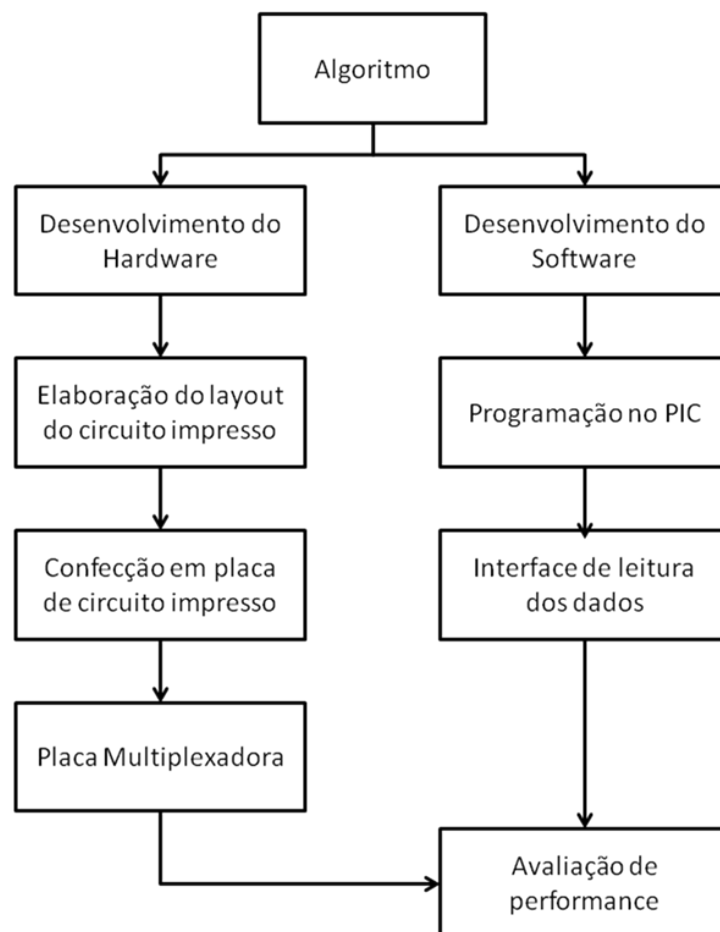
A contribuição deste capítulo visa uma solução para medição das respostas de sensores capacitivos FDR de forma eficiente e barata através de um SAD multiplexado. Assim, o objetivo foi desenvolver um multiplexador capaz de conectar 20 sensores capacitivos FDR e coletar dados de umidade do solo.

## 5 MATERIAL E MÉTODOS

### 5.1 Desenvolvimento do sistema de aquisição de dados multiplexado

O sistema de aquisição de dados multiplexado, adotado aqui como placa multiplexadora de dados de umidade do solo, foi desenvolvida a partir de duas concepções construtivas. Uma de software e outra de hardware. Na Figura 1 está exposto um diagrama de blocos do processo de desenvolvimento da placa multiplexadora. O desenvolvimento do hardware e software foi todo realizado no Laboratório de Eletrônica e Mecânica Agrícola (LEMA) pertencente ao Departamento de Engenharia Agrícola da Universidade Federal do Ceará (UFC).

Figura 1 – Fluxograma em blocos do desenvolvimento da placa multiplexadora

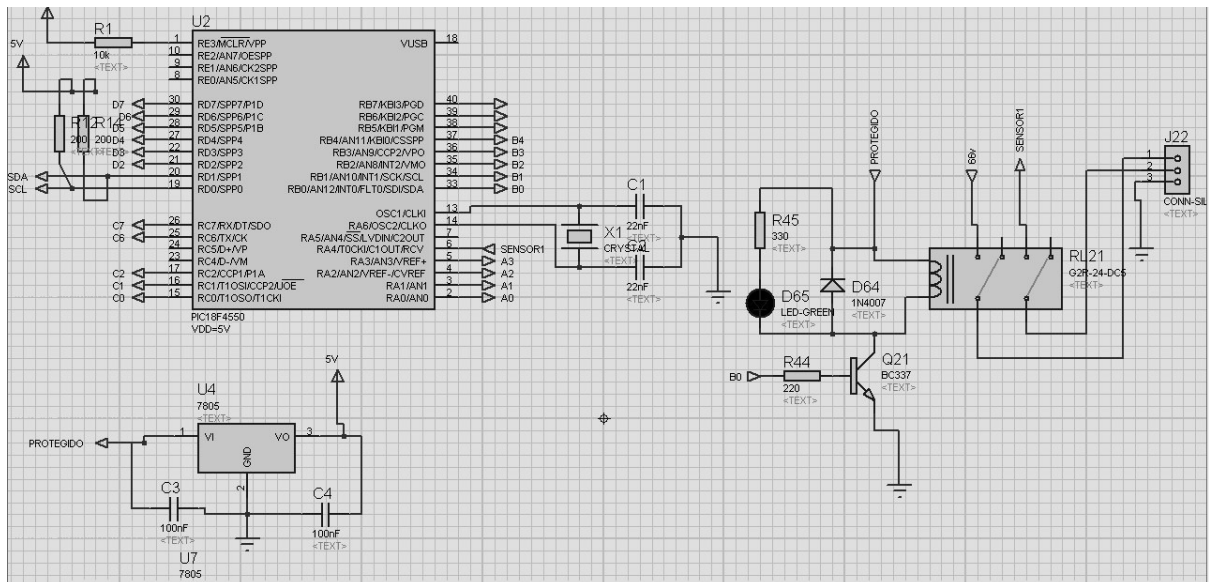


Fonte: Autor

A concepção do hardware foi baseada em diversos dispositivos eletrônicos, entre eles microcontrolador, transistores, regulador de tensão 7805, relé de três contatos e CI de memória externa 24LC512. Os demais são componentes passivos do sistema, como resistores, diodos, leds e terminais de conexão para os sensores e para o fornecimento de tensão.

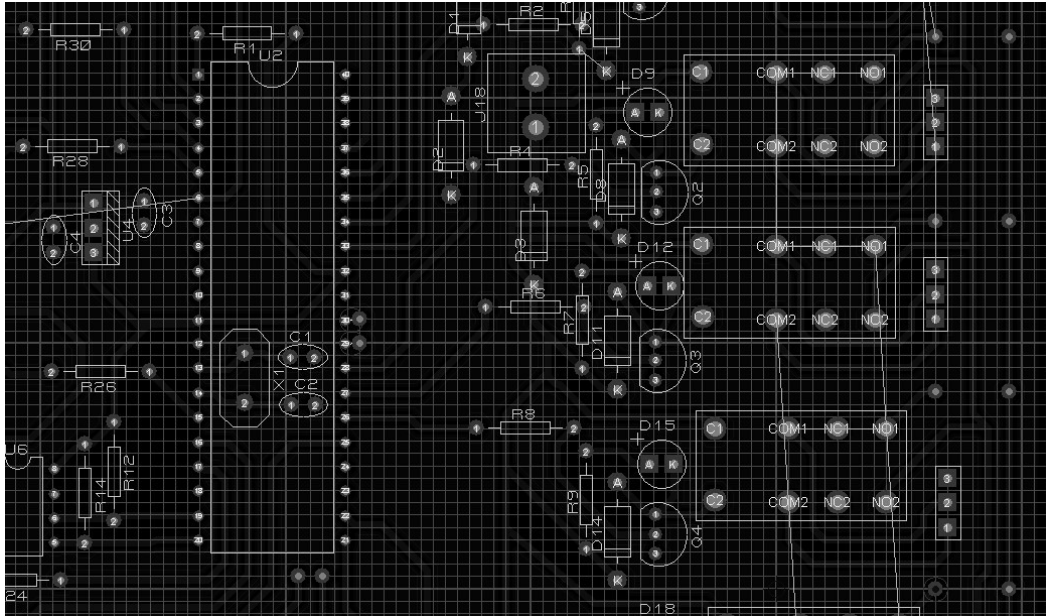
O circuito final foi formulado no ambiente de simulação Proteus (Figura 2), no qual também foi elaborado o layout da placa multiplexadora (Figura 3), que consistiu em organizar todos os componentes no menor espaço possível, mas sem comprometer o produto final. Em seguida, o circuito desenhado foi confeccionado numa placa de fenolite por meio de uma prototipadora modelo Protomat S63, que possui tecnologia CNC (controle numérico computadorizado) para produção de placas de circuito impresso (PCI).

Figura 2 – Circuito da placa multiplexadora simulado via Proteus



Fonte: Autor

Figura 3 – Esboço de circuito impresso desenhado por auxílio de computador



Fonte: Autor

## 5.2 Hardware da placa multiplexadora

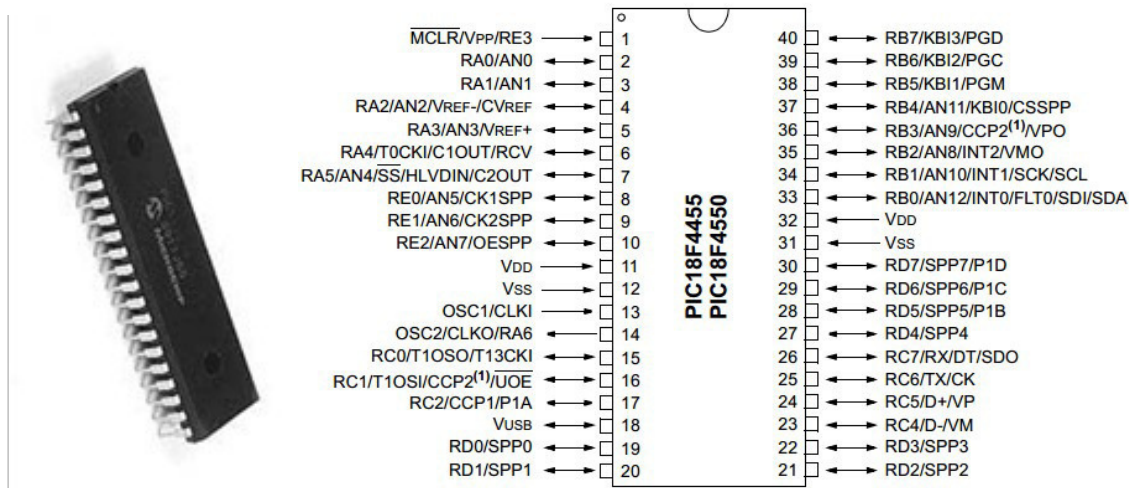
O microcontrolador é um sistema controlador de dados o qual necessita de um programa para realizar as leituras e processar os respectivos dados obtidos pelos sensores. Neste caso, os comandos e instruções são compilados, utilizando para isso um compilador em linguagem C, gerando como resultado um arquivo do tipo hexadecimal, conhecido como *firmware*. Como o microcontrolador possui componentes externos a ele, o mesmo precisa ser configurado para processar os sinais de entrada e saída de maneira automática. São estas informações que definem o funcionamento das portas de entrada e saída (I/O), bem como o seu tempo de resposta.

Paralelamente ao *hardware* foi desenvolvido o *firmware* (sistema operacional do microcontrolador) responsável por condicionar as funções do processamento da placa multiplexadora, que tem por objetivo coletar, de forma indireta, os dados de umidade do solo a partir de sensores capacitivos FDR (*Frequency Domain Reflectometry*). O algoritmo de controle utilizado na programação do microcontrolador foi desenvolvido em linguagem C por meio do compilador CCS Compiler 4.0 (Apêndice 1), que foi gravado diretamente no microcontrolador utilizando para isso o programador BEEPROG+.

O microcontrolador utilizado para o desenvolvimento da placa foi o PIC18F4550, que apresenta baixo custo e características adequadas para o funcionamento da placa. Possui

30 pinos de Entrada/Saída, 256 bytes de memória interna, 13 canais de conversão A/D de 10 bits e 4 *timers* internos. O PIC18F4550 e sua pinagem completa podem ser visualizados na Figura 4.

Figura 4 – Microcontrolador PIC18F4550 e a descrição da sua pinagem



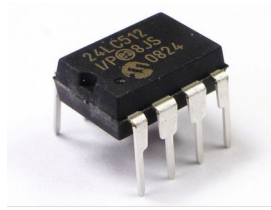
Fonte: Microchip Technology Inc. (2009)

O microcontrolador PIC18F4550 foi responsável pelo gerenciamento das principais operações realizadas no sistema de aquisição de dados multiplexado, principalmente no condicionamento dos sinais digitais brutos, obtidos dos sensores capacitivos, os quais foram convertidos em sinais digitais melhores para a leitura da memória. Após isso, os sinais digitais dos sensores eram recebidos para a contagem de pulsos ou medição de frequência.

A memória EEPROM 24LC512 (Figura 5) foi utilizada para o armazenamento exclusivo dos dados. Ela possui uma memória de 64x8 bits (512 Kbits), apagável eletricamente, capaz de funcionar em uma faixa de tensão de 2,5V a 6,5V, portanto tem um ótimo desempenho em comunicação e armazenamento de dados. Esta memória foi desenvolvida para aplicações avançadas de baixa potência, tais como comunicações pessoais e aquisição de dados, possuindo capacidade de gravação por página de até 128 bytes de dados (MICROCHIP TECHNOLOGY INC., 2010). Esta memória funciona como parte do sistema da placa, onde o microcontrolador tem o papel de mestre, isto é, realiza os comandos de alimentação e leitura dos sensores capacitivos por meio dos relés, enquanto a memória apenas armazena estes dados.



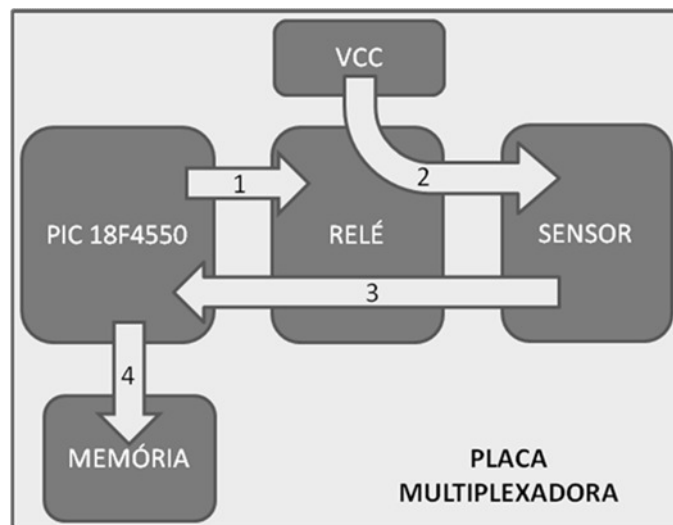
Figura 5 – Memória EEPROM 24LC512



Fonte: Microchip Technology Inc. (2010)

A placa multiplexadora é acionada com uma tensão de 12 VCC (tensão de corrente contínua) e o regulador de tensão 7805, por meio de adaptação com outros componentes, proporciona a tensão necessária para alimentação dos sensores capacitivos FDR, que é de 6,6 volts. A Figura 6 apresenta o diagrama da composição e processamento da placa multiplexadora de dados de umidade do solo.

Figura 6 – Diagrama de composição e processamento da placa multiplexadora



Fonte: Autor

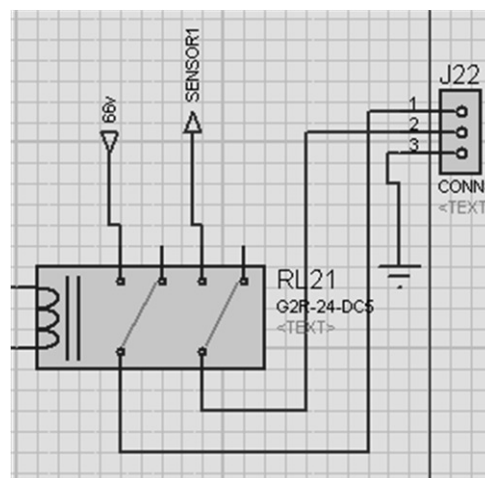
O relé ML2RC2 ficou responsável pela comutação da tensão de alimentação do sensor capacitivo e do seu sinal de resposta na placa multiplexadora. Este relé possui dois contatos reversíveis bifurcados e tensão nominal da bobina de 12VCC (Figura 7). Ao ser alimentado, uma corrente elétrica percorre a bobina ativando os seus contatos, os quais podem ser abertos, fechados ou comutados. No caso da placa multiplexadora, quando a corrente circula a bobina, os contatos ficam abertos para os pinos de alimentação e do sinal de resposta dos sensores capacitivos FDR, conforme esquema de conexão do relé (Figura 8).

Figura 7 – Relé ML2RC2 e o seu diagrama elétrico visto de baixo



Fonte: Metaltex (2014)

Figura 8 – Conexão do relé ML2RC2 na placa multiplexadora

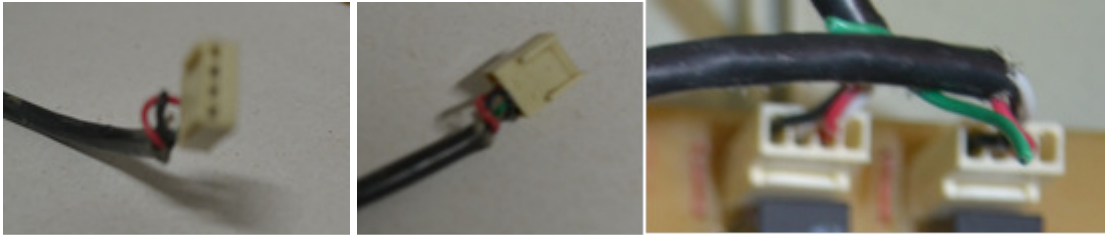


Fonte: Autor

A placa multiplexadora comporta ao todo 20 relés. Portanto, dependendo do número de sensores capacitivos conectados, um ciclo de leituras é consolidado adquirindo os dados de cada sensor de forma consecutiva. Esse procedimento garante que não haja nenhuma interferência na placa, pois os contatos abertos do relé acontecem para cada sensor capacitivo, enquanto os outros relés ficam fechados para o restante dos sensores.

Para a conexão dos sensores capacitivos FDR à placa multiplexadora foi utilizado o conector placa-cabo de 4 vias, sendo macho para a placa e fêmea para o sensor (Figura 9). Este tipo de conector facilita muito a conexão dos sensores à placa, pois evita o uso de conectores do tipo borne, que requerem que os sensores sejam aparafusados.

Figura 9 – Conector placa-cabo de 4 vias



Fonte: Autor

Os dados dos sinais digitais dos sensores capacitivos são gravados na memória EEPROM 24LC512 no formato hexadecimal e transferidos ao PC por meio do programador BEEPROM+. Portanto, os dados são guardados em uma pasta, formando um banco de memórias para serem analisadas. Neste caso, uma interface de leitura foi elaborada em Java para a tradução destes dados em extensão decimal (Figura 10), que são convertidos, através de um fator de conversão, em valores de frequência (kHz), que é a resposta fornecida pelo sensor capacitivo FDR. Os dados então são exportados e arquivados numa planilha do tipo Excel.

Figura 10 – Interface de obtenção e tradução dos dados da memória

| 01    | 02   | 03    | 04    | 05    | 06   |
|-------|------|-------|-------|-------|------|
| 11052 | 8482 | 10406 | 11719 | 13667 | 8339 |
| 11051 | 8480 | 10403 | 11716 | 13666 | 8338 |
| 11050 | 8479 | 10403 | 11713 | 13662 | 8338 |
| 11050 | 8478 | 10402 | 11711 | 13659 | 8338 |
| 11050 | 8477 | 10401 | 11709 | 13657 | 8338 |
| 11050 | 8476 | 10400 | 11707 | 13655 | 8338 |
| 11051 | 8475 | 10399 | 11706 | 13654 | 8338 |
| 11051 | 8472 | 10391 | 11705 | 13652 | 8335 |
| 11052 | 8469 | 10381 | 11704 | 13650 | 8334 |
| 11052 | 8465 | 10370 | 11704 | 13649 | 8334 |
| 11052 | 8461 | 10361 | 11702 | 13648 | 8334 |
| 11052 | 8458 | 10354 | 11702 | 13646 | 8333 |
| 11052 | 8456 | 10349 | 11702 | 13643 | 8332 |
| 11052 | 8454 | 10345 | 11702 | 13642 | 8331 |
| 11052 | 8453 | 10342 | 11701 | 13641 | 8331 |
| 11051 | 8451 | 10339 | 11700 | 13640 | 8330 |
| 11051 | 8449 | 10336 | 11700 | 13640 | 8330 |
| 11050 | 8446 | 10334 | 11698 | 13638 | 8329 |
| 11049 | 8444 | 10331 | 11697 | 13638 | 8329 |
| 11048 | 8442 | 10329 | 11695 | 13637 | 8329 |
| 11048 | 8440 | 10326 | 11694 | 13636 | 8329 |
| 11048 | 8438 | 10324 | 11693 | 13634 | 8328 |
| 11048 | 8436 | 10322 | 11692 | 13633 | 8327 |
| 11048 | 8434 | 10321 | 11692 | 13633 | 8327 |
| 11050 | 8434 | 10321 | 11692 | 13632 | 8326 |
| 11050 | 8433 | 10321 | 11693 | 13630 | 8325 |
| 11051 | 8434 | 10320 | 11694 | 13630 | 8325 |
| 11051 | 8434 | 10320 | 11694 | 13628 | 8324 |

Fonte: Autor

Para o fornecimento de energia à placa multiplexadora foi utilizada a bateria estacionária de 12 volts e 7 Ah, recarregável e constituída de chumbo, ácido sulfúrico e polipropileno, de fácil aquisição.

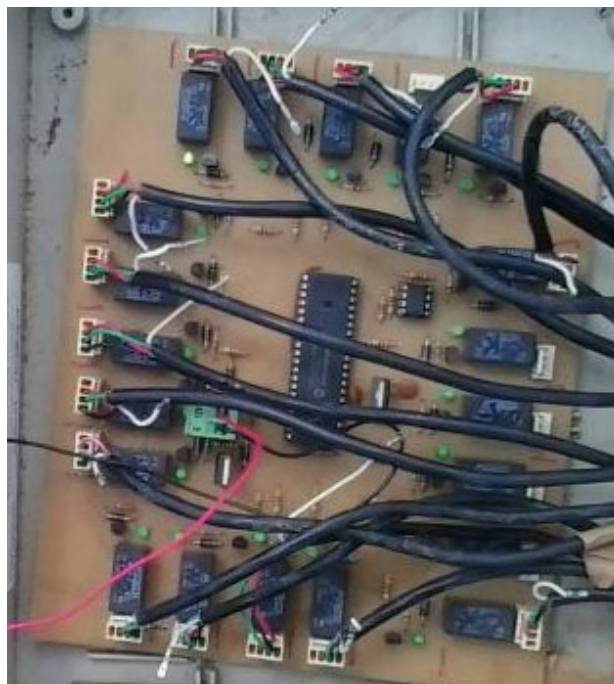
### 5.3 Teste do protótipo em laboratório

O princípio de funcionamento da placa multiplexadora é baseado na coleta dos dados de umidade do solo, com capacidade de adquirir dados de 20 sensores, em uma ordem estabelecida pelo programa gravado no PIC.

A placa multiplexadora foi projetada para funcionar, ao mesmo tempo, como multiplexador e um SAD, ou seja, ambas as funções se encontram na mesma placa, não necessitando acoplar dispositivos externos. A Figura 11 ilustra a placa multiplexadora de dados para medição da umidade do solo a partir das respostas dos sensores capacitivos de umidade FDR.

O ciclo de coleta da placa multiplexadora, ou seja, o tempo que a mesma leva para coletar as respostas dos sensores de forma sequencial é de 83 segundos. Devido a esta frequência a memória da placa multiplexadora consegue armazenar de forma ininterrupta por um período de 24 horas. A partir daí a memória passa a gravar os últimos dados por cima dos dados coletados anteriormente. A importância em se fazer um monitoramento contínuo é evidenciada pelas leituras dos sensores de umidade, que permitem diferenciar a variação temporal da umidade volumétrica nos períodos diurno e noturno, utilizando como parâmetro a redução da umidade nessas ocasiões (COELHO; OR, 1999).

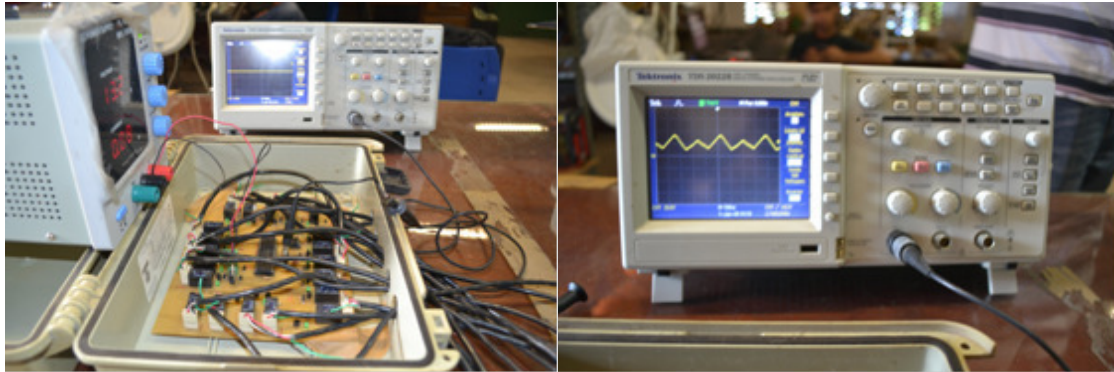
Figura 11 – Placa multiplexadora de dados de umidade do solo



Fonte: Autor

No laboratório foram realizados testes, com o auxílio de um osciloscópio, para avaliar o consumo de corrente com e sem os sensores conectados a placa multiplexadora (Figura 12).

Figura 12 – Banca de testes da placa multiplexadora realizada em laboratório



Fonte: Autor

Os sensores foram alimentados com um sinal positivo (6,6 V) e outro negativo. Optou-se pela utilização do osciloscópio pois o multímetro não consegue registrar queda de tensão ocasionada por algum tipo de interferência.

## 6 RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 6.1 Aferição da placa multiplexadora

A placa multiplexadora possui 20 canais de entrada digitais, com faixa de tensão adequada para medição dos sensores capacitivos FDR. A faixa de tensão de alimentação da placa é de 12 VCC, a mesma utilizada para os relés, podendo operar entre 11V a 16V. Os dois reguladores de tensão conseguiram transmitir a faixa de tensão adequada para o funcionamento da placa, sendo um responsável por alimentar o PIC18F4550 (5 V) e o outro por fornecer a tensão de alimentação dos sensores capacitivos (6,6 V).

O tempo de amostragem da placa é de 1 minuto e 23 segundos, onde nesse intervalo de tempo adquire as medidas de todos os sensores, ou seja, cada canal de entrada permanece ativo por aproximadamente 4,15 segundos. Devido a esta característica, a memória utilizada para armazenamento dos dados apontou um limite de gravação máximo de 1092 ciclos de leituras, correspondendo a 524160 bits, permanecendo dentro das suas especificações. Em outros termos, a memória da placa multiplexadora, com o ciclo atual de

coleta estabelecido em 83 segundos, suporta a gravação dos dados por um período aproximado de 25 horas.

A frequência de coleta da placa pode ser alterada no programa, inserido no PIC, de acordo com as necessidades da pesquisa. Contudo, neste trabalho foi adotado um limite mínimo de tempo, mas que se ajustassem às especificações do sensor de umidade. Este tempo é suficiente para ativar a tensão de alimentação do sensor capacitivo, realizar sua medição e transmitir sua leitura (CRUZ et al., 2010).

A corrente drenada em cada canal de entrada, sem a ativação dos sensores, é de 20 mA, mas ao acioná-los esse valor passa a ser de 100 mA. Este limite de consumo é mais baixo do que o *data logger* CR10X da Campbell Scientific utilizado no trabalho de Almeida (2012), onde os canais de entrada recebiam sinais do tipo pulsados, como anemômetros, pluviômetros, etc, com exigência de tensão menor que o sensor capacitivo, este que trabalha com tensão de 6,6V. A Tabela 1 apresenta as características da placa multiplexadora de dados.

Tabela 1 – Características da placa multiplexadora

| <b>Característica</b>               | <b>Descrição</b> |
|-------------------------------------|------------------|
| Tensão de alimentação               | 12 V             |
| Canais de leituras dos sensores     | 20               |
| Tempo de leitura sequencial*        | 83 s             |
| Tempo de leitura individual*        | 4,15 s           |
| Consumo de operação sem os sensores | 20 mA            |
| Consumo de operação com os sensores | 100 mA           |
| Capacidade da memória               | 524280 bits**    |

\* O intervalo de tempo pode ser alterado no código

\*\* Considerando 1092 ciclos de leituras

## **6.2 Multiplexador no sistema de medição de umidade do solo pelos sensores capacitivos**

Os dados coletados pela placa multiplexadora foram avaliadas de modo a conferir o desempenho da mesma em armazenar os dados sem interferir no valor do sinal de resposta emitido pelo sensor capacitivo FDR, em um intervalo de tempo adequado, buscando também averiguar se não houve falhas ao longo das coletas. A seguir, serão exibidos e discutidos os valores de umidade do solo em relação aos dados coletados.

As Figuras 13, 14 e 15 apresentam os dados de umidade do solo obtidas das leituras dos sensores instalados no solo para as camadas 1, 2 e 3, respectivamente, durante um período de 11 dias de coletas. No eixo das abscissas encontram-se os registros de coletas realizadas pelo multiplexador, ou seja, representa o número de ciclos de coletas feitas pela placa. Lembrando que um ciclo de coleta da placa grava as medições de todos os 15 sensores neste intervalo de tempo. No eixo 1 das ordenadas estão disponíveis os valores de umidade volumétrica do solo em  $\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$ , e no eixo 2 das ordenadas encontram-se os tempos de irrigação efetuados em um cultivo de melancia, cujos dados foram adquiridos pelo autor do trabalho, onde o mesmo definiu os ciclos de irrigação com base no manejo estabelecido em sua pesquisa.

Figura 13 – Valores de umidade do solo da 1ª camada coletados durante 11 dias

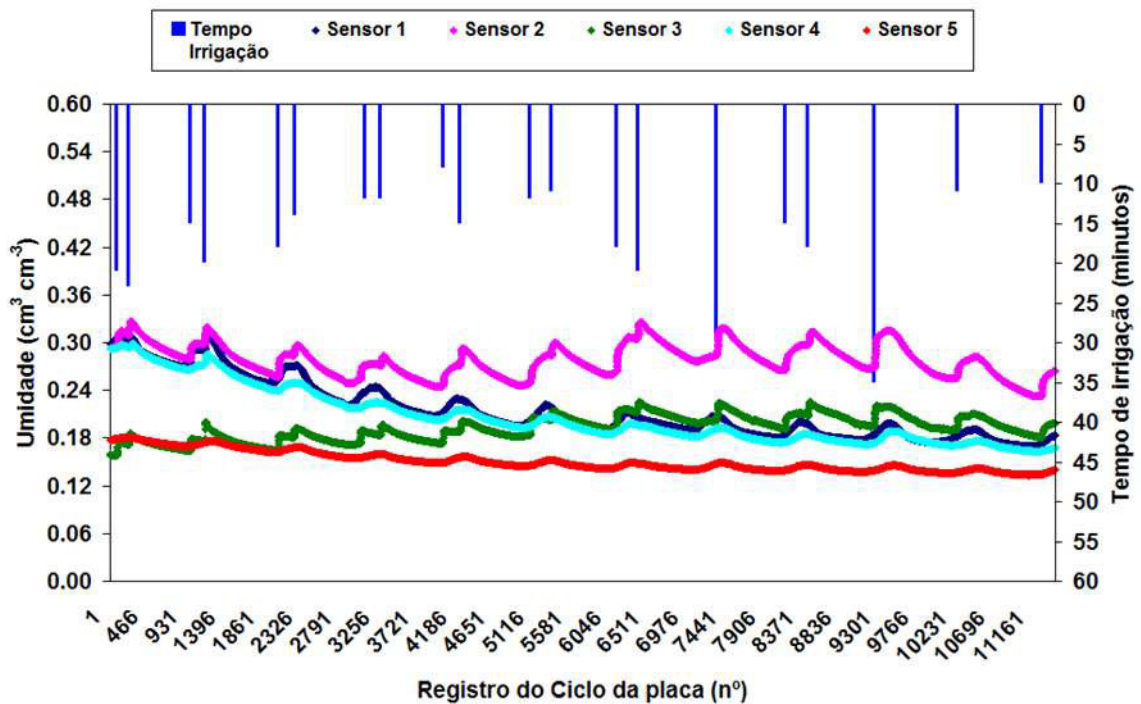


Figura 14 - Valores de umidade do solo da 2ª camada coletados durante 11 dias

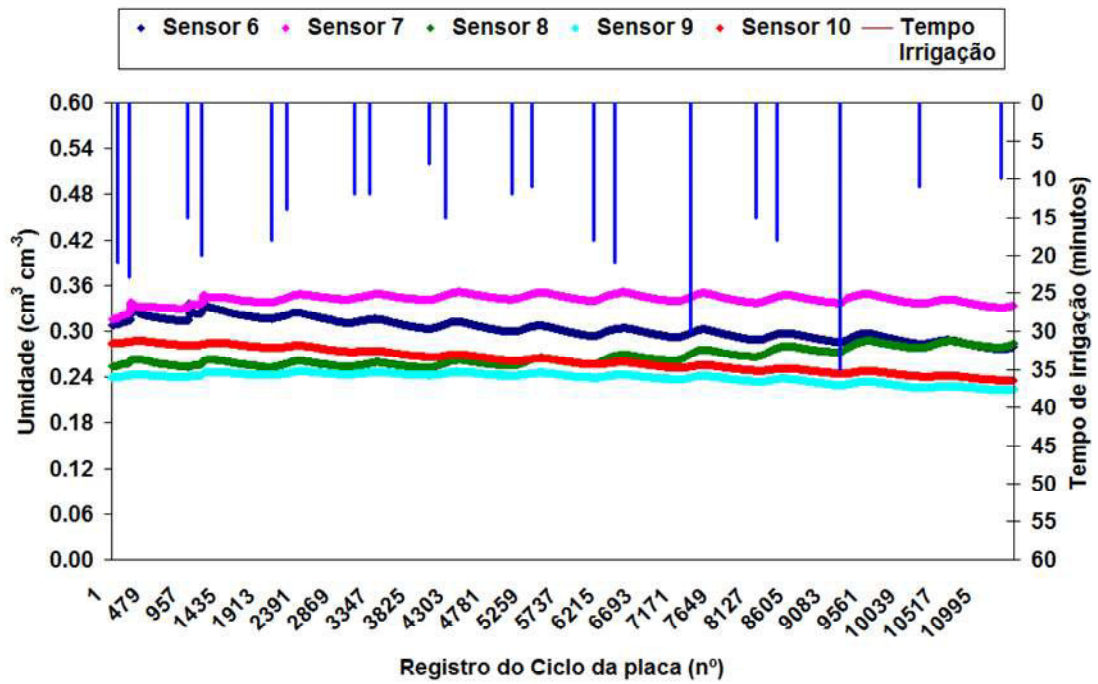
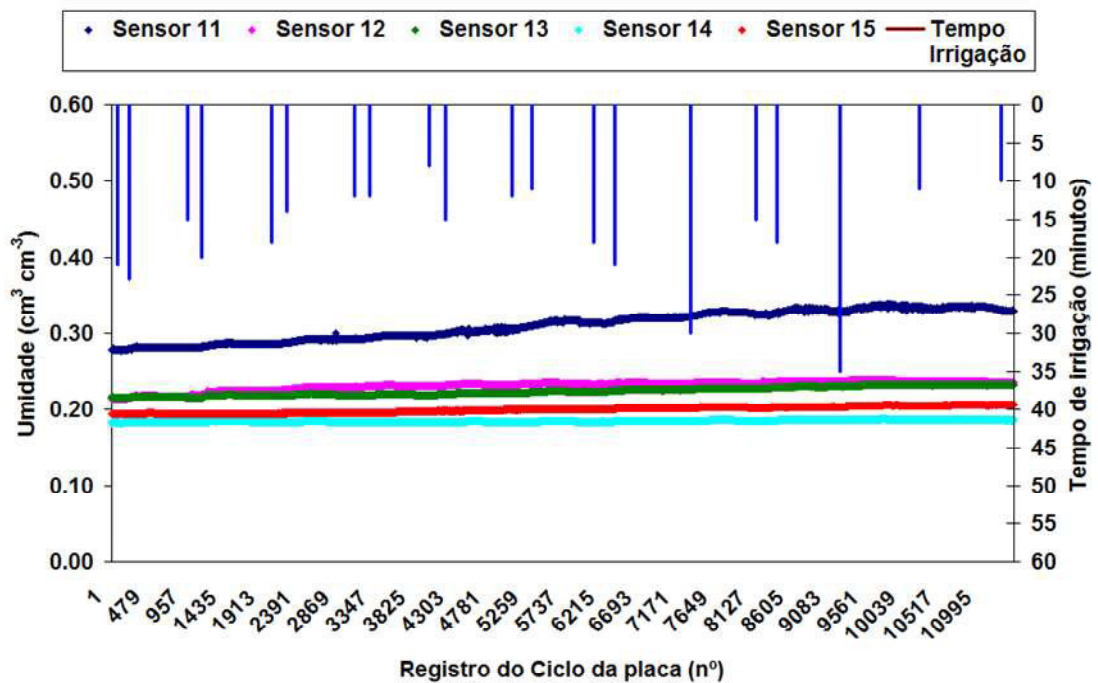


Figura 15 - Valores de umidade do solo da 3ª camada coletados durante 11 dias





Observe que os sensores 2, 3, 7 e 8 das Figuras 13 e 14 seguiram a mesma tendência, isto é, durante todo este intervalo de tempo os valores de umidade volumétrica se elevaram com o tempo. O contrário aconteceu com o restante dos sensores. Isso se deve a instalação destes sensores, pois os mesmos encontram-se abaixo do emissor, onde há maior concentração de umidade do solo devido a formação do bulbo molhado (Ver Figura 19 do Capítulo 2).

Na Figura 15 o que se observa é a ascensão dos valores de umidade provenientes das leituras do sensor 11. Além dele, os sensores 12 e 13 também apresentaram acréscimos de umidade, entretanto de forma menos expressiva. Todos estes sensores se encontram na última profundidade (36 cm). A característica da 3ª camada é que os valores de umidade se mantiveram mais estáveis durante este intervalo de tempo. Fato comum, pois os tempos de irrigação, que não ultrapassavam 30 minutos, proporcionavam maiores oscilações do conteúdo de água nas duas primeiras camadas.

Os dados indicam ainda que o fluxo de água no solo está sendo direcionado e se concentrando na parte mais a esquerda do emissor. Esta situação está melhor detalhada no capítulo 2 que trata sobre a avaliação do bulbo molhado.

Os valores de umidade do solo durante o período estudado apresentaram grande variação na camada que fica a 10 cm de profundidade e tiveram um comportamento relativamente constante nas camadas mais profundas. A dinâmica da água na camada superficial se deve às perdas por evapotranspiração e também devido à extração de água pelas raízes da cultura.

A placa multiplexadora permite coletar dados de acordo com o ciclo da cultura ou com o propósito do experimento. Mostrou-se muito robusta coletando vários dados ao longo do perfil do solo, garantindo o monitoramento mais apurado do conteúdo de água e o seu comportamento com relação às propriedades físicas do solo.

## 7 CONCLUSÕES

O protótipo montado para este trabalho mostrou-se, durante os ensaios práticos, capaz de adquirir os sinais dos sensores capacitivos FDR com uma rápida frequência de coleta.

Com relação ao experimento prático, a placa multiplexadora mostrou-se eficiente para realizar as aquisições de dados de umidade do solo, utilizando os sensores capacitivos FDR, apresentando versatilidade e robustez contra as intempéries climáticas, funcionando durante todo o período da pesquisa, isto é, aproximadamente 40 dias.

A placa multiplexadora permite coletar dados em longos períodos e consome pouca energia quando comparado aos existentes no mercado, tornando-a uma alternativa de baixo custo para o desenvolvimento de trabalhos que necessitem coletar vários dados.

Sua grande vantagem é a multiplexação e a aquisição de dados de sensores capacitivos FDR em uma mesma plataforma, permitindo taxas de amostragens efetivas.

## REFERÊNCIAS

- ALMEIDA, S. S. **Sistema de aquisição de dados para leituras analógicas de tensão utilizando um microcontrolador pic (interface controladora de periféricos)**. 2012. 66 f. Dissertação (Mestrado em Irrigação e Drenagem) – Universidade Federal Rural do Semi-Árido, Mossoró, 2012.
- BASTOS, A. **Instrumentação, Eletrônica Analógica e Digital**. Rio de Janeiro RJ, 2002, 360p.
- IN SITU Instrument AB. Price list Campbell Scientific Products. November, 2014. Disponível em: <http://manualzz.com/doc/1653539/price-list-for-campbell-scientific-products>
- CANAFÍSTULA, F. J. F. **Desenvolvimento e implementação de uma estação agrohidrometeorológica automática e sensores ambientais**. 2013. 140 f. Tese (Doutorado em Engenharia Agrícola) – Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2013.
- COELHO, E. F.; OR, D. **Modelo de distribuição da água e de potencial matricial no solo sob gotejamento com extração de água por raízes**. Pesquisa Agropecuária Brasileira, Brasília, v. 34, n.2, p.225-234, 1999.
- CRUZ, T. M. L.; TEIXEIRA, A. S.; CANAFÍSTULA, F. J. F.; SANTOS, C. C.; OLIVEIRA, A. D. S.; DAHER, S. Avaliação de sensor capacitivo para o monitoramento do teor de água do solo. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v.30, n.1, p.33-45, 2010.
- HELFRICK, A. D.; COOPER, W. D. **Instrumentação, Eletrônica Moderna e Técnicas de Medição**. Rio de Janeiro RJ, 1994. 324p
- INAMASU, R. Y.; BERTUCC, I. V.; FERREIRA, W. S.; SOTTO, C. A. B.; TORRE NETO, A. NAIME, J. M.; RABELLO, L. M.; CRUVINEL, P. E.; BERNARDES FILHO, R.; HERMMANN JUNIOR, P. S.; VAZ, C. M. P. Sistema de informação em elementos de aquisição de dados para ambiente agropecuário. **Embrapa Instrumentação Agropecuária**, São Carlos, SP, n. 10, 8 p., 1996.
- PALMIERI, A. M.; SILVEIRA, L. R.; MIRANDA, J. H.; MIRANDA, K. O. S. Sistema automatizado para coleta de dados de umidade relativa e temperatura do ar. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v.34, n.4, p.636-648, 2014.
- QUEIROZ, T. M. **Desenvolvimento de um sistema automático para irrigação de precisão em pivô central**. 2007. 141 f. Tese (Doutorado em Irrigação e Drenagem) – Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2007.
- ROCHA NETO, O. C.; TEIXEIRA, A. S.; CANAFÍSTULA, F. J. F.; SOUZA, F. N. P.; NUNES FILHO, J. L. N. **Utilização de uma grade de sensores para determinação do bulbo úmido**. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA AGRÍCOLA, 38., 2009, Juazeiro (BA)/Petrolina (PE). *Anais...* Juazeiro (BA)/Petrolina (PE): Associação Brasileira de Engenharia Agrícola, 2009. 1 CD-ROM.
- STAFFORD, J. V. Implementing precision agriculture in the 21<sup>st</sup> century. **Journal Agric. Engng Res**. V.76, p.267-275, 2000.

TAYLOR, H. R. **Data acquisition for sensor systems**. London: Chapman & Hall, 1997.

VOLTAN, D. S. **Desenvolvimento de um sistema computacional para monitoramento de parâmetros físicos na área de irrigação, com base na plataforma labview**. 2012. 127 f. Dissertação (Mestrado em Irrigação e Drenagem) – Universidade Estadual Paulista, Botucatu, 2012.

## APÊNDICE A – ALGORITMO DE CONTROLE IMPLEMENTADO NO MICROCONTROLADOR.

```

//#include <eeprom.h>
#define EEPROM_SDA PIN_D1
#define EEPROM_SCL PIN_D0

#include "24512.c"

#define S1 PIN_A0
#define S2 PIN_B4
#define S3 PIN_B3
#define S4 PIN_B2
#define S5 PIN_B1

#define S6 PIN_B0
#define S7 PIN_D5
#define S8 PIN_D4
#define S9 PIN_C7
#define S10 PIN_D3

#define S11 PIN_D2
#define S12 PIN_D6
#define S13 PIN_D7
#define S14 PIN_C6
#define S15 PIN_C1

#define S16 PIN_C2
#define S17 PIN_C0
#define S18 PIN_A3
#define S19 PIN_A2
#define S20 PIN_A1

#define LED_AMARELO PIN_B1
#define LED_VERDE PIN_B3
#define LED_VERMELHO PIN_B2

int32 cont = 0;
int16 rtc = 0;

#int_RTCC
void RTCC_isr(void)
{
    cont++;
}

int16 tempo;

int16 le_sensor1(void) {
    delay_ms(1000);

```

```

set_timer0(0);
rtc = 0;

//Ativa sensor 1
enable_interrupts(INT_RTCC);

delay_ms(20);

disable_interrupts(INT_RTCC);
rtc = get_timer0();

return rtc;

void escreve_memoria(int16 endereco, int dado) {
    int status;
    i2c_start();

    i2c_write(0b10100000);

    i2c_write(make8(endereco,1));
    i2c_write(make8(endereco,0));

    i2c_write(dado);
    i2c_stop();

    i2c_start();
    status = i2c_write(0b10100000);
    while(status == 1)
    {
        i2c_start();
        status = i2c_write(0b10100000);
    }
    i2c_stop();
}

void main()
{
    int16 contador;
    int16 endereco = 0, i;

    setup_adc_ports(NO_ANALOGS|VSS_VDD);
    setup_adc(ADC_OFF);
    setup_psp(PSP_DISABLED);
    setup_spi(SPI_SS_DISABLED);
    setup_wdt(WDT_OFF);

    setup_timer_0(RTCC_EXT_L_TO_H|RTCC_DIV_8);

```

```
setup_timer_1(T1_EXTERNAL|T1_DIV_BY_1);
setup_timer_2(T2_DISABLED,0,1);
setup_timer_3(T3_DISABLED|T3_DIV_BY_1);

setup_comparator(NC_NC_NC_NC);
setup_vref(FALSE);

enable_interrupts(GLOBAL);
init_ext_eeprom();

while(1) {

    /******* Lê Sensor *****/
    output_high(S1);

    contador = le_sensor1();

    //Gravar na memória
    WRITE_EXT_EEPROM(endereco, 1);
    endereco++;
    WRITE_EXT_EEPROM(endereco, make8(contador,1)); //Grava o MSB
    endereco++;
    WRITE_EXT_EEPROM(endereco, make8(contador,0)); //Grava o LSB
    endereco++;

    output_low(S1);
    /*******//
```

## **8 UTILIZAÇÃO DA REFLECTOMETRIA NO DOMÍNIO DE FREQUÊNCIA (FDR) NA AVALIAÇÃO DO BULBO ÚMIDO DO SOLO**

Tendo em vista a escassez dos recursos hídricos atualmente, é muito importante adotar estratégias de monitoramento do conteúdo de água no solo para melhorar a eficiência do uso da água em sistemas agrícolas. Entre os tipos de irrigações mais utilizados no país, o sistema por gotejamento é o que mais se expandiu na agricultura irrigada devido a sua eficiência de aplicação de água. Apesar desta vantagem novos conceitos devem ser empregados para que os sistemas de irrigação sejam dimensionados de modo a melhorar o uso da água e de forma racional.

Atualmente muitas técnicas são utilizadas para promover o uso eficiente da água destinada à agricultura, mas não se sabe qual delas é a melhor para garantir uma produção sustentável com custos baixos sem que haja desperdício. Mas, independente de qual método ou técnica que deve ser empregada, é necessário considerar a difícil compreensão ao avaliar o movimento de água no solo, pois o sistema solo-água-planta é muito complexo, e qualquer que seja a tecnologia aplicada contribuirá para aumentar a eficiência no uso da água, pois o decréscimo deste recurso é realmente um fato promulgado.

Para que um sistema de irrigação seja dimensionado de forma mais eficiente, no caso específico deste trabalho o método por gotejamento, é necessário conhecer a vazão do sistema e o comportamento da distribuição da água no solo. A finalidade é dimensionar o sistema de irrigação que destine a quantidade de água suficiente para a capacidade de campo e que atenda a demanda pelas plantas com o volume de água propício a distribuição do sistema radicular. No entanto, se não forem utilizadas técnicas adequadas de manejo de irrigação que visem o racionamento de água e o aumento na produtividade, os altos investimentos aplicados para o sistema de irrigação não serão compensados (COELHO et al., 1999).

Assim, o objetivo deste capítulo foi avaliar a formação do bulbo úmido no solo utilizando sensores capacitivos FDR para estimar as dimensões e velocidade da frente de umedecimento no perfil do solo irrigado por gotejamento.



## 9 REVISÃO DE LITERATURA

A avaliação do bulbo molhado, formado pelo emissor de um gotejador, no perfil de um solo é de fato um procedimento importante quando o objetivo é determinar o dimensionamento do sistema de irrigação e outros atributos, como o espaçamento entre emissores, evitando perdas de água por percolação e superposição exagerada de emissores (WIENS, 2002).

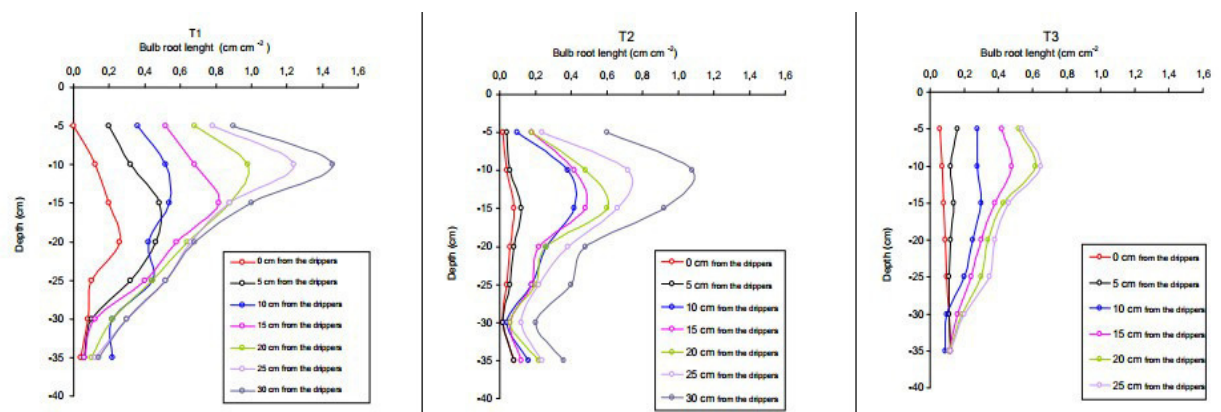
Para o monitoramento da umidade do solo, bem como a determinação da dinâmica da água na formação do bulbo molhado, é necessário o uso de equipamentos que forneçam esses parâmetros em tempo de resposta muito rápido. Neste caso, utilizam-se sensores de umidade, uma vez que possibilita a instalação no perfil do solo na forma de um *grid*, resultando em uma matriz de valores de umidade do solo a partir do ponto onde se encontra o emissor do gotejador, e a interpretação desta matriz é alcançada por meio de imagens processadas com softwares específicos, resultando em uma representação bidimensional da umidade volumétrica, podendo ser segmentadas em classes ou escalas de cores (MATA et al., 2006). Este tipo de procedimento demonstra que existem oportunidades para melhorar o desempenho de sistemas de irrigação localizada, ajustando projetos de sistemas e estratégias de gestão para explicar as diferenças nas propriedades hidráulicas do solo, utilizando para isso simulações do movimento vertical e da frente de molhamento que ocorre no perfil do solo (ELMALOGLU; DIAMANTOPOULOS, 2007).

Uma vez estabelecida a projeção do bulbo úmido no solo se torna fácil a instalação dos sensores, pois estes poderão originar dados mais confiáveis. O bulbo úmido deve atingir o limite de profundidade efetiva das raízes e se a irrigação não for suficiente para atingir esta profundidade, a mesma deve continuar. Por isso a necessidade de mais de uma irrigação no perfil do solo para se avaliar a formação do bulbo úmido, pois apenas um período de irrigação não esclarece a delimitação do mesmo (BARRETO et al., 2008). O importante para o uso dessas relações é estabelecer a largura em função da profundidade que se deseja molhar, pois os dados do formato do bulbo úmido são importantes tanto para o dimensionamento como para o manejo do sistema de irrigação por gotejamento, uma vez que permite prever o volume do solo molhado conhecendo-se o volume de água a ser aplicado, a profundidade a ser umedecida e os dados de umidade atual e na capacidade de campo (LEVIEN et al., 2010).

A região do bulbo úmido interfere diretamente no desenvolvimento do sistema radicular das plantas. Com base nessas características, Pires et al. (2011) realizaram um

trabalho para avaliar o efeito de diferentes configurações da irrigação localizada testando uma, duas e quatro linhas gotejadoras por plantio. Os autores observaram que ocorreu uma maior concentração de raízes na região do bulbo úmido no tratamento que continha apenas uma linha gotejadora (Figura 16).

Figura 16 – Comprimento médio da raiz no bulbo úmido em diferentes profundidades e distâncias de gotejadores em (T1) uma linha gotejadora, (T2), duas linhas gotejadoras e (T3) quatro linhas gotejadoras por linha de plantio em laranjeira



Fonte: Pires et al. (2011)

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), uma vez que o volume molhado do solo está em função da vazão do emissor e do tempo de aplicação da água, mas a formação do bulbo úmido pode ser muito semelhante mesmo em diferentes tipos de solos (MAIA, 2010). Em solos arenosos, por exemplo, é perceptível a influencia da vazão do emissor na formação do bulbo úmido, pois um aumento na vazão do emissor resulta em acréscimo no movimento horizontal em detrimento do movimento vertical para um mesmo tipo de solo e um mesmo volume de água aplicado (TOLENTINO JÚNIOR et al., 2014).

O método da trincheira é o mais utilizado para determinação das dimensões do bulbo úmido, mas também o mais trabalhoso e, além disso, este método precisa ser realizado em período secos do ano, o que inviabiliza sua prática constante (SATO, 2012). Contudo, o

uso de sensores de umidade ganhou preferência para realizar as medições do bulbo úmido no solo, uma vez que, o monitoramento da dinâmica da água no solo se torna mais preciso quando são exigidas maiores quantidades de pontos de medições no perfil do solo, independente das condições ambientais (ELAIUY, 2012).

A aferição da distribuição da água em um perfil de solo por meio de sensores FDR pode trazer resultados importantes com relação ao comportamento do fluxo de água no solo, sendo um método bastante adequado em sistemas de irrigação, contribuindo no monitoramento minucioso do comportamento da frente de umedecimento e formação do bulbo molhado, auxiliando técnicos e produtores na tomada de decisão a cerca do dimensionamento e manejo da irrigação (KUNZ; ÁVILA; PETRY, 2014). Entretanto, os sensores capacitivos são muito influenciados pela densidade do solo e também pela textura e condutividade elétrica do solo. Em áreas intensamente cultivadas, onde a compactação do solo se sobressai, há chances maiores de encontrar variabilidades na densidade do solo, pois a macroporosidade pode diminuir e conseqüentemente reduzir a taxa de infiltração da água, repercutindo em valores maiores de umidade volumétrica (SILVA et al., 2008).

O padrão de formação do bulbo úmido no solo também pode fornecer informações pertinentes sobre a zona efetiva do sistema radicular. Por exemplo, a extração de água no solo pode ser feita pela diferença entre o pico de maior demanda pela cultura, na zona radicular efetiva, até o momento de secagem que antecede o ponto de murcha permanente (MATA et al., 2006).

Mesmo que utilize poucos pontos de monitoramento no perfil do solo pelos sensores, os resultados dão suporte para identificar as regiões de maior extração de água pelas raízes. Estas informações auxiliam na determinação da quantidade de água que deve ser aplicada, bem como definir os pontos para o melhor monitoramento de água do solo pelos sensores de umidade, além também da utilidade em estudos de distribuição de solutos via água de irrigação, uma vez que a absorção de água e nutrientes pela planta ocorre ao mesmo tempo (COELHO; OR, 1999).

## 10 MATERIAL E MÉTODOS

### 10.1 Sensores capacitivos FDR

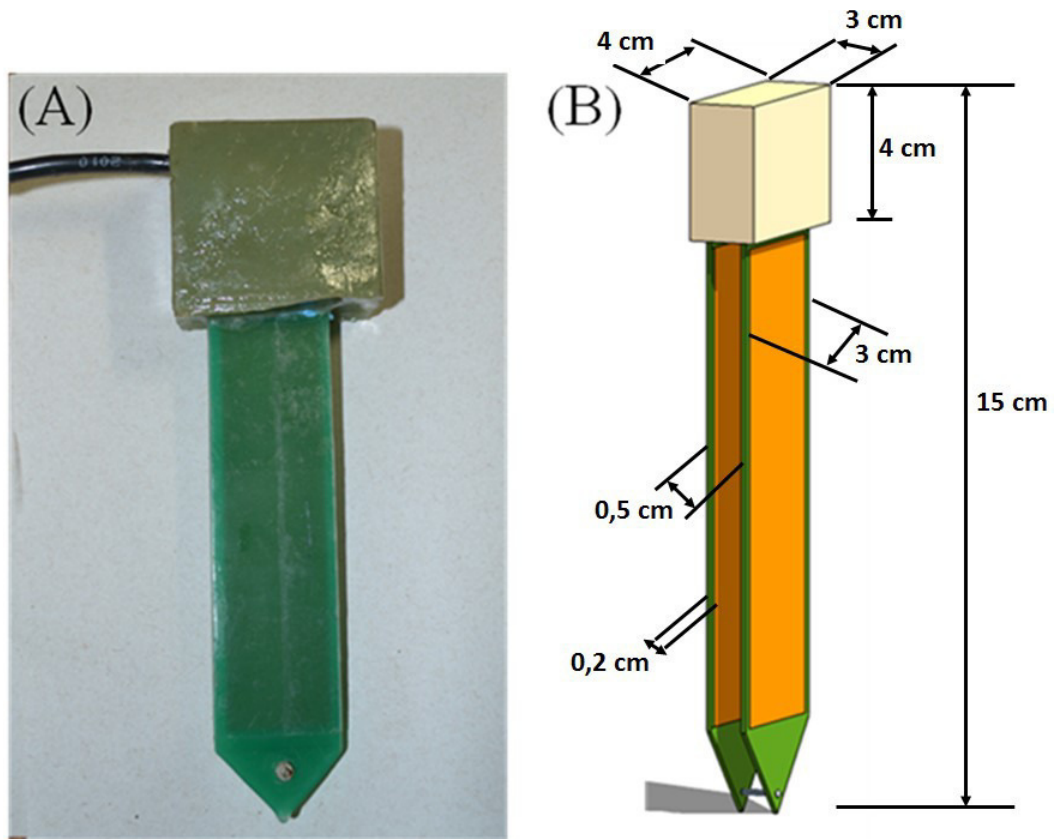
O trabalho foi conduzido em uma área experimental cultivada por melancia próximo ao Laboratório de Hidráulica e Irrigação do Departamento de Engenharia Agrícola pertencente a Universidade Federal do Ceará (UFC), em Fortaleza, CE, com latitude  $3^{\circ} 44' S$ , longitude  $38^{\circ} 33' W$  e altitude 19,5 m. O solo da área foi classificado como Podzólico Vermelho-Amarelo de textura franco-argilo-arenosa (BEZERRA; OLIVEIRA, 1999).

Os sensores utilizados para medir a umidade do solo seguem o princípio de Reflectometria no Domínio de Frequência (FDR) e foram desenvolvidos no Laboratório de Eletrônica e Mecânica Agrícola (LEMA) pertencente a UFC, e denominados de sensores capacitivos FDR. Este princípio fornece uma estimativa do teor de água com base na variação de frequência de um sinal propagado através do solo em função das propriedades dielétricas que compõem o perfil do solo, apresentando um valor específico denominado de constante dielétrica. Enquanto que o valor da constante dielétrica da água é de  $81 \text{ F m}^{-1}$  (Faraday por metro), as partículas sólidas possuem um valor máximo de  $5 \text{ F m}^{-1}$ . Essa grande diferença de magnitude entre a água e as partículas do solo favorece o monitoramento contínuo da umidade do solo, pois pequenas modificações no conteúdo de água podem ocasionar mudanças significativas nas propriedades dielétricas do solo avaliado.

Devido a sua praticidade, o sensor capacitivo FDR é um ótimo equipamento para ser utilizado em experimentos de pesquisa, e com o avanço da eletrônica está se tornando a opção mais indicada para os produtores que desejam realizar manejo de irrigação de forma precisa e confiável (SILVA et al., 2008). A eficiência do sensor capacitivo FDR foi avaliada por Cruz et al. (2010), revelando ser promissor e que o mesmo é eficiente para monitorar a umidade do solo em tempo real.

O sensor capacitivo FDR foi confeccionado em placas de circuito impresso encapsulado em material composto de resina industrial (Figura 17 A). Suas placas são posicionadas paralelamente a 0,5 cm de distância, definindo os eletrodos do capacitor, apresentando espessura, largura e tamanho aproximados de 0,2 cm, 3 cm e 15 cm, respectivamente (Figura 17 B). Este sensor é composto por um oscilador, cuja frequência é definida pelo capacitor, susceptível a variação do dielétrico, e por um resistor fixo de  $10\text{k}\Omega$ . A área da placa que constitui o campo elétrico é de  $25,48 \text{ cm}^2$ .

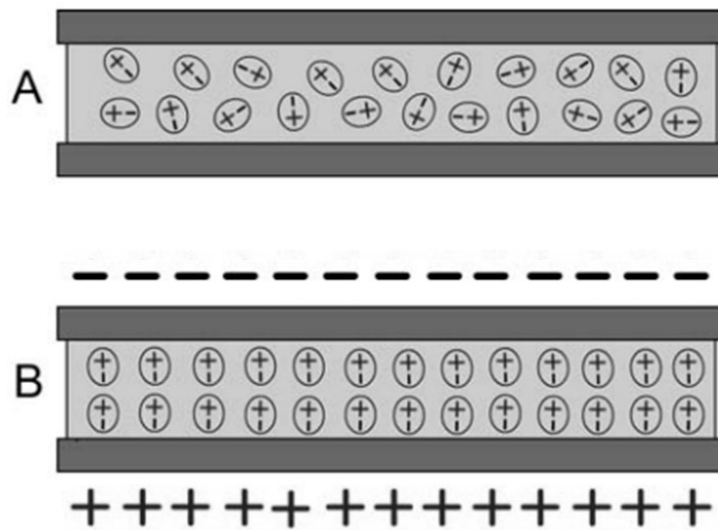
Figura 17 – Sensor capacitivo FDR (A) e seu desenho esquemático (B)



Fonte: Autor

O dielétrico é o material que não conduz ou conduz pouca corrente elétrica. Mas, apesar de conduzir pouca corrente elétrica, os materiais dielétricos que contêm moléculas polares, no caso a água, quando sob a ação de um campo elétrico sofrem polarização. Ao se colocar um material dielétrico bipolar entre as placas de um sensor capacitivo de placas paralelas ocorre um incremento na capacitância (quantidade de energia elétrica acumulada para uma dada tensão), isso porque o campo elétrico polariza as moléculas de água, ocorrendo aumento de carga no capacitor (SILVA et al., 2008). A Figura 18 ilustra o ordenamento e o aumento de cargas próximo às duas placas do capacitor.

Figura 18 – Esquema ilustrativo da distribuição desordenada das moléculas de água (A) e após a polarização (B)



Fonte: Silva et al. (2008)

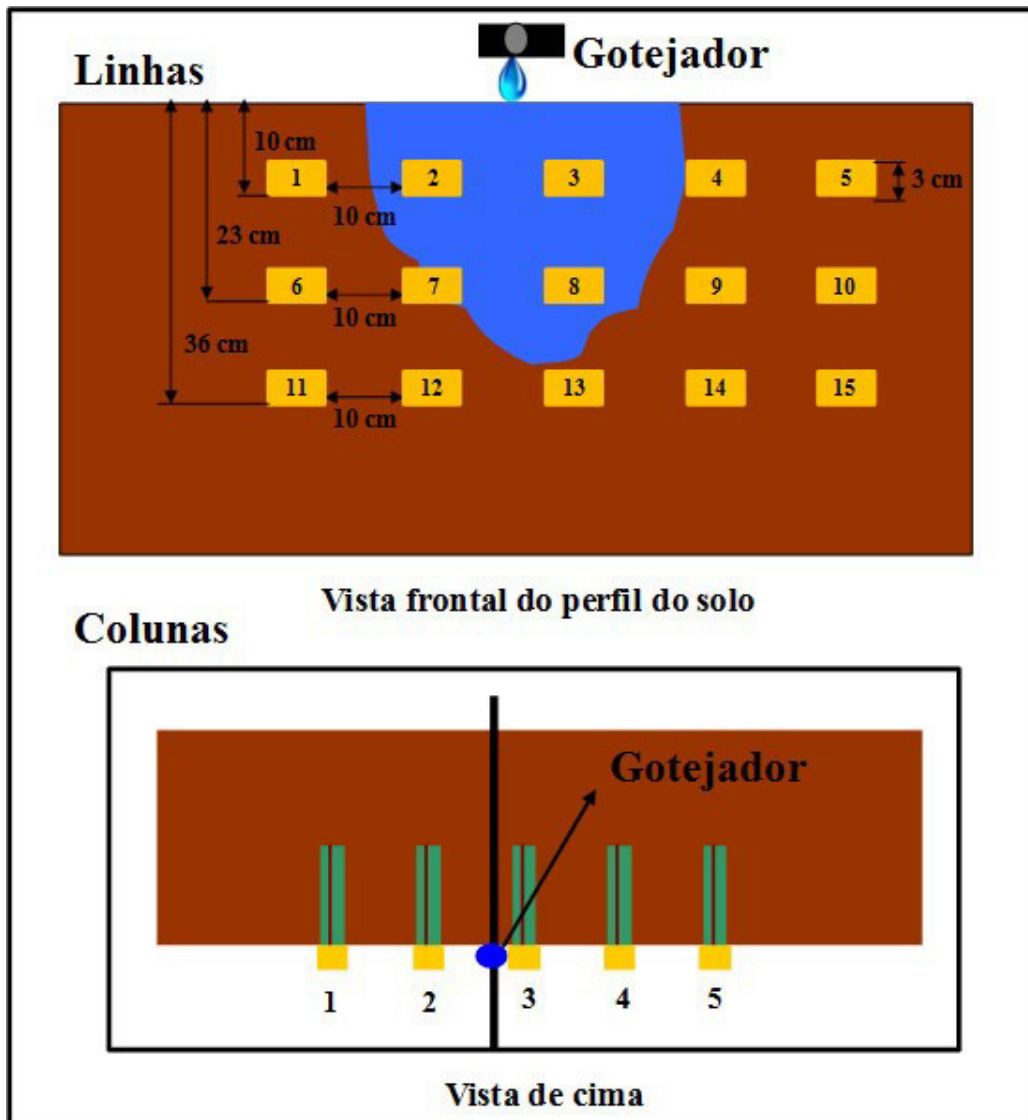
Os materiais dielétricos variam quanto a sua capacidade de serem polarizados por um campo elétrico. Isto é descrito pela permissividade do meio ( $\epsilon$ ). A constante dielétrica ( $K$ ) é um índice que expressa a permissividade do meio em relação à permissividade do vácuo ( $\epsilon_0$ ). Portanto,  $K = \epsilon/\epsilon_0$ . Logo, para o vácuo  $K = 1$ .

No ar,  $K$  é praticamente igual a do vácuo, isto é, igual a 1. Em um solo seco,  $K$  normalmente varia de 2 a 5, enquanto para água seu valor é de aproximadamente 81. No solo a constante  $K$  medida é denominada de constante dielétrica aparente ( $K_a$ ). Portanto, a grande diferença no valor de  $K_a$  com a presença de água permite a determinação indireta da umidade volumétrica do solo.

## 10.2 Montagem da malha de sensores

A partir de uma malha de sensores instalada no perfil do solo foi possível coletar dados de umidade para estimar o bulbo úmido. A Figura 19 ilustra o esquema das vistas frontal e de perfil e a identificação da posição de cada sensor instalado no solo. Foram utilizados 15 sensores capacitivos FDR, espaçados de 10 cm, e conectados a um multiplexador, sendo este alimentado por duas baterias em paralelo que foram carregadas diariamente por meio de um painel fotovoltaico (Figura 20).

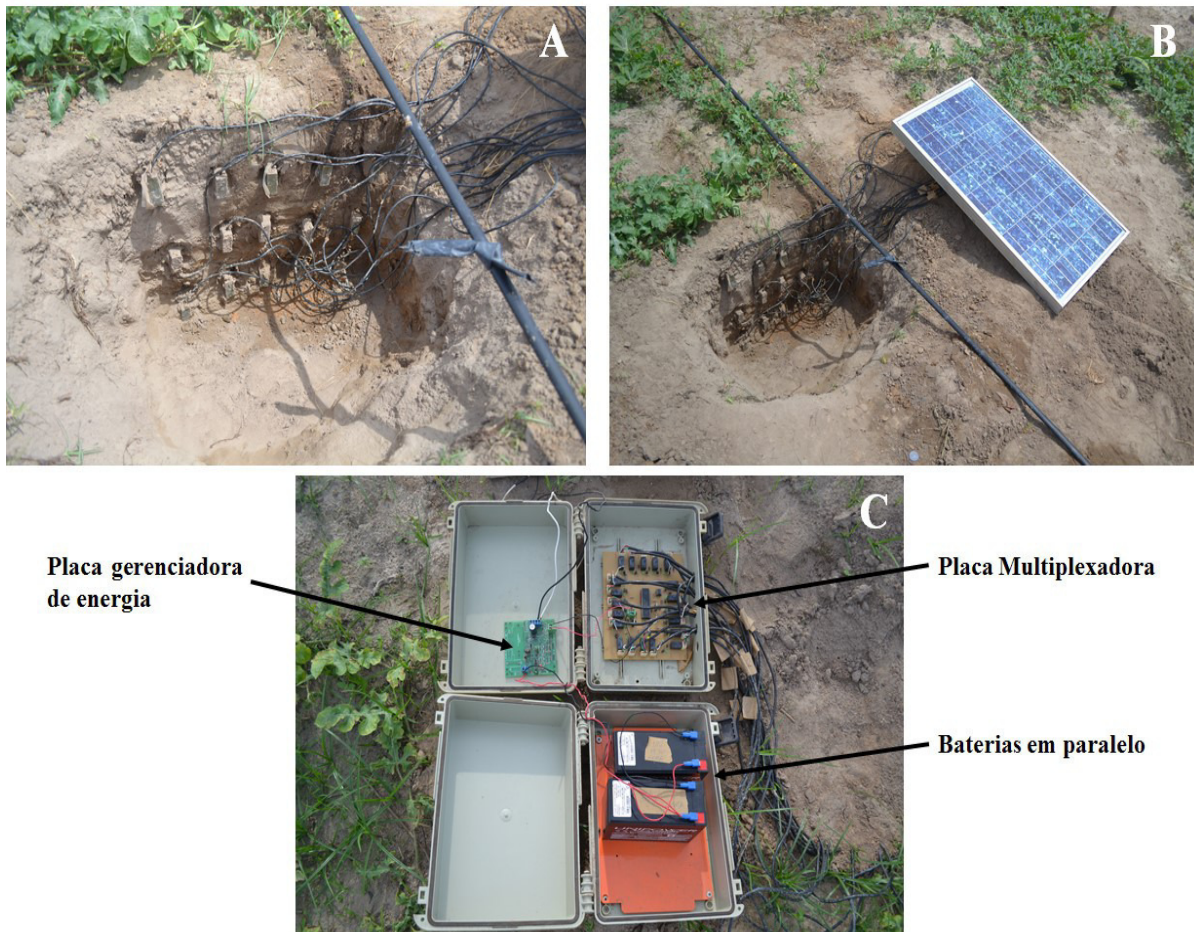
Figura 19 – Esquema da disposição dos sensores no perfil do solo para monitoramento do bulbo molhado no sistema de gotejamento superficial



Fonte: Autor

De acordo com a Figura 19 os sensores foram distribuídos em três linhas horizontais (profundidades de 10 cm, 23 cm e 36 cm, aproximadamente) e cinco colunas verticais. Cada linha foi representada por 5 sensores capacitivos FDR. A ideia inicial foi instalar a coluna central vertical sob o emissor do gotejador, mas isso não ocorreu, pois, a fita gotejadora precisou ser deslocada um pouco a esquerda, procedimento exigido no cultivo da melancia, ficando o emissor localizado entre as colunas 2 e 3 da malha de sensores.

Figura 20 - Malha de sensores capacitivos instalada no perfil do solo (A) e painel fotovoltaico (B), ambos conectados ao multiplexador (C)



Fonte: Autor

A associação das baterias em paralelo permite obter o dobro da corrente, mantendo a tensão nominal igual. Conforme esclarecido no Capítulo 1, a bateria utilizada trabalha com 12V e 7Ah e o consumo da placa multiplexadora é de 100mA. Desta forma, assumindo que as duas baterias ligadas em paralelo proporcionam uma capacidade total de 14Ah, então teoricamente a duração do sistema é de 140 horas. Como as baterias são carregadas diariamente pelo painel fotovoltaico, por meio da placa gerenciadora de energia, o sistema de coleta somente deixa de obter os dados caso não exista incidência de radiação solar ao longo do dia pelo tempo estipulado anteriormente, que é de aproximadamente 5,8 dias. Não ocorrendo isso, os dados são coletados no período noturno sem o risco de descarga das baterias, pois o painel fotovoltaico recarrega as mesmas, fornecendo a tensão necessária.

O sensor capacitivo FDR possui uma equação de calibração para solos com classificação textural areia franca. A equação, para uma profundidade média de 25 cm, foi



determinada em campo por Cruz et al. (2009), que deu origem a Equação 1, apresentando  $R^2 = 0,8876$ .

$$\theta = 6340,6 \cdot f^{-1,4403} \quad (1)$$

Contudo, esta equação é destinada ao solo com textura denominada de areia franca, enquanto que o solo o qual foi instalada a malha de sensores é classificado como solo franco arenoso (BEZERRA; OLIVEIRA, 1999), pois possui 70% de areia e 30% é compreendido de silte e argila. Baseado neste fato, e mesmo em condições semelhantes de textura, foi necessário efetuar uma calibração de campo para definir os parâmetros da curva de calibração do solo estudado.

### 10.3 Calibração da malha de sensores

Uma calibração de campo foi efetuada para constatar o efeito do tipo de solo. Quando se trata de sensores de umidade do solo, todos devem passar por uma calibração, inclusive os sensores capacitivos, pois os mesmos necessitam de calibração para o solo onde vai ser investigado o teor de água, de preferência em campo e se possível para cada camada, isso porque existe grande variabilidade em relação aos tipos de solos e uma calibração nestas condições fornece leituras precisas da umidade volumétrica do solo (SILVA et al., 2008).

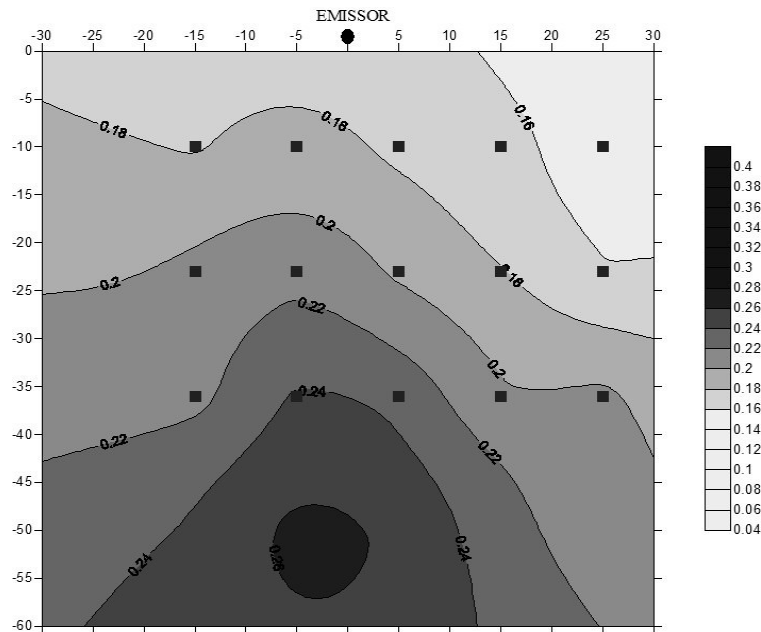
Foi realizada uma calibração de campo para cada sensor capacitivo FDR que se encontrava instalado no perfil do solo. O procedimento foi concretizado coletando-se amostras de solo retiradas próximas a cada sensor instalado, ou seja, para cada ponto na malha que continha o sensor foi obtida uma equação de calibração. Após as coletas das amostras de solo, a umidade das mesmas foi obtida pelo método gravimétrico, que utilizando a densidade do solo determinou-se a umidade volumétrica em cada ponto de coleta.

A coleta iniciou logo após o término de uma irrigação de 8 horas de duração, com uma vazão proveniente do emissor do gotejador de 2L/h. O objetivo foi deixar o solo saturado para coletar a primeira amostra de solo nesta condição, ou seja, ao fim da irrigação foi realizada a primeira coleta. Para o restante das amostras foram estabelecidos intervalos de tempo de coletas tomando por base a primeira, ao passo que o solo manteve seu processo de percolação e secagem. Os intervalos de tempo de coletas das amostras de solos foram 1h, 17h, 25h, 49h, 72h e 97h, todas referentes à primeira coleta.

## 10.4 Avaliação do bulbo úmido

A análise do bulbo úmido foi realizada no cultivo de melancia que se encontrava com 30 dias após semeadura. Não foi aplicado um volume de água específico para acompanhar a distribuição de água no bulbo. A grade de sensores acompanhou os tempos de irrigações exigidos e estabelecidos neste cultivo. Para produzir os mapas de contorno do bulbo úmido foi empregado o software Golden Software Surfer. Os dados foram aplicados no programa em coordenadas (x, y e z), em que x e y representam o posicionamento dos sensores no perfil do solo com relação ao emissor, em distância e profundidade, respectivamente, e z a umidade volumétrica, conforme exemplo na Figura 21.

Figura 21 – Projeção bidimensional do mapa de contorno da umidade do solo



Para a identificação da variação da umidade no perfil solo, por meio das imagens de contorno projetadas pelo programa, foram utilizadas escalas de cores variando desde o amarelo (condição menos úmida) até o azul (condição mais úmida). Assim, os mapas de contorno representam uma seção de controle de 60 cm de profundidade e 60 cm de diâmetro.

## 11 RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 11.1 Calibração da malha de sensores

As Figuras 22, 23 e 24 apresentam as curvas de calibração do conteúdo de água ( $\theta$ ) em função da frequência (kHz) para os três níveis de profundidades avaliadas, 10 cm (1ª camada), 23 cm (2ª camada) e 36 cm (3ª camada), respectivamente. O eixo das abscissas identifica a resposta do sensor capacitivo FDR e o eixo das ordenadas reproduz a umidade volumétrica do solo.

Figura 22 – Umidade volumétrica em função da frequência na calibração de campo para a 1ª camada

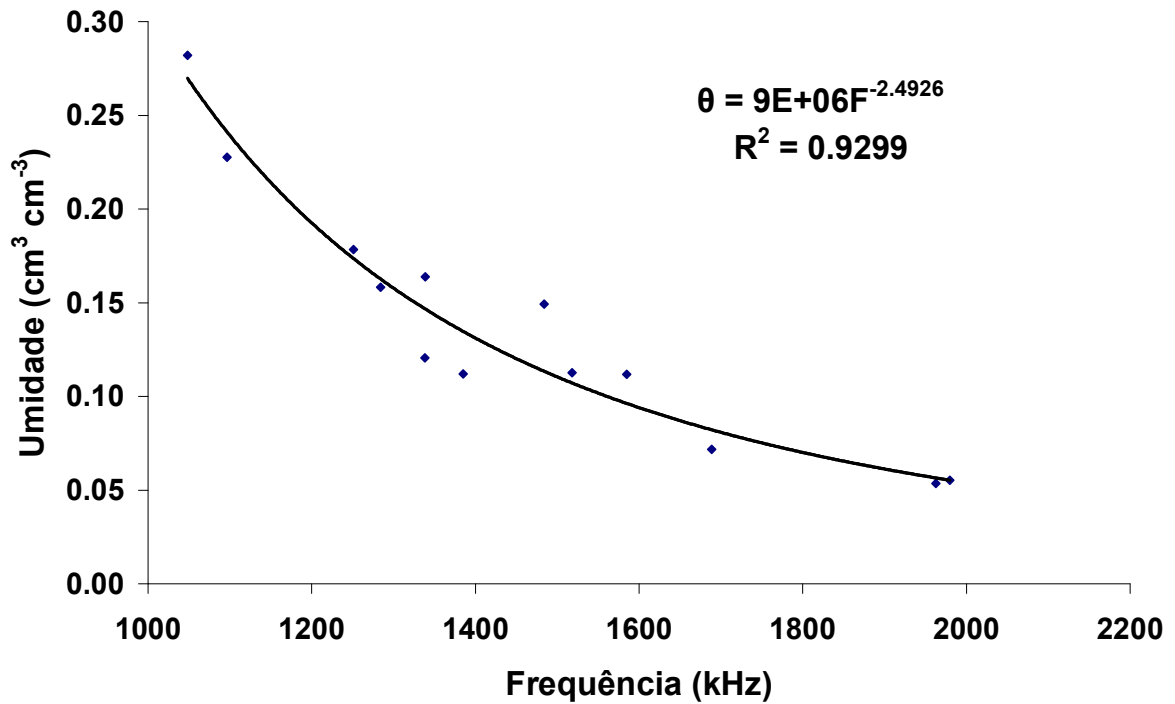


Figura 23 – Umidade volumétrica em função da frequência na calibração de campo para a 2ª camada

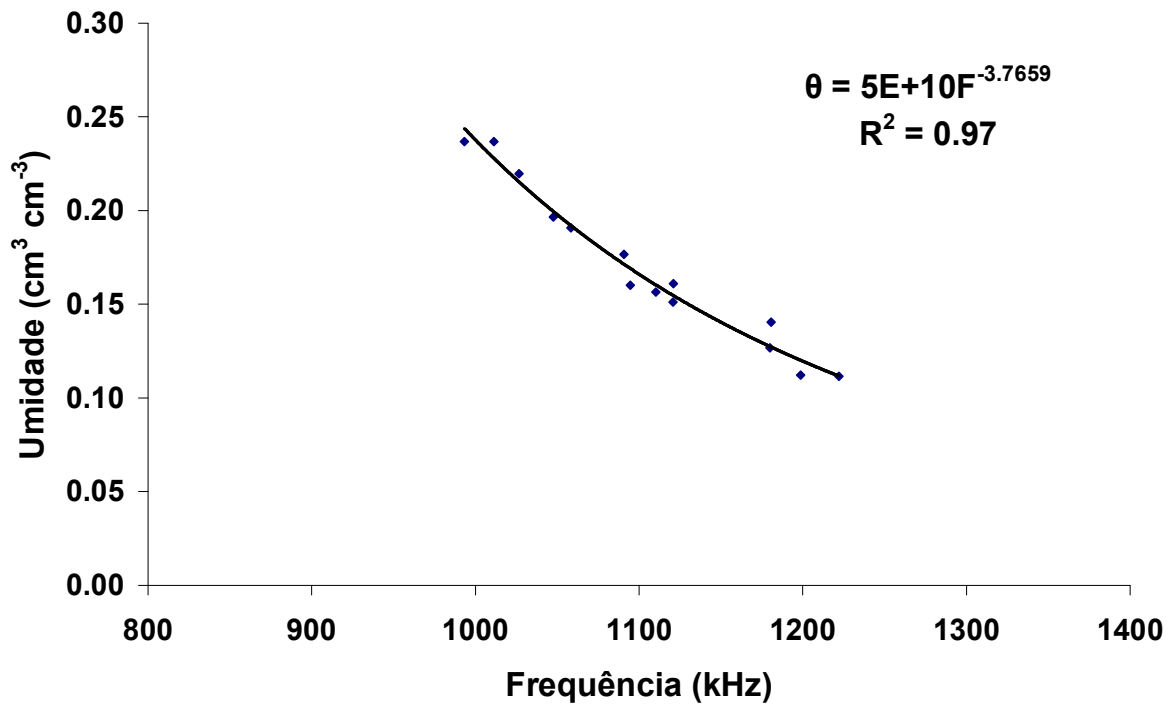
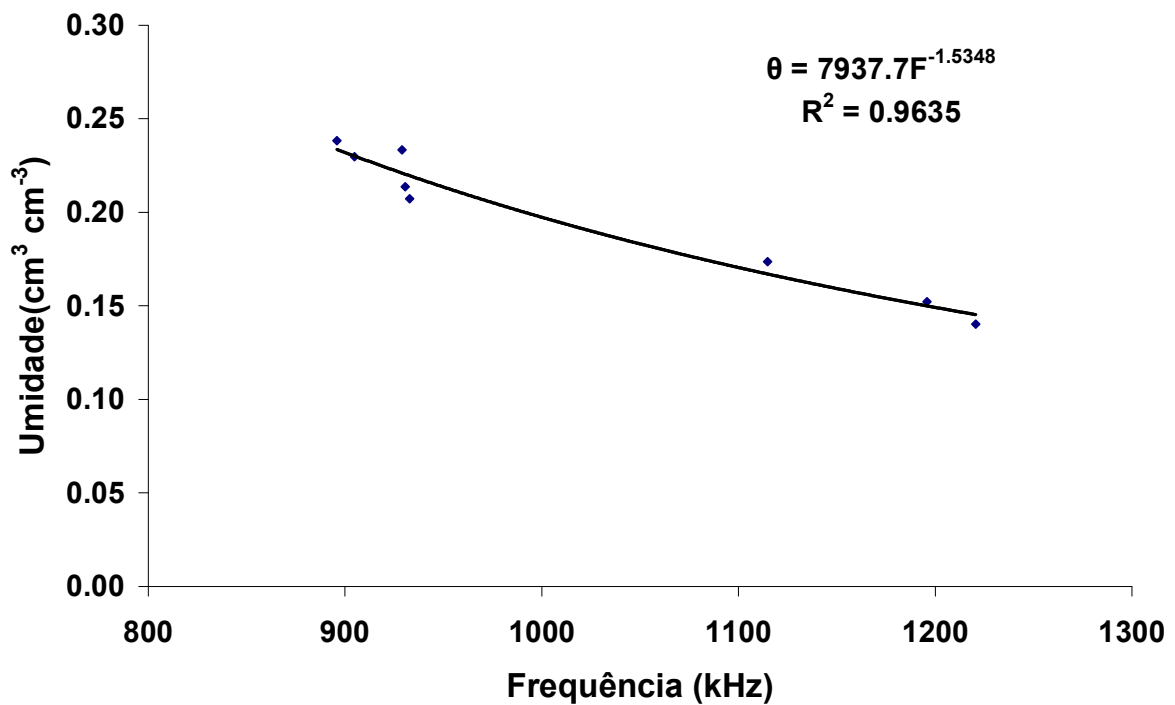


Figura 24 – Umidade volumétrica em função da frequência na calibração de campo para a 3ª camada



A resposta do sensor (frequência) apresentou forte relação com os valores do conteúdo de água volumétrica ( $\theta$ ). Apesar dos coeficientes de determinação para os modelos estudados terem sido altos, as equações para alguns dados subestimaram ou superestimaram os valores de umidade do solo e isso pode causar diferença significativa no monitoramento do conteúdo de água no solo. Notou-se esta diferença quando se confrontou os modelos testados com os dados obtidos em campo. Estes efeitos podem ser visualizados nas Figuras 25, 26 e 27. Nelas estão disponibilizados os valores de umidade do solo ( $\theta$ ) obtidas em campo e os estimados pelos modelos ajustados, ambos em função das respostas dos sensores capacitivos FDR (kHz).

Figura 25 – Umidade volumétrica observada e estimada em função das respostas dos sensores capacitivos FDR para a 1ª camada

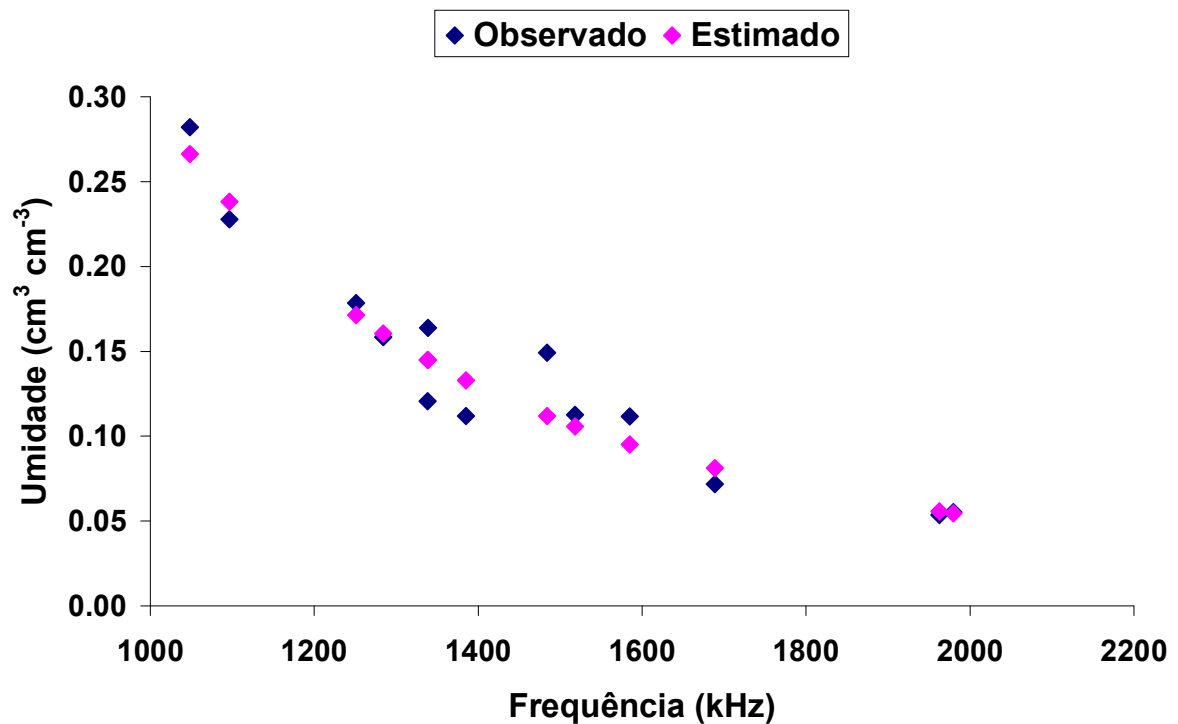


Figura 26 – Umidade volumétrica observada e estimada em função das respostas dos sensores capacitivos FDR para a 2ª camada

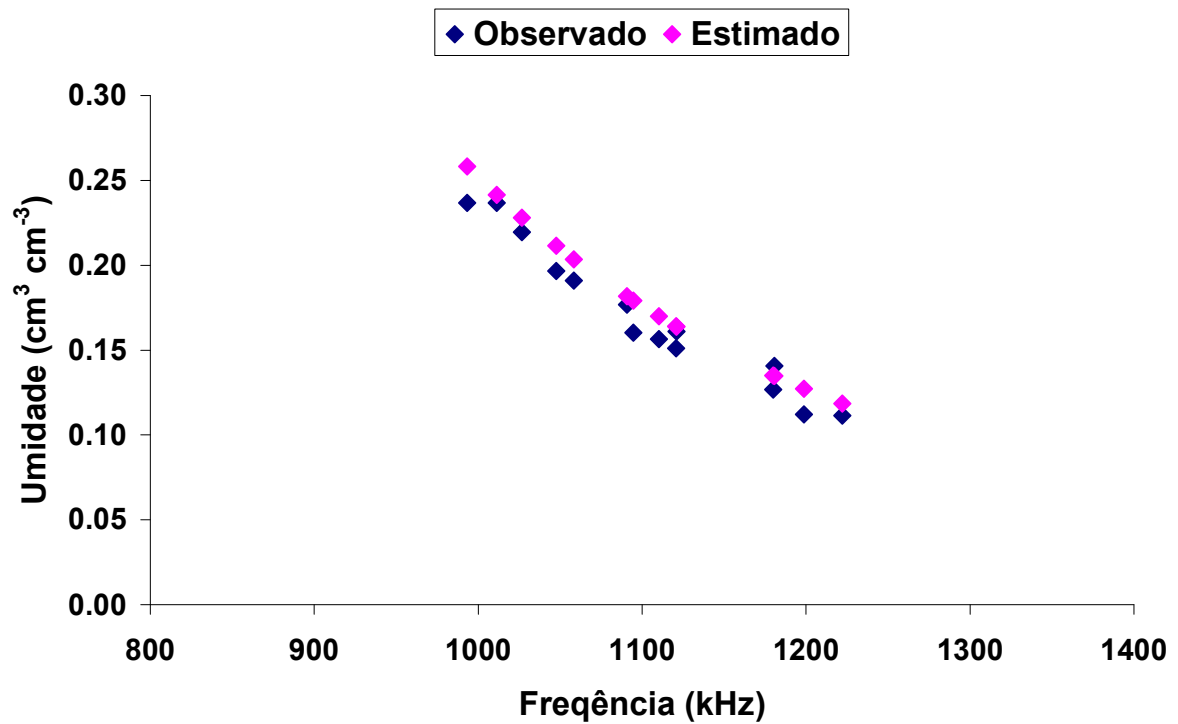
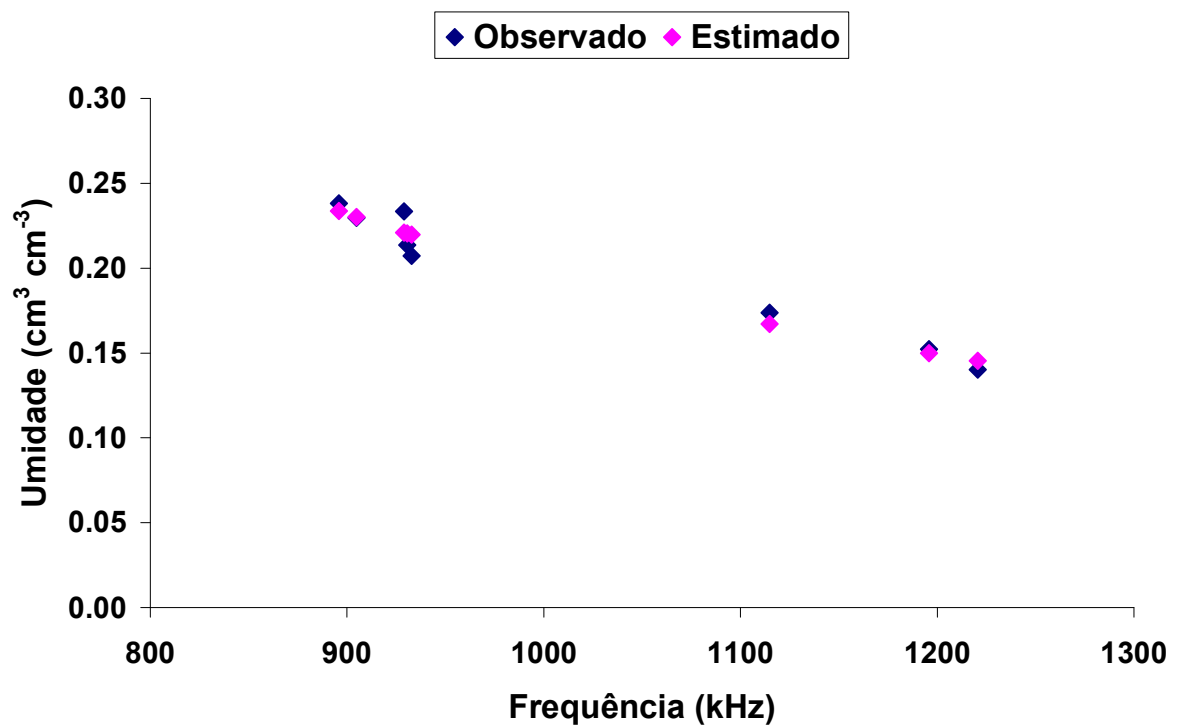


Figura 27 – Umidade volumétrica observada e estimada em função das respostas dos sensores capacitivos FDR para a 3ª camada



As equações apresentadas nas Figuras 22, 23 e 24 foram utilizadas para monitorar o conteúdo de água no solo por meio da malha de sensores capacitivos FDR, nas camadas de 10 cm, 23 cm e 36 cm, respectivamente. Com essas leituras foi possível verificar as diferenças de umidade volumétrica, ao longo do perfil do solo, entre as irrigações realizadas durante o experimento. Entretanto, como esclarecido anteriormente, a maioria dos dados de umidade eram subestimados, não sendo possível obter uma equação de calibração de campo geral para cada camada. Por conta disso, foi necessário empregar uma equação de calibração para cada sensor. A Tabela 2 apresenta as equações utilizadas em cada ponto em que se encontravam os sensores capacitivos FDR instalados no solo.

Tabela 2 – Ajuste do modelo potencial para umidade volumétrica em função da frequência, nas diferentes camadas do solo

| Camadas do Solo (cm) | Sensor (nº) | Modelo                        | R <sup>2</sup> |
|----------------------|-------------|-------------------------------|----------------|
| 0 - 10               | 1           | $\theta = 77093 F^{-1,8139}$  | 0,8913         |
|                      | 2           | $\theta = 9E+09 F^{-3,3502}$  | 0,8919         |
|                      | 3           | $\theta = 418609 F^{-1,9996}$ | 0,9328         |
|                      | 4           | $\theta = 3E+06 F^{-2,4451}$  | 0,9955         |
|                      | 5           | $\theta = 2E+08 F^{-2,8895}$  | 0,9317         |
| 10 - 25              | 6           | $\theta = 5E+10 F^{-3,7659}$  | 0,9700         |
|                      | 7           | $\theta = 5E+15 F^{-5,3748}$  | 0,8774         |
|                      | 8           | $\theta = 5E+10 F^{-3,7659}$  | 0,9700         |
|                      | 9           | $\theta = 5E+10 F^{-3,7659}$  | 0,9700         |
|                      | 10          | $\theta = 5E+10 F^{-3,7659}$  | 0,9700         |
| 25 - 40              | 11          | $\theta = 2E+10 F^{-3,6891}$  | 0,8664         |
|                      | 12          | $\theta = 7937,7 F^{-1,5348}$ | 0,9635         |
|                      | 13          | $\theta = 6E+74 F^{-24,784}$  | 0,9621         |
|                      | 14          | $\theta = 7937,7 F^{-1,5348}$ | 0,9635         |
|                      | 15          | $\theta = 7937,7 F^{-1,5348}$ | 0,9635         |

Embora as equações apresentadas na Tabela 2 sejam muitas, as mesmas, ao contrário das equações determinadas por camada, apresentaram valores de umidade

volumétrica bem próximos quando comparados com valores dos obtidos pelo método padrão da estufa.

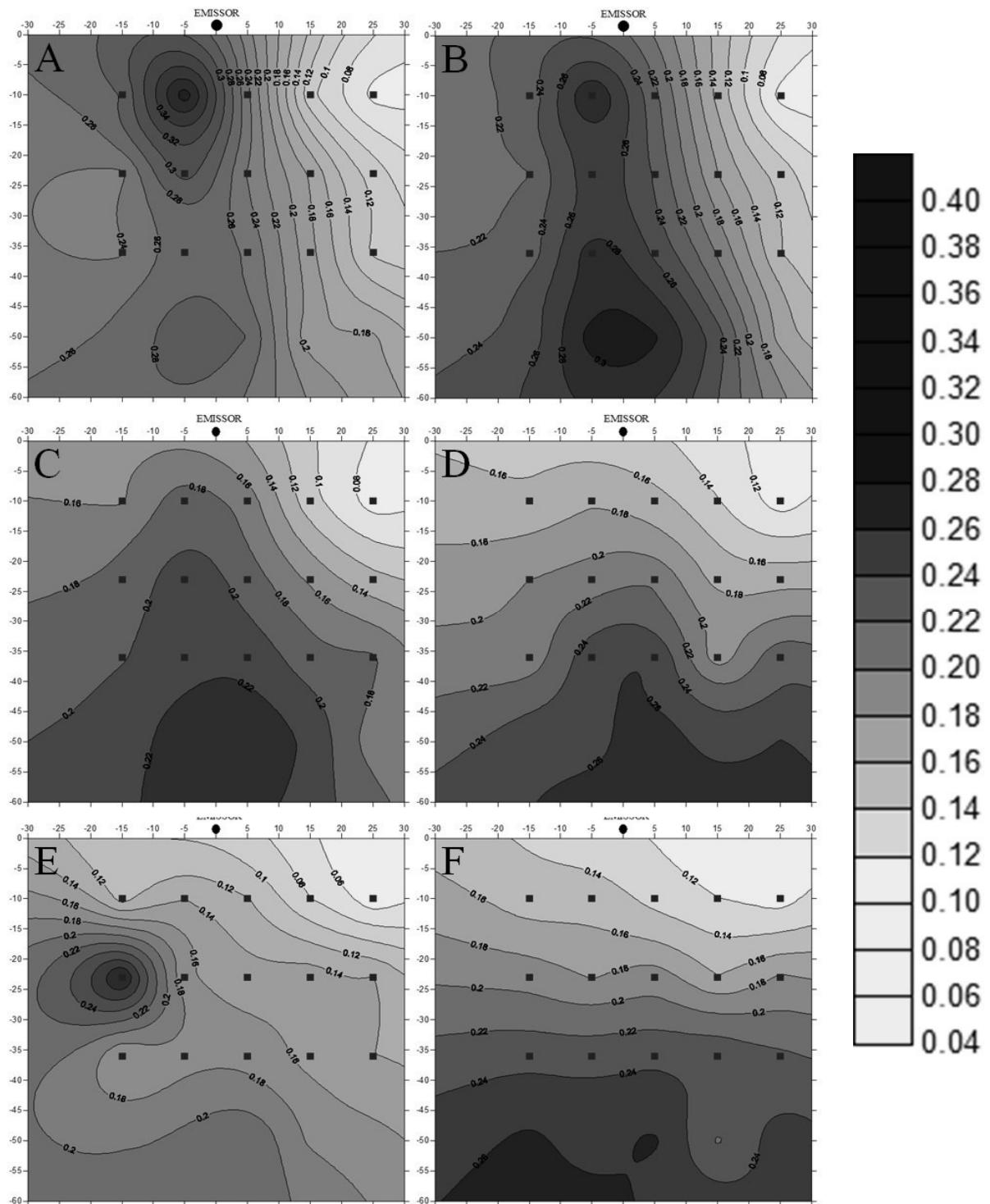
Os sensores que estavam instalados na 1ª camada precisaram cada um de uma equação de calibração para representar os valores de umidade volumétrica adequados para elaboração do bulbo molhado. Contudo, os sensores instalados na 2ª camada (10 cm – 25 cm) utilizaram a mesma equação, pois esta foi suficiente para disponibilizar os valores de umidade próximo dos valores observados pelo método gravimétrico, com exceção de apenas do sensor 7. Na 3ª camada (25 cm – 40 cm) os sensores 12, 15 e 15 utilizaram a mesma equação de calibração, enquanto os outros dois sensores utilizaram equações distintas.

As diferentes equações apresentadas na Tabela 2 manifesta a necessidade de efetuar calibrações para cada camada de solo, uma vez que o mesmo pode apresentar distintas texturas ao longo do seu perfil. Portanto, os sensores necessitam de calibrações para cada tipo de solo, o que requer também calibrações para as camadas de solos os quais os sensores se encontram instalados, e se possível para cada ponto de instalação. Contudo, essa diversidade do solo não inviabiliza o uso dos sensores de umidade, basta apenas realizar as calibrações na profundidade de solo que se deseja monitorar o conteúdo de água. A grande vantagem em se trabalhar com sensores de umidade é justamente poder adquirir dados do conteúdo de água no solo quando o mesmo se encontra em condições mais secas, possibilitando trabalhar em situações variáveis de conteúdo de água, permitindo a aplicação dos sensores em diferentes tipos de culturas (BATISTA, 2012).

A Figura 28 apresenta 6 mapas gerados a partir dos dados de umidade do solo ( $\theta$ ) obtidos da calibração de campo da malha de sensores capacitivos, utilizando o método padrão da estufa. Cada mapa representa o momento da coleta dos dados e a sua umidade volumétrica obtida em campo, intercalados em tempos distintos após uma irrigação de 8 horas.



Figura 28 – Mapas de contorno dos valores de umidade do solo ( $\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$ ) com 10 minutos (A), 1 hora (B), 25 horas (C), 49 horas (D), 72 horas (E) e 97 horas (F) após o fim da irrigação

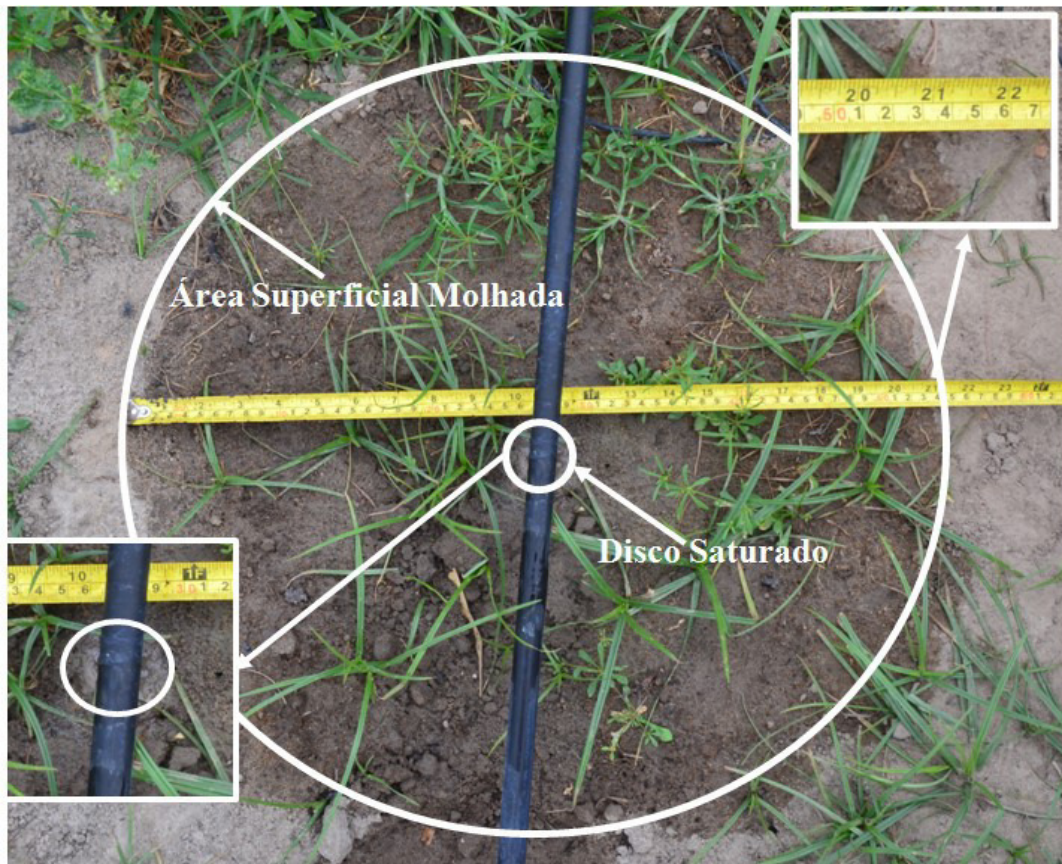


Observe na Figura 28 que ao longo do tempo o comportamento da frente de umedecimento no solo foi bem acentuado no sentido vertical do emissor, mas não apresentou simetria. Após várias horas do fim da irrigação é perceptível a redução de umidade das camadas superiores e o aumento nas camadas inferiores, com grande parte retida nesta ultima.

Vale ressaltar que a camada que se encontrava a 36 cm de profundidade já apresentava textura siltosa e argilosa. Observe também que fluxo de água se concentrou no perfil do solo mais à esquerda do emissor, provavelmente devido a heterogeneidade das propriedades físicas do solo, que estabeleceu um fluxo preferencial.

O diâmetro máximo da frente de umedecimento horizontal medido na superfície do solo após a irrigação de 8 horas foi de 54 cm, apresentando disco saturado de 5 cm de diâmetro (Figura 29). A obtenção da dimensão do disco saturado foi importante para a realização da simulação do bulbo molhado por meio do programa computacional Slide® (Ver Capítulo 3). Sato (2012), avaliou em seu trabalho o diâmetro do disco saturado e da área superficial em um solo de textura franco-argilo-arenosa, e o mesmo obteve valores de 8 cm e 34 cm, respectivamente, para uma vazão de 2L/h durante 8 horas. Ao contrário do experimento deste autor, o solo avaliado neste trabalho possui um teor de areia elevado, não permitindo a formação de um diâmetro maior.

Figura 29 – Área superficial formada pelo gotejador para uma vazão de 2L/h

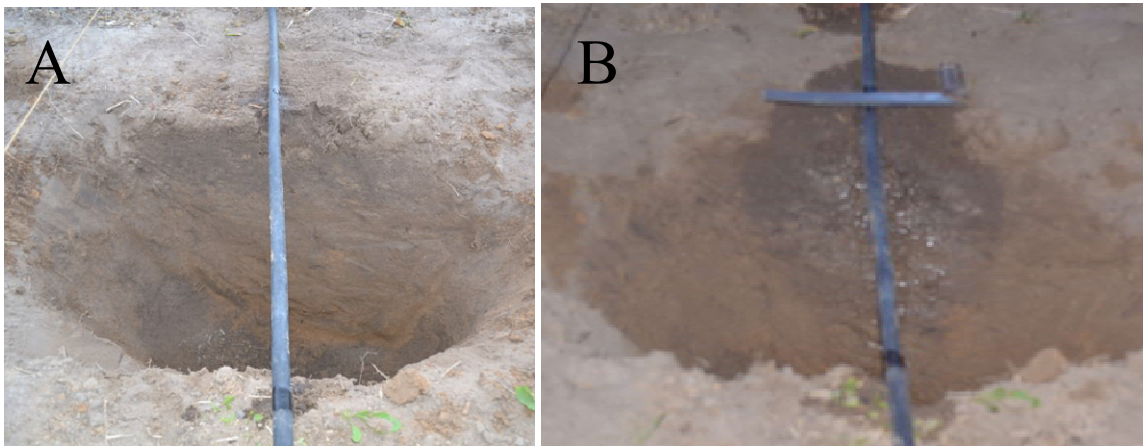


Fonte: Autor

Geralmente o gotejamento superficial apresenta maior expansão lateral e menor expansão vertical na formação do bulbo úmido, ocorrendo variação de umidade, mas em proporções uniformes (SOUZA et al., 2007). Em sistemas com menor vazão pode ocorrer o aumento da área molhada no perfil do solo e, além disso, devido à formação desigual do bulbo molhado, a área molhada pode apresentar extrapolação (BARROS et al., 2009). Levien et al. (2010), trabalhando em um solo com textura franco-argilo-arenosa mostrou que a vazão de  $2 \text{ Lh}^{-1}$  durante uma irrigação de uma hora proporcionou um diâmetro máximo do bulbo úmido de 33,7 cm e profundidade máxima de 21,3 cm.

O solo deste trabalho é caracterizado como franco arenoso e antes da instalação dos sensores foi observada a formação do bulbo úmido, em uma trincheira aberta, durante uma irrigação de 25 minutos. A representação da formação o bulbo molhado no solo utilizado para o estudo pode ser visualizada na Figura 30.

Figura 30 – Representação do bulbo úmido, (A) antes da irrigação e (B) depois da irrigação



O diâmetro superficial alcançado durante a irrigação de 25 minutos foi de aproximadamente de 20 cm, enquanto que a profundidade foi em torno de 35 cm. Mas deve-se considerar que a trincheira aberta proporciona um fluxo de água mais acentuado em profundidade no perfil do solo, causando uma tendência no escoamento subsuperficial.

## 11.2 Avaliação do bulbo úmido

A análise do bulbo molhado no solo foi realizada com a elaboração dos mapas de contorno contendo os valores de umidade volumétrica do solo medidas diretamente no campo pela malha de sensores capacitivos FDR, durante um ciclo de irrigação que durou 6 horas.

As Figuras 31, 32, 33, 34, 35, 36, 37 e 38 apresentam os mapas de contorno dos valores de umidade do solo ( $\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$ ) em ordem temporal gerados pelo programa Golden Software Surfer, que representam, respectivamente, o início da irrigação, 30 minutos de irrigação, 1 hora de irrigação, 3 horas de irrigação, 6 horas de irrigação (fim da irrigação), 1 hora, 3 horas e 6 horas após o fim da irrigação. Nestas figuras, observa-se a maneira como a água se distribuiu no solo e como se formou o bulbo molhado.

Figura 31 – Mapa de contorno de umidade do solo ( $\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$ ) no início da irrigação

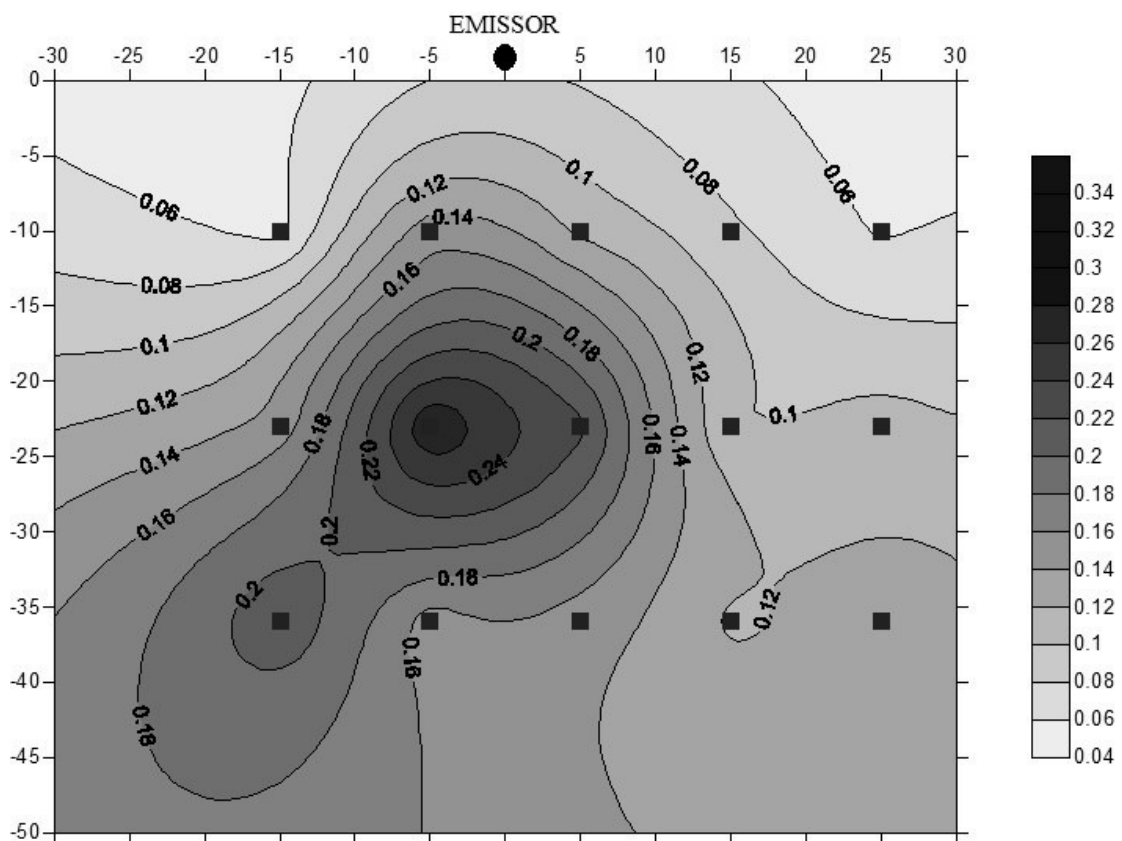


Figura 32 – Mapa de contorno de umidade do solo ( $\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$ ) para 30 minutos de irrigação

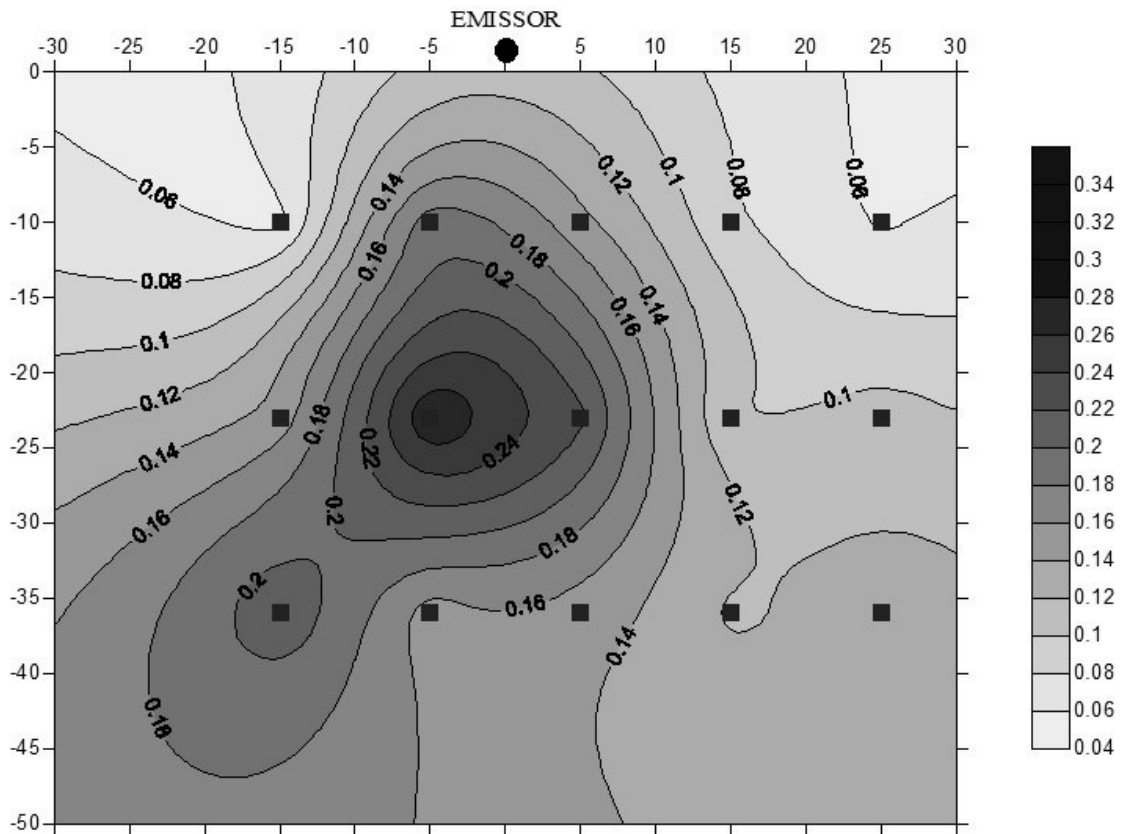


Figura 33 – Mapa de contorno de umidade do solo ( $\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$ ) para 1 hora de irrigação

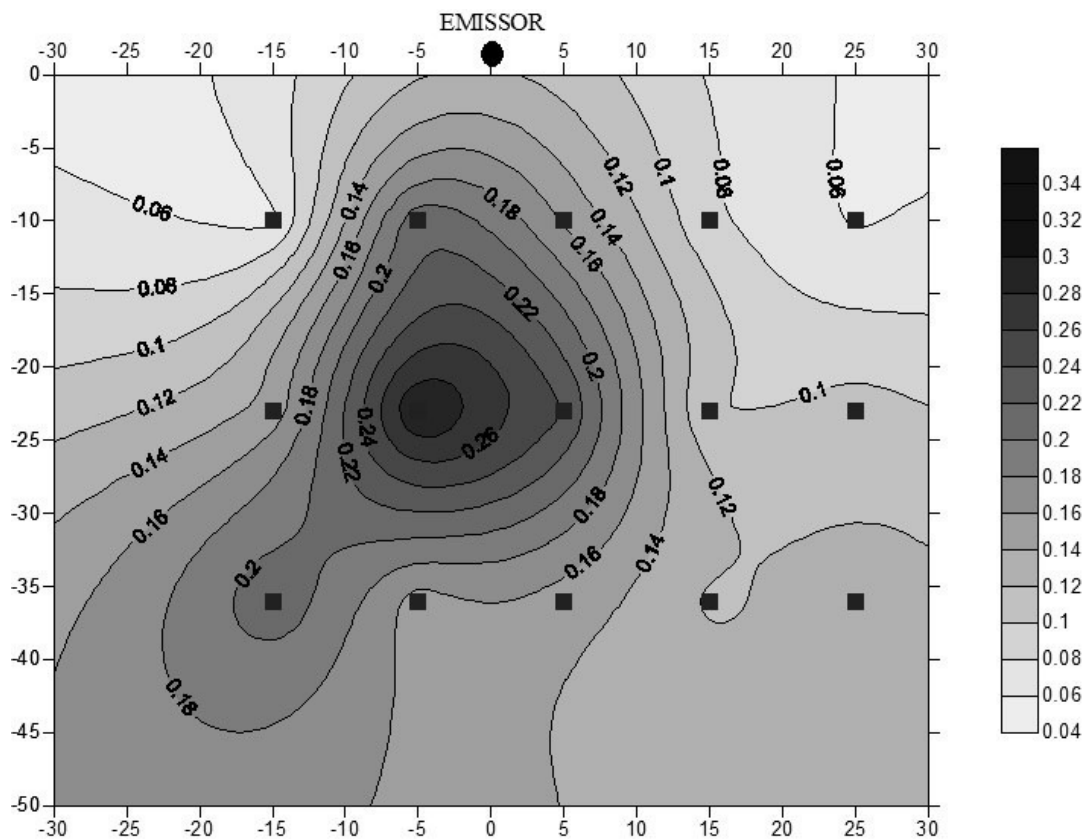


Figura 34 – Mapa de contorno de umidade do solo ( $\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$ ) para 3 horas de irrigação

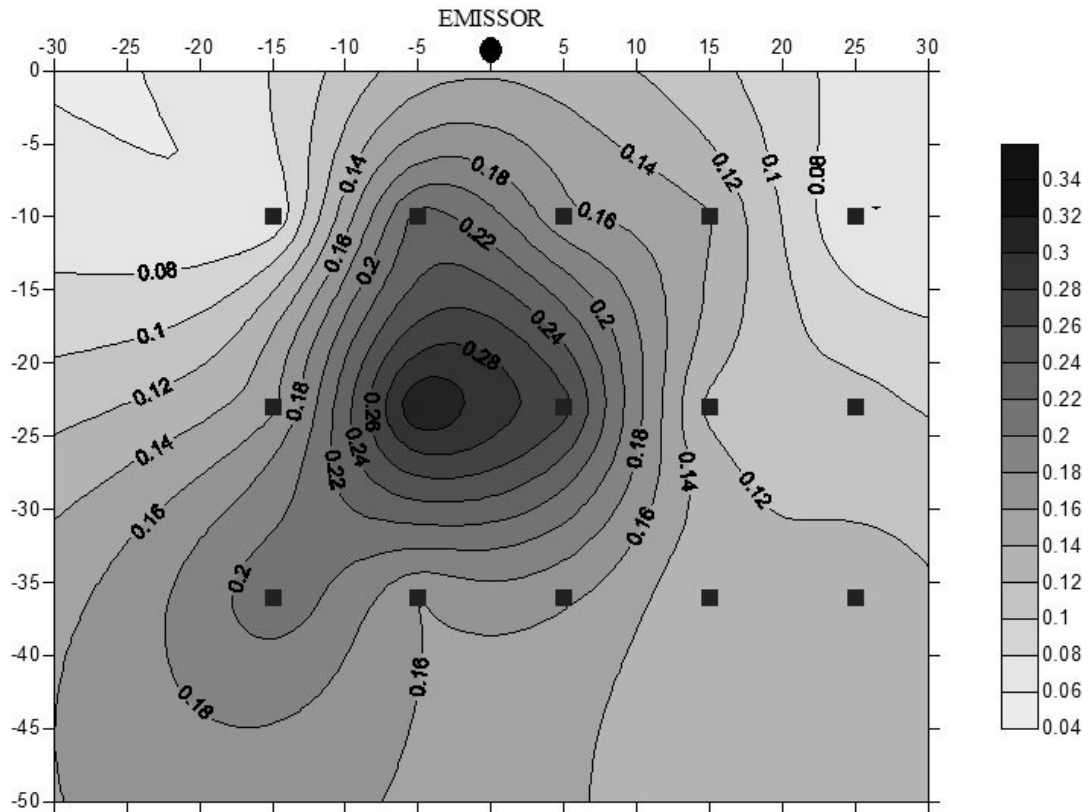


Figura 35 – Mapa de contorno de umidade do solo ( $\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$ ) para 6 horas de irrigação

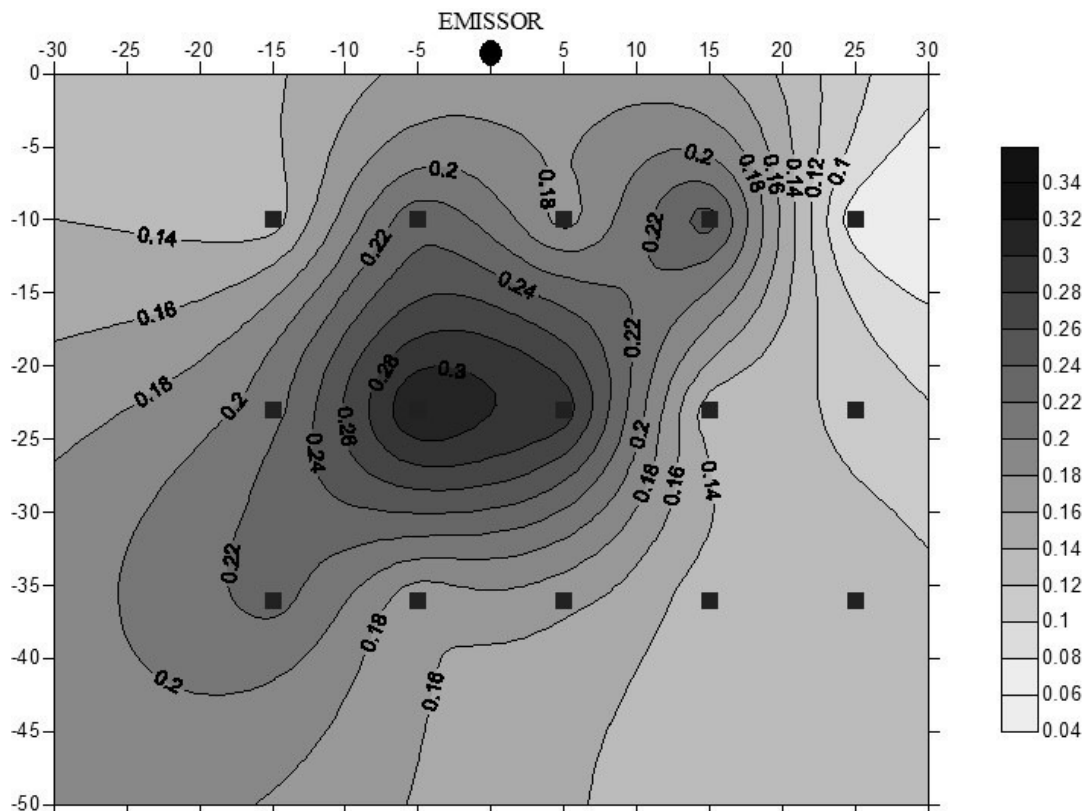


Figura 36 – Mapa de contorno de umidade do solo ( $\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$ ) 1 hora após o fim da irrigação

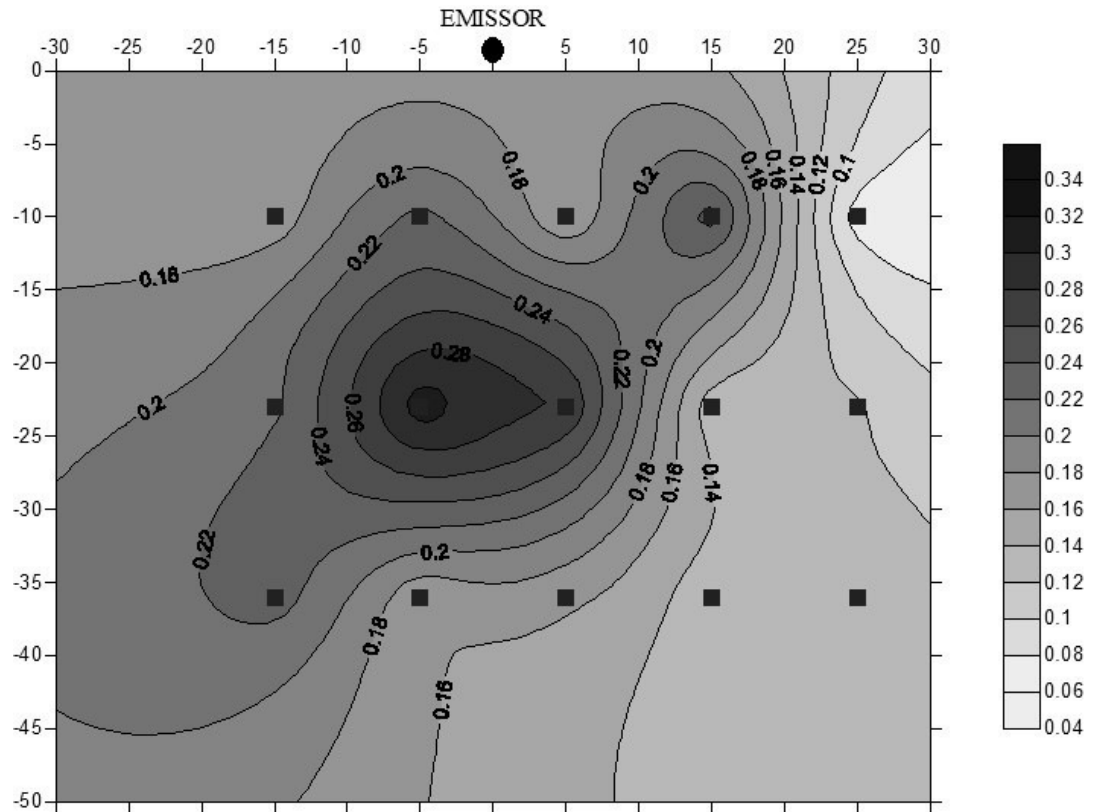


Figura 37 – Mapa de contorno de umidade do solo ( $\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$ ) 3 horas após o fim da irrigação

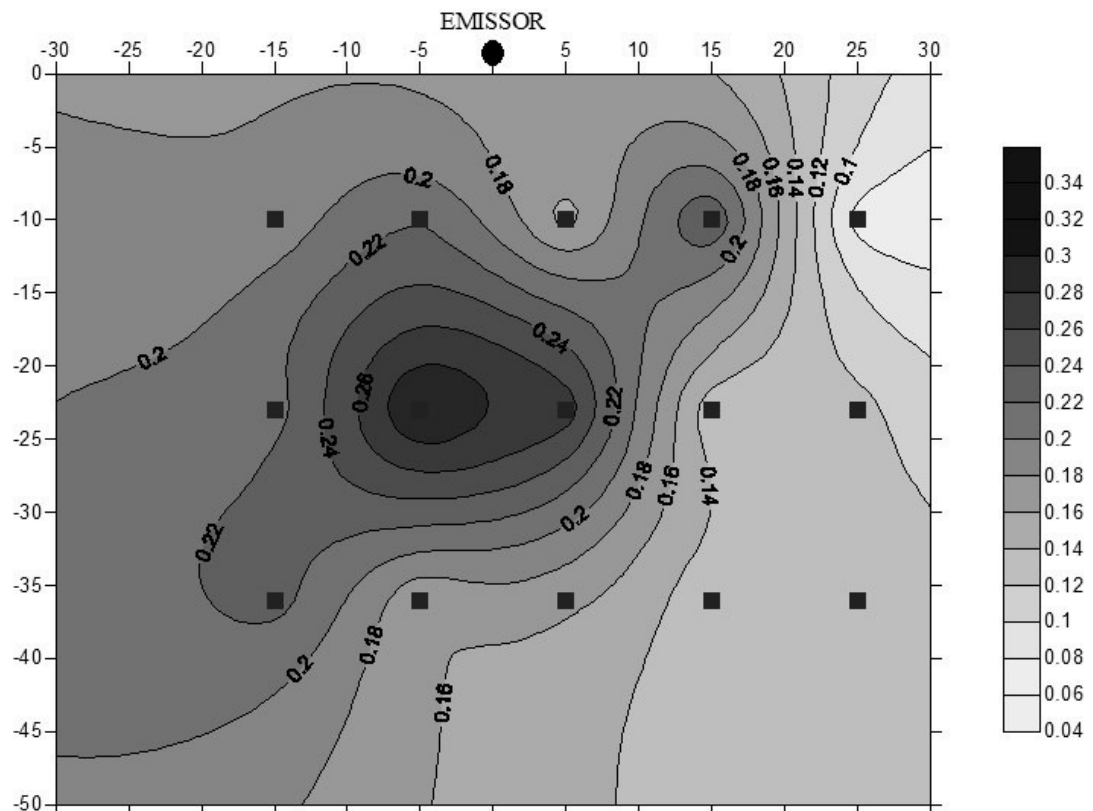
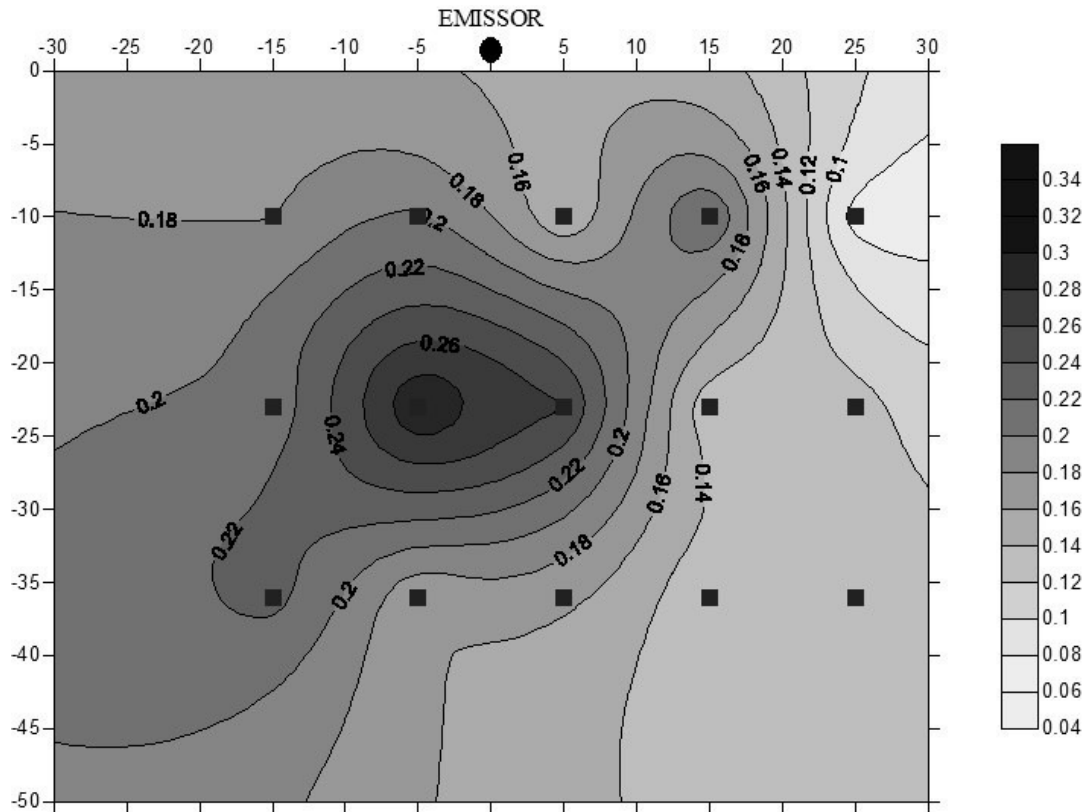


Figura 38 – Mapa de contorno de umidade do solo ( $\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$ ) 6 horas após o fim da irrigação



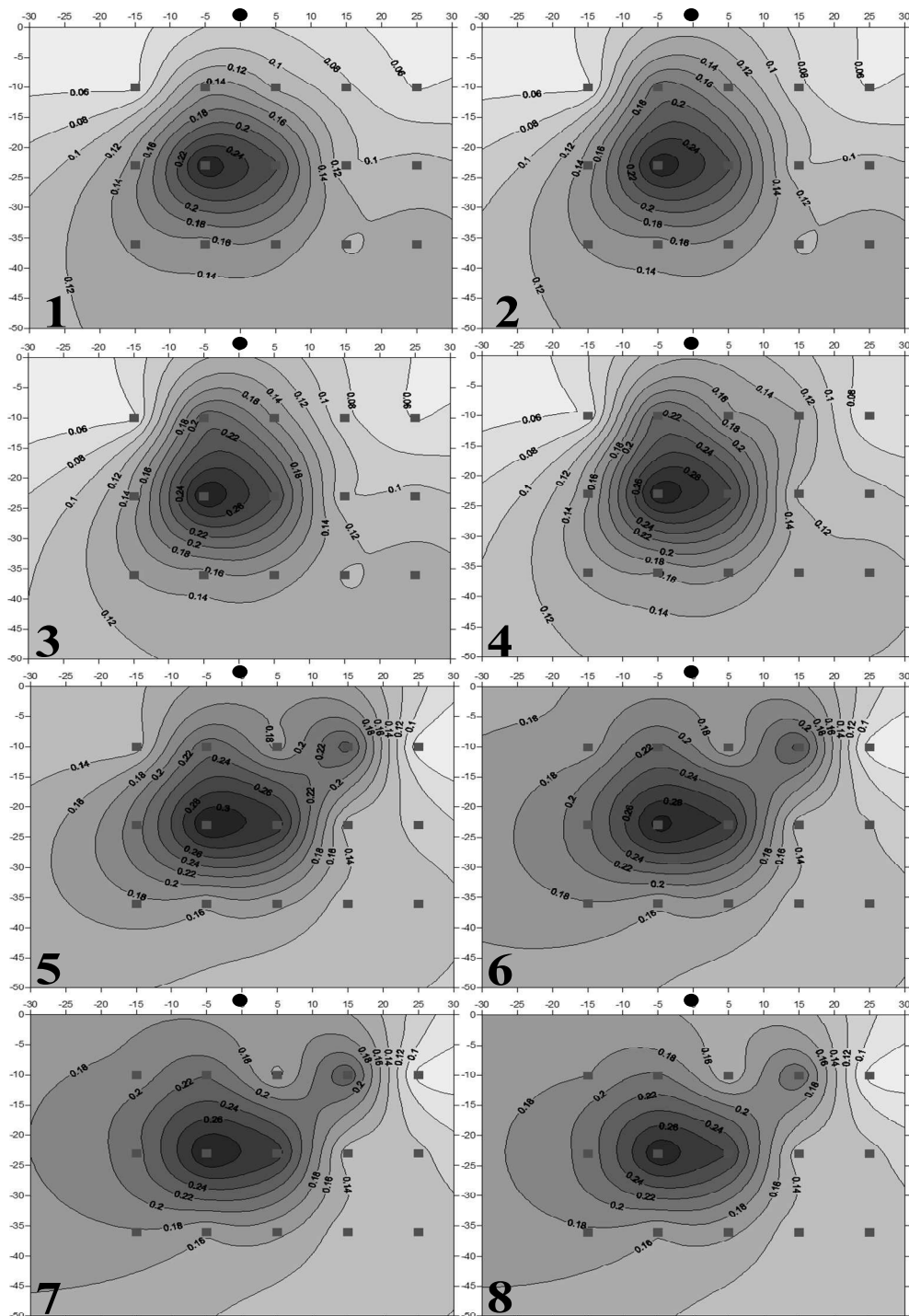
Observando a representação gráfica da distribuição da umidade do solo com base em volume ( $\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$ ), nota-se que a partir de 3 horas de irrigação (Figura 34) ocorreu um favorecimento horizontal do bulbo. A maior concentração de umidade foi encontrada abaixo de 20 cm de profundidade, principalmente na linha vertical de sensores logo abaixo do emissor, proporcionando um alongamento horizontal nessa região. Antes da irrigação a umidade na parte central da malha a 25 cm de profundidade apresentava umidade máxima de  $0,24 \text{ cm}^3 \text{cm}^{-3}$ . Um fato importante observado foi a permanência da umidade volumétrica em  $0,22 \text{ cm}^3 \text{cm}^{-3}$  na profundidade de 10 cm com 1 hora após o fim da irrigação, apontando para um suposto valor de capacidade de campo. Veja também que o bulbo molhado seguiu um fluxo preferencial para o lado esquerdo.

Perceba que após 1 hora de irrigação, a parte central do bulbo compreendida entre a profundidade de 10 cm a 25 cm manteve a umidade em  $0,22 \text{ cm}^3 \text{cm}^{-3}$ . Seis horas após a irrigação verificou-se de forma mais perceptível o alongamento do bulbo no sentido horizontal.



A Figura 39 mostra a sequencia da evolução da frente de umedecimento das Figuras 31 a 38, geradas também pelo programa Golden Software Surfer, com a exclusão dos valores de umidade referentes ao sensor 11 que se mostrou atípico no processo de coleta.

Figura 39 – Mapas de contorno da frente de umedecimento do solo: (1) início da irrigação; (2) 30 minutos de irrigação; (3) 1 hora de irrigação; (4) 3 horas de irrigação; (5) 6 horas de irrigação; (6) 1 hora após o fim da irrigação; (7) 3 horas após o fim da irrigação; (8) 6 horas após o fim da irrigação



Note que o bulbo teve uma distribuição mais horizontal. A grande vantagem no monitoramento diário do bulbo úmido no solo é a determinação do início do estresse hídrico por parte da cultura, e que pode ser identificado pela declividade da umidade volumétrica no perfil do solo. Pontos de monitoramento em profundidades próximas da superfície do solo junto à planta apresentam desvios mais acentuados de valores de umidade ao longo do tempo, uma vez que estão sujeitos à extração de água pelas raízes e à redistribuição e evaporação que ocorre na superfície (COELHO; OR; ANDRADE, 1995).

Os valores de umidade volumétrica obtidos na malha de sensores por meio das equações de calibrações foram empregados no software Slider® 6.0 para o processo de calibração do modelo computacional de fluxo de água no solo (Ver capítulo 3).

## 12 CONCLUSÕES

O desenvolvimento do bulbo molhado possibilita observar se há ou não a formação de uma faixa contínua de umidade. No caso deste trabalho a formação do bulbo molhado não adquiriu uniformidade.

O tempo que o solo avaliado levou para atingir a umidade na capacidade de campo foi menor nas camadas próximas e sob o gotejador, tendo como zona potencial dentro do bulbo molhado a camada de 10 cm a 25 cm.

O conhecimento do bulbo molhado formado no solo aliado a profundidade de manutenção da umidade na capacidade de campo é uma prática que pode ser empregada em áreas agrícolas cujas aplicações de água são intensas, favorecendo práticas de manejo de irrigação.

Devido às diversidades das propriedades físicas do solo é necessária a realização de uma calibração de campo para os sensores de umidade do solo, se possível para cada sensor, pois calibrações generalizadas podem contribuir para subestimar ou superestimar os valores de umidade, proporcionando erros no manejo da irrigação.

## REFERÊNCIAS

- BARRETO, C. V. G.; SAKAI, E.; PIRES, R. C. M.; ARRUDA, F. B. Técnica de avaliação de bulbo úmido por múltiplos cortes em trincheira. **Irriga**, Botucatu, v.13, n.2, p.160-169, 2008.
- BARROS, A. C.; FOLEGATTI, M. V.; SOUZA, C. F.; SANTORO, B. L. Distribuição de água no solo aplicado por gotejamento enterrado e superficial. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v.13, n.6, p.700-707, 2009.
- BEZERRA, F. M. L.; OLIVEIRA, C. H. C. Evapotranspiração máxima e coeficiente de cultura nos estádios fenológicos da melancia irrigada. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v.3, n.2, p.173-177, 1999.
- COELHO, E. F.; OR, D. Modelo de distribuição de água e de potencial matricial no solo sob gotejamento com extração de água por raízes. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v.34, n.2, p.225-234, 1999.
- COELHO, E. F.; OR, D.; SOUSA, V. F. Avaliação de parâmetros hidráulicos para modelos de distribuição de água no solo sob gotejamento. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.34, n.4, p.651-657, 1999.
- COELHO, E. F.; OR, D.; ANDRADE, C. L. T. Avaliação de regime permanente em irrigação por gotejamento e posicionamento de sensores de umidade e de potencial matricial no bulbo molhado. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v.30, n.11, p.1327-1333, 1995.
- CRUZ, T. M. L. **Estratégia de monitoramento e automação em sistemas de irrigação utilizando dispositivos de comunicação em redes de sensores sem fio**. 2009. 84 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) – Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2009.
- CRUZ, T. M. L.; TEIXEIRA, A. S.; CANAFÍSTULA, F. J. F.; SANTOS, C. C.; OLIVEIRA, A. D. S.; DAHER, S. Avaliação de sensor capacitivo para o monitoramento do teor de água do solo. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v.30, n.1, p.33-45, 2010.
- ELAIUY, M. L. C. **Bulbos úmidos a partir da irrigação por gotejamento subsuperficial com água de abastecimento e efluente de esgoto tratado**. 2012. 83 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) – Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2012.
- ELMALOGLU, S.; DIAMANTOPOULOS, E. Wetting front advance patterns and water losses by deep percolation under the root zone as influenced by pulsed drip irrigation. **Agricultural Water Management**, v.90, p.160-163, 2007.
- KUNZ, J.; ÁVILA, V. S.; PETRY, M. Distribuição temporal e espacial da umidade do solo em sistemas de irrigação por gotejamento superficial. **Revista Monografias Ambientais**, Santa Maria, v.13, n.5, p.3963-3976, 2014.
- LEVIEN, S. L. A.; SILVA, C. A.; MAIA, C. E.; MEDEIROS, J. F. Estimativa de largura e profundidade de bulbo molhado em solos de textura média sob irrigação por gotejamento superficial. **Enciclopédia Biosfera**, Goiânia, v.6, n.11, p.1-10, 2010.

MAIA, C. E. Aplicação de modelos matemáticos na estimativa do volume de bulbo molhado por gotejamento superficial em diferentes tipos de solo. **Ciência Rural**, Santa Maria, v.40, n.11, p.2301-2309, 2010.

MATA, S. S.; RESENDE, R. S.; SILVA, P. S.; AMORIM, J. R. A.; LEAL, M. L. S. **Estimação dos volumes das seções do bulbo úmido na irrigação por ponto**. Comunicado Técnico, 51, Aracaju: Embrapa Tabuleiros Costeiros, SE, dez. 2006, 9 p.

PIRES, R. C. M.; BODINE JUNIOR, D.; SAKAI, E.; VILLAR, H. L.; SILVA, T. J. A.; ARRUDA, F. B. Effect of trickle irrigation on root development of the wet bulb and 'pera' orange tree yield in the state of São Paulo, Brazil. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v.31, n.6, p.1096-1103, 2011.

SATO, L. M. **Avaliação de modelos matemáticos para dimensionamento do bulbo molhado na irrigação por gotejamento**. 2012. 58 f. Dissertação (Mestrado em Agricultura e Ambiente) – Universidade Federal de São Carlos, Araras, 2012.

SILVA, C. R. da; ANDRADE JÚNIOR, A.S. de; SOUZA, C. F. **Aspectos práticos na utilização da técnica de capacitância: desafios e aprendizagem**. In: II Workshop de Aplicações de Técnicas Eletromagnéticas para o Monitoramento Ambiental. Taubaté-SP, 2008. CD-ROM.

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, E. A.; COELHO, E. F.; PAZ, V. P. S. Distribuição da umidade num perfil de solo irrigado por gotejamento superficial e subsuperficial. **Ciência Agrotécnica**, Lavras, v.31, n.4, p.1161-1166, 2007.

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.

WIENS, P. E. **Determinação do bulbo molhado para o dimensionamento da irrigação por gotejamento através da técnica da tdr (Reflectometria no Domínio do Tempo)**. X congresso interno de iniciação científica da UNICAMP, 2002.

### **13 USO DE MODELAGEM NUMÉRICA PARA DETERMINAÇÃO DA FRENTE DE UMEDECIMENTO DO SOLO**

O comportamento do fluxo de água no solo deve ser melhor avaliado, a fim de servir como subsídio para projetos de irrigação de precisão, uma vez que o monitoramento do bulbo molhado no solo auxilia na tomada de decisão com relação ao dimensionamento hidráulico e o manejo de irrigação (KUNZ et al., 2014). Nesse caso, para explicar o movimento de água no solo são utilizados programas computacionais que empregam modelos numéricos.

Os modelos numéricos reproduzem o que ocorre na natureza, baseados nos dados reais observados, com a finalidade de apresentar o comportamento de um sistema concreto e calculando condições futuras com uma resolução direcionada para ação pretendida (IRITANI, 1998). Nesta perspectiva, um modelo complexo pode ser motivo de orgulho para um matemático e inadequado para o pesquisador que vai aplicá-lo, pois muitas vezes as necessidades imediatas de um pesquisador são atendidas por um modelo parcial e simples, o qual não comporta todas as variáveis que possam influenciar na dinâmica do fenômeno estudado (BASSANEZI, 1999).

Em áreas irrigadas onde o racionamento de água se faz necessário, um estudo técnico que vise controlar a sua aplicação durante os ciclos das irrigações torna-se fundamental. Levando em consideração que nos solos agrícolas a condição predominante é a de não saturação, deve-se analisar o fluxo de água no estado transiente, ou seja, através da diferença da densidade de fluxo de água que atravessa certa camada de solo em função do tempo, ajudando a identificar e caracterizar os fatores que interferem no movimento de água em seu perfil, contribuindo para aperfeiçoar o manejo de irrigação com índices de produtividade desejáveis (ANDRADE; STONE, 2009).

Diante do exposto, o objetivo deste capítulo foi aplicar um modelo computacional que utiliza a técnica dos elementos finitos para prever fluxo de água vertical em solo não saturado.

## **14 REVISÃO DE LITERATURA**

### **14.1 Fluxo de água no solo**

Durante muitos anos, a quantificação do movimento de água no solo foi ignorada devido à dificuldade de compreensão deste fenômeno. O gradiente que causa o fluxo de água no solo é o potencial de pressão negativo. Contudo, o caminho para o fluxo de água em solos não saturados é mais oblíquo devido os poros estarem cheios de ar. Neste caso, a água deve ser contornada para fluir através da matriz do solo e isso aumenta o comprimento do caminho do fluxo, uma vez que os poros maiores, de mais fácil drenagem, estão cheios de ar, forçando a água a se mover através apenas dos poros menores que são menos condutores (LAL; SHUKLA, 2004). Vale ressaltar que não há uniformidade no avanço da umidade com a profundidade, pois a partir do momento em que um perfil permanece mais úmido a penetração da frente de umedecimento fica mais rápida, alcançando profundidades inferiores em um menor intervalo de tempo (TOZZATO, 2005).

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. Neste sistema a água se movimenta por meio dos potenciais, gravitacional, osmótico, de pressão e matricial. A soma de todos estes potenciais é conhecida por potencial total. Este parâmetro passa a ser interpretado como o gradiente de potencial total na direção vertical, que fisicamente representa a força que atua na unidade de volume de água fazendo-a mover, pois está relacionada a densidade de fluxo. A diferença entre a densidade fluxo de água que entra no solo e a densidade do fluxo de água que sai do mesmo, em certo intervalo de tempo, pode ser determinada através da variação do armazenamento de água que ocorre neste solo, em um intervalo de tempo estimado (LIBARDI, 2010).

### **14.2 Fluxo de água em solos não saturados**

A diferença entre fluxo de água em um solo saturado e em um não saturado está na representação quantitativa da condutividade hidráulica no perfil do solo (propriedade que expressa a facilidade com que a água se movimenta), que em solos não saturados decresce devido à presença de ar nos vazios. Neste caso, o fluxo vai depender da variação da área efetiva da passagem de água, que está sujeita as tensões superficiais, cuja importância

umenta à medida que os poros de menor diâmetro são preenchidos por ar (GERSCOVICH; GUEDES, 2004). O decréscimo da condutividade hidráulica está em função da sucção ou da umidade volumétrica do solo, e o formato da curva vai depender do tipo de solo, isto é, quanto mais arenoso for o solo maior será a variação da condutividade hidráulica não saturada (SOARES, 2006).

Neste sentido, a investigação do fluxo água no solo requer o conhecimento de alguns parâmetros em seus cálculos, como é o caso da condutividade hidráulica, que consiste em detalhar a redistribuição de água no perfil do solo. Mas, tratando-se de solos não saturados este parâmetro requer uma atenção maior durante os cálculos, uma vez que o mesmo é variável dentro do bulbo molhado (RIVERA et al., 2008). Outro parâmetro bastante pertinente é a disponibilidade da 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 (YANG et al., 2004).

É importante ressaltar que a quantificação do movimento de água em solos não saturados é bem mais complexa do que em solos saturados. Isso porque a condutividade hidráulica deixa de ser constante e passa a depender da umidade volumétrica ou do potencial matricial. Assim, se o conteúdo de água no solo diminui, há uma redução da área útil destinada ao seu fluxo e os poros vazios funcionam como barreiras ao movimento da água e como consequência há uma diminuição do valor de condutividade hidráulica (AMARO FILHO et al., 2008).

### **14.3 Modelagem numérica**

As hipóteses e parâmetros assumidos em um processo de modelagem de fluxo de água são reportadas na maioria das vezes 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 et al., 2002).

Em campos agrícolas o que prevalece é a condição de fluxo de água não saturada, 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). Além disso, os solos cuja condição é a de não saturação induz a heterogeneidade na capacidade da água distribuir-se nos poros, devido à dependência destes parâmetros, fazendo com que as equações de fluxo sejam altamente não lineares. Por isso é que muitos dos problemas envolvendo fluxo de água em solos não saturados são resolvidos por modelos numéricos (MISRA; NIEBER, 2004).

Vale salientar que se deve ter cautela no emprego de modelos numéricos, visto que, o solo é um meio heterogêneo com características de condutividade hidráulica diversificada e para sua solução requer um tratamento dos dados de forma adequada para aproximações por elementos finitos (CORREA, 2006). Desta forma, é bastante relevante a combinação da curva característica de sucção 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).

A partir do momento que se trabalha com arquiteturas numéricas é possível relacionar o conteúdo de água com a condutividade hidráulica do solo e desenvolver modelos de simulações para prever esta última durante os eventos de irrigação sob condições de campo (SAHA et al., 2009). Outro aspecto relevante é que os dados adquiridos da curva de sucção do solo por parâmetros de 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 et al., 2010).

Cabe ressaltar que existe uma grande diferença entre modelos que fazem medição e os que realizam a simulação de um comportamento. Neste último, não pode haver nenhuma otimização de 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 através de simulações a partir de critérios de avaliação testados diretamente em campo (RAINE et al., 2007). 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 (MEF), sendo que este último é aplicado principalmente a problemas de fluxo em 2D e 3D (OLIVEIRA, 2008).

De forma mais sucinta, a análise do fluxo de água no solo pelo MEF é feita em três passos. O primeiro é modelar o problema desenhando a malha de elementos finitos, determinar as propriedades dos materiais envolvidos e especificar as condições de contorno. O segundo é processar o modelo através da formulação e solução do sistema de equações de elementos finitos. O terceiro passo é a interpretação dos resultados, ou seja, cargas hidráulicas, gradientes e umidade volumétrica. Contudo, é importante lembrar que a utilização do método dos elementos finitos serve apenas para calcular a distribuição das cargas hidráulicas pela área a ser modelada, pois o fluxo propriamente dito é regido pela Lei de Darcy. Apesar disso, o objetivo dos métodos numéricos é auxiliar no gerenciamento dos recursos hídricos, ajudando no conhecimento da distribuição da água no solo e na sua concentração em função do espaço e tempo (PIZARRO, 2009). Mas sua aplicação não é tão fácil como parece, pois, leva em conta a complexidade pela obtenção de uma solução analítica para resolver problemas de fluxo de água no solo em condições de campo. Uma vez empregado o método numérico, essa passa por uma transformação que dá origem a uma equação diferencial parcial de fluxo em um conjunto de equações integrais, cuja solução é obtida pelo domínio de pontos nodais para diferenças finitas e o domínio dos elementos para o método dos elementos finitos (VENTURA, 2008).

Tratando-se de problemas que envolvem a aplicação de água e o comportamento do seu fluxo, por exemplo, em sistemas de irrigação por gotejamento superficial, 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).

#### **14.4 Programas computacionais para modelagem numérica**

Os softwares numéricos 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 variação das condições de contorno. No entanto, os resultados proporcionados pelos softwares numéricos são fortemente dependentes da confiabilidade dos parâmetros de entrada e muitas

vezes pode não levar em consideração os fatos reais que ocorrem no campo (SOARES et al., 2009).

A equação que explica a dinâmica da água em solos não saturados é a de Richards, que se trata de uma equação diferencial não linear, não possuindo solução analítica, requerendo então o uso de elementos finitos para obtenção das soluções. Como exemplos de softwares baseados em elementos finitos que utiliza a equação de Richards citam-se: Hydrus (SIMUNEK et al., 2006), FlexPDE (AL-CHALABI, 2013), SEEP/W (GEO-SLOPE International Ltd., 2009), COMSOL Multiphysics® (COMSOL, 2011) e SLIDE®.

O software Hydrus apresenta boa aplicabilidade aos problemas complexos de fluxo de água em solos não saturados, originando modelos precisos ao se trabalhar em uma dimensão, contribuindo para reduzir a carga computacional quando comparado aos modelos em três dimensões (ZHU et al., 2012). A característica do software SEEP/W se resume ao seu código, pois permite desenvolver o melhor ajuste para infiltração e a distribuição de água em solos saturados e não saturados em condições diversas de condutividade hidráulica do solo e foi muito eficaz na modelagem de fluxo de água no solo para evitar deslizamentos em taludes (SORBINO; NICOTERA, 2013). No caso do software FlexPDE, além de analisar o fluxo de água no solo nas condições estacionárias ou transientes, o programa permite que o usuário proponha equações no próprio algoritmo de simulação, o que requer, por parte do usuário, conhecimento aprofundado sobre o problema analisado (AL-CHALABI, 2013). O software COMSOL Multiphysics® simula e ajuda a prever modelos de distribuição espacial de água em solos heterogêneos permitindo uma situação mais realista do local de estudo, mas exige familiaridade com software devido a sua complexidade (BOLUWADE; MADRAMOOTOO, 2011).

O software Slide® é um dos softwares 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). Este 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 triangular 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. O modelo é disponibilizado em 2D, em que o domínio de interesse é subdividido em uma malha de cálculo correspondente as propriedades hidráulicas em comum com as condições reais

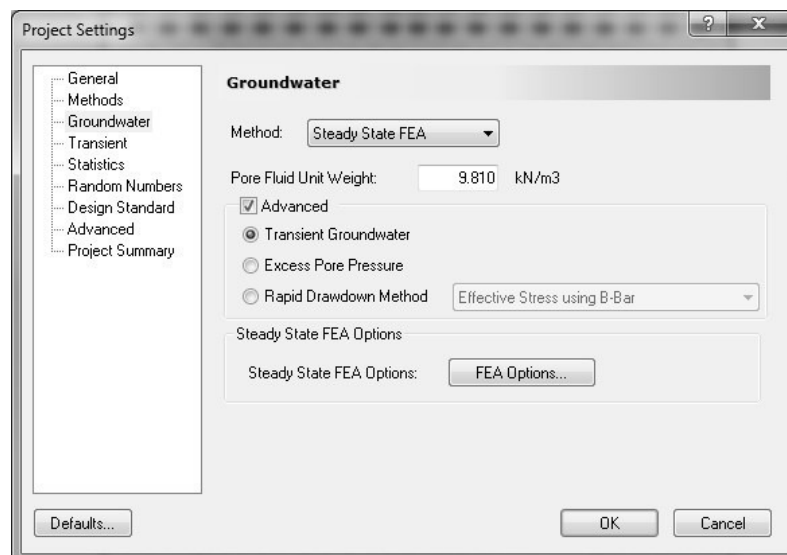
## 15 MATERIAL E MÉTODOS

### 15.1 Modelagem computacional 2 D

Esta parte do trabalho foi dividida em dois procedimentos. O primeiro foi o monitoramento da formação do bulbo molhado do solo para fornecer informações do conteúdo de água em condições de campo (Ver capítulo 2). O outro procedimento foi a realização das simulações da frente de umedecimento vertical no solo utilizando modelo numérico por meio de programa computacional.

O programa utilizado para as simulações do fluxo de água no solo foi o *Slide*® 6.0 da Rocscience Inc., possuindo um módulo chamado *Groundwater* que permite simular o fluxo de água para solos em condições saturadas e não saturadas (Figura 40), em duas dimensões. O modelo necessita do conhecimento de variáveis como: condições de contorno iniciais, propriedades físicas do solo, 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). O software *Slide*® possui uma interface onde é possível a visualização gráfica das simulações realizadas.

Figura 40 – Método de fluxo de água do software *Slide*®



Para sua operação, o software solicita algumas informações (Figura 41). No caso deste trabalho foi definido o modelo de van Genuchten com seguintes parâmetros:  $\alpha = 0,04 \text{ cm}^{-1}$ ;  $m = 0,3235$ ;  $n = 1,4782$ ;  $\theta_r = 0,078 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$  e  $\theta_s = 0,288 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ . Estes parâmetros foram

extraídos do trabalho de BEZERRA e OLIVEIRA (1999) que obtiveram esses dados do mesmo solo que foi instalada a malha de sensores para realização deste trabalho.

Os valores utilizados de umidade volumétrica na condição de saturação e condutividade hidráulica saturada ( $K_s$ ) foram  $0,38 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$  e  $0,0014 \text{ cm s}^{-1}$ , respectivamente. Este último parâmetro foi obtido no Laboratório de Mecânica dos Solos e Pavimentação da UFC, seguindo o procedimento da NBR 13292 da ABNT, em que a amostra totalmente saturada foi submetida a uma carga hidráulica contínua (Figura 42).

Figura 41 – Tela de informações requeridas pelo software Slide®

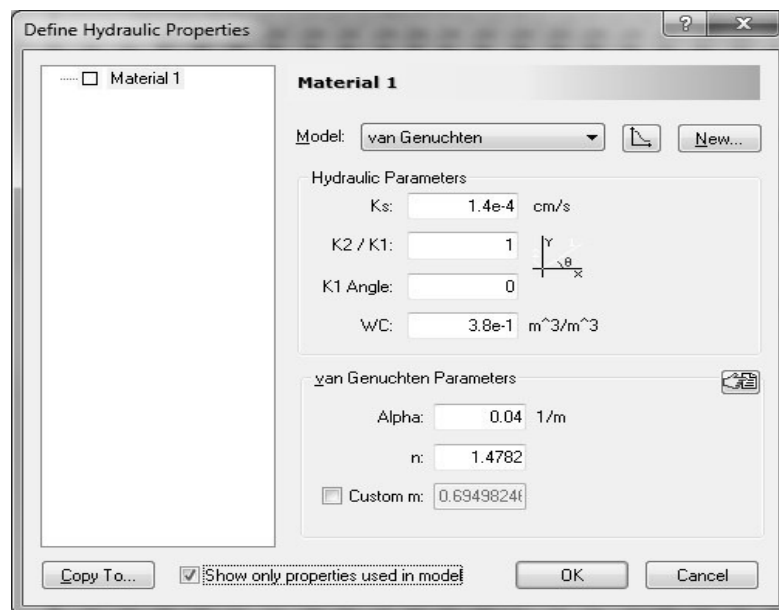
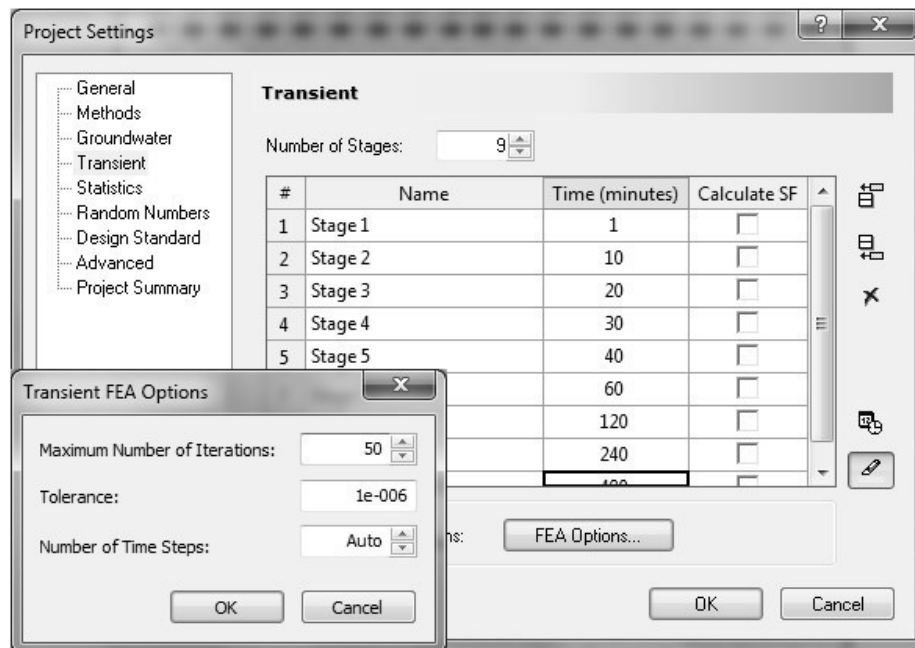


Figura 42 – Ensaio de permeâmetro de carga contínua



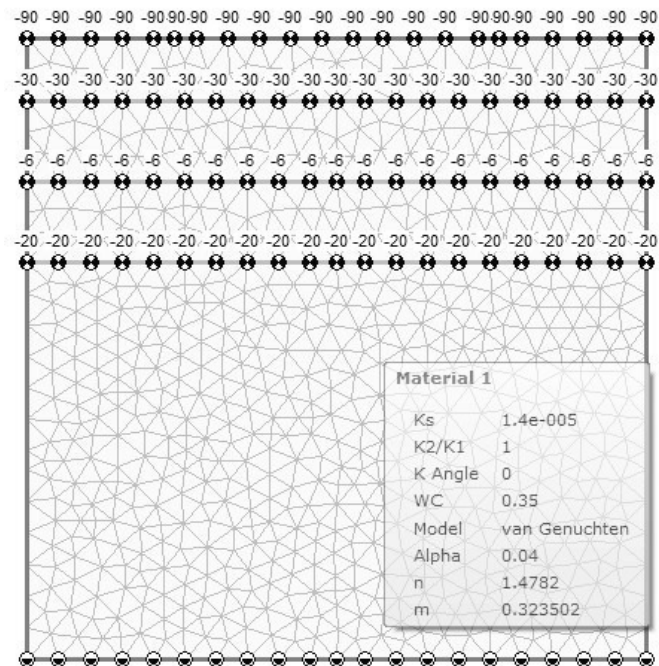
As características temporais também são solicitadas no software (Figura 43). O tempo total de modelagem adotado foi de 480 minutos, que corresponde a 8 horas. Este tempo foi intercalado em 9 estágios (1, 10, 20, 30, 40, 60, 120, 240 e 480 minutos), com base numa carga hidráulica contínua que correspondeu a vazão de  $2 \text{ L h}^{-1}$ . É necessário informar ao software a unidade de tempo utilizada, neste caso em minutos. No que diz respeito a simulação, foi determinado um número máximo de 50 interações.

Figura 43 – Tela de informações temporais requeridas pelo software Slide®



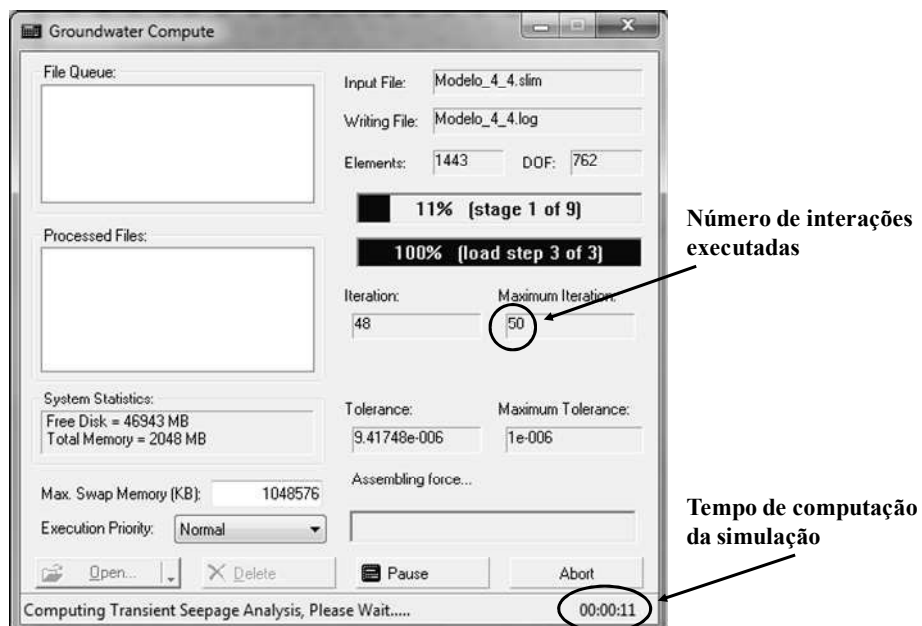
Para o processo de simulação foi desenhado uma seção transversal nas dimensões de  $1 \text{ m} \times 1 \text{ m}$ , e também definido as três profundidades de camada (10 cm, 23 cm e 36 cm) em que se encontravam os sensores instalados para tornar a simulação mais próxima das condições reais do experimento. O software determinou as malhas triangulares não estruturadas, e o seu algoritmo calculou as interações para a região bidimensional. Os valores de potencial matricial do solo analisado, utilizados como condição de contorno na malha triangular para as profundidades de 10 cm, 23 cm e 36 cm (Figura 44), foram obtidas pelo modelo de van Genuchten apresentado na Equação 2.

Figura 44 – Malha triangular formada pelo software Slide®



A estrutura do modelo consistiu também na utilização do disco saturado como fonte de entrada de água no sistema de simulação. Utilizou o diâmetro médio do disco saturado em 5 cm conforme medido em campo (Ver capítulo 2). Após a preparação de toda a estrutura do modelo sob as condições encontradas no campo, o programa inicia a simulação do bulbo molhado compilando as interações para cada estágio de tempo planejado (Figura 45).

Figura 45 – Execução da simulação no software Slide®



## 15.2 Calibração do modelo

O processo de calibração consistiu em ajustar os valores de sucção na malha de elementos finitos, minimizando a diferença entre os valores de umidade volumétrica calculada pelo modelo e os obtidos a partir das medições dos sensores capacitivos FDR.

Os parâmetros internos do modelo, tais como a condutividade hidráulica saturada, a umidade volumétrica e a tensão de sucção total no sistema, são ajustados até que o modelo computacional proposto se comportasse de maneira similar as condições de campo. Este procedimento corresponde à fase de calibração do modelo.

Na parametrização do modelo buscou-se aproximar as condições de umidade do solo, obtidas pelos sensores FDR, para processar as simulações da frente de umedecimento semelhante as encontradas no campo. Os valores de sucção inseridos no software e utilizados como condições de contorno na simulação foram calculados de acordo com as leituras de umidades atuais adquiridas dos sensores FDR utilizando o modelo de van Genuchten, conforme Equação 2.

$$|\Psi_m| = \frac{\left[ \left( \frac{0,29 - 0,08}{\theta - 0,08} \right)^{1/0,3235} - 1 \right]^{1/1,4782}}{0,04} \quad 2$$

Onde,

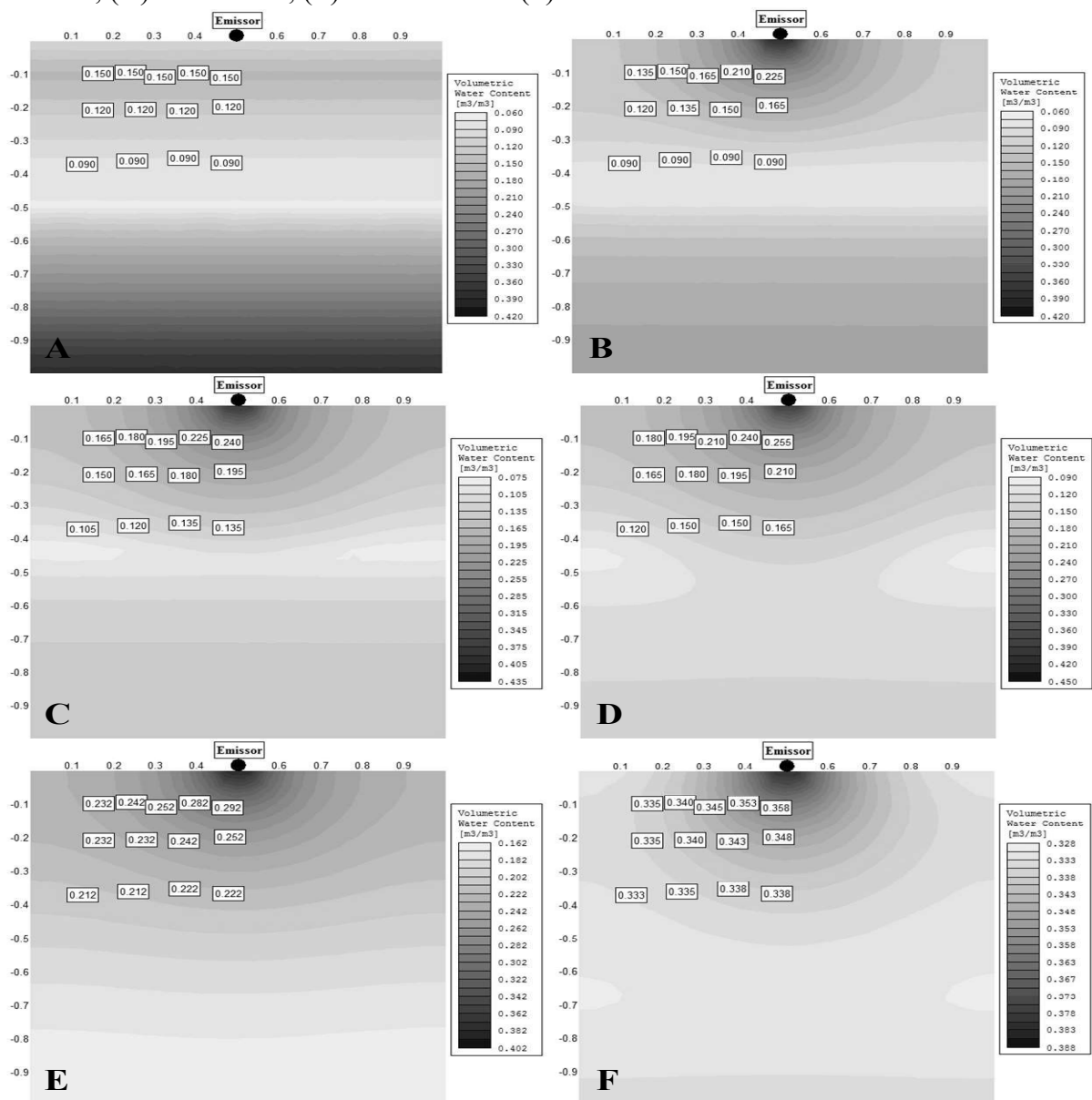
$|\Psi_m|$  corresponde ao potencial matricial, em kPa; e  $\theta$  a umidade atual do solo, em  $\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$ .

## 16 RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 16.1 Calibração do modelo

Na Figura 46 estão apresentados os mapas de simulação da dinâmica da água no solo pelo software Slide® de acordo com os parâmetros físicos do modelo de van Genuchten durante uma irrigação de 4 horas.

Figura 46 – Simulação do fluxo de água no solo: (A) condição inicial; (B) 10 minutos; (C) 40 minutos; (D) 60 minutos; (E) 120 minutos e (F) 240 minutos





As simulações da Figura 46 representam as condições encontradas no campo e utilizadas no modelo, em que a umidade volumétrica saturada obtida pelos sensores capacitivos FDR foi de  $0,39 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$ . Os valores de umidade do solo simulados por camada no modelo não corresponderam aos valores observados em campo, chegando a superestimar os dados em 4%. Contudo, a densidade do solo e densidade das partículas obtidos em laboratório para o solo analisado apontaram para uma porosidade de 35%. Considerou-se então para as simulações a umidade de saturação de  $0,35 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$ , que seria a capacidade máxima para o solo avaliado de acordo com os parâmetros encontrados em laboratório.

Após essa modificação as simulações convergiram com os valores observados em campo. Para uma melhor visualização e compreensão, as simulações foram organizadas em 10 figuras. O progresso evolutivo do modelo com os parâmetros adequados pode ser visualizado nas Figuras 47, 48, 49, 50, 51, 52, 53, 54, 55 e 56, que apresentam a evolução da simulação do fluxo de água no solo ( $\text{cm}^3 \text{ cm}^{-3}$ ) para um ciclo de irrigação que durou 8 horas, com uma vazão de  $2 \text{ L h}^{-1}$ . Nesta simulação constou a condição inicial, que é considerada a condição de umidade atual do sistema, e mais 9 estágios temporais, que compreendem a condição transiente do modelo (simulação da frente de umedecimento com o tempo), distribuídos em 1, 10, 20, 30, 40, 60, 120, 240 e 480 minutos. O tempo gasto pelo software para a compilação da simulação foi de 35 segundos.

Os dados de umidade volumétrica fornecidos por três sensores que se encontravam instalados a 5 cm de distância horizontal e a 10 cm, 23 cm e 36 cm de distância vertical do emissor, foram utilizados para estabelecer as condições iniciais do modelo. Os valores de umidade obtidos no campo referentes às profundidades de 10 cm, 23 cm e 36 cm analisadas no modelo foram de  $0,195 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$ ;  $0,180 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$  e  $0,150 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$ , respectivamente, conforme visto na Figura 49.

Figura 47 – Simulação do fluxo de água no solo para condição inicial

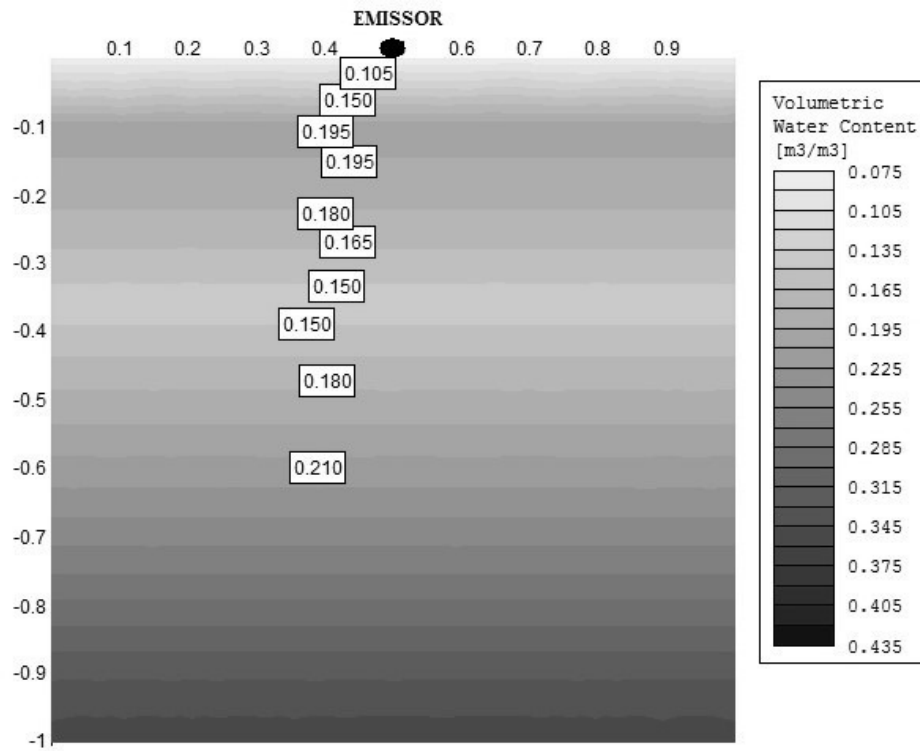


Figura 48 – Simulação do fluxo de água no solo para o tempo de 1 minuto

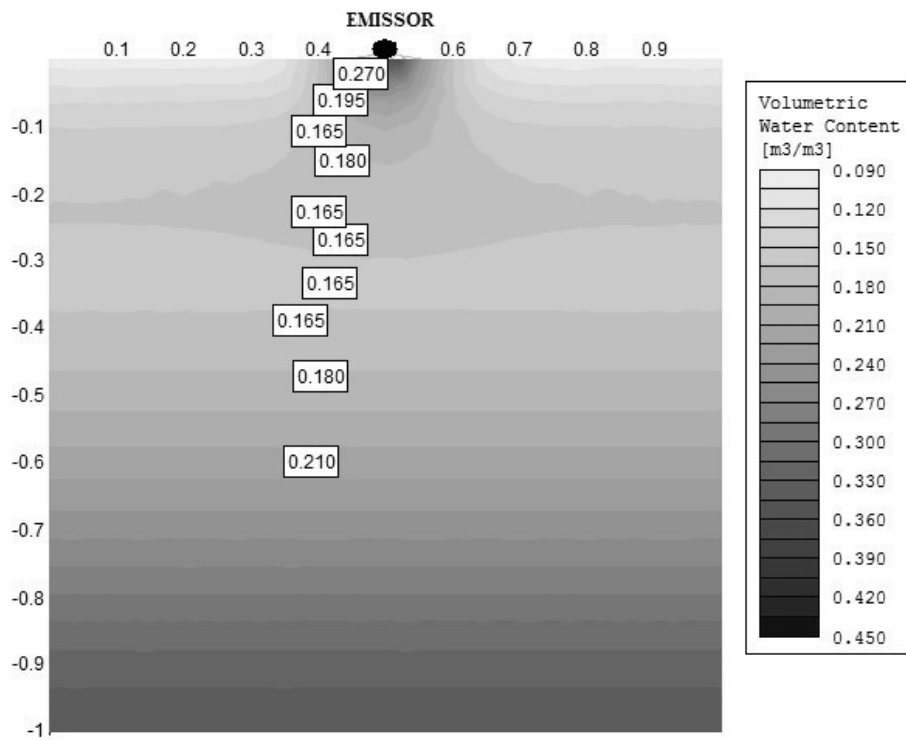


Figura 49 – Simulação do fluxo de água no solo para o tempo de 10 minutos

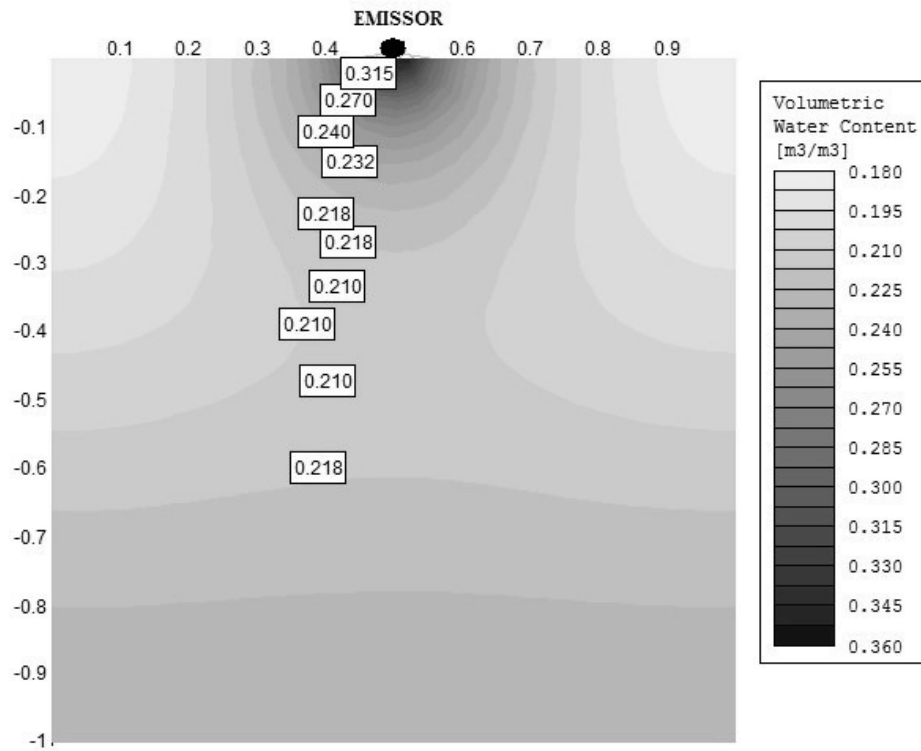


Figura 50 – Simulação do fluxo de água no solo para o tempo de 20 minutos

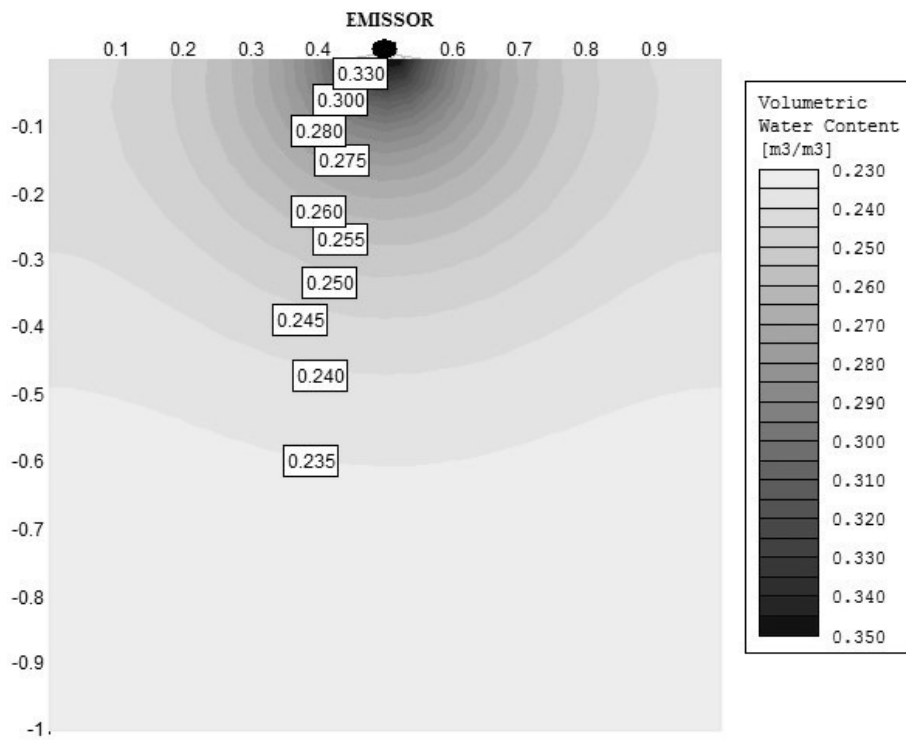


Figura 51 – Simulação do fluxo de água no solo para o tempo de 30 minutos

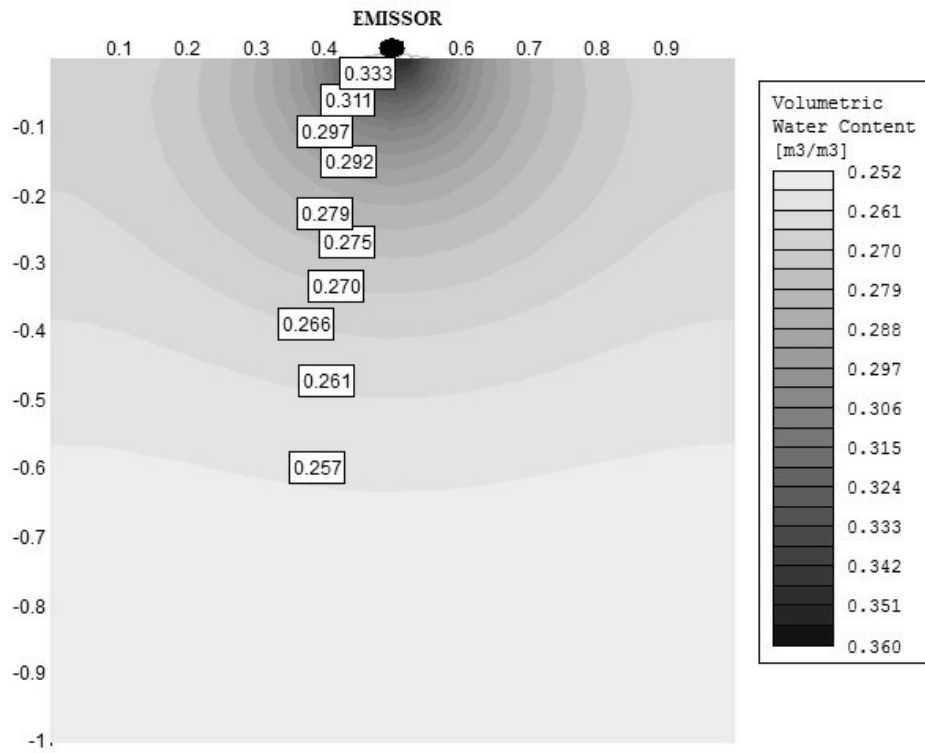


Figura 52 – Simulação do fluxo de água no solo para o tempo de 40 minutos

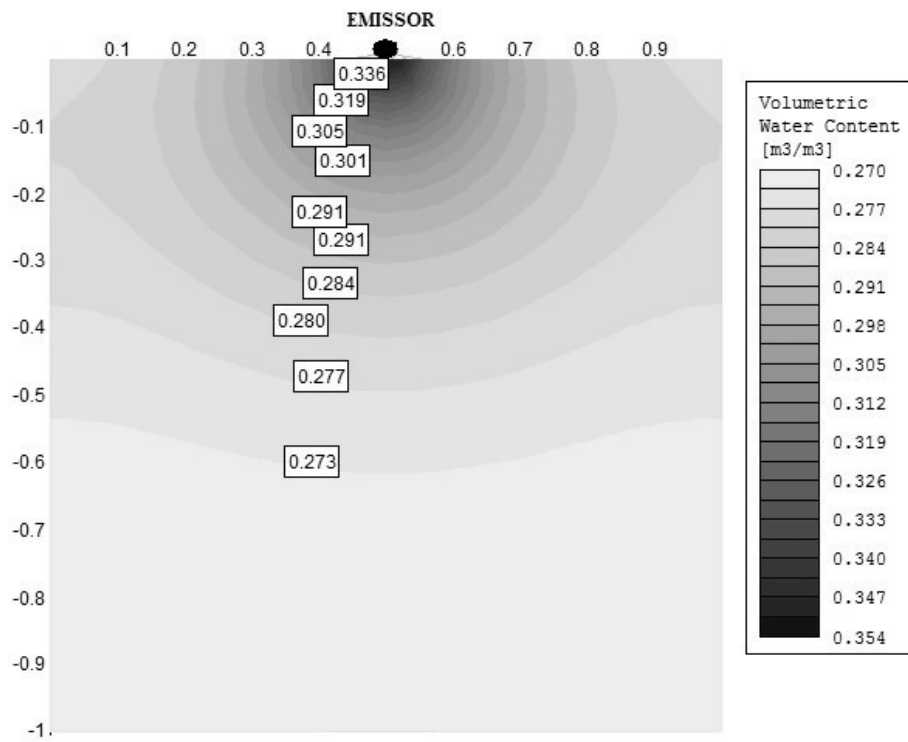


Figura 53 – Simulação do fluxo de água no solo para o tempo de 60 minutos

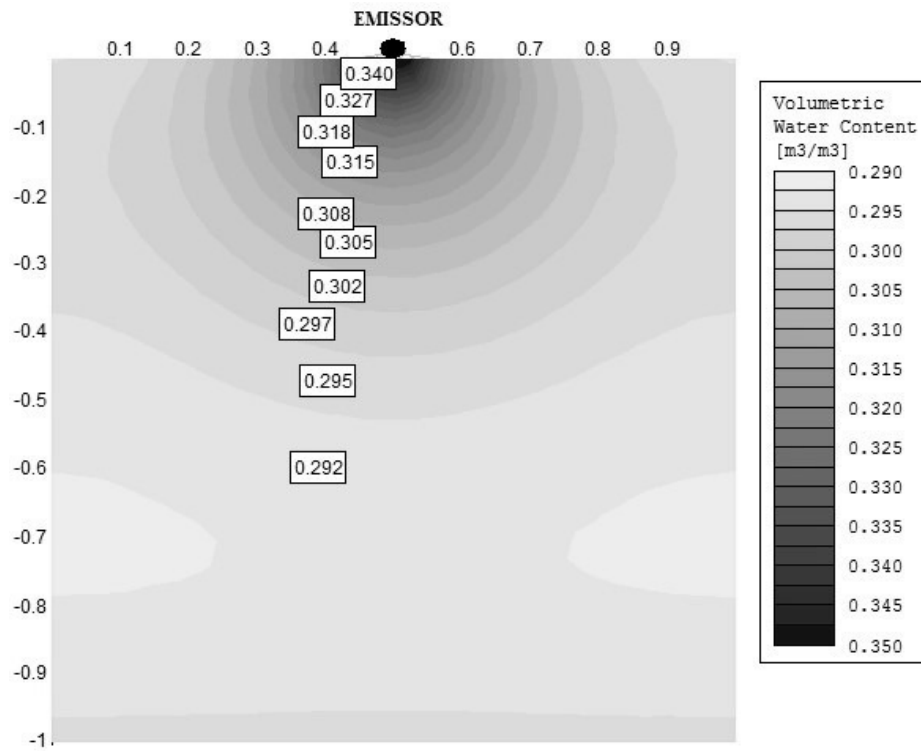


Figura 54 – Simulação do fluxo de água no solo para o tempo de 120 minutos

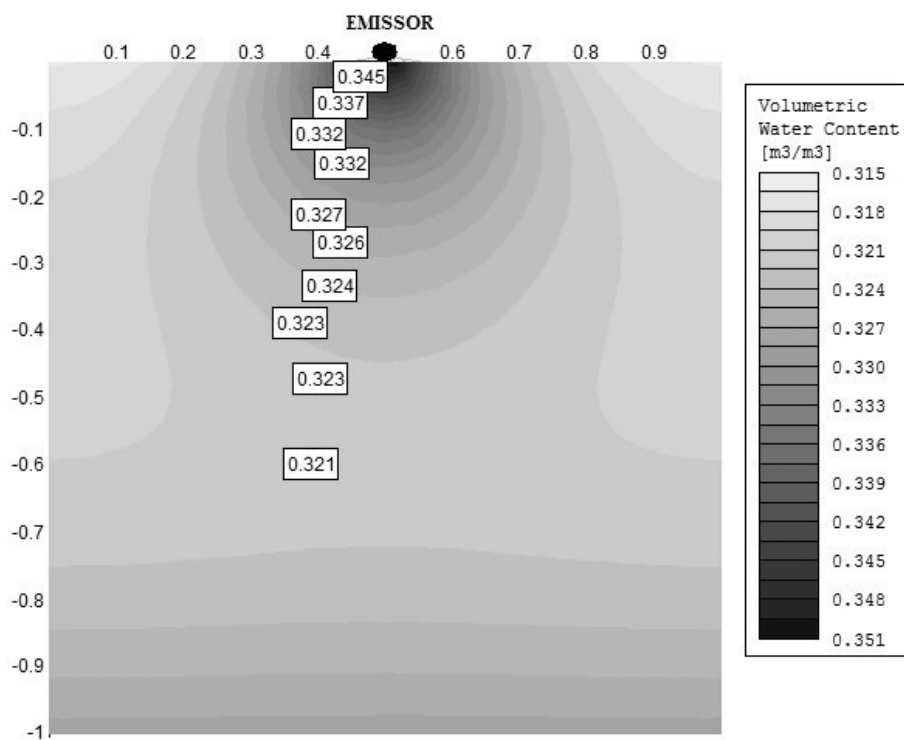


Figura 55 – Simulação do fluxo de água no solo para o tempo de 240 minutos

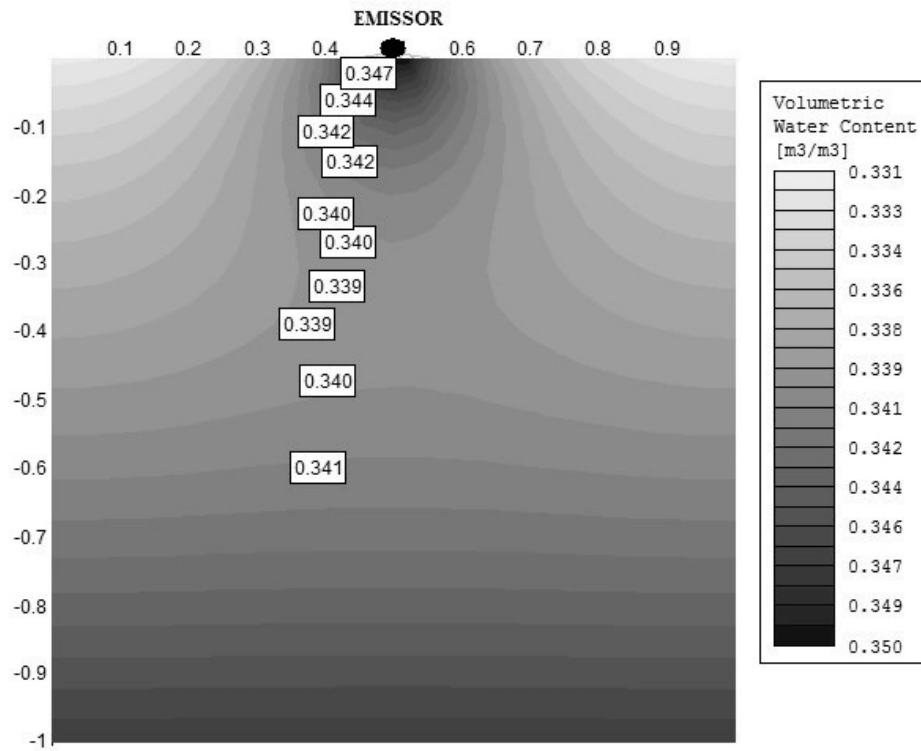
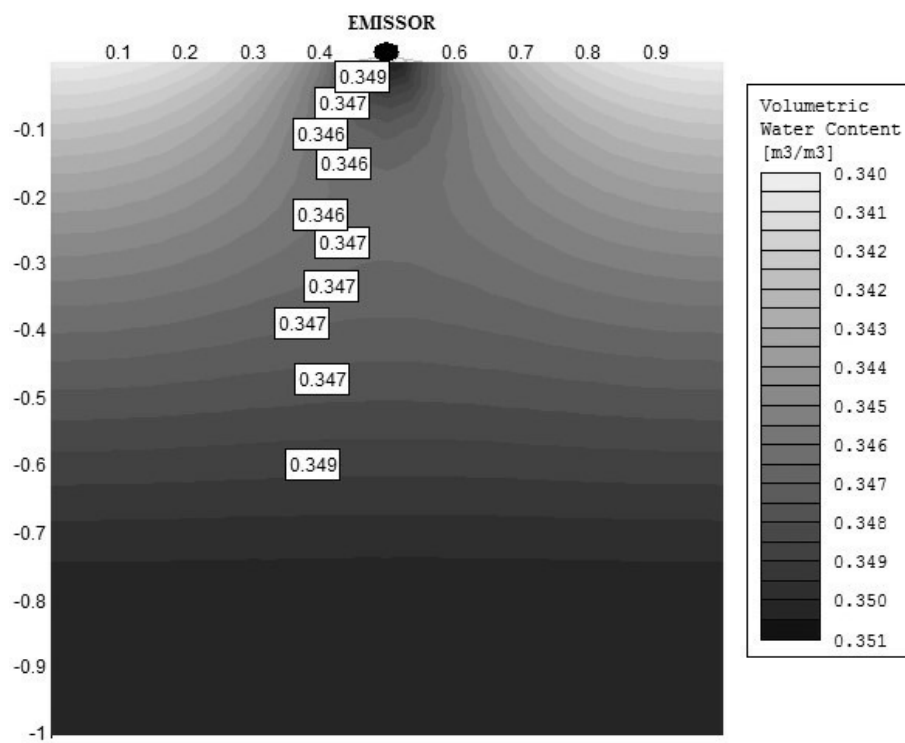


Figura 56 – Simulação do fluxo de água no solo para o tempo de 480 minutos



Com relação às Figuras 47, 48, 49, 50, 51, 52, 53, 54, 55 e 56, observe que houve um aumento gradativo dos teores de umidade volumétrica enquanto a frente de umedecimento evoluía. Contudo, esta evolução foi mais rápida no início da simulação, pois logo nos 10 primeiros minutos a umidade volumétrica a 10 cm de profundidade já se encontrava na capacidade de campo para este solo, que é de  $0,24 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$ . Valor esse que foi atingido nas profundidades de 23 cm e 36 cm aos 20 minutos.

Os dados de umidade da frente de umedecimento simulados pelo modelo foram confrontados com as leituras medidas pelos sensores capacitivos FDR. Os comparativos destes dados estão apresentados nas Figuras 57, 58 e 59, que apresentam também os coeficientes de determinação, obtidos pelo modelo de regressão potencial o qual se ajustou melhor aos dados, tanto para os medidos pelo sensor como para os simulados pelo programa Slide®.

Figura 57 – Comparação dos dados de umidade volumétrica medidas em campo pelos sensores capacitivos com os fornecidos pela simulação do programa Slide® para profundidade de 10 cm

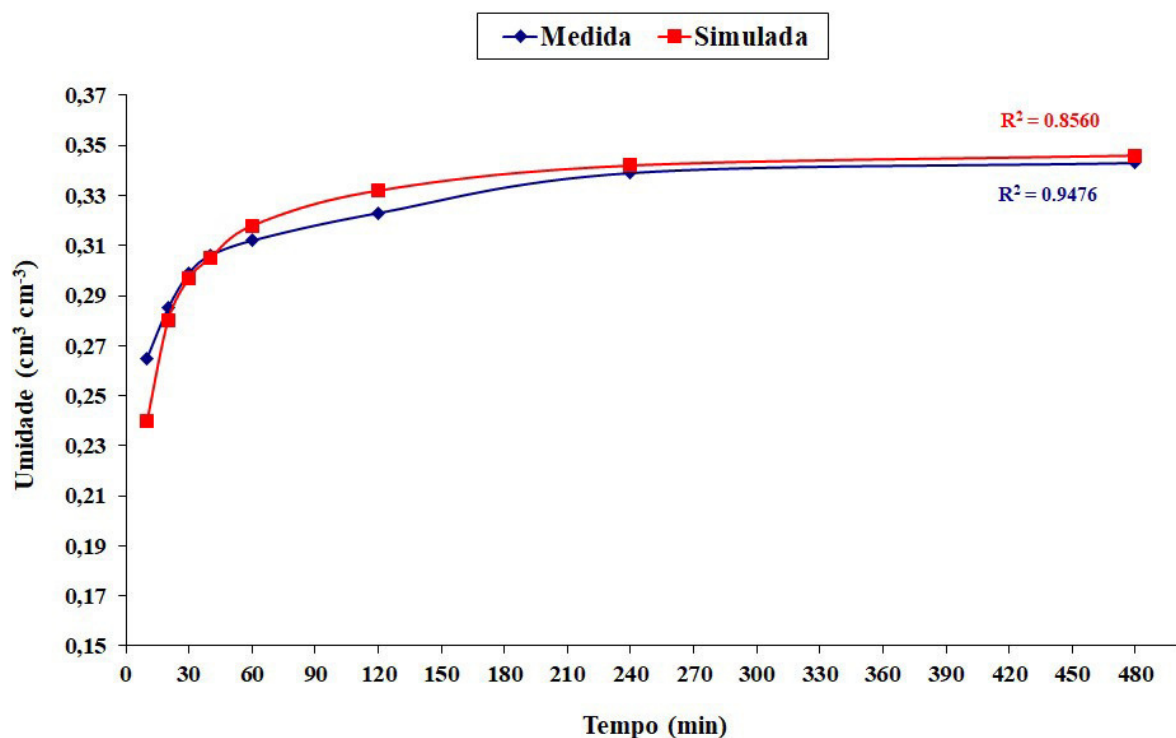


Figura 58 – Comparação dos dados de umidade volumétrica medidas em campo pelos sensores capacitivos com os fornecidos pela simulação do programa Slide® para profundidade de 23 cm

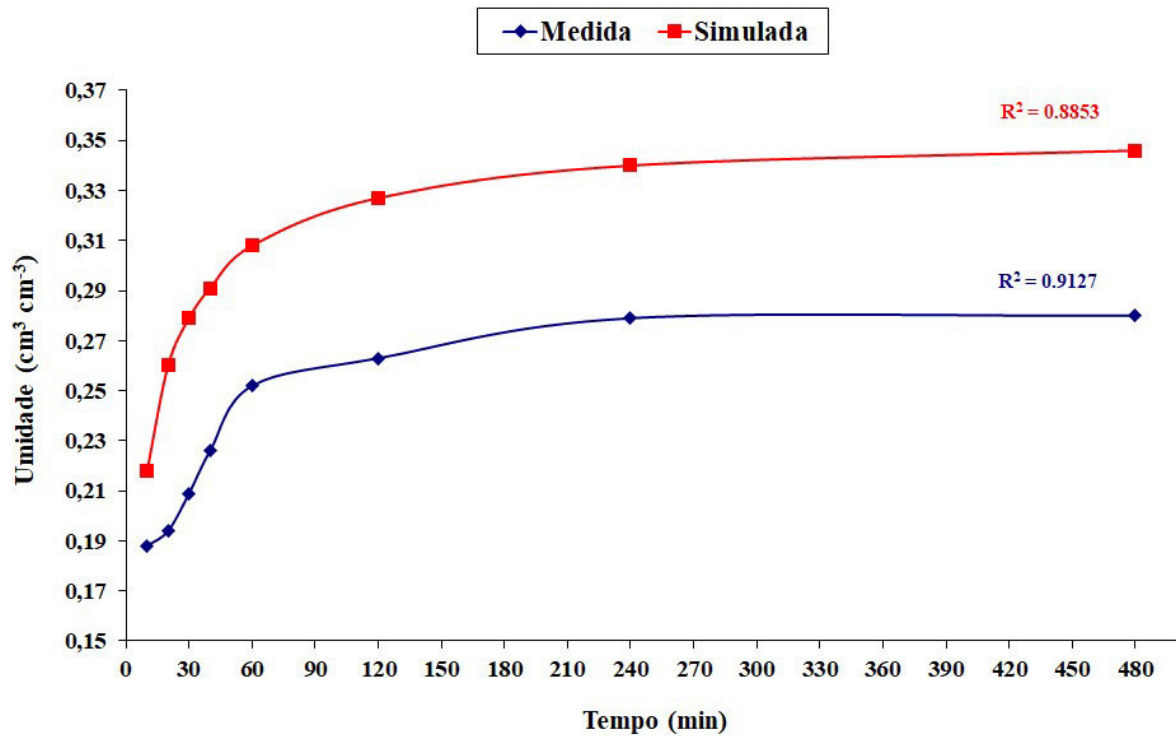
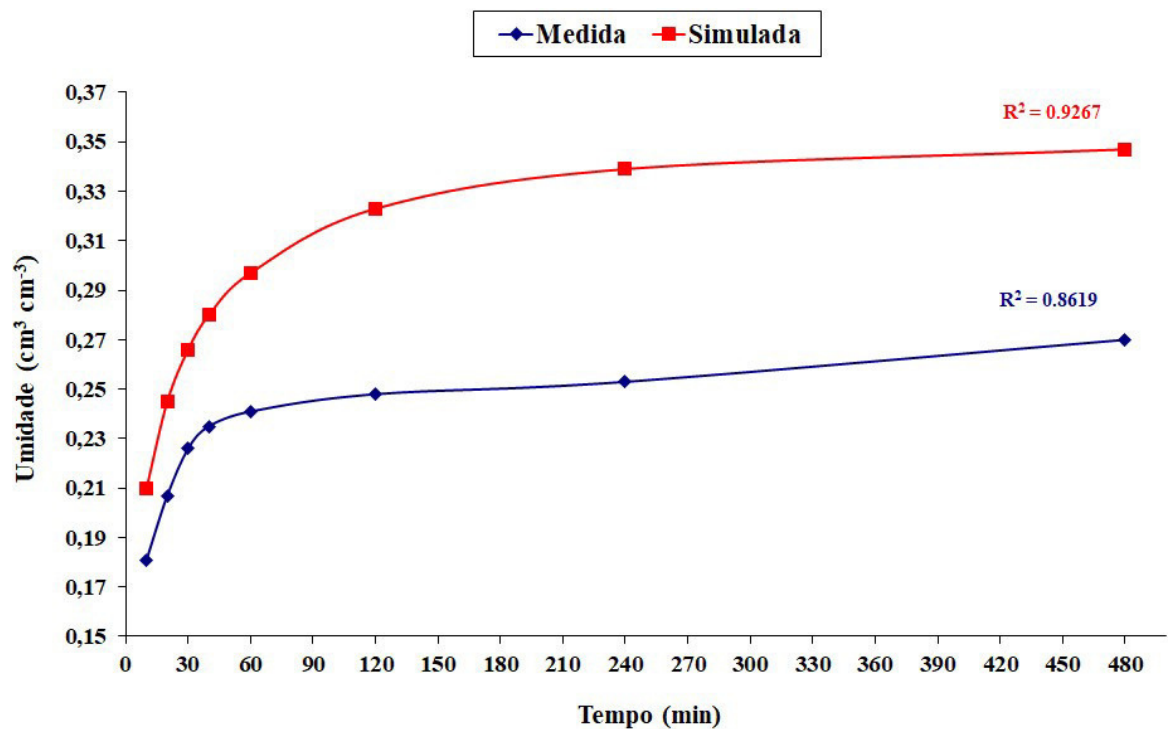


Figura 59 – Comparação dos dados de umidade volumétrica medidas em campo pelos sensores capacitivos com os fornecidos pela simulação do programa Slide® para profundidade de 36 cm





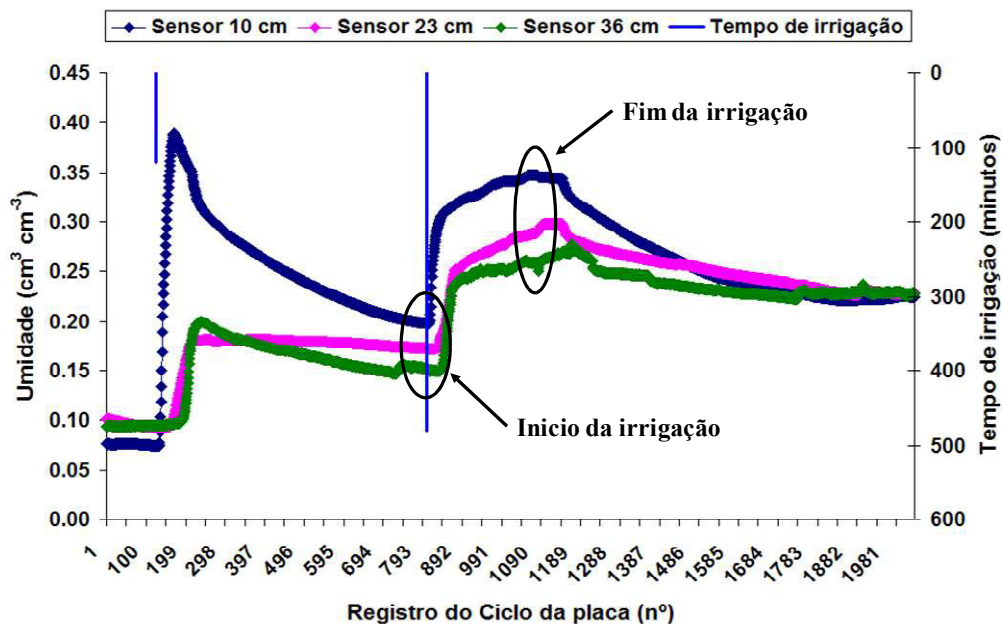
Apesar dos dados de umidade volumétrica obtidas pela simulação terem se distanciado dos teores de água observados pelos sensores nas camadas de 23 cm e 36 cm, o mesmo não aconteceu para a profundidade de 10 cm, pois os valores simulados e observados assumiram uma estreita relação. Considerando esta profundidade de 10 cm pode-se constatar a proximidade dos valores de umidade medidos pelo sensor com o apresentado pelo modelo.

A diferença máxima verificada entre os dados foi de aproximadamente 7% na camada de 23 cm e 8,6% na camada de 36 cm de profundidade. Considerando que a malha de sensores se encontrava instalada num cultivo de melancia e que o manejo através da automação adota como base os valores de umidade na camada de 0-20 cm para determinar o tempo de irrigação, pode-se exaltar a funcionalidade do modelo, uma vez que a simulação apresentou valores de umidade que ficaram muito próximos dos dados observados em campo. Percebe-se que com apenas 20 minutos foi possível disponibilizar água na capacidade de campo até a profundidade de 40 cm, onde se encontra a profundidade efetiva das raízes da cultura da melancia. Oliveira (2012) trabalhou com manejo automático em uma área agrícola utilizando sensores de umidade para determinação do tempo de irrigação no cultivo da melancia, onde os tempos definidos não ultrapassavam, em sua maioria, 30 minutos de aplicação de água. O que confirma a eficácia do modelo na previsão do tempo de irrigação, bastando para isso entrar com os parâmetros exigidos pelo software Slide®.

Vale ressaltar que a simulação do modelo no software não contabiliza a extração de água pelas raízes e por isso ocorre maior velocidade de infiltração da água. Este fato foi observado por Rocha et al. (2010), em que os mesmos declaram que um modelo pode simular a liberação de água ao solo de forma mais frequente e mais intensa do que ocorre no experimento, pois o modelo não contabiliza a provável resistência interna do sistema radicular. Entretanto, a simulação apresentada pode ser encarada como uma implicação de um problema real através de teorias aplicadas a um programa, que por meio de hipóteses e simplificações permite uma representação de maneira acessível, aproximando-se da realidade ocorrida no campo. Mas os dados sugerem um estudo mais aprofundado do modelo, no que diz respeito às diferenças de camadas, pois a determinação dos parâmetros físicos do solo para cada profundidade avaliada contribuirá bastante para uma maior aproximação entre as condições reais e as simulações do programa. A proximidade destes eventos aponta para uma validação da simulação, intensificando estudos sobre o software para a aplicação do modelo numérico destinado a previsão do fluxo de água em solos não saturados.

Na Figura 60, é mostrado o comportamento dos sensores capacitivos no momento da irrigação que durou 480 minutos, para as profundidades de 10 cm, 23 cm e 36 cm, respectivamente. A nível de comparação, foram considerados os sensores instalados na linha vertical mais próxima do emissor. Estes dados foram os mesmos utilizados na validação do modelo.

Figura 60 – Conteúdo de água observado durante dois eventos de irrigações nas profundidades de 10 cm, 23 cm e 36 cm



Analisando o comportamento das respostas dos sensores, que foram convertidos em valores de unidade volumétrica, observou-se que a resposta do sensor localizado a 10 cm foi muito rápida, provavelmente devido à textura arenosa que se encontra nesta camada. Portanto, o fluxo de água iniciado a partir da vazão do emissor (2L/h) escoou mais rapidamente nesta camada de solo composta por material de granulometria arenosa-siltosa. Já os sensores localizados a 23 cm e 36 cm de profundidade respondem mais lentamente em comparação a profundidade de 10 cm. Isso pode estar ligado ao tempo que a frente de umedecimento leva para atingir as camadas inferiores. Contudo, foi verificado através de amostras de solos coletadas, que a camada de 20 - 40 cm já apresentava diferença de textura, o que explica uma menor permeabilidade, uma vez que a análise granulométrica deste solo revelou uma composição granulométrica de 30% compreendida de silte e argila.

Um detalhe importante a ser explanado, exceto no primeiro evento de irrigação, é que ao iniciar a segunda irrigação, cerca de 85 minutos depois, a partir do momento em que os sensores detectaram a presença de umidade do solo, esta teve um rápido aumento de



Nas Figuras 62, 63, 64, 65, 66, 67 e 68 estão disponibilizadas as simulações do modelo com base na condição inicial apresentada na Figura 61, nos intervalos de tempo de 1, 5, 10, 15, 20, 25 e 30 minutos, respectivamente. O tempo de compilação para esta situação durou 40 segundos.

Figura 62 – Simulação do fluxo de água no solo após 1 minuto de irrigação

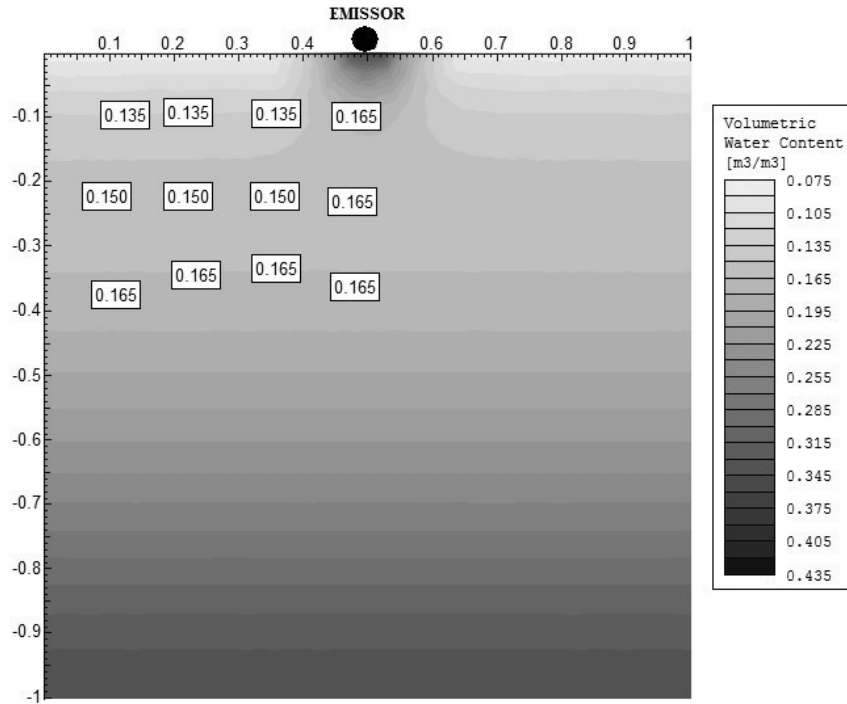


Figura 63 - Simulação do fluxo de água no solo após 5 minutos de irrigação

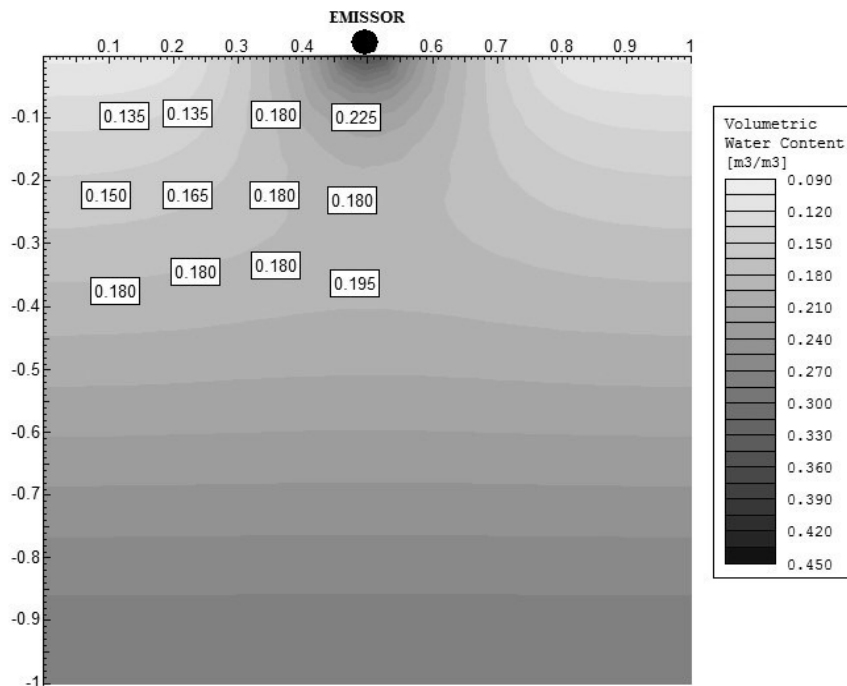


Figura 64 - Simulação do fluxo de água no solo após 10 minutos de irrigação

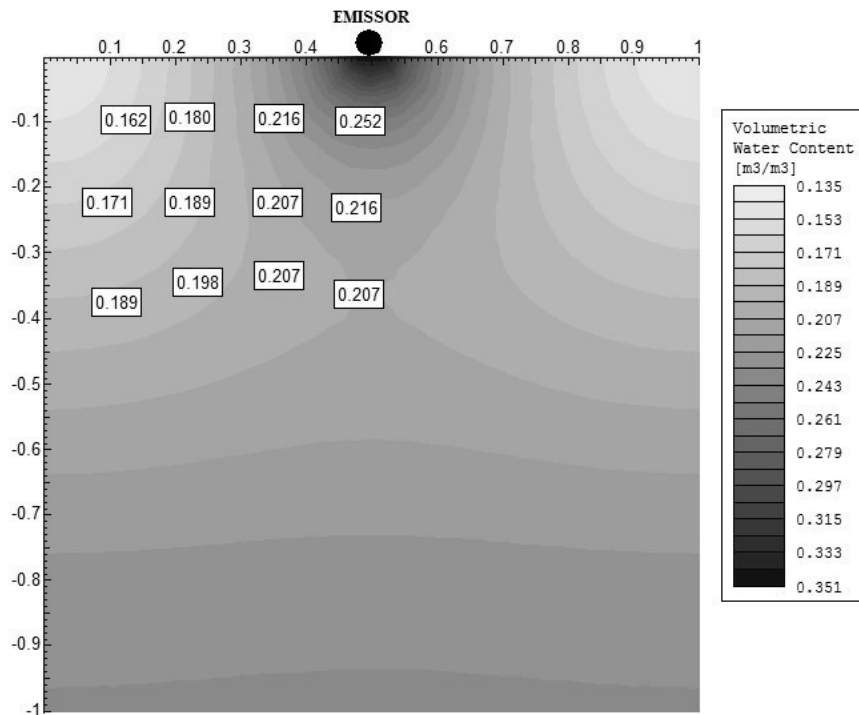


Figura 65 - Simulação do fluxo de água no solo após 15 minutos de irrigação

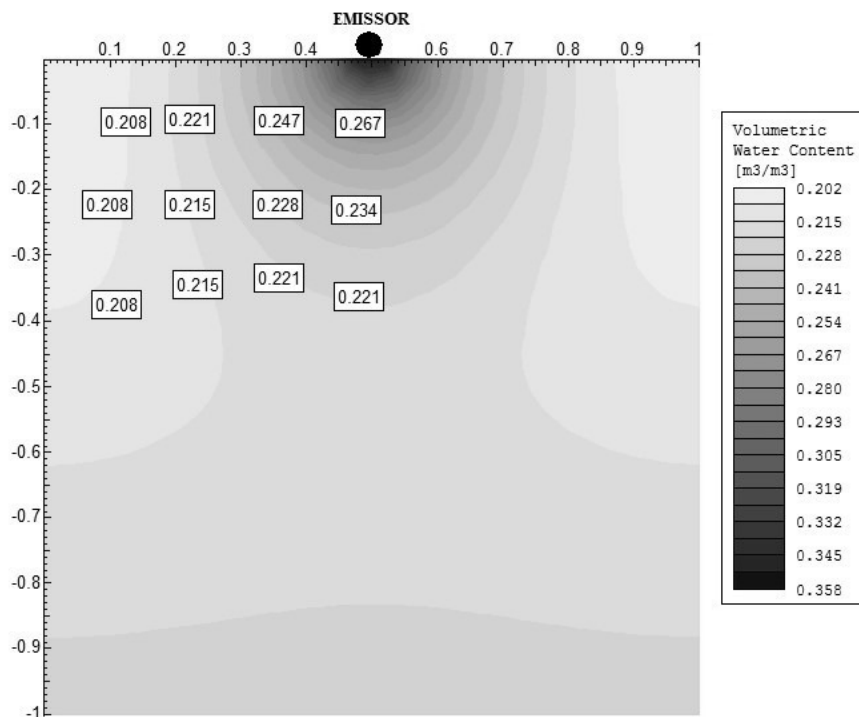


Figura 66 - Simulação do fluxo de água no solo após 20 minutos de irrigação

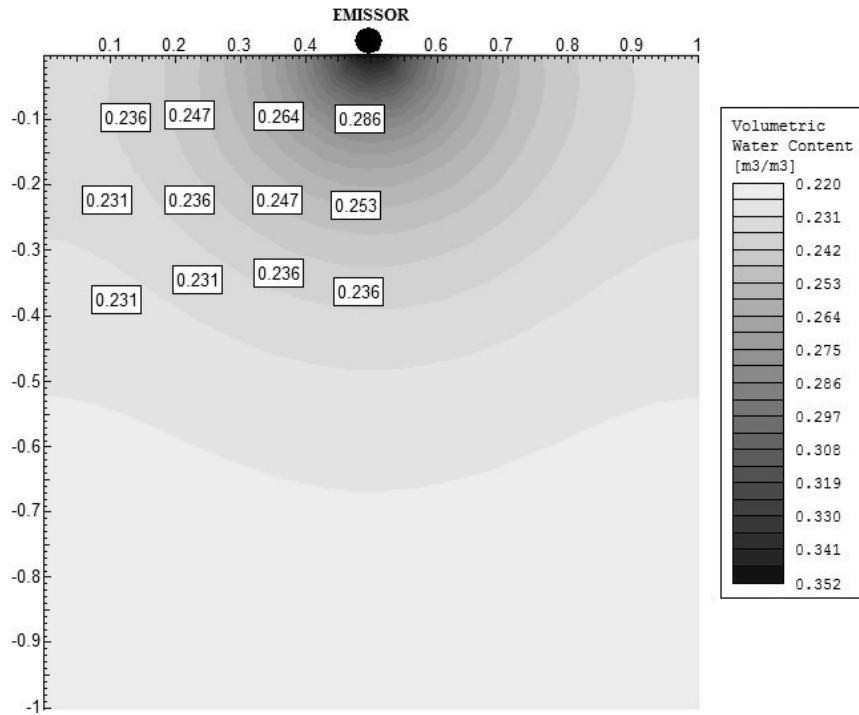


Figura 67 - Simulação do fluxo de água no solo após 25 minutos de irrigação

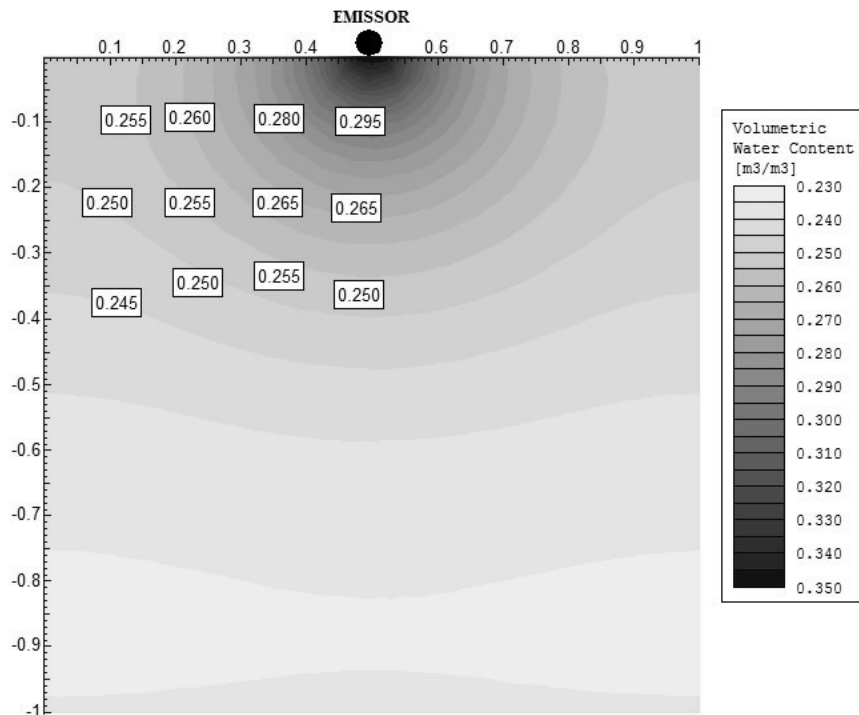
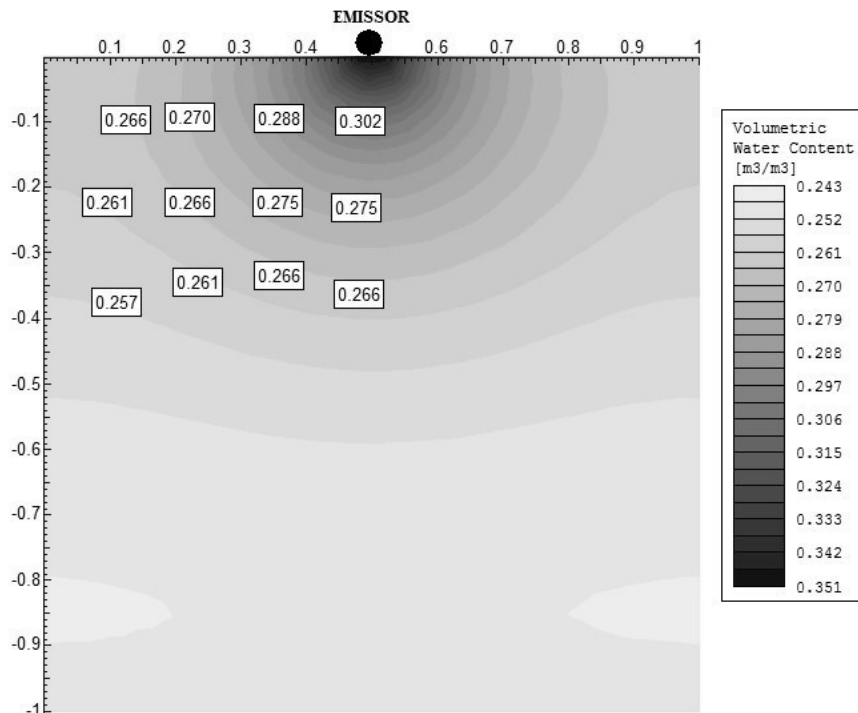


Figura 68 - Simulação do fluxo de água no solo após 30 minutos de irrigação



Como se pode observar, na camada de 10 cm logo abaixo do emissor o valor de umidade volumétrica na capacidade de campo chegou a ser ultrapassado aos 10 minutos de irrigação, como mostra a Figura 64. Caso o objetivo fosse deixar a ultima camada com o teor de água na capacidade de campo ( $0,23 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$ ), necessitaria de 20 minutos de irrigação, conforme apresentação na Figura 66. De acordo como o modelo, o tempo necessário para disponibilizar a umidade do solo na capacidade de campo para toda a malha estaria entre 20 e 25 minutos de irrigação. A diferença entre o tempo estimado pelo modelo numérico e o estipulado por um único sensor instalado no campo está em torno de 10 minutos. Tempo este considerado a mais, segundo a simulação.

É importante ressaltar que o modelo considera os mesmos parâmetros ao longo do perfil da seção, o que na verdade não acontece em condições reais de campo. Um estudo mais aprofundado do modelo seria adequado para dividir em camadas de acordo com parâmetros determinados para cada profundidade que se deseja analisar. Contudo, o software empregado para modelagem do fluxo de água no solo tornou possível determinar o tempo de aplicação de água utilizando o modelo calibrado para as condições do solo avaliado.

## 17 CONCLUSÕES

A execução deste trabalho comprovou o potencial de aplicação de um modelo computacional empregando o método dos elementos finitos em condições de solo não saturado para determinar o tempo de aplicação de água em sistemas de irrigação por gotejamento.

A modelagem permitiu entender o processo de fluxo de água no solo, direcionando as necessidades de levantamento de mais parâmetros físicos do solo, mas a sua grande vantagem está na facilidade de desenvolver modelos sem restrição do uso das propriedades físicas do solo.

A calibração do modelo foi a etapa mais demorada para definir o processo de modelagem, sendo muito relevante um estudo criterioso com relação aos parâmetros físicos para cada profundidade do solo, bem como avaliar as condições de contorno para o problema analisado, uma vez que o software não consegue representar as condições atmosféricas presentes nas condições reais.

Os parâmetros físicos das camadas ao longo do perfil do solo são necessários para detalhar a previsão do fluxo de água na matriz do solo utilizando o software Slide<sup>®</sup>, pois as simplificações adotadas podem direcionar melhor a um planejamento das condições reais de fluxo de água em campo com maior precisão.

Além das definições do conteúdo de água volumétrica do solo, este modelo numérico pode ser utilizado para o gerenciamento do manejo de irrigação, simulando projeções futuras de umidade no perfil de um solo.



## REFERÊNCIAS

- 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.
- AMARO FILHO, J.; ASSIS JUNIOR, R. N.; MOTA, J. C. A. **Física do Solo: Conceitos e aplicações**. 1 ed. Fortaleza: UFC, 2008, 290p.
- ANDRADE, R.S.; STONE, L. F. Uso do índice S na determinação da condutividade hidráulica não-saturada de solos do cerrado brasileiro. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, vol.13, n.4, p.376-381, 2009.
- BASSANEZI, R. C. Modelagem matemática: uma disciplina emergente nos programas de formação de professores. **BioMatemática**, Campinas, v. 9, p. 9-22, 1999.
- BEZERRA, F. M. L.; OLIVEIRA, C. H. C. Evapotranspiração máxima e coeficiente de cultura nos estádios fenológicos da melancia irrigada. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v.3, n.2, p.173-177, 1999.
- BOLUWADE, A.; MADRAMOOTOO, C. A. **Assessment of spatial variably saturated flow by irrigation moisture sensors in 2D-dimensions using the COMSOL Multiphysics 4.1**. Proceedings of the COMSOL International Conference, Newton, Massachusetts, USA. October 12-15. 2011.
- 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.
- CHU-AGOR, M. L.; WILSON, G. V.; FOX, G. A. Numerical modeling of bank instability by seepage erosion undercutting of layered streambanks. **Journal of Hydrologic Engineering**, v.13, n.12, p.1133-1145, 2008.
- COMSOL 4.2<sup>a</sup>, **Multiphysics, User's Guide**, COPYRIGHT 1998-2011. COMSOL AB.
- 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.
- 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.
- EMBRAPA. **Sistema Brasileiro de Classificação de Solos**. Brasília, 1999. 412p.
- FREDLUND, D. G.; XING, A. Equations for soil-water characteristic curve. Canada: **Canadian Geotechnical Journal**, v.31, n.4, p.521-532, 1994.
- GEO-SLOPE International Ltd. **Seepage modeling with seep/w**. Calgary, Alberta, Canada. 2009.

IRITANI, M. A. **Modelação matemática tridimensional para a proteção das captações de água subterrânea**. Tese (Doutorado em Geociência). Instituto de Geociência, São Paulo, 1998. 200p.

KUNZ, J.; ÁVILA, V. S.; PETRY, M. Distribuição temporal e espacial da umidade do solo em sistemas de irrigação por gotejamento subsuperficial. **Santa Maria**, v. 13, n. 5, p.3963-3976, 2014.

LIBARDI, P. L. **Água no solo**. In: \_\_\_\_\_ Física do solo. 1. ed. Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do solo, 2010. cap. 3, p. 145-150.

LOYOLA, J. M. T.; PREVEDELLO, C. L. Modelos analíticos para predição do processo da redistribuição da água no solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 27, n. 5, p.783-787, 2003.

LU, N.; LIKOS, W. J. **Unsaturated soil mechanics**. New Jersey: John Wiley & Sons, Inc., 2004. 556 p.

MISRA, D.; NIEBER, J. L. **Assessment of mixed finite element method applied to one-dimensional transient unsaturated flow**. In: ASAE ANNUAL INTERNATIONAL MEETING, 2004, Ottawa, Ontario. St Joseph: ASAE, 2004. (Paper nº 042072)

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.

NACINOVIC, M. G. G. **Estudo da erosão pela análise de sucção e escoamento superficial na bacia do córrego sujo (Teresópolis, RJ)**. 2009. 167 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2009.

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.

NG, C. W. W.; MENZIES, B. **Advanced unsaturated soil mechanics and engineering**. New York: Taylor & Francis, 2007. 687p.

OLIVEIRA, A. D. S. **Uso do sensor capacitivo FDR na determinação do coeficiente de cultura (kc)**. 2012. 105 f. Tese (Doutorado em Engenharia Agrícola) – Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2012.

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.

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.

RIVERA, R. N. C.; MIRANDA, J. H.; DUARTE, S. N.; BOTREL, T. A. Modelo aplicado à dinâmica da água e do potássio no solo sob irrigação por gotejamento – análise de sensibilidade. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v.28, n.3, p.448-459, 2008.

ROCHA, M .G.; FARIA, L. N.; CASAROLI, D.; LIER, Q. J. V. Avaliação de modelo de extração de água do solo por sistemas radiculares divididos entre camadas de solo com propriedades hidráulicas distintas. **Revista Brasileira de Ciências do Solo**, v.34, p.1017-1028, 2010.

ROCSCIENCE INC. 2010, **Slide Version 6.0** – 2D Limit Equilibrium Slope Stability Analysis. [www.roscience.com](http://www.roscience.com), Toronto, Ontario, Canada.

SAHA, R.; UPADHYAYA, S. K.; WALLENDER, W. W. **Development of an inverse solution technique that utilizes response surface methodology to predict parameters used in soil-water transport model**. In: ASAE ANNUAL INTERNATIONAL MEETING, Reno, Nevada. St Joseph: ASAE, 2009. (Paper nº 096507)

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. **Egenharia Agrícola**, Jaboticabal, v.30, n.1, p.22-32, 2010.

SHENG, D.; GENS, A.; FREDLUND, D. G.; SLOAN, S. W. Unsaturated soils: from constitutive modelling to numerical algorithms. **Computers and Geotechnics**, v.35, p.810-824, 2008.

ŠIMUNEK, 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.

SORBINO, G.; NICOTERA, M. V. Unsaturated soil mechanics in rainfall-induced flow landslides. **Engineering Geology**, v.165, p. 105-132, 2013.

VENTURA, D. M. **Análise de escoamentos compressíveis não-viscosos em três dimensões utilizando o método dos elementos finitos por aresta**. 2008. 68 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2008.

WENDLAND, E.; PIZARRO, M. L. P. Modelagem computacional do fluxo unidimensional de água em meio não saturado do solo. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v.30, n.3, p.424-434, 2010.

ZHU, Y.; SHI, L.; LIN, L.; YANG, J.; YE, M. A fully coupled numerical modeling for regional unsaturated-saturated water flow. **Journal of Hydrology**, v.475, p. 188-203, 2012.