



UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE
CENTRO DE TECNOLOGIA E RECURSOS NATURAIS
UNIDADE ACADÊMICA DE ENGENHARIA AGRÍCOLA
COPEAG - COORD. DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENG. AGRÍCOLA



PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA AGRÍCOLA

Tese de Doutorado

DINÂMICA DA ÁGUA NO SOLO EM FUNÇÃO DA
VAZÃO DO EMISSOR EM IRRIGAÇÃO
INTERMITENTE

TARCIZO NASCIMENTO

Biblioteca UFCG
SMBC_CDSA
CAMPUS DE SUMÉ
Reg. 10423/12

Campina Grande
Paraíba

UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE
CENTRO DE TECNOLOGIA E RECURSOS NATURAIS
PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA AGRÍCOLA

DINÂMICA DA ÁGUA NO SOLO EM FUNÇÃO DA VAZÃO DO
EMISSOR EM IRRIGAÇÃO INTERMITENTE

TARCIZIO NASCIMENTO



Campina Grande – PB
Agosto- 2009

UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE
CENTRO DE TECNOLOGIA E RECURSOS NATURAIS
PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA AGRÍCOLA

DINÂMICA DA ÁGUA NO SOLO EM FUNÇÃO DA VAZÃO DO
GOTEJADOR EM IRRIGAÇÃO INTERMITENTE

TARCIZIO NASCIMENTO

Tese apresentada ao Programa de Pós-
Graduação em Engenharia Agrícola da
Universidade Federal de Campina Grande
como requisito para a obtenção do grau de
Doutor em Irrigação e Drenagem

Orientador: Prof.: Carlos Alberto Vieira de Azevedo

Agência Financiadora: CNPq

Campina Grande – PB

Agosto- 2009

FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELA BIBLIOTECA CENTRAL DA UFCC

N244d

Nascimento, Tarcizio

Dinâmica da água no solo em função da vazão do gotejador em irrigação intermitente / Tarcizio Nascimento. — Campina Grande, 2009. 103 f.: il. color

Tese (Doutorado em Irrigação e Drenagem) - Universidade Federal de Campina Grande, Centro de Tecnologia e Recursos Naturais.

Referências.

Orientador: Prof. Dr. Carlos Alberto Vieira de Azevedo

1. Percolação 2. Frente de Umidade 3. Lisímetro I. Título.

CDU 631.67(043)



UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE
CENTRO DE TECNOLOGIA E RECURSOS NATURAIS
COORDENAÇÃO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA AGRÍCOLA



PARECER FINAL DO JULGAMENTO DA TESE DO DOUTORANDO

TARCÍZIO NASCIMENTO

DINÂMICA DA ÁGUA EM SOLO ARENOSO EM FUNÇÃO DA VAZÃO DO EMISSOR EM
IRRIGAÇÃO INTERMITENTE

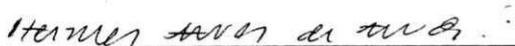
BANCA EXAMINADORA

PARECER



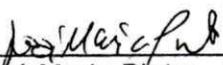
Dr. Carlos Alberto Vieira de Azevedo – Orientador

Aprovado



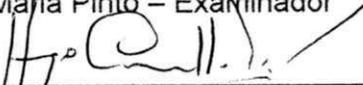
Dr. Hermes Alves de Almeida – Examinador

Aprovada



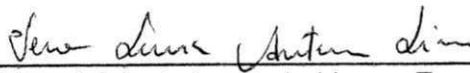
Dr. José Maria Pinto – Examinador

Aprovado



Dr. Hugo Orlando Carvalho Guerra – Examinador

Aprovado



Dra. Vera Lúcia Antunes de Lima – Examinadora

Aprovado



AGOSTO - 2009

À minha família.

DEDICO

AGRADECIMENTOS

A Deus, por guiar meus passos em todos os momentos de minha vida.

À minha família:

Pais - Jó Nascimento e Maria das Dores Nascimento (in memoriam); Irmãos – Izabel, Zélia, Lucília, Lucineide, Luciana, Ana Maria, Maria do Carmo e Joelma (in memoriam), Miguel, Luiz, José Roberto, Carlos e Jairo (in memoriam); Esposa - Mauricéa; Filhos - Talles, Tarcio, Tarley, Thiago, Isis; Netos - Tayna Rebeca e Jó Leandro; Sobrinhos...; Tios...; Primos...; pelo amor, carinho, apoio e torcida pelo meu sucesso.

À Universidade Federal de Campina Grande e ao Departamento de Engenharia Agrícola, pela oportunidade de realizar este curso.

Aos funcionários José Liberalino Filho (Dedé), Expedito Freire dos Santos, João Filho Ferreira da Silva, Luiz José de Oliveira pela coleta de dados e realização de outras atividades quando se faziam necessárias.

Ao meu amigo, José Monteiro Soares pela confiança, pela força e pelas palavras que me fizeram seguir em frente, superando todos os obstáculos.

A todos que, ao colocarem obstáculos em meu caminho, me estimularam a seguir em frente e mostrar que com calma e perseverança todos eles podem ser transpostos.

Ao CNPq, pela liberação dos recursos financeiros para aquisição dos equipamentos que possibilitaram a realização deste estudo.

Ao professor Carlos Alberto, pela orientação para a realização deste trabalho.

Aos amigos e colega de curso, Seixa, Bethania, Gil, Roberto e Aurelir (in memoriam), pela amizade, convivência e colaboração durante todos os momentos do curso, e principalmente nas constantes reuniões para estudo.

A todos que ainda não citados, de alguma forma, contribuíram para o êxito deste trabalho.

EPIGRAFE

“Se tiveres que lidar com água, consulta primeiro a experiência e depois a razão”

Leonardo da Vinci

RESUMO

Este trabalho foi conduzido no campo experimental de Bebedouro, pertencente à Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (Embrapa Semiárido) com o objetivo de determinar a intermitência de irrigação e a vazão do emissor que reduzindo a velocidade da frente de umidade no perfil do solo; e sua influência nas perdas de água por percolação. O trabalho foi realizado em um lisímetro de drenagem com dimensões de 100 cm de aresta, utilizando-se um solo tipo Neossolo Quartzarênico, com 94% de areia, 1% de silte e 5% de argila, coletado em uma área no projeto de irrigação Senador Nilo Coelho, em Petrolina-PE. Com base na evaporação média anual da estação experimental Bebedouro, que é de aproximadamente 8,0 mm, os testes foram realizados, utilizando um volume de reposição, fixo de 8,0 L de água. As irrigações foram realizadas, utilizando-se um esquema fatorial de quatro vazões (2,0; 4,0; 8,0 e 12,0 L h⁻¹) por quatro intermitências (uma, duas, três e sem intermitências). Cada teste foi repetido por três dias consecutivos com irrigação, e quatro dias consecutivos sem irrigações. A velocidade da frente de umidade no solo irrigado com o emissor de 12,0 L h⁻¹ foi, respectivamente, de 110,0; 89,9; 77,5; e 73,6 cm h⁻¹ para irrigação sem, com uma, duas e com três intermitências. Com o emissor de 8,0 L h⁻¹ a velocidade foi de 68,1; 62,3; 60,4 e 62,6 cm h⁻¹. Com o emissor com 4,0 L h⁻¹ a velocidade foi de 47,6; 39,2; 36,6; e 39,7 cm h⁻¹. Com o emissor com 2,0 L h⁻¹ a velocidade foi de 34,7; 25,1; 23,0 e 28,3 cm h⁻¹. Nas irrigações realizadas com emissores de vazão de 12,0 L h⁻¹, observa-se, em relação à intermitência, que a velocidade da frente de umidade sofreu um decréscimo de 18,73; 29,86 e 33,39 %, entre as irrigações sem intermitência e as irrigações com uma, duas e três intermitências, respectivamente. Nas irrigações realizadas com emissores de vazão de 8,0 L h⁻¹, houve um decréscimo de 8,58; 11,31 e 8,08%, nas irrigações realizadas com emissores de vazão de 4,0 L h⁻¹, houve um decréscimo de 17,65; 23,11 e 16,60% e nas irrigações realizadas com emissores de vazão de 2,0 L h⁻¹, houve um decréscimo de 27,67; 33,72 e 18,44%. Em relação à vazão, observa-se que a velocidade da frente de umidade nas irrigações realizadas sem intermitência, sofreu um decréscimo de 38,37; 56,92 e 68,60%, entre as irrigações com emissores de 12,0 L h⁻¹ e as irrigações com emissores de 8,0; 4,0 e 2,0 L h⁻¹ respectivamente. Nas irrigações realizadas com uma intermitência, houve um decréscimo de 30,62; 56,35 e 72,05%, nas irrigações realizadas com duas intermitências, houve um decréscimo de 22,06; 55,77 e 70,32% e nas irrigações realizadas com três intermitências, houve um decréscimo de 14,95; 46,06 e 61,55%. Com base nos resultados, observa-se que as menores velocidades da frente de umidade ocorreram nas irrigações com duas intermitências e com emissores de 2,0 e 4,0 L h⁻¹. A redução na velocidade da frente de umidade aumenta o tempo de permanência da água no perfil do solo, proporcionando um maior tempo de oportunidade para extração da água pela cultura, aumentando a eficiência de uso da água, e reduzindo as perdas por percolação profunda.

Palavras-chave: Percolação, Frente de umidade, Lisímetro.

ABSTRACT

This study was conducted in the Bebedouro experimental field, belonging to the Brazilian Agricultural Research Corporation (Embrapa Semi-Arid) in order to determine the irrigation intermittency and the emitter flow that would reduce the front velocity of moisture in the soil profile, and its influence on deep percolation water loss. The study was conducted in a drainage lysimeter with dimensions of 100 cm of edge, using a soil type Entisols, with 94% of sand, 1% of silt and 5% of clay, collected in a commercial area of a Grape production farm in the irrigation project Senador Nilo Coelho Petrolina-PE. Based on the average annual evaporation of the Bebedouro experimental station, which is approximately 8.0 mm, the tests were conducted using a fixed replacement volume of 8.0 L of water. The irrigations were performed using a factorial scheme of four flow rates (2.0, 4.0, 8.0 and 12.0 L h⁻¹) by four irrigation intermittencies (one, two, three and without intermittency). Each test was repeated three consecutive days with irrigation and four consecutive days without irrigation. The front velocity of moisture in the soil irrigated with the emitter of 12.0 L h⁻¹ was, respectively, 110.0, 89.9, 77.5, and 73.6 cm h⁻¹ without irrigation, with one, two and three intermittencies. With the emitter of 8.0 L h⁻¹ the front velocity was 68.1, 62.3, 60.4 and 62.6 cm h⁻¹. With the emitter with 4.0 L h⁻¹ the front velocity was 47.6, 39.2, 36.6, and 39.7 cm h⁻¹. With the emitter with 2.0 L h⁻¹ the front velocity was 34.7, 25.1, 23.0 and 28.3 cm h⁻¹. In the irrigation performed with the emitters of flow rate of 12.0 L h⁻¹, it is observed, in relation to intermittency, that the front velocity of the moisture decreased by 18.73, 29.86 and 33.39% between the irrigations without intermittency and irrigation with one, two and three intermittencies, respectively. In irrigations performed with emitters of flow rate of 8.0 L h⁻¹, there was a decrease of 8.58, 11.31 and 8.08%, in irrigations performed with emitters of flow rate of 4.0 L h⁻¹, there was a decrease of 17.65, 23.11 and 16.60% and in the irrigations performed with emitters of flow rate of 2.0 L h⁻¹, there was a decrease of 27.67, 33.72 and 18.44%. Regarding flow, it is observed that the front velocity of moisture in irrigations performed without intermittency, decreased by 38.37, 56.92 and 68.60% between the irrigations with emitters of 12.0 L h⁻¹ and the irrigations with emitters of 8.0, 4.0 and 2.0 L h⁻¹ respectively. In irrigations performed with one intermittency, there was a decrease of 30.62, 56.35 and 72.05%, in irrigations performed with two intermittencies, there was a decrease of 22.06, 55.77 and 70.32%, and in the irrigations performed with three intermittencies there was a decrease of 14.95, 46.06 and 61.55%. Based on the results, it is observed that the lower velocity of moisture occurred in the front with two intermittencies and irrigation with emitters of 2.0 and 4.0 L h⁻¹. The reduction in the front velocity of the soil moisture increases the residence time of water in the soil profile, providing a greater opportunity time for water extraction by the crop, increasing the efficiency of water use, and reducing deep percolation losses.

Keywords: Percolation, Front moisture, Lysimeter.

CPCC - BIBLIOTECA

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Cubo elementar, sujeito a um fluxo nas direções x, y e z.....	21
Figura 2 - Curva de retenção de água para o um solo neossolo Quartzarênico.....	43
Figura 3 - Vista com detalhes da passagem dos cabos das sondas TDR.....	45
Figura 4 - Detalhes da estrutura metálica com os tubos de PVC para drenagem da água percolada.....	46
Figura 5 - Detalhe do sistema de drenagem do lisímetro e dos coletores.....	46
Figura 6 - Vista da sonda TDR.....	47
Figura 7 - Vista detalhada da instalação das sondas TDR.....	48
Figura 8 - Corte com detalhes da instalação das sondas TDR.....	48
Figura 9 - Esquema de instalação das sondas TDR.....	49
Figura 10 - Detalhe da instalação do emissor e da válvula solenoide para o controle das irrigações.....	50
Figura 11 - Detalhes da coluna do bulbo infiltrômetro.....	51
Figura 12 - Vista do bulbo infiltrômetro e do suporte para variação da carga hidráulica.....	52
Figura 13 - Painel com circuito eletrônico para controle das intermitências.....	53
Figura 14 - Painel de controle com Datalogger (A), Multiplexador (B), TDR (C), Bateria (D); Keyboard/Display (E) e detalhe das conexões dos cabos das sondas TDR (F).....	54
Figura 15 - Tela de configuração do software PCTDR.....	55
Figura 16 - Configuração Multiplexer do software PCTDR.....	55
Figura 17 - Variação da umidade do solo sob irrigação sem intermitência e emissor com vazão de $2,00 \text{ L h}^{-1}$	62
Figura 18 - Variação da umidade do solo sob irrigação sem intermitência e emissor com vazão de $4,00 \text{ L h}^{-1}$	62

Figura 19 - Variação da umidade do solo sob irrigação sem intermitência e emissor com vazão de 8,00 L h ⁻¹	63
Figura 20 - Variação da umidade do solo sob irrigação sem intermitência e emissor com vazão de 12,00 L h ⁻¹	63
Figura 21 - Variação da umidade do solo sob irrigação com uma intermitência e emissor com vazão de 2,00 L h ⁻¹	67
Figura 22 - Variação da umidade do solo sob irrigação com uma intermitência e emissor com vazão de 4,00 L h ⁻¹	67
Figura 23 - Variação da umidade do solo sob irrigação com uma intermitência e emissor com vazão de 8,00 L h ⁻¹	68
Figura 24 - Variação da umidade do solo sob irrigação com uma intermitência e emissor com vazão de 12,00 L h ⁻¹	68
Figura 25 - Variação da umidade do solo sob irrigação com duas intermitências e emissor com vazão de 2,00 L h ⁻¹	73
Figura 26 - Variação da umidade do solo sob irrigação com duas intermitências e emissor com vazão de 4,00 L h ⁻¹	73
Figura 27 - Variação da umidade do solo sob irrigação com duas intermitências e emissor com vazão de 8,00 L h ⁻¹	74
Figura 28 - Variação da umidade do solo sob irrigação com duas intermitências e emissor com vazão de 12,00 L h ⁻¹	74
Figura 29 - Variação da umidade do solo sob irrigação com três intermitências e emissor com vazão de 2,00 L h ⁻¹	80
Figura 30 - Variação da umidade do solo sob irrigação com três intermitências e emissor com vazão de 4,00 L h ⁻¹	80
Figura 31 - Variação da umidade do solo sob irrigação com três intermitências; e emissor com vazão de 8,00 L h ⁻¹	81
Figura 32 - Variação da umidade do solo sob irrigação com três intermitências e emissor com vazão de 12,00 L h ⁻¹	81
Figura 33 - Curvas da frente de umidade em função da vazões dos emissores e das intermitências de irrigação.....	87

LISTAS DE TABELAS

Tabela 1 - Dados das propriedades físicas do solo.	42
Tabela 2 - Dados de umidade da Curva de retenção	43
Tabela 3 - Parâmetros otimizados da curva de Van Genutchen.....	44

LISTA DE EQUAÇÕES

Equação 1.....	20
Equação 2.....	20
Equação 3.....	21
Equação 4.....	22
Equação 5.....	22
Equação 6.....	23
Equação 7.....	23
Equação 8.....	23
Equação 9.....	25
Equação 10.....	26
Equação 11.....	26
Equação 12.....	27
Equação 13.....	30
Equação 14.....	30
Equação 15.....	32
Equação 16.....	33
Equação 17.....	33
Equação 18.....	34
Equação 19.....	35
Equação 20.....	37
Equação 21.....	39
Equação 22.....	39
Equação 23.....	53
Equação 24.....	57
Equação 25.....	57
Equação 26.....	57
Equação 27.....	60

SUMÁRIO

RESUMO	VII
ABSTRACT	VIII
LISTA DE FIGURAS	IX
LISTAS DE TABELAS.....	XI
LISTA DE EQUAÇÕES.....	XII
1 INTRODUÇÃO.....	15
2 REVISÃO DE LITERATURA.....	17
2.1 SOLOS	17
2.1.1 Textura	17
2.1.2 Infiltração.....	18
2.1.3 Redistribuição da água no solo.....	24
2.1.4 Frente de umidade	26
2.1.5 Armazenamento	27
2.1.6 Condutividade hidráulica.....	28
2.1.7 Percolação	31
2.1.8 Curva de retenção.....	32
2.2 LISIMETRIA.....	35
2.3 TDR	36
2.4 IRRIGAÇÃO.....	38
2.4.1 Intermittência.....	38



3	MATERIAL E MÉTODOS	41
3.1	SOLO.....	41
3.1.1	Coleta do solo	41
3.1.2	Caracterização do solo.....	42
3.2	Lisímetro.....	44
3.2.1	Confecção	44
3.2.2	Colocação do solo no lisímetro	46
3.2.3	Instalação das sondas TDR.....	47
3.2.4	Instalação do emissor	49
3.2.5	Bulbo infiltrômetro de carga variável.....	50
3.2.6	Painel de controle da irrigação.....	52
3.3	Painel de controle central.....	53
3.4	Condução do experimento	57
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	61
5	CONCLUSÕES.....	89
6	RECOMENDAÇÕES	90
7	BIBLIOGRAFIA.....	91

1 INTRODUÇÃO

A água é um recurso natural limitado e essencial à vida. Dotada de valor econômico é um dos principais insumos no processo de produção de mercadorias. Dentre as atividades que fazem uso da água, a agricultura irrigada é uma das atividades que mais desperdiça água em todo mundo. No Brasil, 61% da água captada são usados na agricultura, principalmente na irrigação, e apenas 50% desta são efetivamente utilizados pelas plantas, sendo os outros 50% perdidos na captação, armazenamento, distribuição e aplicação da água na irrigação (ANA/GEF/PNUMA/OEA, 2004).

A perda de água por percolação é uma constante nos perímetros de irrigação, e seu controle se constitui em um dos principais problemas no manejo de água, pois a água percolada é uma das responsáveis pela lixiviação de agroquímicos e nutrientes, e elevação dos níveis de água dos lençóis freáticos, provocando danos ao meio ambiente.

Em consequência do manejo inadequado de água, observa-se em grande parte das áreas irrigadas, que os drenos funcionam diariamente, durante e após as irrigações, desperdiçando água que poderá ser fonte de contaminação de reservatórios superficiais e de aquíferos subterrâneos, além contribuir para a obtenção de baixas produtividades das culturas.

A consequência deste desperdício reflete significativamente sobre a renda e o emprego, principalmente em áreas onde os solos geralmente são arenosos e com baixa capacidade de retenção de água e nutrientes, e a demanda evapotranspiratória exige a aplicação de volumes de água, que na maioria das vezes, são superiores à capacidade de retenção de água dos solos, provocando excessiva perda de água por percolação, como é o caso do vale do São Francisco (FAO, 1966).

. Em trabalho realizado por Fain et al. (2004), foi observado que o volume de água aplicado com intermitência de irrigação, foi 25% menor do que o aplicado sem intermitência.

A irrigação intermitente, por ser uma prática em que o volume de água é aplicado em vários intervalos de tempo, promove em solos arenosos a redução da velocidade da frente de umidade no perfil do solo, aumentando o tempo de oportunidade de absorção de água pela cultura. Ela promove uma maior eficiência de aplicação de água no solo com a redução das perdas de água por percolação e conseqüentemente a lixiviação de agroquímicos, e evita a elevação do lençol freático, que é uma das principais causas da salinização dos solos.

Este trabalho teve como objetivo a determinação frente de umidade em um solo tipo Neossolo Quartzarênico, em função da vazão e da intermitência de irrigação.



2 REVISÃO DE LITERATURA

2.1 SOLOS

2.1.1 Textura

Segundo Leite et al. (2005), a ocorrência de solos arenosos profundos corresponde à aproximadamente 47% do total das terras do semiárido brasileiro, e os NEOSSOLOS QUARTZARÊNICOS, antes denominado de Areias Quartzosas, eram considerados inviáveis para a exploração agrícola utilizando sistema de irrigação por superfície, devido as suas limitações físicas e químicas, tais como baixa capacidade de retenção de cátions e de água, além da dominância da textura arenosa. Essas limitações implicavam que esses solos fossem classificados como não irrigáveis por metodologias como as do Bureau of Reclamation (BUREC). Mas com o advento da irrigação por aspersão e localizada, atualmente existem várias constatações da perfeita viabilidade desses solos para a exploração com agricultura irrigada, devido sua grande profundidade média e a presença de excelente

drenagem natural, que reduzem o risco de salinização, desde que faça um manejo adequado de água.

As principais classes de solos predominantes no Projeto de Irrigação Senador Nilo Coelho, localizado no município de Petrolina- PE, são os Latossolos e os Argissolos, sendo que os primeiros formam-se nas posições mais elevadas e longe das zonas depressionárias, enquanto os últimos nas posições medianas e nas posições mais próximas das linhas de drenagens. Nessa posição, alguns argissolos com ou sem a presença de frações grossas (cascalho e/ou calhaus), desenvolvem horizontes cimentados, conhecidos como fragipã ou duripã e que tais horizontes constituem barreiras à percolação da água, conforme o grau de cimentação e a profundidade deles (CODEVASF, 1980). Essa barreira limitante à drenagem torna os argissolos, rasos abruptos, os mais difíceis de serem manejados devido a um horizonte superficial de elevada velocidade de infiltração básica, sucedido por horizontes subsuperficiais de baixa velocidade (AMARAL et al. 2007). Como o cálculo da lâmina de irrigação a ser aplicada leva em consideração a camada arável, ocorre um dimensionamento incompatível com a capacidade drenante das camadas subsuperficiais, com conseqüente acúmulo de água, elevação do lençol freático, redução na produção vegetal e desenvolvimento ou aceleração do processo de salinização.

2.1.2 Infiltração

Os impactos que a atual intensificação do uso das terras para fins agrícolas vem causando ao meio ambiente tem despertado grande preocupação, sobretudo no que diz respeito à contaminação por substâncias químicas, aplicadas com o objetivo de aumentar a produtividade. Essas substâncias interagem com o solo e a água por meio de diversos processos e podem ser carreados pela água da chuva ou

da irrigação por escoamento superficial, ou através do perfil do solo com a água infiltrada (PIFFER, 1989).

Segundo Halevy et al. (1973), o processo de infiltração da água no solo pode ser dividido em três fases: Fase I - Zona de transmissão: a umidade do solo está próxima da saturação; Fase II - Zona de molhamento: ocorre o fluxo da água na direção do menor potencial total; e Fase III - Frente de molhamento: é o limite extremo da zona de molhamento.

Durante o processo de infiltração, identifica-se uma área saturada na superfície do solo (disco saturado), originado pelo funcionamento do gotejador, e assim a água se distribui pelos poros vizinhos, cuja umidade é menor, em direção ao menor potencial total, o qual basicamente é formado pelos potenciais gravitacional e matricial (PIZARRO, 1987).

A medida que a água infiltra no solo, as camadas superiores do perfil vão se umedecendo de cima para baixo, alterando gradativamente o perfil de umidade. Enquanto houver aporte de água, o perfil de umidade tende à saturação em toda a profundidade, sendo a camada superficial, naturalmente, a primeira a saturar. Normalmente, a infiltração decorrente de precipitações naturais não é capaz de saturar todo o solo, restringindo-se a saturar, quando consegue, apenas as camadas próximas à superfície, formando um perfil típico onde o teor de umidade decresce com a profundidade (SILVEIRA et al. 2000).

Os valores da velocidade de infiltração e da condutividade hidráulica para os solos tipo neossolos quartzarênico são superiores a $40,0 \text{ cm h}^{-1}$ e $32,0 \text{ cm h}^{-1}$ respectivamente. Esses elevados valores já eram esperados, uma vez que a principal característica desta classe de solo é o domínio da textura arenosa (CODEVASF, 1980).

Segundo Amaral (2005), os resultados dos testes de infiltração realizados em lotes com predomínio de solos tipo Neossolos Quatzarênicos Órticos típicos e Neossolos Quatzarênicos Órticos latossólicos, apresentaram valores, variando de

27,45 a 74,09 cm h⁻¹. Esses solos estão na classe de velocidade de infiltração denominada “muito rápida”, ou seja, maior que 12,0 cm h⁻¹.

Segundo Libardi (2005), o primeiro estudo que quantifica o fluxo de água no solo em condições não saturadas foi desenvolvido por Buckingham, em 1907, quando analisou o escoamento na direção horizontal, conforme a seguinte equação:

$$q = -K(\theta)\nabla h \quad \text{Equação 1}$$

Em que:

$K(\theta)$ = Condutividade hidráulica do solo em função da umidade, em cm h⁻¹

θ = Umidade volumétrica, em cm³. cm⁻³

h = Componente matricial do solo, em cm.

Considerando um cubo elementar submetido a um fluxo de água nas direções x, y e z (Figura 1), pode-se obter a equação diferencial do fluxo (FREEZE e CHERRY, 1979), que na forma matricial é dada por:

$$\nabla^T(\rho_w \bar{v})dxdydz = -\frac{\partial M_w}{\partial t} \quad \text{Equação 2}$$

Em que:

ρ_w = massa específica da água

M_w = Massa de água

t = Tempo

\bar{v} = vetor de velocidade superficial de fluxo

∇ = operador diferencial que depende da dimensão do problema.

UFSC - PÓS-GRADUAÇÃO

O termo à esquerda desta equação representa o balanço de massa nas três direções, e o termo à direita representa, de acordo com o princípio da conservação da massa, a taxa de variação, no tempo, da massa de água (M_w) armazenada no cubo elementar.

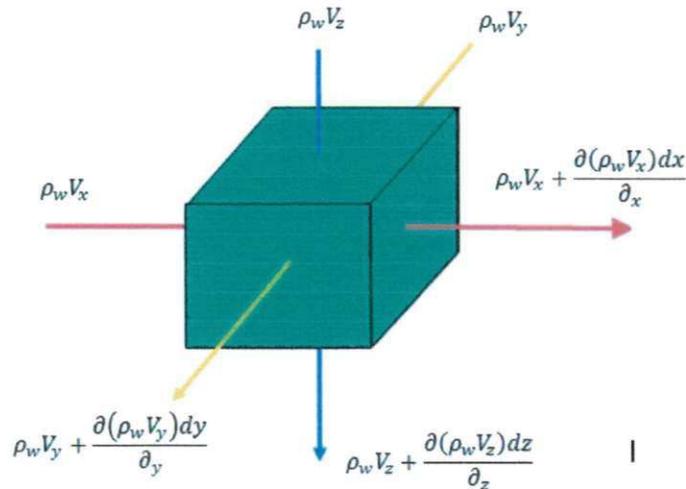


Figura 1 - Cubo elementar, sujeito a um fluxo nas direções x, y e z.

O fluxo de água em um meio poroso isotérmico, isobárico e unidimensional, sob condições de não saturação, e a coordenada vertical, orientada positivamente para baixo, pode ser descrito pela equação de Richards (1931), incluindo o termo fonte ou sumidouro (BEAR, 1979; HILLEL, 1980; JURY et al. 1991; LIBARDI, 2005).

$$C(h) \frac{\partial h}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left(k(h) \left[\frac{\partial h}{\partial z} + 1 \right] \right) + S \quad \text{Equação 3}$$

Em que:

$C(h)$ = capacidade hídrica específica do solo

h = potencial matricial

t = tempo.

$k(h)$ = condutividade hidráulica do solo

S = termo de sumidouro

z = coordenada vertical, positiva para cima

Green e Ampt (1911), com base na equação de Darcy, desenvolveram uma equação, assumindo que durante o processo de infiltração existe uma carga hidráulica constante na superfície do solo e que a frente de umedecimento é bem nítida e precisamente definida, acima da qual o solo se encontra uniformemente saturado com condutividade hidráulica ($K=K_o$), e que o potencial matricial nesta frente, permanece igual ao valor do potencial matricial relativo à umidade inicial do solo. O modelo é representado pela equação:

$$I = A[1 + B(h + W)] \quad \text{Equação 4}$$

Em que:

I = Infiltração

W = Carga hidráulica acima da superfície

h = Potencial mátrico na frente de umedecimento

A e B = Constantes que dependem do tipo de solo.

A equação de Buckingham é válida apenas para o fluxo de água no solo na direção horizontal ou quando o efeito da gravidade é desprezível, enquanto que o fluxo de água na direção vertical foi definido por Richards (1931) como dependente do somatório dos componentes de potenciais gravitacional (h_g) e matricial (h), sob condições não saturadas, conforme a equação seguinte (LIBARDI, 2005).

$$q = -K(\theta)\nabla(h + h_g) \quad \text{Equação 5}$$



A equação de Richards, também conhecida como equação de Darcy-Buckingham, considera o solo tanto na condição de saturação, quanto de não saturação de água.

Através da equação de continuidade pode-se expressar a taxa de variação do conteúdo de água ao longo do tempo, pela equação:

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = - \left(\frac{\partial \theta_x}{\partial x} \right) + \left(\frac{\partial \theta_y}{\partial y} \right) + \left(\frac{\partial \theta_z}{\partial z} \right) \quad \text{Equação 6}$$

Através da equação de Richards (1931), pode-se obter a taxa de variação do conteúdo de água para um solo saturado ou não saturado e isotrópico ou não-isotrópico, como segue:

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(K_x(h) \frac{\partial h_t}{\partial x} \right) + \left(\frac{\partial h_t}{\partial y} \right) + \left(\frac{\partial h_t}{\partial z} \right) \quad \text{Equação 7}$$

Quando se considera o fluxo apenas na direção vertical, a equação de Richards (1931) fica reduzida a seguinte forma:

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left(K_z(\theta) \frac{\partial h_t}{\partial z} \right) = - \frac{\partial}{\partial z} \left(K_z(\theta) \frac{\partial h}{\partial z} + \frac{\partial z}{\partial z} \right) = - \frac{\partial}{\partial z} \left(K_z(\theta) \frac{\partial h}{\partial z} + 1 \right) \quad \text{Equação 8}$$

em que:

$$\theta = \theta (x, y, z, t)$$

$$h_t = h_t (x, y, z, t)$$

$$K = K (\theta)$$

$$K = K (h_t)$$

Para criar um meio homogêneo $\Rightarrow K_x (\theta) = K_y (\theta) = K (\theta)$.

Segundo Bear (1979), citado por Costa (1998), a equação de Richards dá origem aos modelos matemáticos que descrevem o fluxo de água em solos saturados e não saturados, os quais permitem a simulação de diversos processos, tais como infiltração, evaporação e drenagem interna.

A obtenção de uma modelagem satisfatória do movimento de água no solo e do escoamento superficial em uma bacia hidrográfica, só será conseguida a partir de uma adequada modelagem do processo de infiltração da água no solo (SKAGGS e KHALEEL, 1982).

2.1.3 Redistribuição da água no solo

Para um mesmo volume de água aplicada no solo, o aumento da vazão implica um aumento do movimento horizontal e um decréscimo da profundidade do bulbo molhado, e a medida que se aumenta o volume de água aplicado, maior é o avanço da frente de molhamento, tanto em profundidade quanto lateralmente, aumentando as dimensões do bulbo molhado (BRESLER et al. 1978).

O fluxo de água abaixo da superfície do solo decresce com a extração de água pelas raízes das plantas. porém, abaixo das zonas de evaporação e de extração de água, o fluxo de água permanece constante com a profundidade. Sob condição de alta frequência de irrigação. O conteúdo de água no perfil do solo dependeria somente da lâmina de água aplicada.

Segundo Vieira (1975), em irrigação por gotejamento a água é aplicada através de uma fonte puntiforme ao solo em pequenas quantidades, porém com elevada frequência, mantendo a umidade do solo, nessa região, próximo à capacidade de campo sem, contudo, criar problemas de aeração. Esta água aplicada forma uma superfície, que pouco a pouco vai crescendo radialmente para

os lados e para baixo no interior do solo, formando um bulbo molhado. Geralmente nos solos argilosos, o movimento horizontal é maior do que nos solos arenosos.

Para explicar o movimento da água em meios porosos saturados, Darcy (1856), comprovou em seus estudos que a densidade de fluxo é proporcional ao gradiente hidráulico, sendo a constante de proporcionalidade denominada condutividade hidráulica, podendo ser expresso pela equação:

$$q = -k \frac{\partial h}{\partial z} \quad \text{Equação 9}$$

Em que:

q = Densidade de fluxo

$\frac{\partial h}{\partial z}$ = Gradiente hidráulico

k = Condutividade hidráulica

A água no solo, assim como qualquer corpo na natureza, pode ser caracterizada por seu estado de energia. Reichardt (1990) destaca que depois da umidade, o estado de energia da água é a característica mais importante dos solos, e como na natureza os corpos tendem a ocuparem um estado mínimo de energia, há uma busca espontânea por estados mais estáveis. A água obedecendo à tendência universal, move-se no sentido de diminuição de seu estado de energia. Conhecendo-se então os potenciais de energia da água em diferentes pontos do solo, pode-se determinar o sentido do seu movimento.

Quando em um solo não saturado, em estado de equilíbrio, modifica-se a carga de pressão à qual o solo está submetido, ocorrerá um fluxo de água até que se atinja um novo equilíbrio. A nova condição de equilíbrio não significa uma distribuição uniforme da umidade, mesmo quando o solo for homogêneo (CRONEY, 1952), citado por Rassam et al. (2004).

O conhecimento da dinâmica da água ,durante o desenvolvimento de uma cultura, fornece elementos essenciais ao estabelecimento ou aprimoramento de práticas de manejo agrícola que visa à otimização da produtividade. Estudos da dinâmica da água em condições de campo, dando ênfase a fluxos de água na zona radicular da cultura, são escassos e, muitas vezes, incompletos (REICHARDT et al. 1979).

2.1.4 Frente de umidade

Elmaloglou e Malamos (2006) propuseram um método, constando de duas equações que estimam a profundidade da frente de umidade, V , sendo que a primeira diz respeito ao movimento vertical antes do fim da irrigação.

$$V = d_v t^{c_v} \quad \text{Equação 10}$$

Em que:

t = Tempo desde o início da irrigação

c_v e d_v = Coeficientes empíricos que dependem das características hidrodinâmicas do solo e da taxa de aplicação de água.

A duração t_i , em horas, é o tempo necessário para a aplicação da água requerida por irrigação. O avanço vertical da água que ocorre no tempo t_i é V_i , então:

$$V_i = d_v t_i^{c_v} \quad \text{Equação 11}$$

Na segunda fase que segue após o término da irrigação, o movimento vertical da frente de umidade é descrito pela seguinte equação:

$$V - V_i = A(t - t_i)^{1/2} + B(t - t_i) + C(t - t_i)^{3/2} \quad \text{Equação 12}$$

Em que:

A, B e C = Coeficientes empíricos que dependem das características hidrodinâmicas do solo e da taxa de aplicação de água.

Todos os coeficientes empíricos mencionados podem ser obtidos através de regressão, utilizando dados da frente de avanço vertical da água sob o emissor em campo ou laboratório (ELMALOGLOU e MALAMOS, 2005).

As propriedades hidráulicas do solo exercem grande influência no movimento vertical da frente de umedecimento (ELMALOGLOU e DIAMANTOPOULOS, 2007), e a propagação da frente de umidade proveniente de uma fonte pontual de água no solo é tridimensional e a forma do volume de solo umedecido (bulbo molhado) depende, principalmente, do equilíbrio entre as forças capilares e gravitacionais. Entretanto, o solo por ser um meio heterogêneo a infiltração, também é afetada pela textura do solo, condutividade hidráulica, volume e vazão do gotejador e umidade inicial do solo (KELLER, 1984).

A dinâmica dos fluidos em meio poroso é objeto de vários estudos teóricos e experimentais, devido a sua importância para a engenharia e aplicações ambientais (SAHIMI, 1993; SCHEIDEGGER, 1974) e entre os maiores desafios nesta área, está a solução dos problemas de modelagem do fluxo de fluido, através de um meio parcialmente saturado, em especial a propagação das frentes de Umidade ou secagem no perfil do solo (MITKOV et al. 1998).

2.1.5 Armazenamento

Segundo Azevedo et al. (1993), as necessidades hídricas das culturas têm sido estabelecidas, utilizando-se dados climáticos, ajustados através do coeficiente de cultivo (K_c). Por outro lado, é necessário que a água aplicada seja totalmente disponibilizada para a cultura, através de uma eficiente aplicação e armazenagem no solo, que é função da textura, do teor de água disponível e do volume de solo molhado.

O movimento da água e dos solutos no solo e deste para as plantas é função do estado energético em que a água se encontra retida no solo, e este é mais importante que a quantidade de água no solo (LIBARDI, 2005).

A retenção de água é uma propriedade do solo que relaciona as forças superficiais que determinam o estado de energia da água do solo. A relação entre o potencial matricial e o conteúdo de água do solo é uma característica do solo denominada de curva de retenção ou curva característica da água no solo. Os processos responsáveis pela retenção da água ocorrem nos microporos (capilaridade) e nas superfícies dos sólidos do solo como filmes presos à superfície, pela adsorção (LIBARDI, 2005).

2.1.6 Condutividade hidráulica

Segundo a EMBRAPA (1995), mesmo em latossolos, que é uma classe de solos considerada “uniforme” ao longo do perfil (isotrópica), foram encontradas diferenças de condutividade hidráulica, variando de 10,0 a 22,0 cm h^{-1} nos horizontes superficiais e valores inferiores, variando de 6,0 a 10,0 cm h^{-1} nos horizontes subsuperficiais.

Segundo Andrade e Stone (2009), o conhecimento da condutividade hidráulica não saturada em nível experimental esbarra na morosidade, no custo elevado e na alta variabilidade de valores, no espaço e no tempo. Usa-se como

alternativas, modelos numéricos que calculam esta condutividade de modo rápido e a um custo bem menor.

A condutividade hidráulica não saturada no ponto de inflexão da curva de retenção (K_i), pode ser determinada a partir do índice S e de h_i em modelos numéricos que permitem determinar a condutividade hidráulica não saturada $K(h)$, e que independentemente da textura do solo, as determinações de $K(h)$, feitas com base em K_i , apresentaram altas correlações com valores medidos (ANDRADE E STONE, 2009).

Em geral, a condutividade hidráulica saturada, K_0 (na tensão $h = 0$) é um valor medido e os valores da condutividade hidráulica não saturada são calculados a partir dela, utilizando-se procedimentos em que a saturação ($h = 0$) e seu conteúdo de água associado são conhecidos como ponto de referência (DEXTER, 2004).

A condutividade hidráulica do solo é um dos principais parâmetros utilizados para estudos agrícolas e ambientais que envolvem o fluxo de água no solo, tais como, planejamento de sistemas de irrigação e drenagem, rebaixamento do lençol freático, movimento de água no solo, nutrição de plantas, controle da erosão e poluição da água (JONES e WABENET, 1984; FREEZE, 1994; FILIZOLA et al.1997, JONG VAN LIER e LIBARDI, 1999; LIBARDI, 2005; RADCLIFFE e RASMUSSEN, 2000)

Segundo Libardi (2005), existe carência de estudos da dinâmica da água em condições não saturadas. Para avaliação de tais fluxos, as propriedades hidráulicas da zona não saturada precisam ser estimadas.

De acordo com Fredlund e Xing (1994) existem basicamente dois tipos de abordagem para a determinação da função de condutividade hidráulica, uma primeira baseada em estudos empíricos e a segunda em modelos estatísticos. Dentro destes modelos estatísticos, encontra-se o de Van Genuchten - Mualem que é representada pela equação:

$$K = K_s \theta_e^{0,5} \left[1 - (1 - \theta_e^{0,5})^m \right]^2 \quad \text{Equação 13}$$

Em que:

K = Condutividade hidráulica não saturada

K_s = condutividade hidráulica saturada

θ_e = saturação efetiva ($0 \leq \theta_e \leq 1$)

0,5= parâmetro de inclinação (MUALEM, 1976) proposto para a maioria dos solos;

$$\theta_e = \frac{(\theta - \theta_r)}{(\theta_s - \theta_r)} \quad \text{Equação 14}$$

Em que:

θ = Umidade em base de volume ($\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$)

θ_s = Umidade na saturação em base de volume ($\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$)

θ_r = Umidade residual em base de volume ($\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$)

Oliveira e Pinto (1997), utilizando a equação proposta por Van Genuchten (1980) para determinação da capacidade de campo, e o modelo proposto por Hillel (1980) para o cálculo da condutividade hidráulica do solo não saturado, pelo método do perfil instantâneo em colunas de solo, constataram que a equação de Van Genuchten apresentou um valor de r^2 igual a 0,998 e que a relação entre a condutividade hidráulica não saturada e a umidade volumétrica foi explicada pelo ajuste das equações tipo exponencial, proposta por Gardner (1958) para diferentes camadas de solo, cujos valores de r^2 foram superiores a 0,96.

2.1.7 Percolação

A porosidade drenável, porosidade efetiva, porosidade livre de água ou macroporosidade, representa o volume de poros do solo no qual a água se move livremente (QUEIROZ, 1995). A porosidade drenável, responsável pela drenagem e aeração do solo, é uma propriedade de grande significado para o manejo e estudo de fluxos hidráulicos no solo, sendo vital na modelagem da contaminação do lençol freático e na drenagem propriamente dita (Queiroz, 1997).

Considerar a porosidade drenável como uma constante significa assumir uma condição de drenagem capaz de levar o solo do ponto de saturação até a "capacidade de campo", quando cessaria o processo de drenagem interna (equilíbrio estático).

A modelagem do movimento de água e solutos no solo é importante para a compreensão das formas de reduzir a poluição das águas superficiais e subterrâneas (ROGERS, 1994)

Em observação, Dahan (2007) concluiu que a infiltração através de formações aluviais com camadas de diferentes características hidráulicas pode exigir uma pequena carga hidráulica para quebrar a barreira capilar e permitir a infiltração profunda.

Kukal e Aggarwal (2002) e Kukal e Sidhu (2004) observaram diminuição das taxas de percolação ao longo do tempo, durante um ciclo de irrigação em todos os níveis de intensidade e de profundidade de encharcamento, em tipos similares de solos, e em todos os níveis de pré-cultivo com encharcamento do solo para cultivo de arroz.

2.1.8 Curva de retenção

Segundo Fredlund e Xing (1994), a curva de retenção da água no solo pode ser definida como a variação da capacidade de retenção da água nos macros e micros poros no interior do solo, com a sucção aplicada no solo.

Hutson e Cass (1987) observaram que a equação de Campbell apresentou um desempenho insatisfatório no intervalo próximo à saturação, e que os dados de laboratório mostravam um ponto de inflexão em que a equação de Campbell tornava-se ineficiente. Para correção destes problemas, foi proposta uma equação parabólica para representar a curva de retenção de umidade no intervalo $0 \leq \varphi \leq \varphi_i$, onde φ_i é a pressão matricial correspondente ao ponto de inflexão da curva de retenção, como segue:

$$S = 1 - (1 - S_i)S^{2b} \left(\frac{\psi}{a}\right)^2 \quad \text{Equação 15}$$

Em que:

S = Grau de saturação ($\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$)

S_i = Grau de saturação no qual o ponto de inflexão teoricamente ocorre ($\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$).

ψ = Potencial de água no solo (kPa)

a e b = Coeficientes de regressão obtidos com base na equação de Campbell.

As equações de retenção de água no solo que correlacionam o conteúdo de água no solo em relação ao potencial matricial são úteis para os propósitos de modelagem e de planejamento, especialmente se as propriedades do solo forem valorizadas pela escolha apropriada dos parâmetros das equações.

A primeira representação matemática da curva característica de umidade do solo foi desenvolvida por Brooks e Corey (1964), cujos parâmetros tinham significância física e eram determinados graficamente. Campbell (1974) reconheceu que, para todos os propósitos práticos, que os coeficientes da equação de Brooks e Corey eram coeficientes de regressão. Como resultado disto, a equação a seguir é conhecida como equação de Campbell:

$$S = \left(\frac{a}{\phi}\right)^b \quad \text{Equação 16}$$

Em que:

S = Grau de saturação, em $\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$.

ϕ = Potencial matricial, em cm.

a = Coeficiente dependente empírico.

b = Coeficiente empírico.

A falha da equação de Campbell está no grau de saturação que pode exceder 100% próximo a saturação, onde $\phi^b < a^b$ e torna-se infinito quando a pressão matricial é igual a zero.

A representação da curva característica de umidade foi proposta por Verma e Brussaert (1970), caracterizada por uma relação de potência inversa, como segue:

$$S = \left(\frac{A}{A + \psi^\beta}\right) \quad \text{Equação 17}$$

Em que:

S = Grau de saturação, em $\text{cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$.

A e β são constantes empíricas.

De acordo com esta equação, a saturação é igual a 1,0 quando a pressão matricial é zero.

Uma representação mais complexa da curva de retenção de umidade foi proposta por Van Genuchten (1980), caracterizada por uma relação inversa com dois coeficientes de regressão que devem ser determinados graficamente. Sua equação é dada por:

$$S = \left(\frac{\theta_s - \theta_r}{\theta_s} \right) [1 + (\alpha\Psi)^n]^{(1+\frac{1}{n})} + \frac{\theta_r}{\theta_s} \quad \text{Equação 18}$$

Em que:

S = Grau de saturação, em $\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$.

θ_s = umidade a saturação, em $\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$.

θ_r = umidade residual, em $\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$.

α e n = Constantes empíricas.

A Curva de Retenção pode ser dividida em três estágios de drenagem. O primeiro, chamado de "Efeito Limite" (Boundary Effect Stage), ocorre até o valor de entrada de ar e é nele que praticamente todos os poros estão preenchidos com água. O segundo estágio ocorre entre a pressão de entrada de ar e o ponto de início da umidade residual. Também chamada de fase de transição. Neste estágio, o fluxo de água é em fase líquida, quando a sucção aplicada aumenta e o solo é drenado com o aumento da sucção. Já no terceiro estágio, fase residual de drenagem, a continuidade da água nos vazios é bastante reduzida e descontínua e acréscimos adicionais na sucção levam a pequenas mudanças no grau de saturação do solo. (VANAPALLI et al. 1999).

Os dados obtidos através do método da câmara de pressão ou da centrífuga são ajustados pelo modelo de Van Genuchten (1980) para obtenção do perfil de umidade, a partir do perfil de tensão. Com o modelo de Van Genuchten (1980) faz-

se o ajuste dos parâmetros empíricos (n e α), a partir de regressões múltiplas com os dados obtidos em laboratório para estimação da função $\theta(h)$. O parâmetro empírico m é obtido pela relação $m=1-1/n$.

$$\theta = \theta_r + \frac{\theta_s - \theta_r}{[1 + (\alpha\Psi)^n]^m} \quad \text{Equação 19}$$

Em que:

θ = Teor de umidade $\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$

θ_s = Umidade de saturação.

θ_r = Umidade residual.

Ψ = Tensão da água no solo.

m , n e α = Parâmetros empíricos do modelo de van Genuchten.

2.2 LISIMETRIA

Citado por Machado (1996) Abouklad (1982) definiu lisímetros como containers preenchidos com solo e localizados no campo para representar o meio com superfícies vegetadas ou não, para determinação do balanço hídrico, e a evapotranspiração das culturas. Os lisímetros são divididos em duas categorias: os não pesáveis (chamados volumétricos, de drenagem ou de compensação) e os lisímetros de pesagem (gravimétricos).

O primeiro relato da utilização de um lisímetro ocorreu na França, em 1688, quando De La Hire usou recipientes de chumbo preenchidos com solo argilo-arenoso e concluiu que nos lisímetros cobertos com grama havia mais perda de água do que em outros com solo nu (MACHADO, 1996).

Segundo Queiroz et al. (1999), após o enchimento do lisímetro será necessário um período de tempo para que haja a estabilização do solo. Em trabalho realizado por eles, os lisímetros eram, inicialmente, enchidos cuidadosamente com solo homogeneizado e durante três meses submetidos a irrigações periódicas; e submetidos ao processo natural de compactação, ficando expostos à intempérie durante mais cinco meses. O procedimento de enchimento dos lisímetros e detalhes dos ensaios de drenagem, inclusive do comportamento hidrodinâmico, são descritos por Gheyi (1989) e Queiroz (1990).

2.3 TDR

A "Time Domain Reflectometry – TDR" tem-se constituído numa técnica muito utilizada para o monitoramento do conteúdo de água no solo, devido a precisão dos dados coletados, tanto sob condições de laboratório quanto de campo (TOPP e DAVIS, 1985; ZEGELIN et al. 1992). A técnica do TDR permite que o monitoramento da dinâmica da água no solo seja automatizada, uma vez que as medições podem ser feitas em tempo real, tornando esta tecnologia, extremamente importante para a realização de estudos de balanço de água no solo e para determinação da evapotranspiração (BAKER e ALLMARAS, 1990; HEIMOVAARA e BOUTEN, 1990; HERKELRATH, 1991).

Malicki et al. (1992) verificaram que a técnica do TDR torna possível examinar o conteúdo de água no perfil do solo com uma resolução vertical, a partir de camadas de 0,01 m, com uso de minissondas. Com esta técnica, combinada com o uso de minitensiômetros, é possível monitorar o fluxo de água no solo, assim como os parâmetros de condutividade hidráulica, difusividade e curva de retenção de umidade.

Topp et al. (1980), propuseram uma relação empírica entre umidade do solo e a constante dielétrica que serviria para uma gama de tipos e texturas de solos, motivo pelo qual esta relação ficou conhecida como “Equação Universal” de calibração do TDR, descrita a seguir:

$$\theta = -0,053 + 0,0292\varepsilon - 0,00055\varepsilon^2 + 0,0000043\varepsilon^3 \quad \text{Equação 20}$$

Em que:

θ = Umidade à base de volume ($\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$)

ε = constante dielétrica do meio.

Grable (1966) menciona que existe um valor máximo de umidade no solo, acima do qual a difusão de oxigênio através do solo é reduzida com base nos resultados disponíveis em literatura relativa à relação entre condutividade hidráulica (K) e o teor de umidade no solo (θ) para vários tipos de solos.

A relação da leitura do TDR com a umidade do solo, expressa por sua curva de calibração, pode ser descrita por modelos estatísticos totalmente empíricos ou baseados em princípios físicos ou, ainda, mistos. Esta curva pode ser da umidade em função da permissividade ou do tempo medido pelo equipamento; este último deve resultar em uma relação linear (HOOK et al. 1992)

Para medidas de umidade do solo a utilização de sensores capacitivos como reflectometria no domínio do tempo (TDR) que consiste de uma técnica baseada na avaliação da constante dielétrica do solo em cabos condutores (TEIXEIRA et al. 2003).

Esta técnica possui algumas vantagens quanto ao uso, principalmente pela precisão, automatização e repetição das leituras sem destruição da amostra de solo como no tradicional método de coletas, secagem e pesagem das amostras para determinação da umidade.

2.4 IRRIGAÇÃO

2.4.1 Intermitência

Em uma ampla avaliação da eficiência da irrigação no Vale do rio São Francisco, Ramos e Pruski (2003), concluíram que, mesmo para os sistemas de irrigação do tipo localizado, a eficiência final da irrigação oscilava em torno de 50%, implicando em elevada perda da água aplicada bem como dos nutrientes veiculados via fertirrigação.

A Irrigação intermitente pode melhorar a eficiência de aplicação da irrigação permitindo que a água permaneça por mais tempo movendo-se pelo sistema de microporos do solo. (KARAM, 1994)

Segundo Larry et al. (1976), a redistribuição da umidade é promovida pelo movimento da água no perfil do solo durante os períodos entre as aplicações, e ela determina o conteúdo de água no solo e sua distribuição no início de um novo período de aplicação.

O ciclo tradicional de irrigação consiste de um breve período de infiltração seguido por um longo período de extração de água pela cultura, como acontece nos sistemas de irrigação por superfície e por aspersão, cujo contraste econômico minimiza o número de irrigações aumentando o tempo entre elas. O desenvolvimento dos sistemas de irrigação localizada, capazes de aplicar água em menores quantidades, implica aumento da frequência de irrigação, em que o período de infiltração torna-se a parte mais importante do ciclo de irrigação (RAWLINS, 1973).

A intensidade de aplicação de água necessária para umedecer o solo, sem que seu conteúdo de umidade alcance o valor máximo, deverá oscilar entre 0,5 – 2,0

mm.h⁻¹ (ZUR, 1976). Como os emissores disponíveis não são capazes de aplicar água abaixo dessas intensidades de aplicação, adotou-se o princípio da intermitência do tempo de irrigação recomendado por Rubimn e Steinhardt (1964), de acordo com seguinte equação:

$$I_{am} = I_{ae} \times \frac{tp}{T} \quad \text{Equação 21}$$

Em que:

I_{am} = intensidade média de aplicação de água (mm h⁻¹)

I_{ae} = intensidade de aplicação do emissor (mm h⁻¹)

t_p = duração da cada pulso (min).

T = tempo entre o início de dois pulsos consecutivos (min.)

que resultaria num fluxo constante de água abaixo da zona de absorção de água e que se igualaria à intensidade média de aplicação.

Zur e Savaldi (1977) formularam e testaram experimentalmente as variações induzidas da umidade do solo, em períodos e fizeram uma analogia entre o regime de infiltração de água no perfil de solo, sob irrigação intermitente, e o fenômeno de propagação da onda. Eles também observaram que o tempo de variação da umidade nas diversas profundidades da coluna de solo recebendo água em dois regimes de intermitências foi muito bem representado pela série de Fourier. As amplitudes computadas do tempo de variação da umidade foram crescendo exponencialmente com a profundidade, e a mudança de fase, linearmente como previsto hipoteticamente.

Segundo Karmeli e Peri (1974) os tempos, real e total de irrigação de cada ciclo podem ser determinados pelas equações:

$$t_i = \frac{I_{am} \times T_i}{I_{ae} \times n} \quad e \quad T_t = n \times t_i + (n-1)t_p \quad \text{Equação 22}$$

Em que:

T_i = tempo total de irrigação

n = número de ciclos

T_t = tempo total de ciclo

t_i = tempo real de irrigação em cada ciclo

t_p = tempo de parada do sistema de irrigação

Levin et al. (1979) constataram perdas de água da ordem de 26% abaixo de 60cm de profundidade, quando optaram pelo tempo contínuo de irrigação, utilizando emissores com vazões de 2, 4 e 8 L h⁻¹, em comparação ao uso de emissores com vazão de 1 L.h⁻¹ com aplicação contínua e de 2 L.h⁻¹ com intermitência do tempo de aplicação, resultando em perdas de apenas 12% ,sem afetar a distribuição horizontal de umidade.

A aplicação intermitente de água em colunas de solos provocou uma redução e um aumento acentuados da condutividade hidráulica saturada e da densidade global, respectivamente, quando a pressão negativa aumentava, alcançando uma estabilização e uma pressão de 0,36 m para um solo arenoso. Os valores de densidade global foram menores que os normais, devido à estrutura altamente porosa do solo arenoso. Mas, os mesmos resultados não foram obtidos para solos de textura silto-argilosa, siltosa e franca, que não alcançaram uma estabilidade, mesmo sob uma pressão negativa de 0,50 m. Em condições de campo, também foi constatado que a aplicação intermitente da água condicionou a redução da condutividade hidráulica e, em seguida, da velocidade de infiltração (SAMANI e YITAYEW, 1989).

3 MATERIAL E MÉTODOS

Este estudo foi conduzido em um lisímetro no campo experimental Bebedouro, pertencente à Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (Embrapa Semi-árido) localizada no perímetro Irrigadod de Bebedouro, Petrolina-PE (Latitude: 09° 09' S, Longitude: 40° 22' W; Altitude: 365 m).

3.1 SOLO

3.1.1 Coleta do solo

O solo utilizado no lisímetro foi um Neossolo Quartzarênico com 94% de areia, 1% de silte e 5% de argila. Ele foi coletado em uma área comercial de uma Fazenda produtora de Uva, com coordenadas geográficas de Latitude 09° 28' 03"S e Longitude 40° 36' 30"W, no projeto de Irrigação Senador Nilo Coelho, em Petrolina-PE. Foi aberta uma trincheira de 120,0 cm x 120,0 cm x 80,0 cm e o solo coletado em fatias horizontais de 10,0 cm até a profundidade 80,0 cm. Cada fatia de solo foi

acondicionada em sacos de ráfia com identificação de local, tipo de solo, e profundidade da camada; e transportadas para o campo experimental de Bebedouro, da Embrapa Semiárido, local de realização dos testes.

3.1.2 Caracterização do solo

Para a determinação da curva de retenção de água, foram coletadas oito amostras de solo com estrutura indeformada, uma por camada de solo, utilizando-se cilindros tipo Uhland, com dimensões de 6,0 cm de altura e 5,0 cm de diâmetro; e oito amostras com estrutura deformada para determinação das propriedades físicas do solo (Tabela 1), nas profundidades de 0,0 – 10,0; 10,0 - 20,0; 20,0 - 30,0; 30,0 - 40,0; 40,0 - 50,0; 50,0 - 60,0 cm. Para elaboração da curva de retenção (Figura 2), foram utilizadas as tensões de 6,08; 10,33; 33,44; 60,80; 101,33 e 1.519,88 kPa., obtidas através de uma centrífuga de alta rotação no laboratório de solos da Embrapa Semi-árido (Tabela 2). Os parâmetros de ajuste da curva Van genutchen n,

Tabela 1 - Dados das propriedades físicas do solo.

PROF	DA	DR	AG	AF	SIL	ARG	POR	CT
(cm)	(g cm ⁻³)	(g cm ⁻³)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	-
0,00 – 10,0	1,58	2,67	52	42	1	5	41	Areia
10,0 – 20,0	1,58	2,67	52	42	1	5	41	Areia
20,0 – 30,0	1,58	2,67	52	42	1	5	41	Areia
30,0 – 40,0	1,57	2,70	1	92	2	5	42	Areia
40,0 – 50,0	1,57	2,70	1	92	2	5	42	Areia
50,0 – 60,0	1,57	2,70	1	92	2	5	42	Areia

Condutividade hidráulica (Ko) = 42,0 cm h⁻¹

PROF=Profundidade; DA=Densidade aparente; DR=Densidade real; AG=Areia grossa; AF=Areia fina; SIL=Silte; ARG=Argila; POR=Porosidade; CT=Classe textural.

Tabela 2 - Dados de umidade da Curva de retenção

Prof.	Tensão					
	6,08 kPa	10,33 kPa	33,44 kPa	60,80 kPa	101,33 kPa	1.519,88 kPa
Umidade ($\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$)						
0,0-0,10	0,13	0,12	0,10	0,11	0,13	0,12
0,10-0,20	0,10	0,09	0,06	0,08	0,09	0,08
0,20-0,30	0,08	0,07	0,05	0,07	0,07	0,06
0,30-0,40	0,07	0,06	0,04	0,06	0,06	0,05
0,40-0,50	0,07	0,05	0,04	0,05	0,05	0,04
0,50-0,60	0,05	0,02	0,02	0,03	0,02	0,03
Média	0,08	0,07	0,05	0,07	0,07	0,06

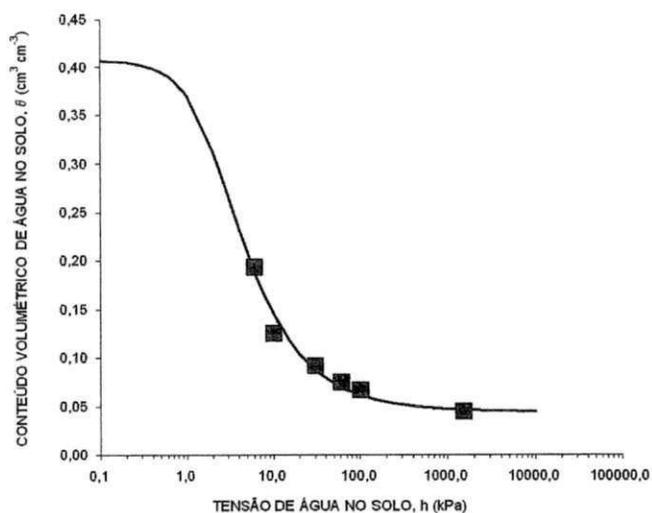


Figura 2 - Curva de retenção de água para o um solo neossolo Quartzarênico

m e α (Tabela 3), foram obtidos através do software Soil Water Retention Curve - SWRC (DOURADO NETO et al. 2001).

Tabela 3 - Parâmetros otimizados da curva de Van Genutchen.

Umidade de Saturação	θ_s (cm ³ cm ⁻³)	0,40
Umidade Residual	θ_r (cm ³ cm ⁻³)	0,04
	n	1,78
	α	0,62
	m	0,41
Soma de quadrados		0,0005

3.2 Lisímetro

3.2.1 Confecção

O lisímetro foi confeccionado com chapa metálica nº16, reforçada com cantoneira de ferro, com abas iguais em L, com 3,0" de largura e 1/8" de espessura, e com dimensões de 100,0 cm de comprimento, 100,0 cm de largura e 100,0 cm de altura, baseado na metodologia utilizada por Cecilio (2002). Em uma das paredes laterais da caixa foram feitos orifícios, com a finalidade de dar passagem aos cabos que faziam a conexão entre as sondas TDR e os multiplexadores (Figura 3).



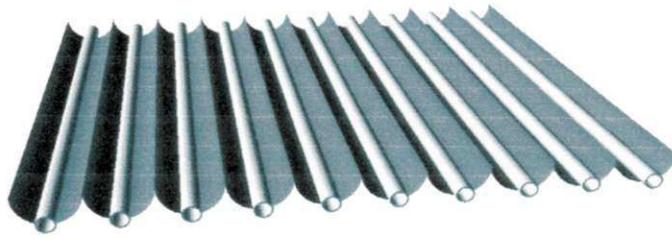


Figura 4 - Detalhes da estrutura metálica com os tubos de PVC para drenagem da água percolada



Figura 5 - Detalhe do sistema de drenagem do lisímetro e dos coletores.

3.2.2 Colocação do solo no lisímetro

Sobre a estrutura metálica foi colocada uma camada de 5,0 cm de brita fina e sobre a camada de brita foi colocada uma camada de areia grossa de 5,0 cm para

depois serem colocadas as camadas de solo, obedecendo a mesma sequência de coleta no campo. A cada camada adicionada, o solo era umedecido com um regador, e permanecia drenando por 24 horas e só então era colocada a camada seguinte, e assim sucessivamente até completar todo perfil. Este procedimento teve como objetivo completar o adensamento das camadas de solo para que se obtivesse uma densidade equivalente às condições naturais.

3.2.3 Instalação das sondas TDR

Durante a colocação de cada camada de solo no lisímetro, eram instaladas as sondas TDR (Figura 6) espaçadas de 10,0 cm até o completo enchimento do lisímetro, perfazendo um perfil de 80,0 cm, conforme Figuras 7, 8 e 9. Foi utilizado um conjunto de 15 sondas TDR, da Campbell, modelo CS610-L50 com 3 eletrodos de 30,5 cm e cabos de 15 metros de comprimento. Como a sonda é uma extensão da guia de onda no final do cabo, foram utilizados cabos especiais tipo coaxial e modelo RG8, que atenuam as perdas, dando maior confiabilidade aos dados, já que sinal emitido pelo TDR100 e refletido pela sonda, percorre toda a guia de onda e qualquer interferência eletromagnética poderia alterar o sinal dando margem a erros de interpretações.

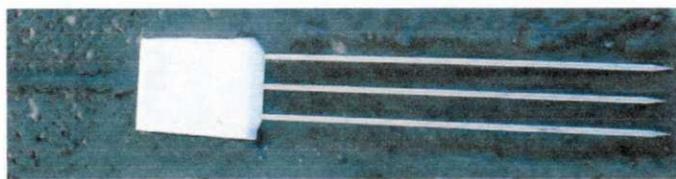


Figura 6 - Vista da sonda TDR

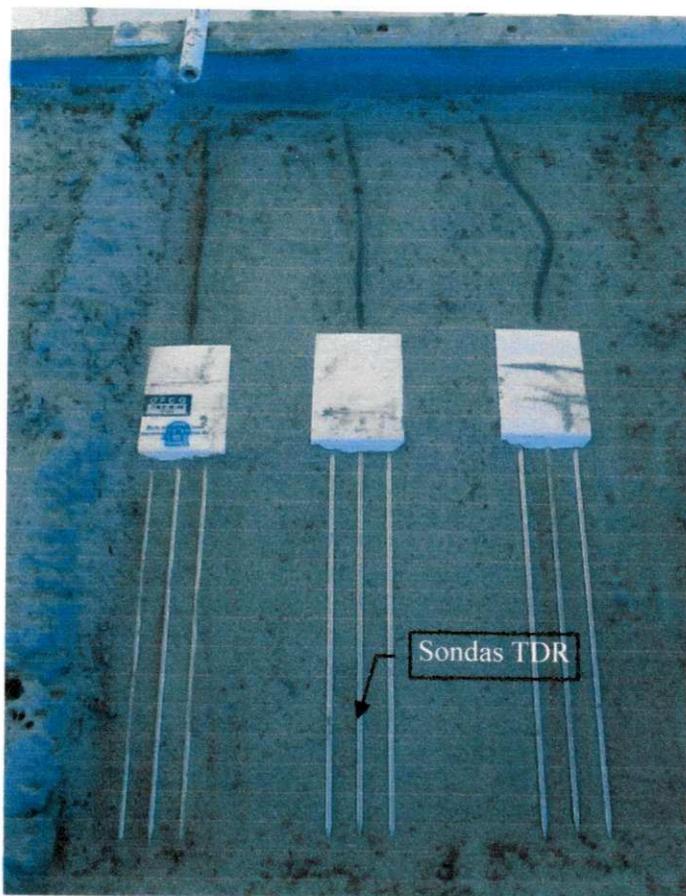


Figura 7 - Vista detalhada da instalação das sondas TDR.

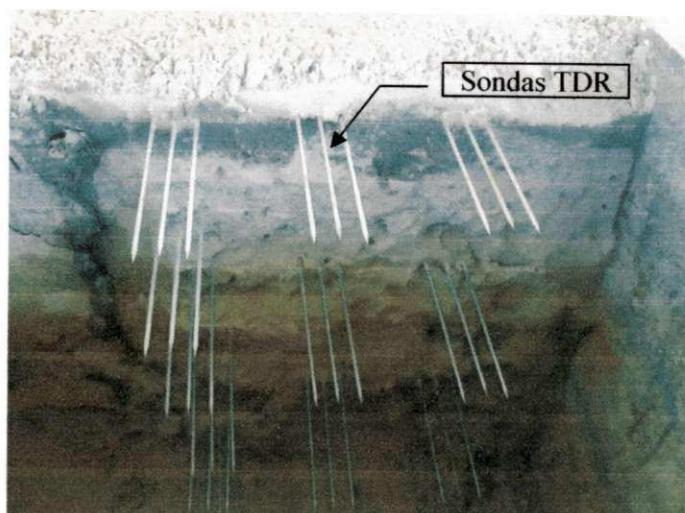


Figura 8 - Corte com detalhes da instalação das sondas TDR

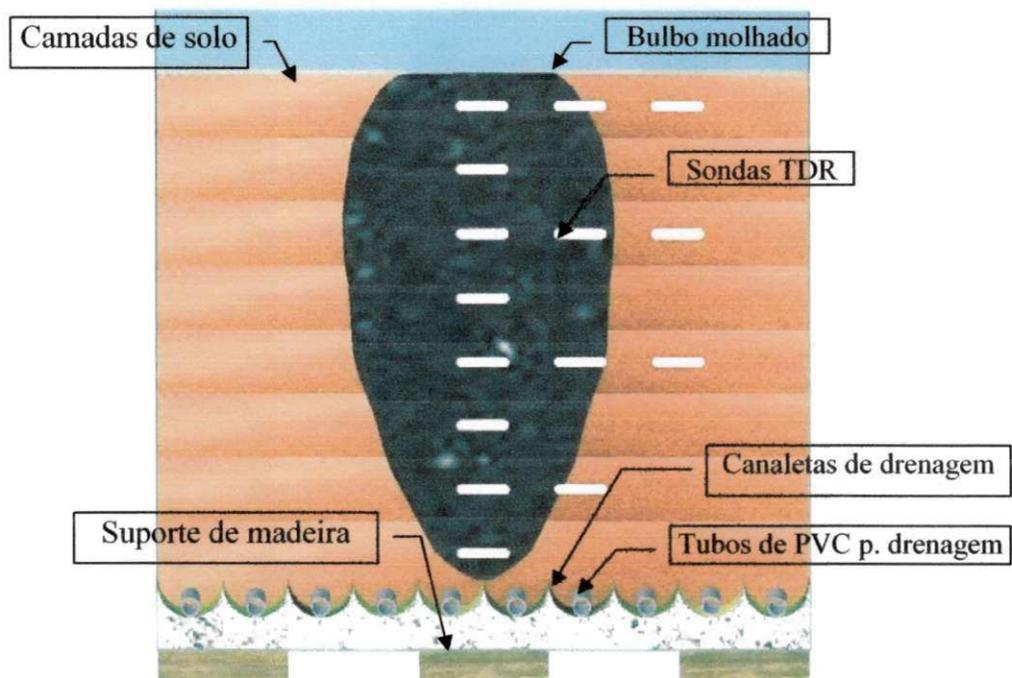


Figura 9 - Esquema de instalação das sondas TDR

3.2.4 Instalação do emissor

Após o enchimento do lisímetro, foi instalado na parte superior da caixa um suporte de metal onde foi fixado um microtubo que simulava um gotejador alimentado por um reservatório de água, denominado de bulbo infiltrômetro desenvolvido por Nascimento e Soares (1988), (Figuras 10, 11 e 12), cujo funcionamento era controlado através de uma válvula Solenoide acionada através do painel de controle da irrigação a cada comando enviado pelo datalogger.

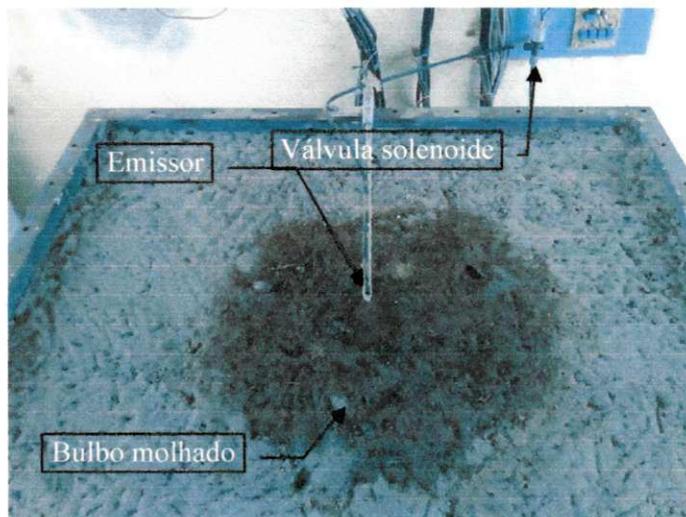


Figura 10 - Detalhe da instalação do emissor e da válvula solenoide para o controle das irrigações.

3.2.5 Bulbo infiltrômetro de carga variável

O bulbo infiltrômetro de carga variável é uma adaptação do bulbo infiltrômetro convencional e consiste de um tubo de PVC com uma bóia que mantém uma coluna de água constante no interior do equipamento (Figura 11), montado em uma estrutura de madeira dotada de um mecanismo que permitia a variação da carga hidráulica no emissor para a obtenção das vazões desejadas (Figura 12).

O equipamento foi interligado a uma tomada de água que era abastecida de forma contínua por um reservatório. Quando a válvula solenoide era acionada o bulbo infiltrômetro liberava a água com vazão de acordo com a carga hidráulica estipulada e que era mantida constante através da boia que regulava a entrada de água no equipamento, de acordo com a vazão demandada.

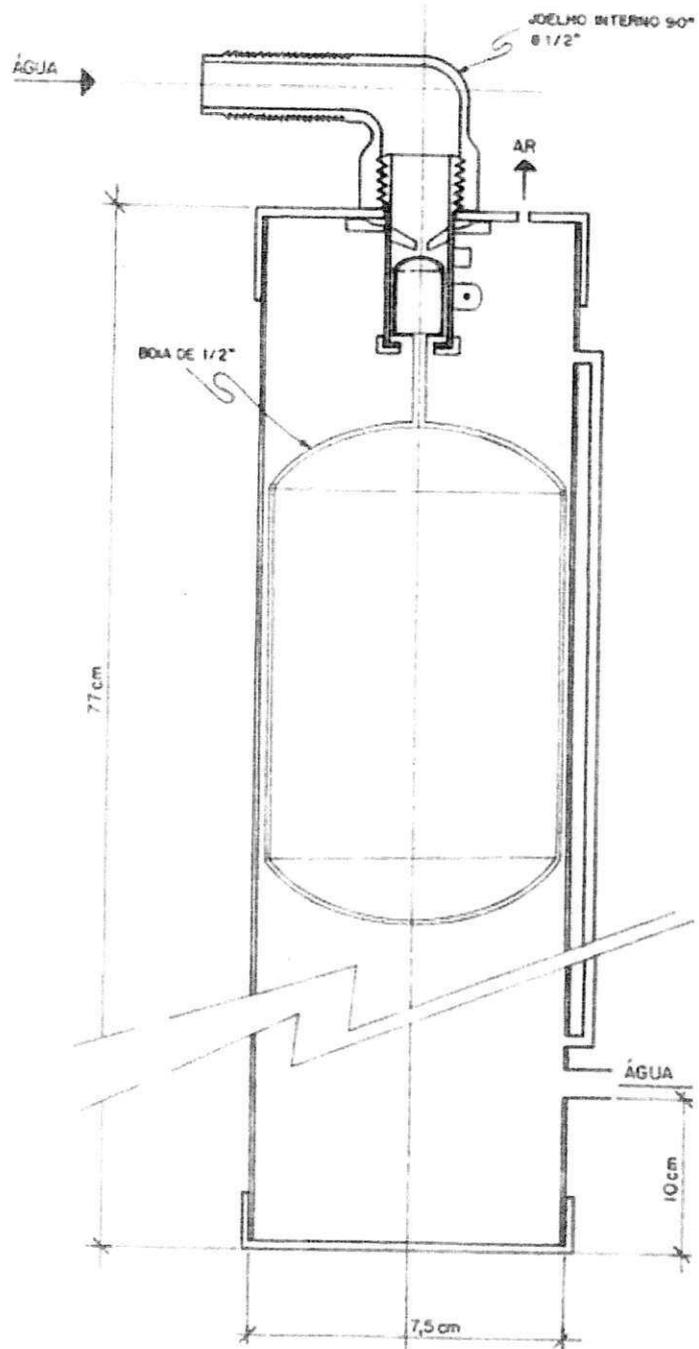


Figura 11 - Detalhes da coluna do bulbo infiltrômetro

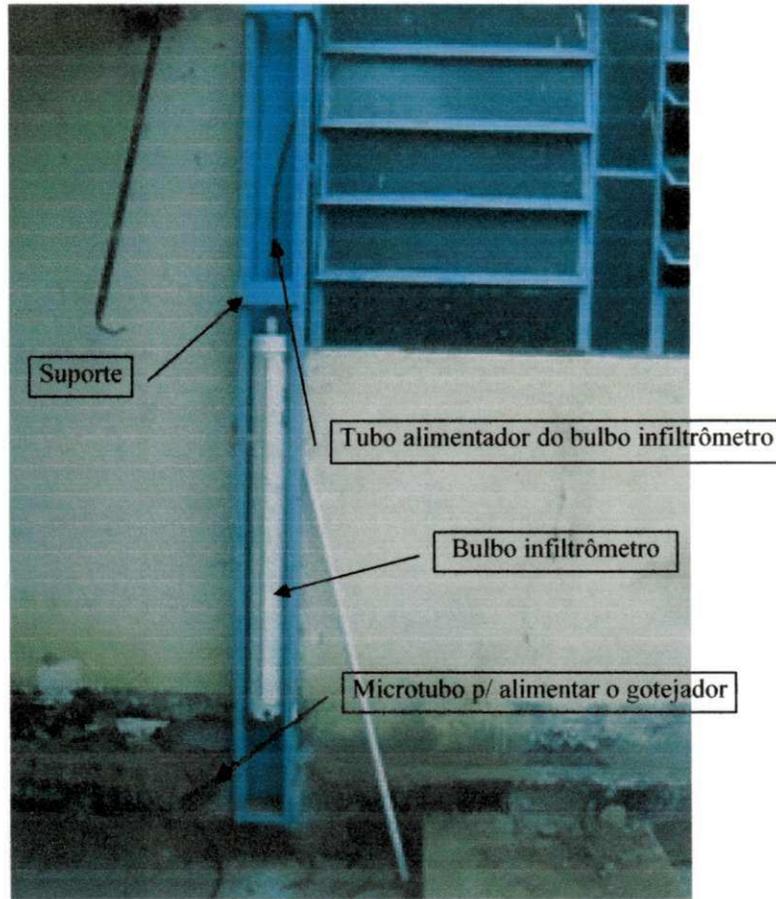


Figura 12 - Vista do bulbo infiltrômetro e do suporte para variação da carga hidráulica.

3.2.6 Painel de controle da irrigação

Para o controle das intermitências, foi montado um circuito eletrônico (figura 13), composto de um conjunto de relés que eram ligados e desligados através de comandos enviados pelo datalogger, de acordo com o tempo especificado para cada intermitência, acionando a válvula solenoide que liberava o fluxo de água para o emissor

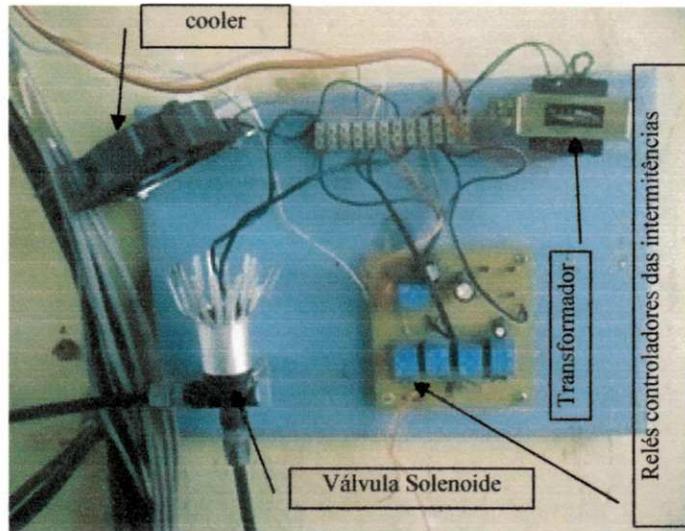


Figura 13 - Painel com circuito eletrônico para controle das intermitências

3.3 Painel de controle central

Para a coleta e armazenamento dos dados foi montado um painel com equipamentos em uma caixa selada modelo ENCTDR100 (Figura 14), onde foram instalados um TDR100, um Multiplexador, um Datalogger e uma bateria. Em outra caixa selada foi montado outro multiplexador.

O TDR100 contém o gerador de pulso que emite um sinal eletromagnético às sondas TDR. Ele também digitaliza os sinais de reflexão e utilizando um algoritmo numérico calcula o teor volumétrico de água, com base na metodologia de Topp et al. (1980) através da seguinte equação:

$$\theta = 0,0000043\varepsilon^3 - 0,00055\varepsilon^2 + 0,0292\varepsilon - 0,053 \quad \text{Equação 23}$$

Em que:

θ = Umidade volumétrica, em $\text{cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$

ε = Permissividade dielétrica do solo

UNICAMP - BIBLIOTECA

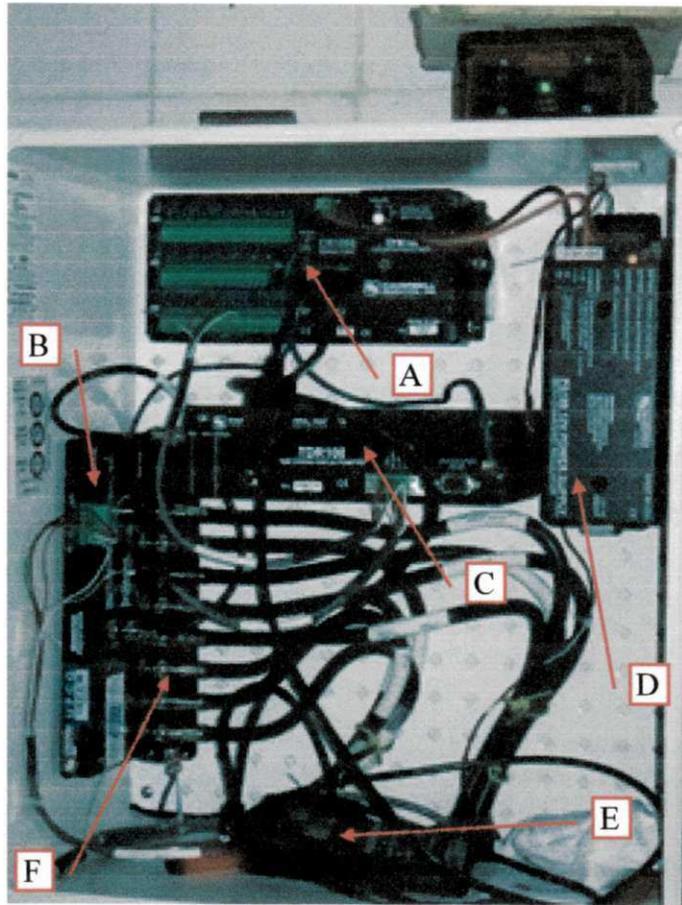


Figura 14 - Painel de controle com Datalogger (A), Multiplexador (B), TDR (C), Bateria (D); Keyboard/Display (E) e detalhe das conexões dos cabos das sondas TDR (F)

As sondas ligadas aos multiplexadores foram configuradas usando a Configuração Multiplexer do software PCTDR. As sete primeiras sondas foram configuradas para operarem nos canais de 1 a 7 do primeiro multiplexador (nível 1). O segundo multiplexador (nível 2) foi configurado para operar no canal 8 do multiplexador nível 1. As oito sonda seguintes fora configuradas para operarem nos canais de 1 a 8 do multiplexador nível 2 (Figuras 15 e 16).

O Controle do TDR100 e dos multiplexadores foram realizados pelo Datalogger CR1000 através de instruções do programa CRBasic (Apêndice A), criadas com o software LoggerNet, que além de armazenar os dados processados pelo TDR100, controlava os tempos de irrigação e as intermitências. A instrução

“TDR100” do CRBasic controlava seqüencialmente os sinais eletromagnéticos do TDR100, enviados para 15 sondas TDR.

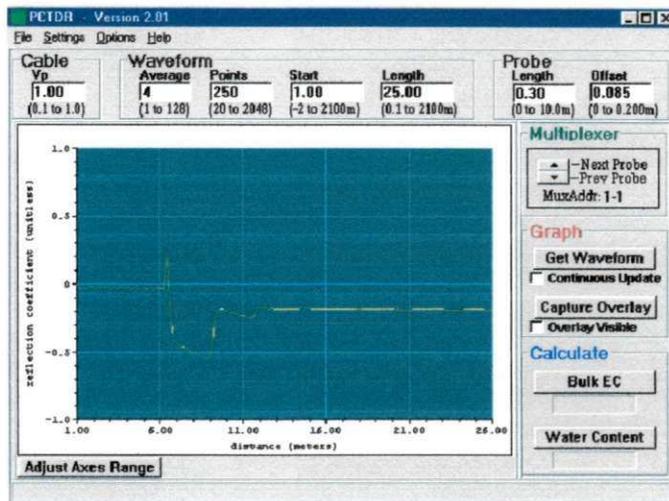


Figura 15 - Tela de configuração do software PCTDR.

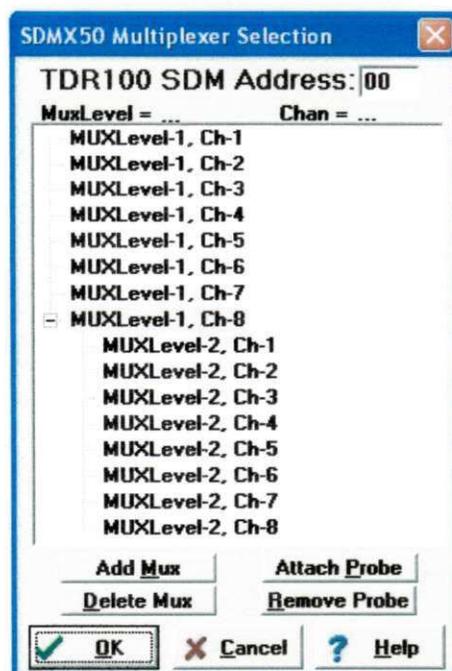


Figura 16 - Configuração Multiplexer do software PCTDR.

Instrução TDR100 do CRBasic.

“TDR100” (Dest, SDMAAddress, Option, Mux/ProbeSelect, WaveAvg, Vp, Points, CableLength, WindowLength, ProbeLength, ProbeOffset, Mult, Offset)

Dest - É a variável em que os dados serão armazenados

SDMAAddress - É a porta através da qual o TDR se comunica com o Datlogger.

Option - Parâmetro que determina a saída de dados da instrução.

0 - Retorna o valor de $L \lambda^{-1}$

1 - Retorna os dados da forma de onda.

2 - Retorna a segunda derivada das formas de onda

3 - Retorna os valores da condutividade elétrica

Mux/ProbeSelect - Indica o nível em que a sonda esta instalada

WaveAvg - Número médio de reflexão por sonda

Vp - Velocidade relativa de propagação.

Points - Número de pontos lidos.

CableLength - Comprimento aparente dos cabo*.

WindowLength - Comprimento da reflexão da onda.

ProbeLength - Comprimento da haste metálica das sondas.

ProbeOffset - 0.085

Mult - Fator multiplicador

Offset - 0

O comprimento aparente dos cabos das sondas TDR foi determinado através da expressão:

* Comprimento aparente = (Comprimento atual) x (Vp selecionada/Vp atual).

Em que :

Vp = Velocidade relativa da propagação da onda que depende das características da constante dielétrica do material isolante. O valor indicado neste campo é a relação entre a velocidade real de propagação para um determinado tipo de cabo e a velocidade de propagação da energia eletromagnética no vácuo.

O valor para a Vp selecionada para o cabo RG-8 foi = 1,0

O valor para Vp atual para o cabo RG-8 foi = 0,78

3.4 Condução do experimento

A primeira irrigação feita no lisímetro foi realizada com um regador onde foi aplicado um volume de água suficiente para que se iniciasse o processo de drenagem, indicando que todo perfil do solo se encontrava com umidade acima da capacidade de retenção ou próximo da saturação. Após esse procedimento, o solo permaneceu drenando durante 48 horas para que o solo atingisse a umidade de capacidade de campo e ,só após esse período ,foram iniciados os testes.

Com base na evaporação média anual da estação experimental de Bebedouro, que é de aproximadamente 8,0 mm, os testes foram realizados utilizando um volume de reposição, fixo de 8,0 L de água.

O tempo efetivo e total de irrigação de cada teste foi realizado de acordo as seguintes equações, utilizando-se emissores com vazões de 2,0; 4,0; 8,0 e 12,0 L h⁻¹ e uma, duas, três e sem intermitências. O tempo de cada intermitência foi igual ao tempo de cada pulso de irrigação.

$$T_e = \frac{V}{Q} \quad \text{Equação 24}$$

$$T_p = \frac{T_e}{n_p} \quad \text{Equação 25}$$

$$T_t = T_e + (T_i * n_i) \quad \text{Equação 26}$$

Em que:

T_e = Tempo efetivo de irrigação (h)

T_t = Tempo total de irrigação (h)

T_i = Tempo de cada intermitência (h) = T_p

T_p = Tempo de cada pulso de irrigação (h)

n_i = Número de intermitências

$n_p = n_i + 1$ = Número de pulsos de irrigação

V = Volume de água aplicado (L)

Q = Vazão do emissor ($L h^{-1}$)

O experimento foi conduzido de acordo com o seguinte esquema:

Primeira bateria de testes: Vazão $2,0 L h^{-1}$

- 3 dias consecutivos com irrigação diária sem intermitência.
- 4 dias consecutivos sem irrigação.
- 3 dias consecutivos com irrigação diária com 1 intermitência.
- 4 dias consecutivos sem irrigação.
- 3 dias consecutivos com irrigação diária com 2 intermitências.
- 4 dias consecutivos sem irrigação.
- 3 dias consecutivos com irrigação diária com 3 intermitências.
- 4 dias consecutivos sem irrigação.

Segunda bateria de testes: Vazão $4,0 L h^{-1}$

- 3 dias consecutivos com irrigação diária sem intermitência.
- 4 dias consecutivos sem irrigação.
- 3 dias consecutivos com irrigação diária com 1 intermitência.
- 4 dias consecutivos sem irrigação.
- 3 dias consecutivos com irrigação diária com 2 intermitências.
- 4 dias consecutivos sem irrigação.
- 3 dias consecutivos com irrigação diária com 3 intermitências.
- 4 dias consecutivos sem irrigação.

Terceira bateria de testes: Vazão $8,0 \text{ L h}^{-1}$

- 3 dias consecutivos com irrigação diária sem intermitência.
- 4 dias consecutivos sem irrigação.
- 3 dias consecutivos com irrigação diária com 1 intermitência.
- 4 dias consecutivos sem irrigação.
- 3 dias consecutivos com irrigação diária com 2 intermitências.
- 4 dias consecutivos sem irrigação.
- 3 dias consecutivos com irrigação diária com 3 intermitências.
- 4 dias consecutivos sem irrigação

Quarta bateria de testes: Vazão $12,0 \text{ L h}^{-1}$

- 3 dias consecutivos com irrigação diária sem intermitência.
- 4 dias consecutivos sem irrigação.
- 3 dias consecutivos com irrigação diária com 1 intermitência.
- 4 dias consecutivos sem irrigação.
- 3 dias consecutivos com irrigação diária com 2 intermitências.
- 4 dias consecutivos sem irrigação.
- 3 dias consecutivos com irrigação diária com 3 intermitências.
- 4 dias consecutivos sem irrigação.

Os dados gerados pelo conjunto TDR100 e sondas TDR, com a variação da umidade do solo, foram coletados e armazenados em um Datalogger CR1000 que foi programado para efetuar leituras a cada minuto e após a integração dos dados, armazená-los a cada 3 minutos. Os dados foram tabulados e tratados em uma planilha eletrônica. Cada teste diário foi utilizado para gerar um gráficos compostos de um conjunto de curvas de variação da umidade, correspondentes a cada profundidade.

A velocidade da frente de umidade foi calculada, levando-se em conta o tempo em que a umidade levou para atingir a uma determinada profundidade

(Equação 27). O tempo era definido no instante em que era registrada a variação da umidade no referido ponto após o início de cada irrigação.

$$v = \frac{Pr}{t}$$

Equação 27

Em que:

v = Velocidade (cm h⁻¹)

Pr = Profundidade (cm)

t = Tempo (min)

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Irrigações sem intermitência

Observa-se nas figuras 17 a 20 as curvas de capacidade campo, ponto de murcha e de variação da umidade no perfil do solo, nas profundidades de 10,0 a 60,0 cm, referentes à irrigação realizada com emissores de vazão de 2,00; 4,00; 8,00 e 12,00 L h⁻¹, irrigando sem intermitência. Nas curvas de umidade correspondentes às profundidades de 20,0 a 60,0 cm, observa-se que a variação de umidade sofreu um retardo em relação ao tempo de início da irrigação e este retardo é função da velocidade da frente de avanço da umidade e da profundidade.

Observa-se na figura 17, referente à irrigação sem intermitência e com emissor de vazão de 2,00 L h⁻¹, que a curva de umidade correspondente à profundidade de 10,0 cm teve um rápido crescimento no intervalo de 0 a 50 minutos após o início da irrigação, daí então começou a reduzir, tendendo para a estabilização quando a umidade chegou aproximadamente a 0,19 cm³ cm⁻³, umidade situada no intervalo correspondente à porosidade drenável, situada entre a

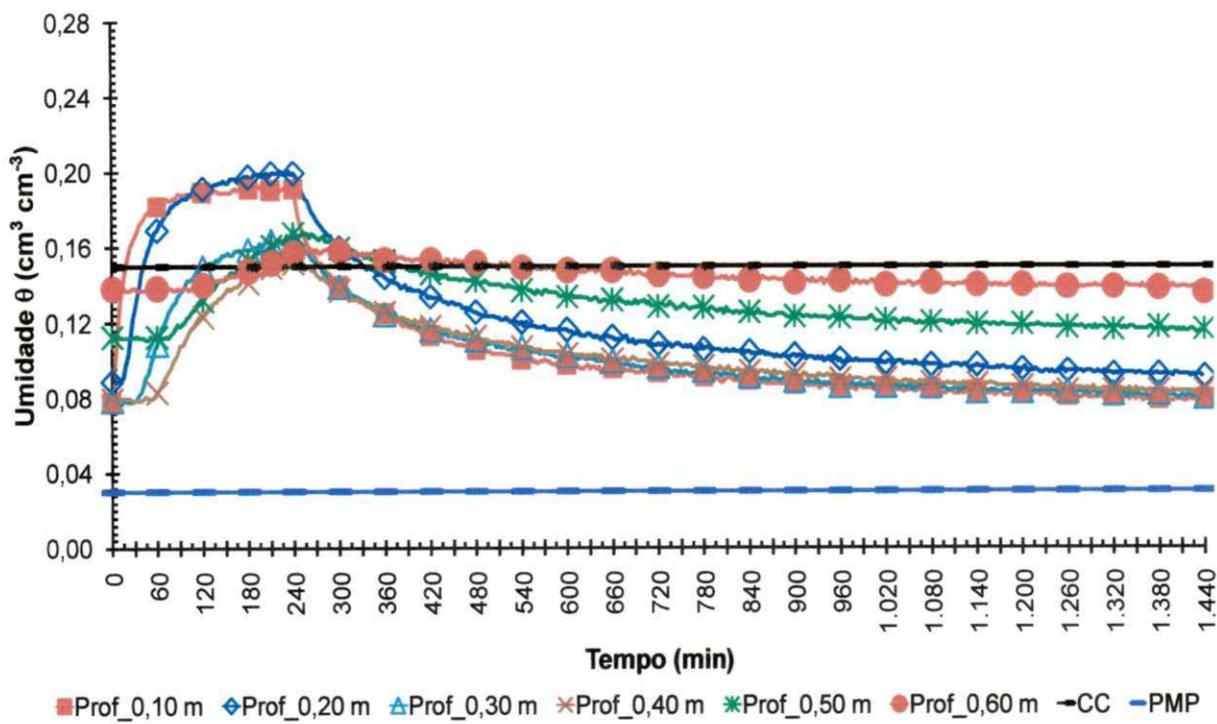


Figura 17 - Variação da umidade do solo sob irrigação sem intermitência e emissor com vazão de $2,00 \text{ L h}^{-1}$.

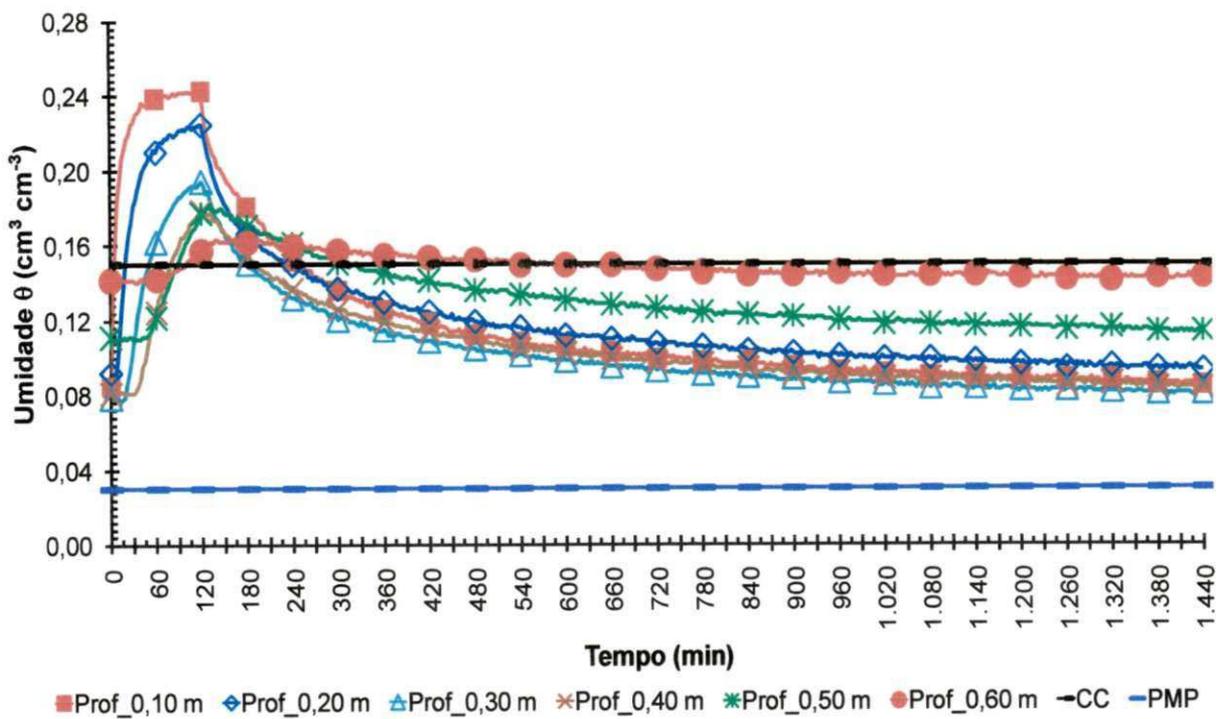


Figura 18 - Variação da umidade do solo sob irrigação sem intermitência e emissor com vazão de $4,00 \text{ L h}^{-1}$.

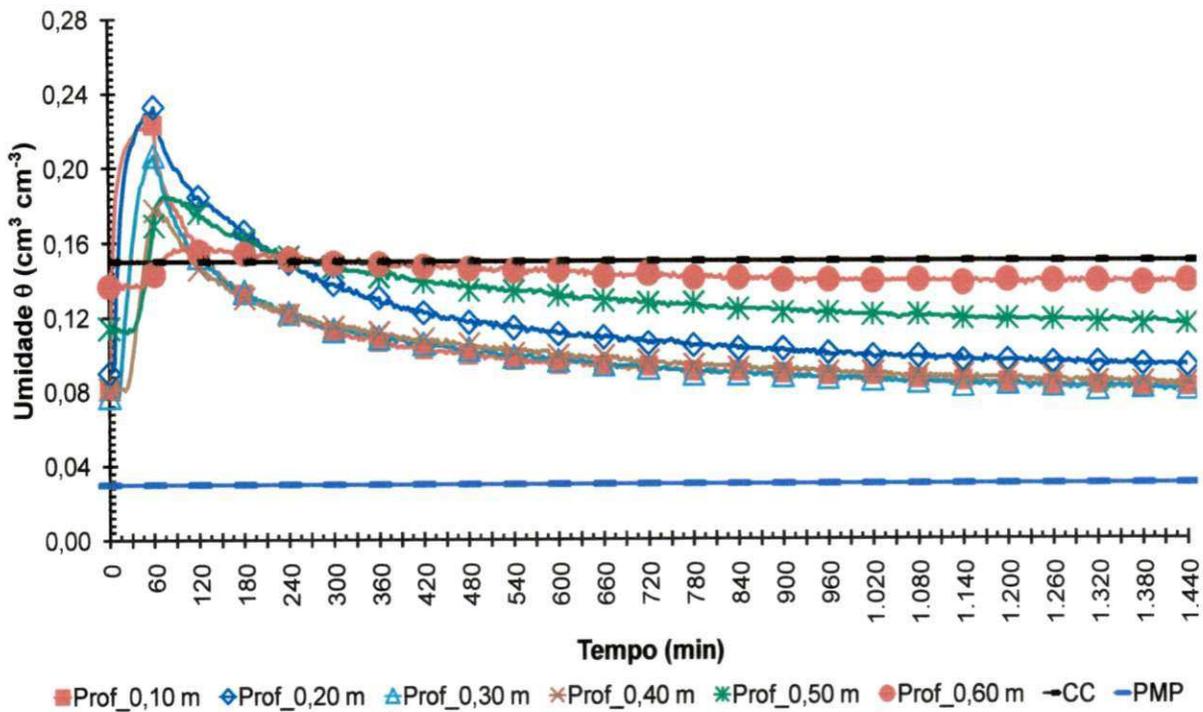


Figura 19 - Variação da umidade do solo sob irrigação sem intermitência e emissor com vazão de 8,00 L h⁻¹.

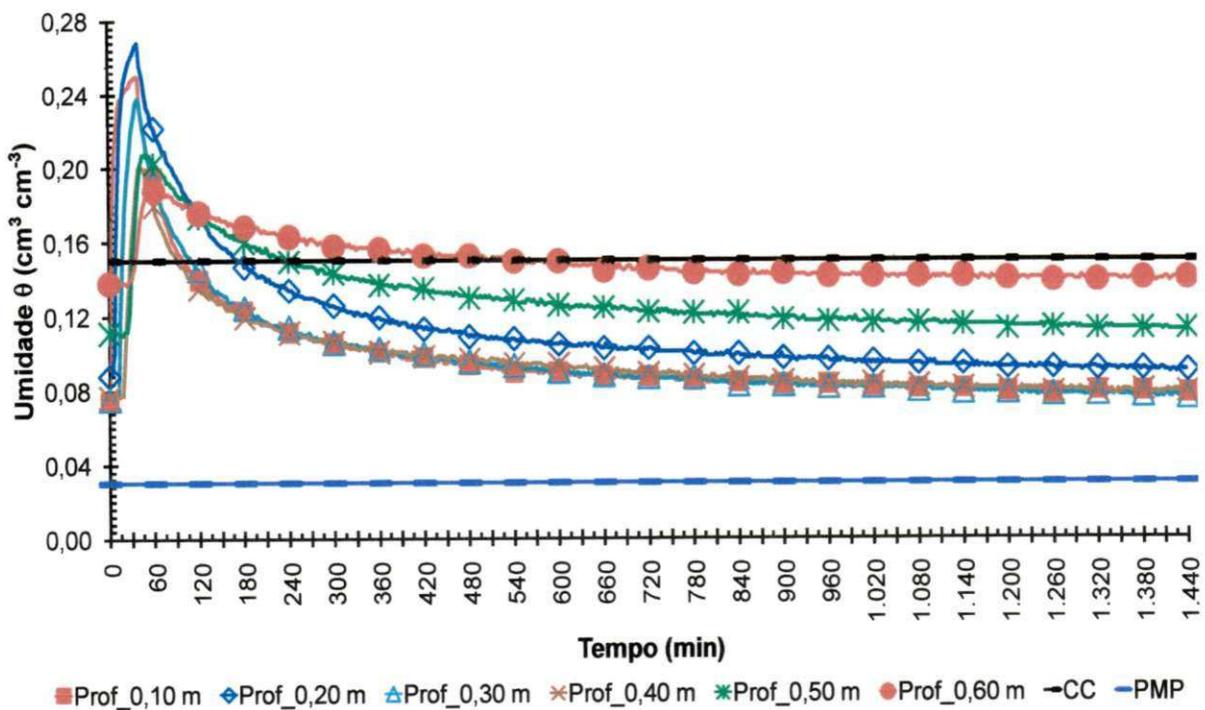


Figura 20 - Variação da umidade do solo sob irrigação sem intermitência e emissor com vazão de 12,00 L h⁻¹.

capacidade de campo e a saturação e que corresponde ao início do preenchimento dos macroporos, representado pelo ponto de inflexão da curva característica (Figura 2). A partir deste instante a umidade permaneceu praticamente constante durante todo evento da irrigação, devido ao fluxo de água no solo ter se equiparado ao fluxo de água do emissor, caracterizando-se um estado de equilíbrio dinâmico.

Observa-se na curva correspondente à profundidade de 60,0 cm, que a água percorreu todo perfil do solo num tempo de aproximadamente 104 minutos após o início da irrigação, quando foi percebida a variação de umidade nessa profundidade, com a frente de umidade atingindo uma velocidade de deslocamento de aproximadamente $34,7 \text{ cm h}^{-1}$. A umidade continuou aumentando até que, aproximadamente, aos 180 minutos superou o valor da capacidade campo, iniciando um processo de percolação profunda; e permaneceu nesta condição até aos 630 minutos, retornando em seguida aos níveis de umidade correspondentes ao de água disponível do solo.

Observa-se na figura 18, referente à irrigação sem intermitência e com emissor de vazão de $4,00 \text{ L h}^{-1}$, que a curva de umidade correspondente à profundidade de 10,0 cm teve um rápido crescimento no intervalo de 0 a 40 minutos após o início da irrigação, quando então começou a reduzir tendendo para a estabilização quando a umidade chegou aproximadamente a $0,24 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$, umidade situada no intervalo correspondente à porosidade drenável. A partir deste instante, a umidade permaneceu praticamente constante durante todo evento da irrigação, devido ao fluxo de água no solo ter-se equiparado ao fluxo de água do emissor, caracterizando-se um estado de equilíbrio dinâmico.

Observa-se na curva correspondente à profundidade de 60,0 cm, que a água percorreu todo perfil do solo num tempo de aproximadamente 76 minutos, após o início da irrigação, quando foi percebida a variação de umidade nessa profundidade, com a frente de umidade atingindo uma velocidade de deslocamento de aproximadamente $47,6 \text{ cm h}^{-1}$. A umidade continuou aumentando até que,

aproximadamente, aos 96 minutos superou o valor da capacidade campo, iniciando um processo de percolação profunda e permaneceu nesta condição até aos 651 minutos, retornando em seguida aos níveis de umidade correspondentes ao de água disponível do solo.

Observa-se na figura 19, referente à irrigação sem intermitência e com emissores de vazão de $8,00 \text{ L h}^{-1}$, que a curva de umidade correspondente à profundidade de 10,0 cm teve um rápido crescimento no intervalo de 0 a 60 minutos após o início da irrigação, tendo a umidade chegado aproximadamente à $0,23 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$, umidade situada no intervalo correspondente à porosidade drenável. Após o final da irrigação a umidade começou a decrescer até que aos 120 minutos ela retornou à faixa de umidade de água disponível do solo.

Observa-se, através da curva correspondente à profundidade de 60,0 cm, que a água percorreu todo perfil do solo num tempo de aproximadamente 53 minutos, após o início da irrigação, quando foi percebida a variação de umidade nessa profundidade, com a frente de umidade atingindo uma velocidade de deslocamento de aproximadamente $68,1 \text{ cm h}^{-1}$. A umidade continuou aumentando até que, aproximadamente, aos 72 minutos superou o valor da capacidade campo, iniciando um processo de percolação profunda e permaneceu nesta condição até aos 390 minutos, retornando em seguida aos níveis de umidade correspondente ao de água disponível do solo.

Observa-se na figura 20, referente à irrigação sem intermitência e com emissores de vazão de $12,00 \text{ L h}^{-1}$, que a curva de umidade correspondente à profundidade de 10,0 cm teve um rápido crescimento no intervalo de 0 a 30 minutos após o início da irrigação, quando então começou a reduzir tendendo para uma estabilização, quando a umidade chegou aproximadamente a $0,19 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$, umidade situada no intervalo correspondente à porosidade drenável. Após o final da irrigação a umidade começou a decrescer até que aos 90 minutos ela retornou à faixa de umidade de água disponível do solo.

Observa-se, através da curva correspondente à profundidade de 60,0 cm, que a água percorreu todo perfil do solo num tempo de aproximadamente 104 minutos, após o início da irrigação, quando foi percebida a variação de umidade nessa profundidade, com a frente de umidade atingindo uma velocidade de deslocamento de aproximadamente $34,7 \text{ cm h}^{-1}$. A umidade continuou aumentando até que, aproximadamente, aos 72 minutos superou o valor da capacidade campo, iniciando um processo de percolação profunda e permaneceu nesta condição até aos 390 minutos, retornando em seguida aos níveis de umidade correspondente ao de água disponível do solo.

Irrigação com uma intermitência

Na irrigação com uma intermitência, existem dois ciclos de irrigação e um de repouso.

Observa-se nas figuras 21 a 24 as curvas de capacidade campo, ponto de murcha e de variação da umidade no perfil do solo, nas profundidades de 10,0 a 60,0 cm, referentes à irrigação realizada com emissores de vazão de 2,00; 4,00; 8,00 e 12,00 L h^{-1} , irrigando com uma intermitência. Nas curvas de umidade correspondentes às profundidades de 20,0 a 60,0 cm, observa-se que a variação de umidade sofreu um retardo em relação ao tempo de início de cada ciclo de irrigação; e este retardo é função da velocidade da frente de avanço da umidade e da profundidade.

Observa-se na figura 21, referente à irrigação com uma intermitência e com emissores de vazão de 2,00 L h^{-1} , que durante o primeiro ciclo de irrigação, a curva de umidade correspondente à profundidade de 10,0 cm teve um rápido crescimento no intervalo de 0 a 30 minutos, após o início da irrigação, quando então começou a reduzir tendendo para uma estabilização, sendo seguida pela curva de umidade correspondente à profundidade de 20,0 cm após um retardo de aproximadamente 15

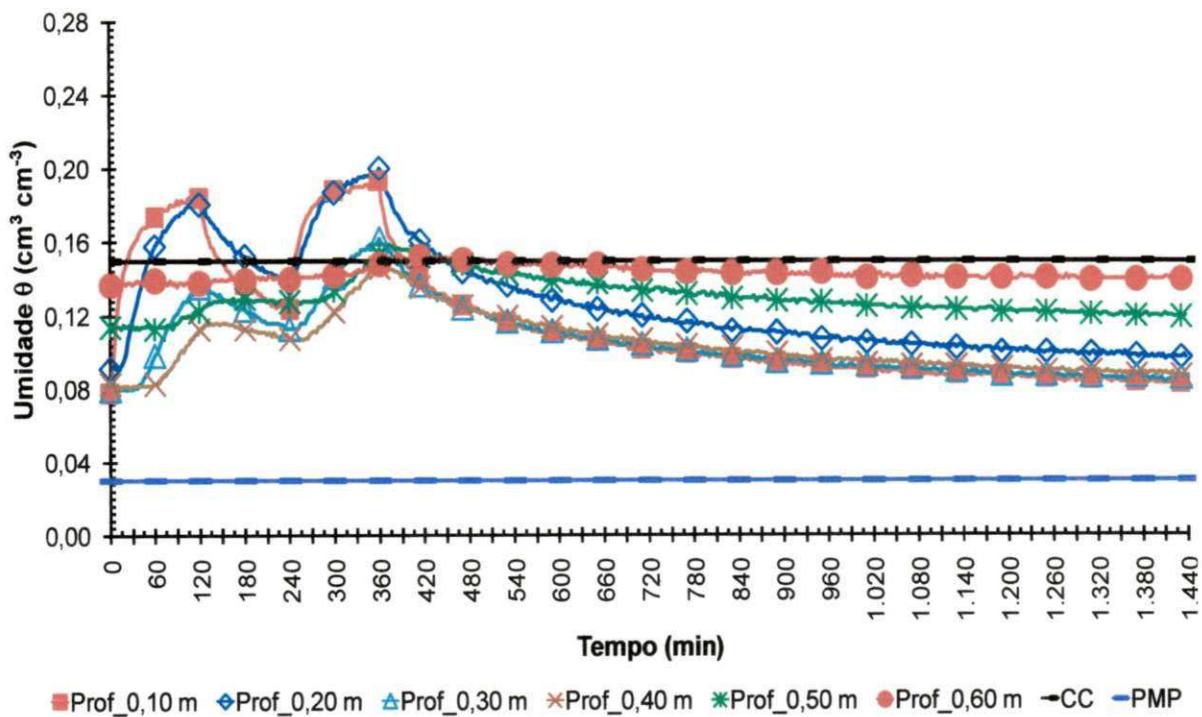


Figura 21 - Variação da umidade do solo sob irrigação com uma intermitência e emissor com vazão de $2,00 \text{ L h}^{-1}$.

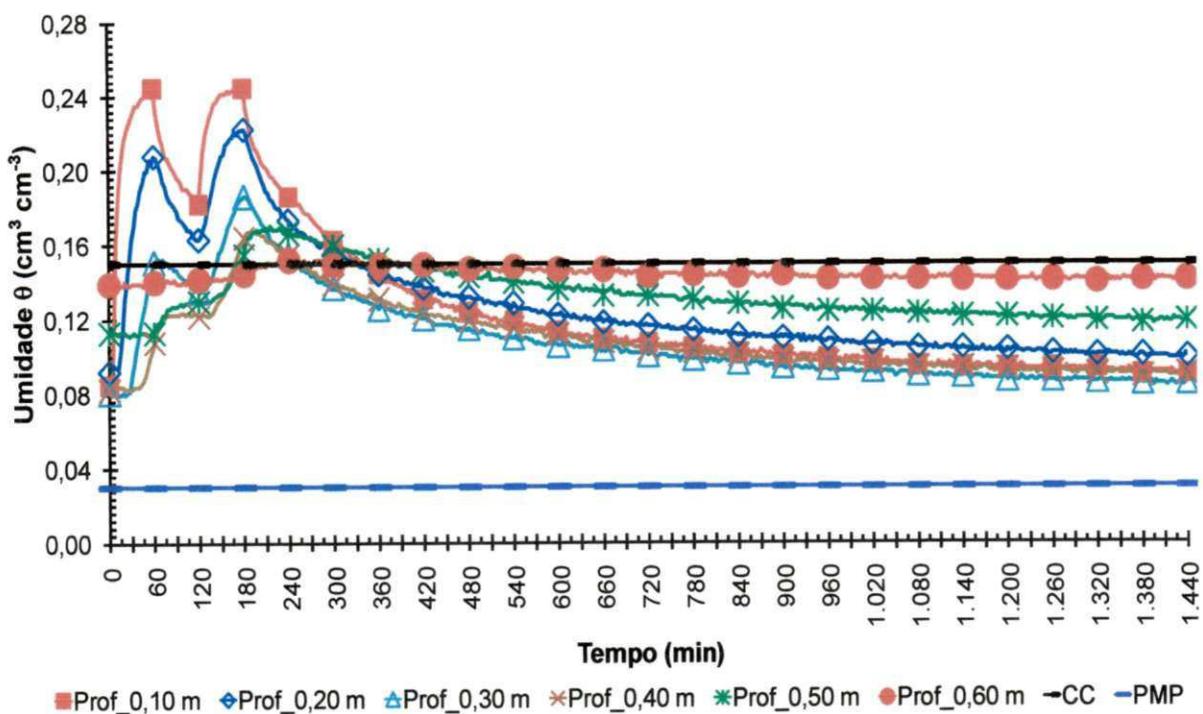


Figura 22 - Variação da umidade do solo sob irrigação com uma intermitência e emissor com vazão de $4,00 \text{ L h}^{-1}$.

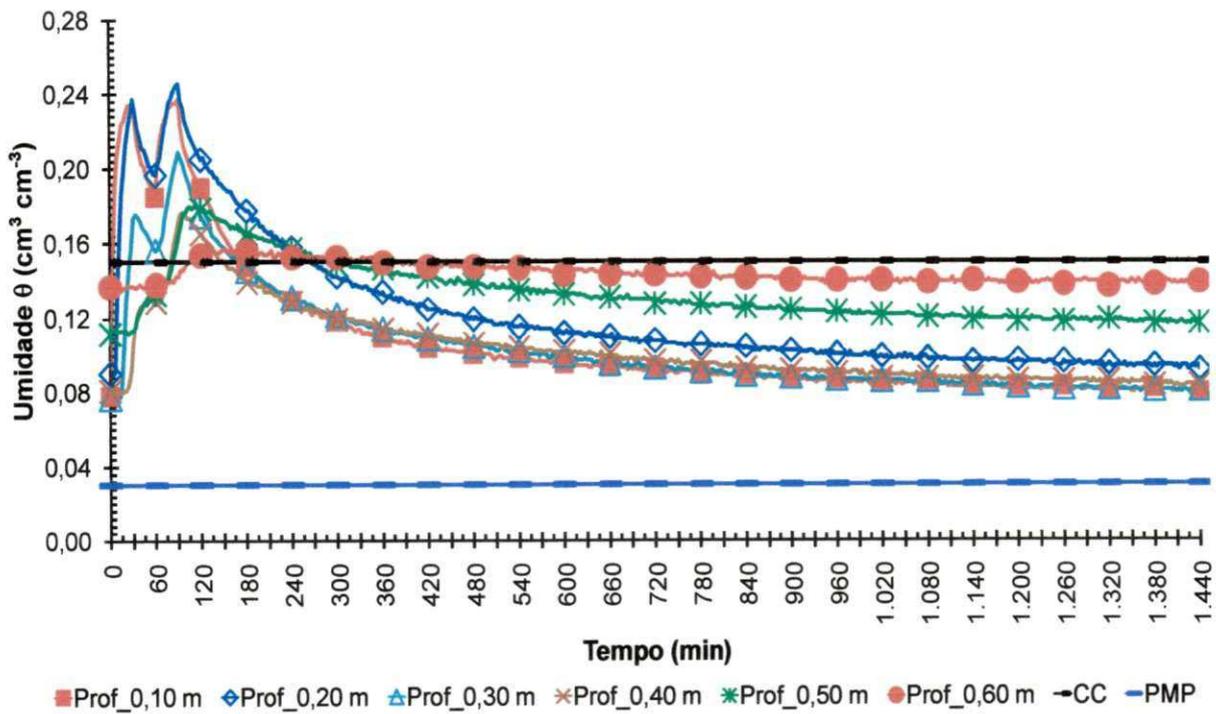


Figura 23 - Variação da umidade do solo sob irrigação com uma intermitência e emissor com vazão de 8,00 L h⁻¹.

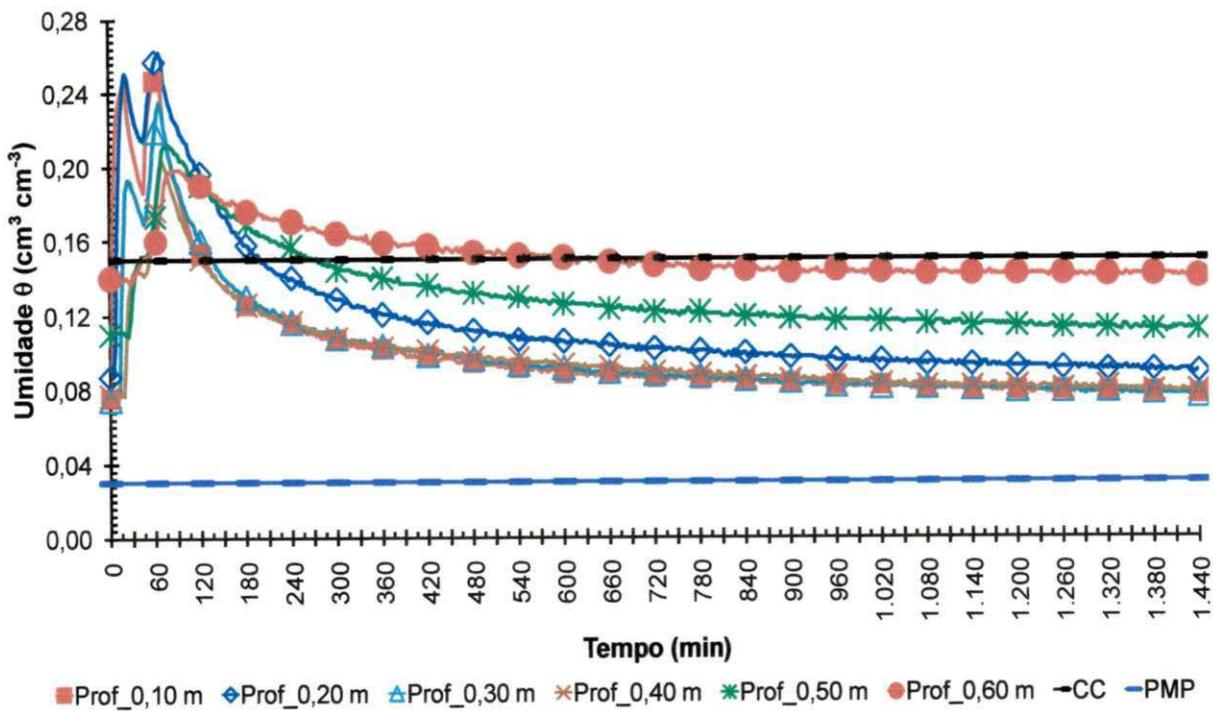


Figura 24 - Variação da umidade do solo sob irrigação com uma intermitência e emissor com vazão de 12,00 L h⁻¹.

minutos chegando ambas ao final do ciclo com a umidade de aproximadamente $0,183 \text{ cm}^3.\text{cm}^{-3}$, umidade situada no intervalo correspondente à porosidade drenável. As profundidades de 30,0 a 50,0 cm também sofreram variação na umidade, em menor intensidade, sem, no entanto ultrapassarem a umidade de capacidade de campo.

Observa-se, na curva correspondente à profundidade de 60,0 cm que a água percorreu todo perfil do solo num tempo de aproximadamente 143 minutos, após o início do primeiro ciclo de irrigação, quando foi percebida a variação de umidade nessa profundidade, com a frente de umidade atingindo uma velocidade de deslocamento de aproximadamente $25,1 \text{ cm h}^{-1}$. A umidade continuou aumentando até que, aproximadamente, aos 365 minutos superou o valor da capacidade campo, iniciando um processo de percolação profunda; e permaneceu nesta condição até aos 450 minutos, retornando em seguida aos níveis de umidade correspondentes ao de água disponível do solo.

No intervalo entre os ciclos de irrigação percebe-se a redução nos níveis de umidade das camadas de 10,0 a 50,0 cm, que vão decrescendo até que um novo ciclo seja iniciado. Como no início do novo ciclo, o solo se encontra com a umidade residual do ciclo anterior, percebe-se um aumento gradativo na umidade de todas as profundidades, que tendem a superar a umidade de capacidade de campo.

Observa-se que logo após o final da irrigação, a umidade nas profundidades de 10,0 a 50,0 cm começou a decrescer rapidamente, retornando aos níveis de umidade correspondentes ao de água disponível do solo, aos 450 minutos após o início da irrigação.

Observa-se na figura 22, referente à irrigação com uma intermitência e com emissores de vazão de $4,00 \text{ L h}^{-1}$, que durante o primeiro ciclo de irrigação a curva de umidade correspondente à profundidade de 10,0 cm teve um rápido crescimento no intervalo de 0 a 15 minutos após o início da irrigação, quando então começou a reduzir tendendo para uma estabilização, sendo seguida pela curva de umidade

correspondente à profundidade de 20,0 cm após um retardo de aproximadamente 15 minutos chegando ambas, ao final do ciclo, com a umidade de aproximadamente 0,244 e 0,210 $\text{cm}^3.\text{cm}^{-3}$ respectivamente. As profundidades de 30,0 a 50,0 cm também sofreram variação na umidade, em menor intensidade, tendo somente a 30,0 cm, ultrapassado a umidade de capacidade de campo.

Observa-se, na curva correspondente à profundidade de 60,0 cm que a água percorreu todo perfil do solo num tempo de aproximadamente 92 minutos, após o início do primeiro ciclo de irrigação, quando foi percebida a variação de umidade nessa profundidade, com a frente de umidade atingindo uma velocidade de deslocamento de aproximadamente 39,2 cm h^{-1} . A umidade continuou aumentando até que, aproximadamente, aos 240 minutos superou o valor da capacidade campo, iniciando um processo de percolação profunda e permaneceu nesta condição até aos 390 minutos, retornando em seguida aos níveis de umidade correspondente ao de água disponível do solo.

No intervalo entre os ciclos de irrigação percebe-se a redução nos níveis de umidade das profundidades de 10,0 a 50,0 cm, que vão decrescendo até que um novo ciclo seja iniciado. Como no início do novo ciclo o solo se encontra com a umidade residual do ciclo anterior, percebe-se um aumento gradativo na umidade de todas as profundidades, chegando a superar a umidade de capacidade de campo. Observa-se que logo após o final da irrigação, a umidade nas profundidades de 10,0 a 50,0 cm começaram a decrescer rapidamente, retornando aos níveis de umidade correspondentes ao de água disponível do solo, aos 390 minutos após o início da irrigação.

Observa-se na figura 23, referente a irrigação com uma intermitência e com emissores de vazão de 8,00 L h^{-1} , que durante o primeiro ciclo de irrigação a curva de umidade correspondente à profundidade de 10,0 cm teve um rápido crescimento no intervalo de 0 a 30 minutos após o início da irrigação, sendo seguida pela curva de umidade correspondente à profundidade de 20,0 cm após um retardo de

aproximadamente 5 minutos chegando ambas, ao final do ciclo, com a umidade de aproximadamente $0,237 \text{ cm}^3.\text{cm}^{-3}$, umidade situada no intervalo correspondente à porosidade drenável. As profundidades de 30,0 a 50,0 cm também sofreram variação na umidade, em menor intensidade, tendo todas elas, ultrapassado a umidade de capacidade de campo.

No intervalo entre os ciclos de irrigação percebe-se a redução nos níveis de umidade das profundidades de 10,0 a 50,0 cm, que vão decrescendo até que um novo ciclo seja iniciado. Como no início do novo ciclo, o solo se encontra com a umidade residual do ciclo anterior, percebe-se um aumento gradativo na umidade de todas as profundidades, chegando a superar a umidade de capacidade de campo.

Observa-se que logo após o final da irrigação, a umidade nas profundidades de 10,0 a 50,0 cm começa a decrescer rapidamente, retornando aos níveis de umidade correspondente ao de água disponível do solo aos 270 minutos após o início da irrigação.

Observa-se na curva correspondente à profundidade de 60,0 cm que a água percorreu todo perfil do solo num tempo de aproximadamente 58 minutos, após o início do primeiro ciclo de irrigação, quando foi percebida a variação de umidade nessa profundidade, com a frente de umidade atingindo uma velocidade de deslocamento de aproximadamente $62,3 \text{ cm h}^{-1}$. A umidade continuou aumentando até que, aproximadamente, aos 105 minutos superou o valor da capacidade campo, iniciando um processo de percolação profunda; e permaneceu nesta condição até aos 330 minutos, retornando em seguida aos níveis de umidade correspondentes ao de água disponível do solo.

Observa-se na figura 24, referente à irrigação com uma intermitência e com emissores de vazão de $12,00 \text{ L h}^{-1}$ que, durante o primeiro ciclo de irrigação, a curva de umidade correspondente à profundidade de 10,0 cm teve um rápido crescimento no intervalo de 0 a 20 minutos. após o início da irrigação, sendo seguida pela curva de umidade correspondente à profundidade de 20,0 cm, chegando ambas, ao final

do ciclo, com a umidade de aproximadamente $0,250 \text{ cm}^3.\text{cm}^{-3}$, umidade situada no intervalo correspondente à porosidade drenável. As profundidades de 30,0 a 50,0 cm também sofreram variação na umidade, em menor intensidade, tendo somente a de 30,0 cm, ultrapassado a umidade de capacidade de campo.

No intervalo entre os ciclos de irrigação, percebe-se a redução nos níveis de umidade das profundidades de 10,0 a 40,0 cm, que vão decrescendo até que um novo ciclo seja iniciado. Como no início do novo ciclo o solo se encontra com a umidade residual do ciclo anterior, percebe-se um aumento gradativo na umidade de todas as profundidades, tendendo para a saturação.

Observa-se que logo após o final da irrigação, a umidade nas profundidades de 10,0 a 30,0 cm começa a decrescer rapidamente, e aproximadamente 15 minutos após, as profundidades de 40,0 a 60,0 cm, retornando todas aos níveis de umidade correspondente ao de água disponível do solo aos 570 minutos após o início da irrigação.

Observa-se, na curva correspondente à profundidade de 60,0 cm que a água percorreu todo perfil do solo num tempo de aproximadamente 40 minutos, após o início do primeiro ciclo de irrigação, quando foi percebida a variação de umidade nessa profundidade, com a frente de umidade atingindo uma velocidade de deslocamento de aproximadamente $89,8 \text{ cm h}^{-1}$. A umidade continuou aumentando até que, aproximadamente, aos 50 minutos superou o valor da capacidade campo, iniciando um processo de percolação profunda; e permaneceu nesta condição até aos 570 minutos, retornando em seguida aos níveis de umidade correspondentes ao de água disponível do solo.

Irrigação com duas intermitências.

Na irrigação com duas intermitências, existem três ciclos de irrigação e dois de repouso.

Observa-se nas figuras 25 a 28, as curvas de capacidade campo, ponto de

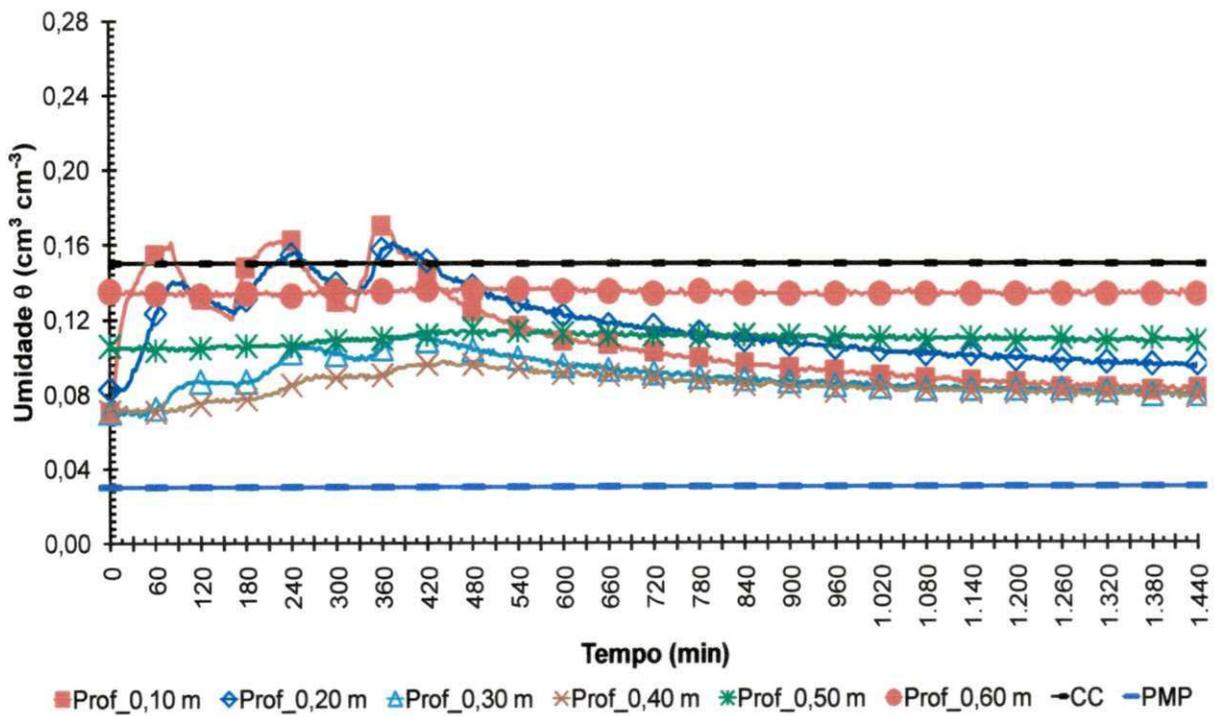


Figura 25 - Variação da umidade do solo sob irrigação com duas intermitências e emissor com vazão de $2,00 \text{ L h}^{-1}$.

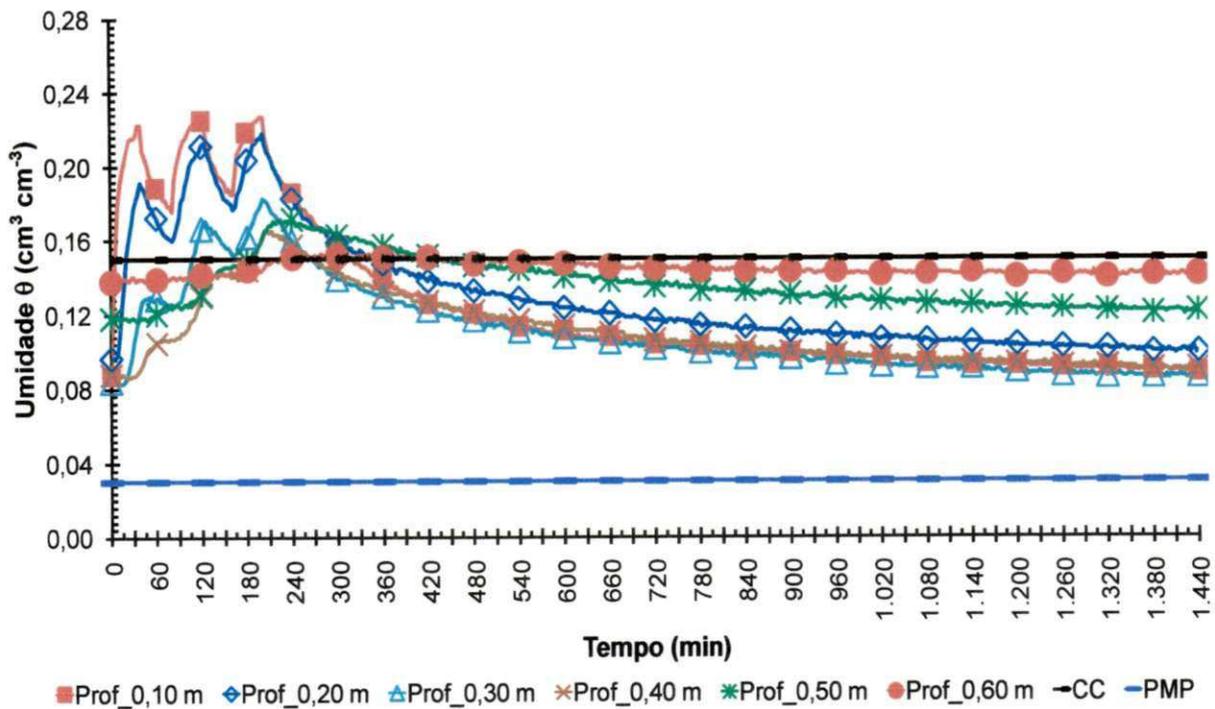


Figura 26 - Variação da umidade do solo sob irrigação com duas intermitências e emissor com vazão de $4,00 \text{ L h}^{-1}$.

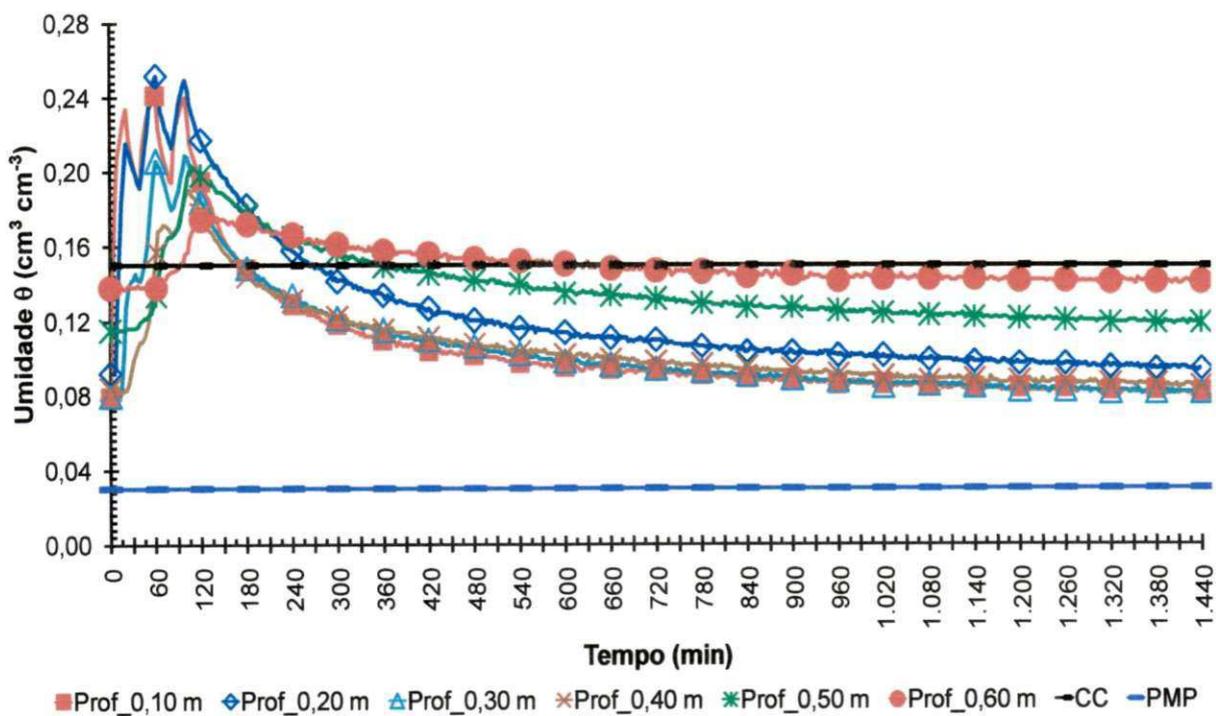


Figura 27 - Variação da umidade do solo sob irrigação com duas intermitências e emissor com vazão de 8,00 L h⁻¹.

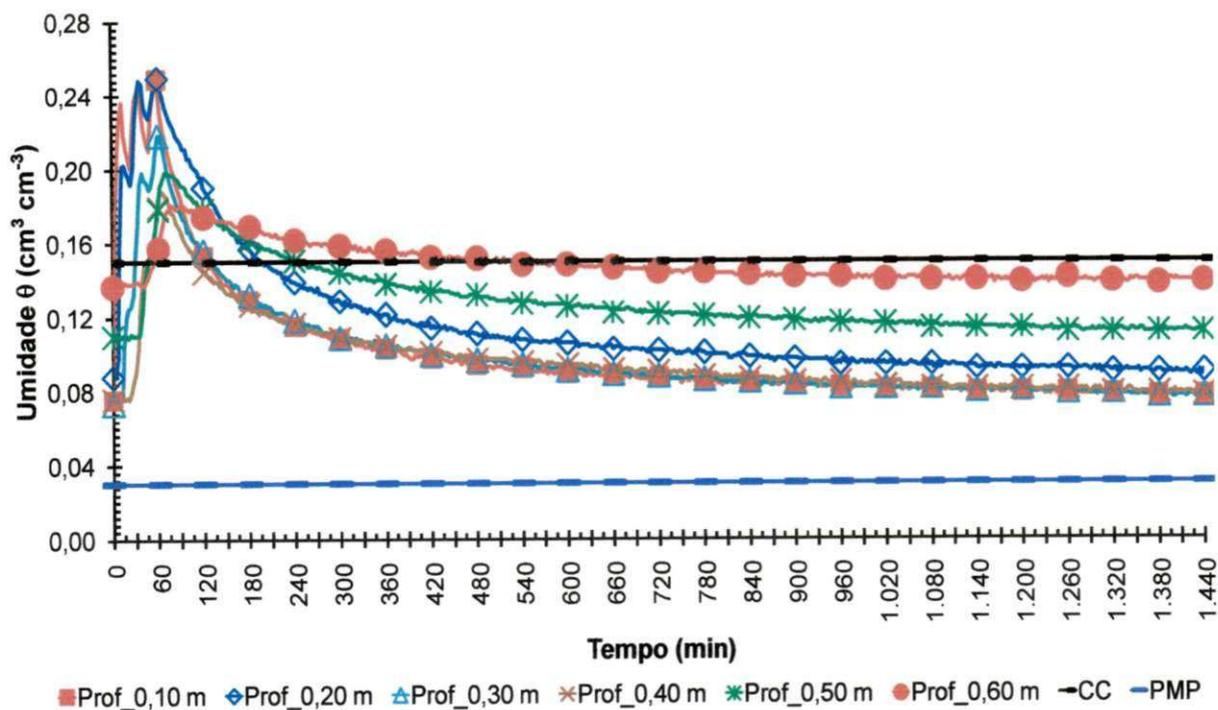


Figura 28 - Variação da umidade do solo sob irrigação com duas intermitências e emissor com vazão de 12,00 L h⁻¹.

murcha e de variação da umidade no perfil do solo, nas profundidades de 10,0 a 60,0 cm, referentes à irrigação realizada com emissores de vazão de 2,00; 4,00; 8,00 e 12,00 L h⁻¹, irrigando com duas intermitências. Nas curvas de umidade correspondentes às profundidades de 20,0 a 60,0 cm, observa-se que a variação de umidade sofreu um retardo em relação ao tempo de início de cada ciclo de irrigação; e este retardo é função da velocidade da frente de avanço da umidade e da profundidade.

Observa-se na figura 25, referente à irrigação com duas intermitências e com emissores de vazão de 2,00 L h⁻¹, que, durante o primeiro ciclo de irrigação, a curva de umidade correspondente à profundidade de 10,0 cm teve um rápido crescimento no intervalo de 0 a 80 minutos, após o início da irrigação, chegando ao final do ciclo, com a umidade de aproximadamente 0,160 cm³ cm⁻³, umidade situada no intervalo correspondente à porosidade drenável. As profundidades de 20,0 a 50,0 cm também sofreram variação na umidade, em menor intensidade, sem, no entanto ultrapassarem a umidade de capacidade de campo.

Nos demais ciclos, percebem-se, nas profundidades de 10,0 e 20,0 cm, um comportamento da umidade semelhante ao do primeiro ciclo e no intervalo entre eles, uma redução nos níveis de umidade das profundidades de 10,0 a 20,0 cm, que vão decrescendo até que um novo ciclo seja iniciado.

Como no início do novo ciclo, o solo se encontra com a umidade residual do ciclo anterior, percebe-se um aumento gradativo da umidade nas profundidades de 30,0 a 50,0 cm, que tende a superar a umidade de capacidade de campo.

Observa-se que, logo após o final da irrigação, a umidade nas profundidades de 10,0 a 20,0 cm começou a decrescer rapidamente, retornando todas aos níveis de umidade correspondentes ao de água disponível do solo, aos 420 minutos após o início da irrigação. Nas profundidades de 30,0 e 40,0 cm, a umidade continuou aumentando até, que respectivamente, aos 420 e 430 minutos, após o início da

irrigação, começou a decrescer, tendendo para os níveis de umidade anterior ao do início da irrigação. Na profundidade de 50,0 cm, a umidade continuou aumentando até aos 600 minutos após o início da irrigação, decrescendo em seguida, sem, no entanto superar a umidade de capacidade de campo.

Observa-se, na curva correspondente à profundidade de 60,0 cm que a água percorreu todo perfil do solo num tempo de aproximadamente 157 minutos, após o início do primeiro ciclo de irrigação, quando foi percebida uma discreta variação de umidade nessa profundidade, com a frente de umidade atingindo uma velocidade de deslocamento de aproximadamente 23,0 cm h⁻¹. A umidade, após a variação, permaneceu constante e sem superar o valor da capacidade campo, até o início de um novo evento de irrigação.

Observa-se na figura 26, referente à irrigação com duas intermitências e com emissores de vazão de 4,00 L h⁻¹, que durante o primeiro ciclo de irrigação a curva de umidade correspondente à profundidade de 10,0 cm teve um rápido crescimento no intervalo de 0 a 40 minutos, após o início da irrigação, sendo seguida pela curva de umidade correspondente à profundidade de 20,0 cm, após um retardo de aproximadamente 15 minutos, chegando ambas, respectivamente, ao final do ciclo com a umidade de aproximadamente 0,22 e 0,19 cm³ cm⁻³, umidade situada no intervalo correspondente à porosidade drenável. As profundidades de 30,0 a 50,0 cm também sofreram variação na umidade, em menor intensidade, sem, no entanto, ultrapassarem a umidade de capacidade de campo.

Nos demais ciclos, percebem-se, nas profundidades de 10,0 e 20,0 cm, um comportamento da umidade semelhante ao do primeiro ciclo; e no intervalo entre eles, uma redução nos níveis de umidade das profundidades de 10,0 a 20,0 cm que vão decrescendo até que um novo ciclo seja iniciado.

Como no início de cada novo ciclo o solo se encontra com a umidade residual do ciclo anterior, percebe-se um aumento gradativo da umidade nas profundidades de 30,0 a 50,0 cm, até superar a umidade de capacidade de campo.

Observa-se que logo após o final da irrigação, a umidade nas profundidades de 10,0 a 40,0 cm começou a decrescer rapidamente, retornando todas aos níveis de umidade correspondente ao de água disponível do solo aos 420 minutos, após o início da irrigação. Na profundidade de 50,0 cm, a umidade continuou aumentando até que, aproximadamente, aos 225 minutos, após o início da irrigação, começou a decrescer, retornando aos níveis de umidade correspondentes à umidade da água disponível no solo, aos 420 minutos.

Observa-se na curva correspondente à profundidade de 60,0 cm, que a água percorreu todo perfil do solo num tempo de aproximadamente 92 minutos após o início do primeiro ciclo de irrigação, quando foi percebida uma discreta variação de umidade nessa profundidade, com a frente de umidade atingindo uma velocidade de deslocamento de aproximadamente $39,2 \text{ cm h}^{-1}$. A umidade continuou aumentando até que, aproximadamente, aos 210 minutos superou o valor da capacidade campo, iniciando um processo de percolação profunda e permaneceu nesta condição até aos 420 minutos, retornando em seguida aos níveis de umidade correspondentes ao de água disponível do solo.

Observa-se na figura 27, referente à irrigação com duas intermitências e com emissores de vazão de $8,00 \text{ L h}^{-1}$, que durante o primeiro ciclo de irrigação a curva de umidade correspondente à profundidade de 10,0 cm teve um rápido crescimento no intervalo de 0 a 20 minutos, após o início da irrigação, sendo seguida pela curva de umidade correspondente à profundidade de 20,0 cm, após um retardo de aproximadamente 10 minutos, chegando ambas, respectivamente, ao final do ciclo com a umidade de aproximadamente $0,23$ e $0,21 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$, umidade situada no intervalo correspondente à porosidade drenável. As profundidades de 30,0 a 50,0 cm também sofreram variação na umidade, em menor intensidade, sem, no entanto, ultrapassarem a umidade de capacidade de campo.

Nos demais ciclos, percebem-se nas profundidades de 10,0 e 20,0 cm, um comportamento da umidade semelhante ao do primeiro ciclo e no intervalo entre

eles, uma redução nos níveis de umidade das profundidades de 10,0 a 20,0 cm que vão decrescendo até que um novo ciclo seja iniciado.

Como no início de cada novo ciclo o solo se encontra com a umidade residual do ciclo anterior, percebe-se um aumento gradativo da umidade das profundidades de 30,0 a 50,0 cm, até superar a umidade de capacidade de campo.

Observa-se que logo após o final da irrigação a umidade nas profundidades de 10,0 a 50,0 cm começou a decrescer rapidamente, retornando, todas, aos níveis de umidade correspondentes ao de água disponível do solo, aos 360 minutos após o início da irrigação.

Observa-se na curva correspondente à profundidade de 60,0 cm que a água percorreu todo perfil do solo num tempo de aproximadamente 60 minutos, após o início do primeiro ciclo de irrigação, quando foi percebida uma variação de umidade nessa profundidade, com a frente de umidade atingindo uma velocidade de deslocamento de aproximadamente $60,0 \text{ cm h}^{-1}$. A umidade continuou aumentando até que, aproximadamente, aos 90 minutos superou o valor da capacidade campo, iniciando um processo de percolação profunda e permaneceu nesta condição até aos 660 minutos, retornando em seguida aos níveis de umidade correspondente ao de água disponível do solo.

Observa-se na figura 28, referente à irrigação com duas intermitências e com emissores de vazão de $12,00 \text{ L h}^{-1}$, que durante o primeiro ciclo de irrigação a curva de umidade correspondente à profundidade de 10,0 e 20,0 cm teve um rápido crescimento no intervalo de 0 a 12 minutos, após o início da irrigação, chegando ambas, respectivamente, ao final do ciclo com a umidade de aproximadamente 0,23 e $0,20 \text{ cm}^3.\text{cm}^{-3}$, umidade situada no intervalo correspondente à porosidade drenável. As profundidades de 30,0 a 50,0 cm também sofreram variação na umidade, em menor intensidade, sem, no entanto ultrapassarem a umidade de capacidade de campo.

Nos demais ciclos percebem-se, nas profundidades de 10,0 e 20,0 cm, um comportamento da umidade semelhante ao do primeiro ciclo e no intervalo entre eles, uma redução nos níveis de umidade das profundidades de 10,0 a 20,0 cm que vão decrescendo até que um novo ciclo seja iniciado. Como no início de cada novo ciclo, o solo se encontra com a umidade residual do ciclo anterior, percebe-se um aumento gradativo da umidade das profundidades de 30,0 a 50,0 cm, superado a umidade de capacidade de campo.

Observa-se que, logo após o final da irrigação, a umidade nas profundidades de 10,0 a 50,0 cm começou a decrescer rapidamente, retornando todas aos níveis de umidade correspondente ao de água disponível do solo aos 240 minutos após o início da irrigação.

Observa-se na curva correspondente à profundidade de 60,0 cm, que a água percorreu todo perfil do solo num tempo de aproximadamente 46 minutos após o início do primeiro ciclo de irrigação, quando foi percebida uma variação de umidade nessa profundidade, com a frente de umidade atingindo uma velocidade de deslocamento de aproximadamente $77,5 \text{ cm h}^{-1}$. A umidade continuou aumentando até que, aproximadamente, aos 60 minutos superou o valor da capacidade campo, iniciando um processo de percolação profunda e permaneceu nesta condição até aos 600 minutos, retornando em seguida aos níveis de umidade correspondentes ao de água disponível do solo.

Irrigação com três intermitências.

Na irrigação com três intermitências existem quatro ciclos de irrigação e três de repouso.

Observa-se nas figuras 29 a 32, as curvas de capacidade campo, ponto de murcha e de variação da umidade no perfil do solo, nas profundidades de 10,0 a 60,0 cm, referentes à irrigação realizada com emissores de vazão de 2,00; 4,00;

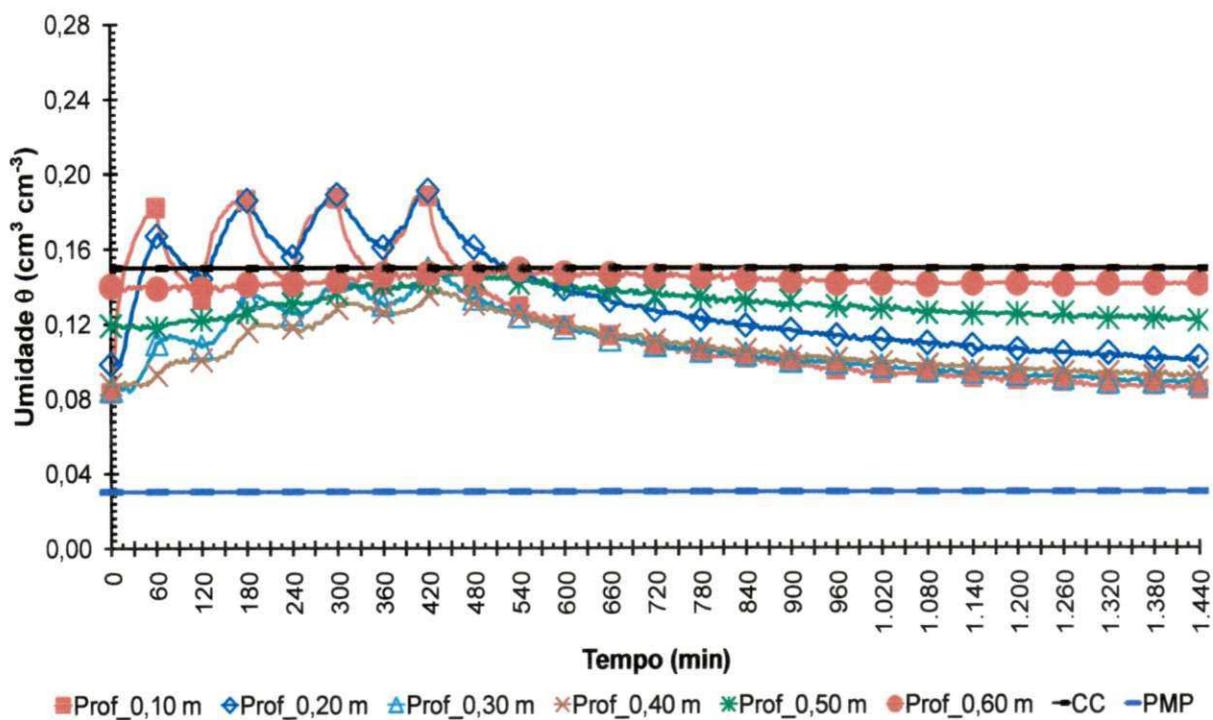


Figura 29 - Variação da umidade do solo sob irrigação com três intermitências e emissor com vazão de $2,00 \text{ L h}^{-1}$.

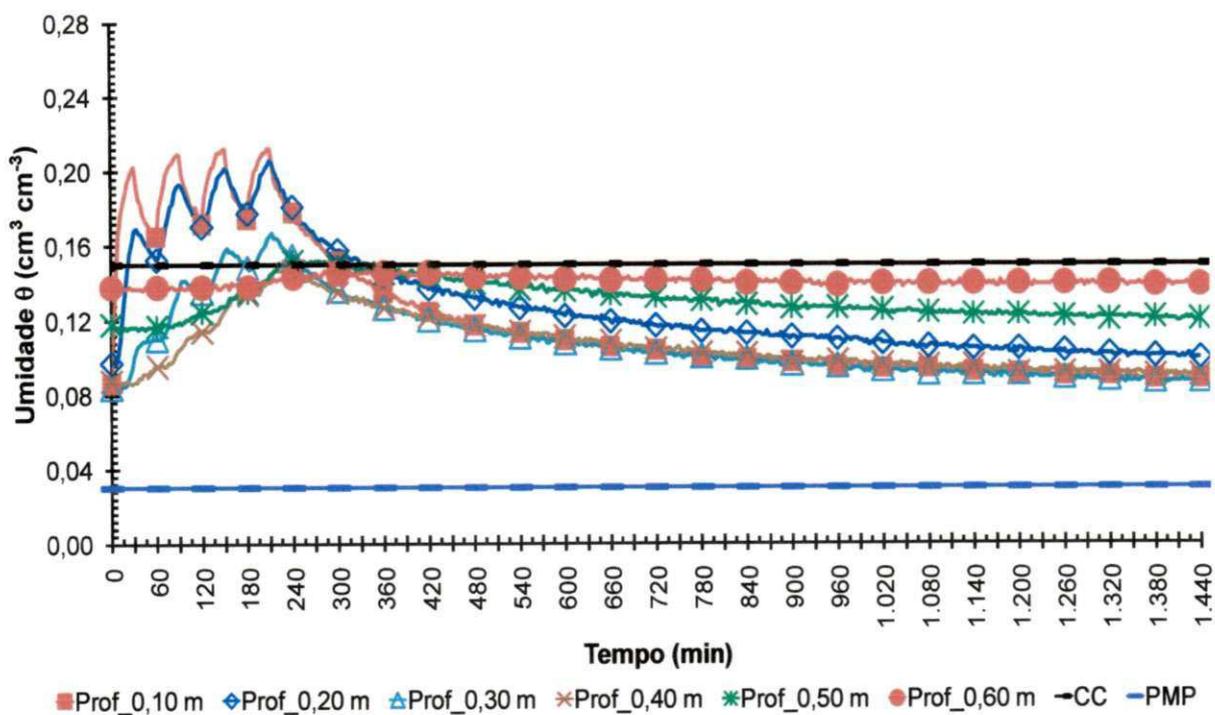


Figura 30 - Variação da umidade do solo sob irrigação com três intermitências e emissor com vazão de $4,00 \text{ L h}^{-1}$.

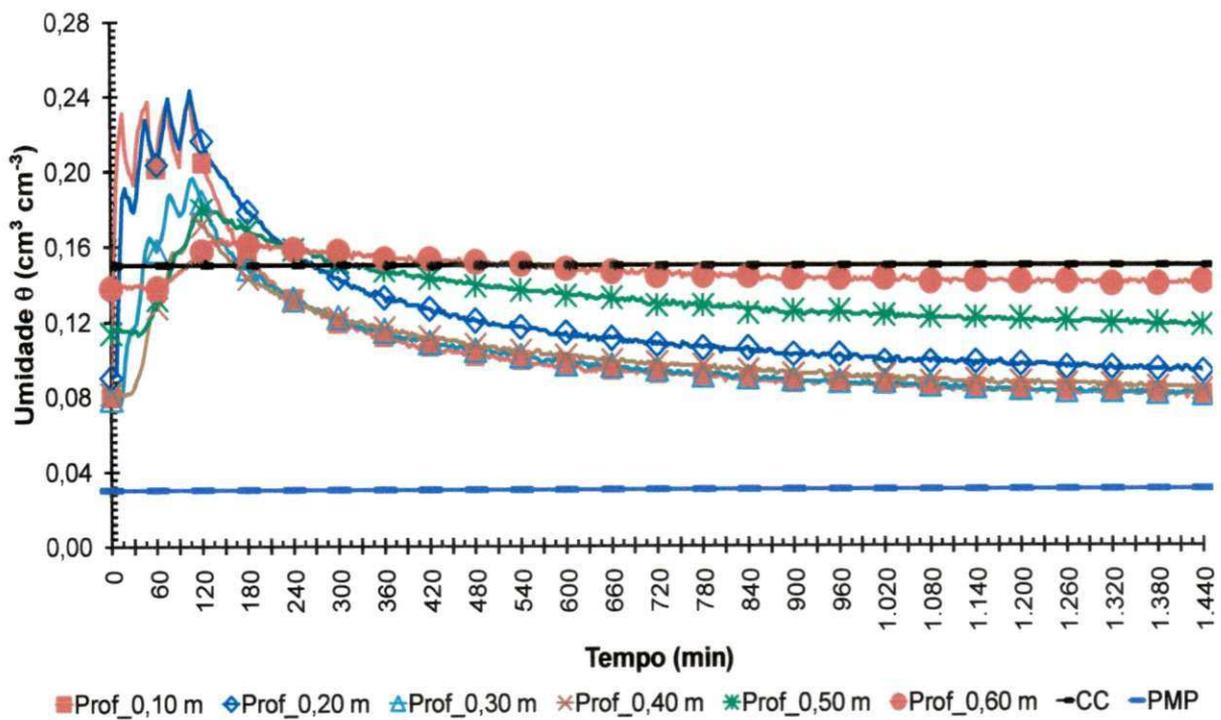


Figura 31 - Variação da umidade do solo sob irrigação com três intermitências; e emissor com vazão de 8,00 L h⁻¹.

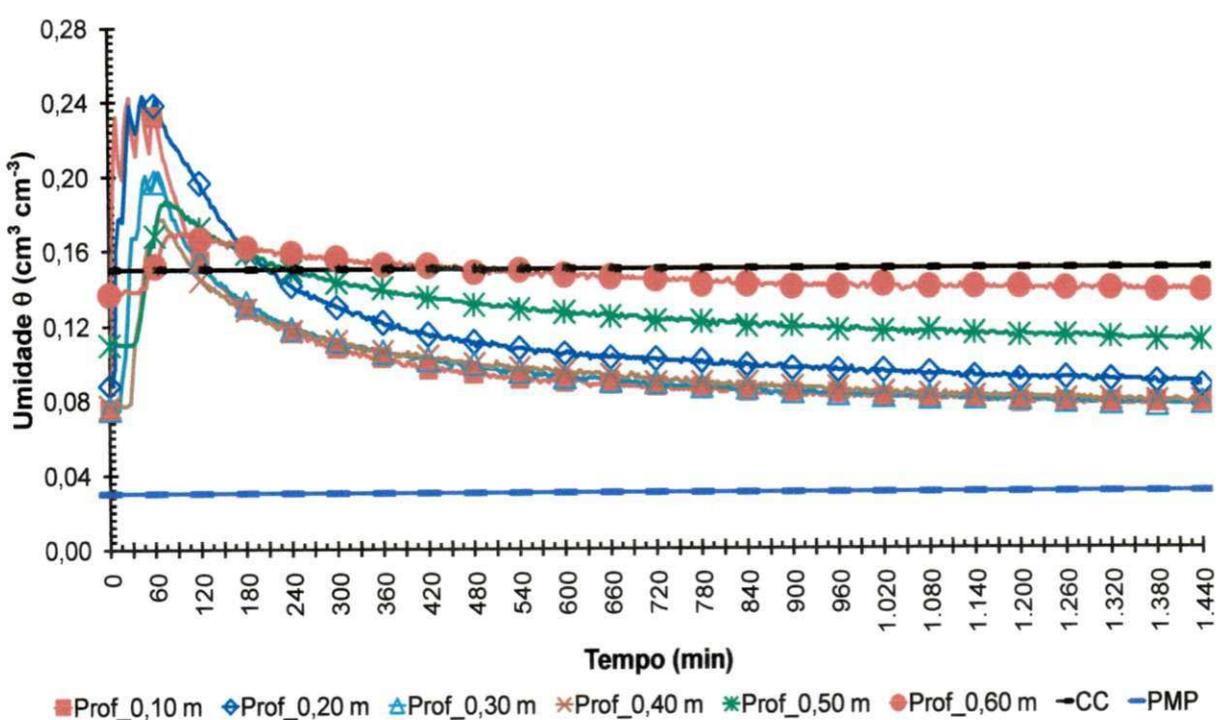


Figura 32 - Variação da umidade do solo sob irrigação com três intermitências e emissor com vazão de 12,00 L h⁻¹.

8,00 e 12,00 L h⁻¹, irrigando com três intermitências. Nas curvas de umidade correspondentes às profundidades de 20,0 a 60,0 cm, observa-se que a variação de umidade sofreu um retardo em relação ao tempo de início de cada ciclo de irrigação; e este retardo é função da velocidade da frente de avanço da umidade e da profundidade.

Observa-se na figura 29, referente a irrigação com três intermitências e com emissores de vazão de 2,00 L h⁻¹, que durante o primeiro ciclo de irrigação a curva de umidade correspondente à profundidade de 10,0 cm teve um rápido crescimento no intervalo de 0 a 60 minutos após o início da irrigação, sendo seguida pela curva de umidade correspondente à profundidade de 20,0 cm, após um retardo de aproximadamente 15 minutos, chegando ambas, respectivamente, ao final do ciclo com a umidade de aproximadamente 0,18 e 0,17 cm³ cm⁻³, umidade situada no intervalo correspondente à porosidade drenável. As profundidades de 30,0 a 50,0 cm também sofreram variação na umidade, em menor intensidade, sem, no entanto ultrapassarem a umidade de capacidade de campo.

Nos demais ciclos percebem-se nas profundidades de 10,0 e 20,0 cm, um comportamento da umidade semelhante ao do primeiro ciclo; e no intervalo entre eles, uma redução nos níveis de umidade das profundidades de 10,0 a 20,0 cm que vão decrescendo até que um novo ciclo seja iniciado.

Como no início do novo ciclo o solo se encontra com a umidade residual do ciclo anterior, percebe-se um aumento gradativo da umidade das profundidades de 30,0 a 50,0 cm, sem, no entanto ultrapassar a umidade de capacidade de campo.

Observa-se que, logo após o final da irrigação, a umidade nas profundidades de 10,0 a 20,0 cm começou a decrescer rapidamente, retornando todas aos níveis de umidade correspondente ao de água disponível do solo aos 540 minutos após o início da irrigação. Nas profundidades de 30,0 e 40,0 cm, a umidade continuou aumentando até que aos 420 minutos, após o início da irrigação, começou a decrescer, tendendo para os níveis de umidade anterior ao do início da irrigação,

sem, no entanto superar a umidade de capacidade de campo. Na profundidade de 50,0 cm, a umidade continuou aumentando até aos 480 minutos, após o início da irrigação, decrescendo em seguida, sem, no entanto, superar a umidade de capacidade de campo.

Observa-se, na curva correspondente à profundidade de 60,0 cm que a água percorreu todo perfil do solo num tempo de aproximadamente 127 minutos após o início do primeiro ciclo de irrigação, quando foi percebida uma discreta variação de umidade nessa profundidade, com a frente de umidade atingindo uma velocidade de deslocamento de aproximadamente $28,3 \text{ cm h}^{-1}$. A umidade continuou aumentando até, aproximadamente, aos 550 minutos, decrescendo em seguida, sem, no entanto, superar a umidade de capacidade de campo.

Observa-se na figura 30, referente a irrigação com três intermitências e com emissores de vazão de $4,00 \text{ L h}^{-1}$, que durante o primeiro ciclo de irrigação, a curva de umidade correspondente à profundidade de 10,0 cm teve um rápido crescimento no intervalo de 0 a 30 minutos, após o início da irrigação, sendo seguida pela curva de umidade correspondente à profundidade de 20,0 cm, após um retardo de aproximadamente 15 minutos, chegando ambas, respectivamente, ao final do ciclo com a umidade de aproximadamente $0,21$ e $0,17 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$, umidade situada no intervalo correspondente à porosidade drenável. As profundidades de 30,0 a 50,0 cm também sofreram variação na umidade, em menor intensidade, sem, no entanto, ultrapassarem a umidade de capacidade de campo.

Nos demais ciclos, percebem-se nas profundidades de 10,0 e 20,0 cm, um comportamento da umidade semelhante ao do primeiro ciclo; e no intervalo entre eles, uma redução nos níveis de umidade das profundidades de 10,0 a 20,0 cm que vão decrescendo até que um novo ciclo seja iniciado.

Como no início do novo ciclo o solo se encontra com a umidade residual do ciclo anterior, percebe-se um aumento gradativo da umidade das profundidades de 30,0 a 50,0 cm, tendo a umidade da profundidade de 30,0 cm, ultrapassado de

capacidade de campo à aproximadamente aos 135 minutos, do início da irrigação e continuou aumentando até aproximadamente aos 210 minutos, decrescendo em seguida, até que aos 240 minutos, retornou aos níveis de umidade correspondentes ao da água disponível.

Observa-se que, logo após o final da irrigação, a umidade nas profundidades de 10,0 a 20,0 cm começou a decrescer rapidamente, retornando todas aos níveis de umidade correspondentes ao de água disponível do solo, a aproximadamente aos 330 minutos após o início da irrigação. Nas profundidades de 40,0 e 50,0 cm, a umidade continuou aumentando até que aos 240 minutos, após o início da irrigação, decrescendo em seguida, tendendo para os níveis de umidade anterior ao do início da irrigação, sem, no entanto superar a umidade de capacidade de campo.

Observa-se, na curva correspondente à profundidade de 60,0 cm que a água percorreu todo perfil do solo num tempo de aproximadamente 91 minutos após o início do primeiro ciclo de irrigação, quando foi percebida uma discreta variação de umidade nessa profundidade, com a frente de umidade atingindo uma velocidade de deslocamento de aproximadamente $39,7 \text{ cm h}^{-1}$. A umidade continuou aumentando até, aproximadamente, aos 345 minutos, decrescendo em seguida, sem, no entanto, superar a umidade de capacidade de campo.

Observa-se na figura 31, referente à irrigação com três intermitências e com emissores de vazão de $8,00 \text{ L h}^{-1}$, que durante o primeiro ciclo de irrigação a curva de umidade correspondente à profundidade de 10,0 cm teve um rápido crescimento no intervalo de 0 a 15 minutos, após o início da irrigação, sendo seguida pela curva de umidade correspondente à profundidade de 20,0 cm após um retardo de aproximadamente 5 minutos chegando ambas, respectivamente, ao final do ciclo, com a umidade de aproximadamente $0,26$ e $0,18 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$, umidade situada no intervalo correspondente à porosidade drenável. As profundidades de 30,0 a 50,0 cm também sofreram variação na umidade, em menor intensidade, sem, no entanto, ultrapassarem a umidade de capacidade de campo.

Nos demais ciclos, percebem-se nas profundidades de 10,0 e 20,0 cm, um comportamento da umidade semelhante ao do primeiro ciclo e no intervalo entre eles, uma redução nos níveis de umidade que vão decrescendo até que um novo ciclo seja iniciado.

Como no início do novo ciclo o solo se encontra com a umidade residual do ciclo anterior, percebe-se um aumento gradativo da umidade das profundidades de 30,0 a 50,0 cm, tendo a umidade da profundidade de 30,0 cm, ultrapassado de capacidade de campo à aproximadamente aos 45 minutos, do início da irrigação; e continuou aumentando até aproximadamente aos 105 minutos, decrescendo em seguida, até que aos 180 minutos, retornou aos níveis de umidade correspondente ao da água disponível. A umidade nas profundidades de 40,0 e 50,0 cm ultrapassou, aos 75 minutos, após o início da irrigação, a umidade de capacidade de campo e continuou aumentando até aos 120 minutos, decrescendo em seguida, até que aos 180 minutos retornou aos níveis de umidade correspondentes ao da água disponível.

Observa-se que, logo após o final da irrigação, a umidade nas profundidades de 10,0 a 20,0 cm começou a decrescer rapidamente, retornando todas, respectivamente, aos níveis de umidade correspondente ao de água disponível do solo, a aproximadamente aos 180 e 270 minutos após o início da irrigação.

Observa-se, na curva correspondente à profundidade de 60,0 cm que a água percorreu todo perfil do solo num tempo de aproximadamente 58 minutos após o início do primeiro ciclo de irrigação, quando foi percebida uma variação de umidade nessa profundidade, com a frente de umidade atingindo uma velocidade de deslocamento de aproximadamente $62,6 \text{ cm h}^{-1}$. A umidade continuou aumentando até que, aproximadamente, aos 105 minutos superou o valor da capacidade campo, iniciando um processo de percolação profunda; e permaneceu nesta condição até aos 600 minutos, retornou aos níveis de umidade correspondentes ao da água disponível.

Observa-se na figura 32, referente à irrigação com três intermitências e com emissores de vazão de $12,00 \text{ L h}^{-1}$, que durante o primeiro ciclo de irrigação a curva de umidade correspondente à profundidade de 10,0 cm teve um crescimento instantâneo, após o início da irrigação, sendo seguida pela curva de umidade correspondente à profundidade de 20,0 cm chegando ambas, respectivamente, ao final do ciclo, com a umidade de aproximadamente $0,23$ e $0,18 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$, umidade situada no intervalo correspondente à porosidade drenável. As profundidades de 30,0 a 50,0 cm também sofreram variação na umidade, em menor intensidade, sem, no entanto ultrapassarem a umidade de capacidade de campo.

Nos demais ciclos percebem-se nas profundidades de 10,0 e 20,0 cm, um comportamento da umidade semelhante ao do primeiro ciclo; e no intervalo entre eles, uma redução nos níveis de umidade que vão decrescendo até que um novo ciclo seja iniciado.

Como no início do novo ciclo o solo se encontra com a umidade residual do ciclo anterior, percebe-se um aumento gradativo da umidade das profundidades de 30,0 a 50,0 cm, tendo a umidade da profundidade de 30,0 cm, ultrapassado a de capacidade de campo a aproximadamente aos 30 minutos, do início da irrigação; e continuou aumentando até aproximadamente aos 60 minutos, decrescendo em seguida, até que aos 120 minutos, retornou aos níveis de umidade correspondentes ao da água disponível. A umidade nas profundidades de 40,0 e 50,0 cm ultrapassou a umidade de capacidade de campo, aproximadamente aos 45 minutos, após o início da irrigação e continuaram aumentando, respectivamente, até aos 60 e 75 minutos, decrescendo em seguida, até que respectivamente, aos 120 e 240 minutos, retornaram aos níveis de umidade correspondente ao da água disponível.

Observa-se que, logo após finalizar a irrigação, a umidade nas profundidades de 10,0 a 20,0 cm começou a decrescer rapidamente, retornando todas, respectivamente, aos níveis de umidade correspondentes ao de água disponível do solo, a aproximadamente aos 120 e 180 minutos, após o início da irrigação.

Observa-se, na curva correspondente à profundidade de 60,0 cm que a água percorreu todo perfil do solo num tempo de aproximadamente 49 minutos, após o início do primeiro ciclo de irrigação, quando foi percebida uma variação de umidade nessa profundidade, com a frente de umidade atingindo uma velocidade de deslocamento de aproximadamente $73,6 \text{ cm h}^{-1}$. A umidade continuou aumentando até que, aproximadamente, aos 60 minutos superou o valor da capacidade campo, iniciando um processo de percolação profunda; e permaneceu nesta condição até aos 450 minutos, retornou aos níveis de umidade correspondentes ao da água disponível.

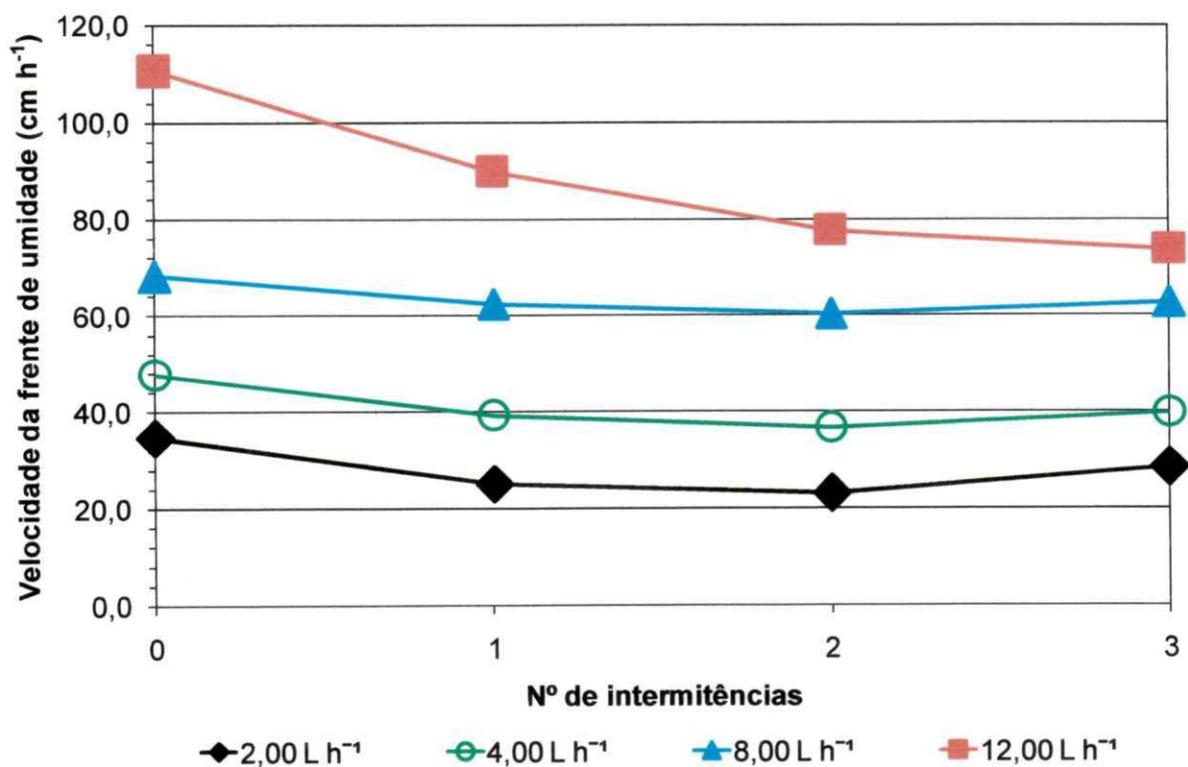


Figura 33 - Curvas da frente de umidade em função da vazões dos emissores e das intermitências de irrigação.

Observa-se na figura 33 as curvas referentes à variação da velocidade da frente de umidade no perfil de um solo neossolo Quartzarênico em função da vazão

e da intermitência. Nas irrigações realizadas com emissores de vazão de $2,0 \text{ L h}^{-1}$, observa-se em relação à intermitência, que a velocidade da frente de umidade, sofreu um decréscimo de 27,67; 33,72 e 18,44% entre as irrigações sem intermitência e as irrigações com uma, duas e três intermitências, respectivamente. Nas irrigações realizadas com emissores de vazão de $4,0 \text{ L h}^{-1}$, houve um decréscimo de 17,65; 23,11 e 16,60%; nas irrigações realizadas com emissores de vazão de $8,0 \text{ L h}^{-1}$, houve um decréscimo de 8,58; 11,31 e 8,08%; e nas irrigações realizadas com emissores de vazão de $12,0 \text{ L h}^{-1}$, houve um decréscimo de 18,73; 29,86 e 33,39%. Em relação à vazão, observa-se que a velocidade da frente de umidade nas irrigações realizadas sem intermitência, sofreu um decréscimo de 38,37; 56,92 e 68,60% entre as irrigações com emissores de $12,0 \text{ L h}^{-1}$ e as irrigações com emissores de 8,0; 4,0 e $2,0 \text{ L h}^{-1}$ respectivamente. Nas irrigações realizadas com uma intermitência, houve um decréscimo de 30,62; 56,35 e 72,05%, nas irrigações realizadas com duas intermitências, houve um decréscimo de 22,06; 55,77 e 70,32% e nas irrigações realizadas com três intermitências houve um decréscimo de 14,95; 46,06 e 61,55%.

Com base nos resultados, observa-se que as menores velocidades da frente de umidade ocorreram nas irrigações com duas intermitências e com emissores de $2,0$ e $4,0 \text{ L h}^{-1}$. A redução na velocidade da frente de umidade aumenta o tempo de permanência da água no perfil do solo, proporcionando um maior tempo de oportunidade para extração da água pela cultura, aumentando a eficiência de uso da água, e reduzindo as perdas por percolação profunda.

5 CONCLUSÕES

A redução na velocidade da frente de umidade com o uso da intermitência provoca um aumento no tempo de permanência da água no perfil do solo, proporcionando um maior tempo de oportunidade para extração da água pela cultura

Para o solo, Neossolos Quartzarênico, nas condições estudadas, a velocidade da frente de umidade é diretamente proporcional à vazão e inversamente proporcional ao número de intermitências.

Para o solo, Neossolos Quartzarênico, nas condições estudadas, a frente de umidade em irrigações realizadas sem o uso da intermitência, mesmo para emissores de baixa vazão, se desloca com maior velocidade no perfil solo, podendo provocar perdas de água por percolação profunda, durante as irrigações.

Para o solo, Neossolos Quartzarênico, nas condições estudadas, a irrigação com o emissor de 2 L.h^{-1} , e três intermitências foi a que apresentou melhor desempenho, apresentando uma menor variação da umidade na profundidade de 60,0 cm.

Para o solo, Neossolos Quartzarênico, nas condições estudadas, a irrigação com emissores de vazão maior que 4 L.h^{-1} , pode provocar grandes perdas por percolação profunda, mesmo com intermitência.

6 RECOMENDAÇÕES

Recomenda-se que outros trabalhos, na mesma linha de pesquisa, sejam realizados utilizando-se outros tipos de solos, com e sem cultivo, para se estudar a dinâmica da água no solo para subsidiar o manejo ideal de água, nas áreas irrigadas

7 BIBLIOGRAFIA

AMARAL, F. C. S. do (Ed.). **Sistema brasileiro de classificação de terras para irrigação: enfoque na Região Semi-Árida**. Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 2005. 218 p. Convênio Embrapa Solos / CODEVASF.

AMARAL, F. C. S. do; PARAHYBA, R. da B. V.; BATISTA, F. H. B.; LEITE, A. P.; BATISTA, M. de J.; BARROS, J. C. **Caracterização pedológica e estudos de drenabilidade dos perímetros de irrigação Brígida, Caraíbas e Apolônio Sales, Estado de Pernambuco**. EMBRAPA SOLOS, Rio de Janeiro, 2007.

ANA/GEF/PNUMA/OEA. **Projeto de Gerenciamento Integrado das Atividades Desenvolvidas em Terra na Bacia do São Francisco, Sub-projeto 4.5C – Plano Decenal de Recursos Hídricos da Bacia do Rio São Francisco – PBHSF (2004-2013)**: Disponibilidade hídrica quantitativa e usos consuntivos. Estudo Técnico de Apoio nº 16. Brasília: SUM/ANA, 2004. 13p.

ANA/GEF/PNUMA/OEA. **Projeto de Gerenciamento Integrado das Atividades Desenvolvidas em Terra na Bacia do São Francisco, Sub-projeto 4.5C – Plano Decenal de Recursos Hídricos da Bacia do Rio São Francisco – PBHSF (2004-2013)**: Alocação de água. Estudo Técnico de Apoio nº 16. Brasília: SUM/ANA, 2004. 53p.

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, 2009. v. 13, p. 376-381.

AZEVEDO, P.V.; RAMANA RAO, T.V.; AMORIM NETO, M.S.; PEREIRA, J.R.C.; ESPÍNOLA SOBRINHO, J. e MACIEL, G.F. **Necessidades hídricas da cultura do algodoeiro**: Brasília: Pesquisa Agropecuária Brasileira, 1993. v. 28. n.7, p.863-870.

BAKER, J. M.; ALLMARAS, R. R. **System for automating and multiplexing soil moisture measurement by time domain reflectometry**. Madison: Soil Science

Society of America Journal, 1990. v.54, p.1-6.

BEAR, J. **Hydraulics of groundwater**. New York: McGraw-Hill Book Company, 1979. 569p.

BRESLER, E. **Analysis of trickle irrigation with application to design problems**. New York: Irrigation Science, 1978. v.1. p.3-17.

BROOKS, R.H., COREY A.T. **Hydraulic properties of porous media**: Hydrology paper 3. Fort Collins: Colorado State University, 1964. 24p.

BUCKINGHAM, E. **Studies on the movement of soil moisture**, United State Department Agricultural Bureau: Soils Buletin, 1907. 38:1-61.

CAMPBELL, G.S. **A simple method for determining unsaturated conductivity from moisture retention data**. Soil Science, 1974. v.117, p. 311–314.

CECILIO, R. A. Aplicação da equação de Green-Ampt na modelagem da infiltração de água em Latossolo Vermelho-Amarelo estratificado. Viçosa, MG: Editora UFV, 2002 (Tese de Mestrado).

CODEVASF. **Projeto Massangano**: relatório n. 1, avaliação de solos. Recife, 1980. v.1 (Relatório técnico)

COSTA, S.N. DA. **Desenvolvimento de um modelo computacional para simular o transporte de água e solutos no solo sob condições de escoamento não-permanente na vertical**. Viçosa: UFV, 1998, 145p il., (Tese de Doutorado)

Dahan, O; Shani, Y; Enzel Y; Yechieli, Y; Yakirevich, A. **Direct measurements of floodwater infiltration into shallow alluvial aquifers**. J. Hydrol, 2007. 344:157–170.

DARCY, H. **Dètermination des lois d'écoulement de l'eau à travers le sable**. In Les Fontaines Publiques de la Ville de Dijon. Paris: Victor Dalmont, 1856. p.590–594.

DEXTER, A. R. Soil physical quality. Part I. **Theory, effects of soil texture, density, and organic matter, and effects on root growth**. Geoderma, 2004.v.120, p.201-214.

DOURADO NETO, D.; NIELSEN, D.R.; HOPMANS, J.W.; REICHARDT, K.; BACCHI, O.O.S.; LOPES, P.P. **Soil water retention curve**. SWRC, version 3.00. Piracicaba, 2001.

ELMALOGLU, S.; DIAMANTOPOULOS, E. **Wetting front advance patterns and water losses by deep percolation under the root zone as influenced by pulsed drip irrigation**. Athens: Agricultural Water Management, 2007. V-90, issues 1-2, p-

160-163.

ELMALOGLU, S.; MALAMOS N. **Estimation of the wetted soil volume depth, under a surface trickle line source, considering evaporation and water extraction by roots.** Irrigation and Drainage, 2005. 54: 417–430.

ELMALOGLU, S.; MALAMOS, N. **A methodology for determining the surface and vertical components of the wetting front under a surface point source, with root water-uptake and evaporation.** J. Irrigation and Drainage: 2005. 55 (1), 99–111.

EMBRAPA. Centro Nacional de Pesquisa de Solos. **Procedimentos normativos de levantamentos pedológicos.** Brasília, DF: Embrapa – Serviço de Produção de Informação, 1995. 101 p.

FAIN, G.B., PARIDON, K., HUDSON, P. **The effect of cyclic irrigation and herbicide on plant and weed growth in production of magnolia grandiflora 'alta'.** Mississippi: Southern Nursery Association Research Conference, 2004. V.49, p.37-39.

FAO. **Survey of the São Francisco River basin, Brazil; soil resources and land classification for irrigation.** Rome, 1966. v.2. p.1.

FILIZOLA, H.F.; SANS, L.M.A.; FERRACINI, V.L. **Parâmetros hídricos do solo como auxiliares na avaliação da poluição da água superficial e subsuperficial (CD).** In: CONGRESSO BRASILEIRO DE CIÊNCIA DO SOLO, 26., Rio de Janeiro, 1997. Anais...Rio de Janeiro: SBCS, 1997.

FREDLUND, D.G.; XING, A. **Equations for the soil – water characteristic curve.** Can. Geotech. J., 1994. 31. 521– 532.

FREEZE, R. A., CHERRY, J. A. **Groundwater, Prentice Hall, Inc., NJ, 1979. 604p.**

FREEZE, R.A. **Henry Darcy and the fountains of Dijon.** Dublin: Ground water, 1994. v.32, n.1, p.23-30.

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

GHEYI, H.R. **Modelo numérico para previsão de riscos de salinização em áreas irrigadas.** Campina Grande: UFPB. 1989. 72p. (Relatório Anual do Projeto PB-42. Convênio PDCT - CNPq/BID).

GRABLE, A. R. **Soil aeration and plant growth .** Advance Agronomy. V. 18, p. 57-106, 1966.

GREEN, W.H.; AMPT, G.A. **Studies on soil physics-1. The flow of air and water**

through soil. Cambridge: Journal of Agricultural Science, 1911, v.4, n.1, p. 1-24.

HALEVY, I; BOAZ, M.; ZOHAR, Y; SHANI, M.; DAN, H. **Trickle irrigation.** Rome: Irrigation and Drainage paper n° 14, FAO, 1973. p.75-119,

HEIMOVAARA, T. J.; BOUTEN, W. **A computer-controlled 36-channel time-domain reflectometry system for monitoring soil water contents.** Washington: Water Resource Research, 1990. v. 26, n.10, p. 2311-2316.

HERKELRATH, W. N.; HAMBURG, S. P.; MURPHY, F. **Automatic, real-time monitoring of soil moisture in a remote field area with time-domain reflectometry.** Washington: Water Resource Research, 1991, v. 27, p. 857-864.

HILLEL, D. **Fundamentals of soils physics.** New York: Academic press, 1980.

Hook, W.R.; Livingston, N.J.; Sun Z.J.; Hook P.B. **Remote diode shorting improves measurements of soil water by time domain reflectometry.** Madison: Soil Science Society of America Journal, 1992. v.56, p.1384-1391.

HUTSON, J. L.; CASS, A. **A retentivity function for use in soil-water simulation models.** Oxford: Journal of Soil Science, 1987. v.38, p.105–113.

JONES, A.J.; WAGENET, R.J. **In situ estimation of hydraulic conductivity using simplified methods.** Washington: Water Resources Research, 1984. v.20, n.11, p. 1620-1626.

JONG VAN LIER, Q.; LIBARDI, P.L. **Variabilidade dos parâmetros da relação entre condutividade hidráulica e umidade do solo determinada pelo método do perfil instantâneo.** Campinas: Revista Brasileira de Ciência do Solo, 1999. v.23, p.1005-1014.

JURY, W.A.; GARDNER, W.R.; GARDNER, W.H. **Soil physics.** New York: John Wiley and Sons. 1991.

Karam, N.S.; Niemiera, A.X. **Cyclic sprinkler irrigation and pre-irrigation substrate water content affect water and N leaching from containers.** J. Environ. Hort., 1994. 12:198-202.

KARMELI, D.; PERI, G. **Basic principles of pulse irrigation.** J. Irr. Drain. Div., 1974. IOO(IR3): 309-319, Sept.

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

KUKAL, S.S.; AGGARWAL, G.C. **Percolation losses of water in relation to puddling intensity and depth in a sandy loam rice (*Oryza sativa* L.) field.** Agric. Water Manage, 2002. V.57, p. 49–59.

KUKAL, S.S.; SIDHU, A.S. **Percolation losses of water in relation to pre-puddling**

tillage and puddling intensity in a puddled sandy loam rice (*Oryza sativa* L.) field. Soil Tillage Res., , 2004. V.72, p.1-8.

LEITE, A. P.; AMARAL, F. C. S.; SILVA, F.H.B.B.; PARAHYBA, R. da B.V. **Aplicando o SiBCTI.** In: Fernando Cezar Saraiva do Amaral. (Org.). Sistema Brasileiro de Classificação de Terras para Irrigação Enfoque na Região Semi-Árido. 1 ed. Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 2005. v.10, p.189-218.

LEVIN, I.; VAN ROOYEN, P. C.; VAN ROOYEN, F. C. **The effect of discharge rate and intermittent water application by point source irrigation on the soil moisture distribution pattern.** Madison: Soil Science Society American Journal, 1979. v.43, p.816.

LIBARDI, P.L. **Dinâmica da água no solo.** São Paulo: EDUSP, 2005. 344p

MACHADO, R. E. **Desenvolvimento e Utilização de um Lisímetro para a Determinação da Evapotranspiração de Referência.** São Carlos. Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, 1996. 93p.

MALICKI, M.A.; PLAGGE, R.; RENGER, M.; WALCZAK, R.T. **Application of time-domain reflectometry (TDR) soil moisture miniprobe for the determination of unsaturated soil water characteristics from undisturbed soil cores.** New York: Irrigation Science, 1992. v.13, p.65-72.

MITKOV, I; TARTAKOVSKY, D. M.; WINTER; C. L. **Dynamics of wetting fronts in porous media,** *Phys. Rev. E*, 1998. v.58, n.5, p.245R-5248R.

MUALEM, Y. **A new model for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated porous media.** Washigton: Water Resources Research, 1976. v.12, n.3, p.513 –522.

NASCIMENTO, T.; SOARES, J. M. **Bulbo Infiltrômetro.** Petrolina, PE: EMBRAPA-CPATSA, 1988. 6p. (FOL 9207).

PIFFER, R. **Movimento e degradação de Aldicarbe e Sulfona de Aldicarbe em dois diferentes solos.** Lavras: ESAL, 1989. 99p. Dissertação Mestrado

PIZARRO, F. **Riegos localizados de alta frecuencia (RLAF): Goteo, Microaspersión, Exudación.** Madrid: Ediciones Mundi – Prensa, 1987. 461p.

QUEIROZ, J. E. **Parâmetros hidrodinâmicos de um solo de várzea para fins de drenagem subterrânea.** Piracicaba: Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, 1995. 167p. (Tese Doutorado).

QUEIROZ, J. E. **Um novo método de cálculo da porosidade drenável.** Campina Grande: Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental, 1997. v.1, p.117-119.

QUEIROZ, M. M. F. de ; RUSTEBERG, B. ; GHEYI, H. R. ; GUERRA, H. O. C. **Estudo da Condutividade Hidráulica de um solo aluvial em Lisímetros**. Campina Grande-PB: Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental, 1999. v.3, n.2, p.161-166.

RADCLIFFE, D.E.; RASMUSSEN, T.C. **Soil water movement**. In: SUMMER, M.E. Handbook of Soil Science. New York: CRC Press, 2000. cap.4, p.87-127.

RAMOS, M. M.; PRUSKI, F. F. Subprojeto 4.3: **quantificação e análise da eficiência do uso da água pelo setor agrícola na bacia do São Francisco**. In: Projeto gerenciamento integrado das atividades desenvolvidas em terra na bacia do São Francisco. Viçosa, MG: UFV: ANA: GEF: PNUMA: OEA, 2003. p.185-190. Relatório Final.

RASSAM, D., SIMUNEK, J., VAN GENUCHTEN, M. TH., **Modelling Variably Saturated Flow with HYDRUS-2D**, Second edition, 2004.

RAWLINS, S.L. **Principles of managing high frequency irrigation**. Soil Science Society American Journal, 1973. v.37, p.626-627.

REICHARDT, K. **A água em sistemas agrícolas**. São Paulo: Ed. Manole Ltda, 1990. Cap.3, p.27-65.

REICHARDT, K.; LIBARDI, P.L.; SAUNDERS, L.C.U. e CADIMA, Z.A. **Dinâmica da água em solo cultivado com milho**. R. Bras. Ci. Solo, 1979. v.3, p.1-5.

RICHARDS, L. A. **Capillary conduction of liquids through porous medium**. Physics, 1931. v.1, p. 318-333.

ROGERS, J.S. **Capacitance and initial time step effects on numerical solutions of Richards equation**. St. Joseph: Transactions of the ASAE, 1994. v.37, n.3, p.807-813.

RUBIMN, J; STEINHARDT, R. **Soil water relation-ship during rains for low intensity. 2. Moisture content profiles**. Madison: Soil Science Society of American Proceeding, 1964. v. 28, p.1-5,

SAHIMI, M. **Flow phenomena in rocks: From continuum models to fractals, percolation, cellular-automata, and simulated annealing**. Rev. Mod. Phys, 1993. V. 65, n.4, p.1393–1534.

SAMANI, Z.A; YITAYEW, M. **Changes in soli properties under intermitent water application**, Irrigation and Science, 1989. v.10, p.177-182.

SCHEIDEGGER, A. E. **The Physics of Flow Through Porous Media**. (University of Toronto, Toronto, 1974)

SILVEIRA, A.L.; LOUZADA, J.A.; BELTRAME, L.F. **Infiltração e armazenamento no solo**. In: TUCCI, C.E.M. Hidrologia: ciência e aplicação. 2.ed. Porto Alegre: Ed.

Universidade: ABRH, EDUSP, p.335-372, 2000.

SKAGGS, R.W.; KHALEEL, R. **Infiltration**. In: Haan, C.T.; Johnson, H.P.; Brakensiek, D.L. Hydrologic modeling of small watersheds. St. Joseph, Michigan: ASAE Monograph n°5, 1982. p.121-166.

TEIXEIRA, W.G.; SCHROTH, G.; MARQUES, J.D.; HUWE, B. **Sampling and TDR probe insertion in the determination of the volumetric soil water**. R. Bras. Ci. Solo, 2003. 27:575-582..

TOPP, G. C.; DAVIS, J. L. **Measurement of soil water using time-domain reflectometry (TDR)**. Madison: Soil Science Society of American Journal, 1985. v.49, p.19-24.

TOPP, G.C.; DAVIS, J.L.; ANNAN, A.P. **Electromagnetic determination of soil water content: measurements in coaxial transmission lines**. Washington: Water Resources Research, 1980. v. 16, n.3, p.574-582.

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

VANAPALLI, S.K.; FREDLUND, D.G.; PUFHAL, D.E. **The Influence of Soil Structure and Stress History on the Soil-Water Characteristics of a Compacted Till**. Géotechnique, 1999. v.49, n.2, p.143-159.

VERMA, R. D.; BRUTSAERT, W. **Unconfined aquifer seepage by capillary flow theory**. Journal of the Hydraulics Division, Proceedings of the American Society of Civil Engineers 96, 1970. p.1331-1344.

VIEIRA, D.B. **Perspectiva do sistema de irrigação por gotejamento em São Paulo**. In: SEMINÁRIO NACIONAL DE IRRIGAÇÃO E DRENAGEM, 1, 1975, Brasília. Anais... Brasília: ABID, 1975. p.31-33.

ZEGELIN, S.J. **A critique of the time domain reflectometry technique for determining field soil water content**. In: Topp G.C., et al., ed. Advances in measurement of soil physical properties: Bringing theory into practice. Spec. Publ. 30. Madison, WI: SSSA, 1992:187-208.

ZUR, B. **The pulsed irrigation principle for controlled soil wetting**. Soil Science, 1976. v.122, n.5, p.282-291.

ZUR, B.; SAVALDI, D. **Infiltration under a pulsed water application: 1 The nature of the flow system**. Baltimore: Soil Science, 1977. v.124, n.3, p.127-134.

APÊNDICE.

Programa do TDR

```
'CR1000 Series
'date: 08/06/2008
'Autor do programa: TARCIZIO NASCIMENTO
'
'-----
'Declare Public & Dim Variables
Public batt_volt
Public Panel_temp
Public LaL(15) 'ratio of apparent to physical probe rod length
Public LaL2(15)
Public LedieuVWC(15)
Public ToppVWC(15)
Public rTime(9)
Public OutStat As Boolean, LastFileName As String * 25
Public WavePT(260)'Collect Waveform values - Outputs reflection waveform values as an array of floating point numbers with a range
    'of -1 to 1. The waveform values are prefaced by a header containing values of key parameters For this instruction
    '(averaging, propagation velocity, points, cable length, window length, probe length, probe offset, multiplier,
    'offset)
Public wave_Deriv(511)' Collect Waveform plus First Derivative - Returns (2*n-5)+9 values
    'where n is the number of waveform reflection values specified by the Points parameter.
Public CE(15) 'Retorna os valores de condutividade eletrica

Public MuxChan(1)
Public Status_irriga()
Public SW12()
Public ON
Public OFF
Dim I 'Declare]a Constantes

'Constantes Dielectricas para a equacao de TOOP
Const a0= -0.053
Const a1= 0.0292
Const a2= -0.00055
Const a3= 0.0000043
Const high = true
Const low = false
Const X1=.1138
Const X2=-0.1758

Alias rTime(1) = Ano
Alias rTime(2) = Mes
Alias rTime(3) = Dia
Alias rTime(4) = Hora
Alias rTime(5) = Minuto
Alias rTime(6)= Segundo
Alias rTime(7)= uSecond
Alias rTime(8) = WeekDay
Alias rTime(9) = Day_of_Year
'Alias Liga = Irrigando
'Alias nLiga = Deligado

'DEFINE AS TABELAS DE DADOS
```

```

DataTable (Data_TDR,1,-1)
  DataInterval (0,3,Min,0)
  CardOut(0,-1)
  Minimum (1,batt_volt,IIEEE4,0,False)
  Average (1,Panel_temp,IIEEE4,0)
  Sample (1,Status_irriga(),FP2)
  Sample (5,rTime(), IIEEE4 )
  Sample (15,LaL(),IIEEE4)
  Sample (15,LaL2(),IIEEE4)
  Sample (15,LedieuVWC(),FP2)
  Sample (15,ToppVWC(),FP2)
EndTable

```

```

DataTable (Wave_PT,1,-1)
  DataInterval (0,0,min,0)
  CardOut(0,-1)
  Sample(5,rtime(),IIEEE4)
  Sample (1,MuxChan,IIEEE4)
  Sample (511,wave_Deriv(),FP2)
EndTable

```

PROGRAMA-----

BeginProg

```

PortsConfig (&B10000111,&B10000000 'configure SDM ports C1,C2,C3 as inputs and C8 as output
SDMSpeed (50)

```

```

Scan (180000,mSec,0,0) '=3 minutos
  Battery (Batt_volt)
  PanelTemp (Panel_temp,250)

```

```

SubScan (20,mSec,2)
  RealTime(rTime)

```

'VAZÃO DE 2,00 L

'DIA 22 NOVEMBRO DE 2008

"-----> PULSO INICIAL - (Vazao = 2,0L/h

```

' ( Ano ) ( Mes ) ( Dia ) ( Hora ) ( Minuto ) (Segundo ) ( mSegundo)
If rtime(1)=2008 AND rtime(2)=11 AND rtime(3)=22 AND rtime(4)=8 AND rtime(5)=0 AND rtime(6)=0 AND rtime(7)<=1 Then SW12(1)
If rtime(1)=2008 AND rtime(2)=11 AND rtime(3)=22 AND rtime(4)=8 AND rtime(5)=0 AND rtime(6)=0 AND rtime(7)>1 Then SW12(0)
'PULSO FINAL
' ( Ano ) ( Mes ) ( Dia ) ( Hora ) ( Minuto ) (Segundo ) ( mSegundo)
If rtime(1)=2008 AND rtime(2)=11 AND rtime(3)=22 AND rtime(4)=9 AND rtime(5)=0 AND rtime(6)=0 AND rtime(7)<=1 Then SW12(1)
If rtime(1)=2008 AND rtime(2)=11 AND rtime(3)=22 AND rtime(4)=9 AND rtime(5)=0 AND rtime(6)=0 AND rtime(7)>1 Then SW12(0)

```

'PRIMEIRA INTERMITENCIA

"-----> PULSO INICIAL - (Vazao = 2,0L/h

```

' ( Ano ) ( Mes ) ( Dia ) ( Hora ) ( Minuto ) (Segundo ) ( mSegundo)
If rtime(1)=2008 AND rtime(2)=11 AND rtime(3)=22 AND rtime(4)=10 AND rtime(5)=0 AND rtime(6)=0 AND rtime(7)<=1 Then SW12(1)
If rtime(1)=2008 AND rtime(2)=11 AND rtime(3)=22 AND rtime(4)=10 AND rtime(5)=0 AND rtime(6)=0 AND rtime(7)>1 Then SW12(0)
' PULSO FINAL
' ( Ano ) ( Mes ) ( Dia ) ( Hora ) ( Minuto ) (Segundo ) ( mSegundo)
If rtime(1)=2008 AND rtime(2)=11 AND rtime(3)=22 AND rtime(4)=11 AND rtime(5)=0 AND rtime(6)=0 AND rtime(7)<=1 Then SW12(1)
If rtime(1)=2008 AND rtime(2)=11 AND rtime(3)=22 AND rtime(4)=11 AND rtime(5)=0 AND rtime(6)=0 AND rtime(7)>1 Then SW12(0)

```

'SEGUNDA INTERMITENCIA

"-----> PULSO INICIAL - (Vazao = 2,0L/h

```

' ( Ano ) ( Mes ) ( Dia ) ( Hora ) ( Minuto ) (Segundo ) ( mSegundo)
If rtime(1)=2008 AND rtime(2)=11 AND rtime(3)=22 AND rtime(4)=12 AND rtime(5)=0 AND rtime(6)=0 AND rtime(7)<=1 Then SW12(1)
If rtime(1)=2008 AND rtime(2)=11 AND rtime(3)=22 AND rtime(4)=12 AND rtime(5)=0 AND rtime(6)=0 AND rtime(7)>1 Then SW12(0)
' PULSO FINAL
' ( Ano ) ( Mes ) ( Dia ) ( Hora ) ( Minuto ) (Segundo ) ( mSegundo)
If rtime(1)=2008 AND rtime(2)=11 AND rtime(3)=22 AND rtime(4)=13 AND rtime(5)=0 AND rtime(6)=0 AND rtime(7)<=1 Then SW12(1)

```


NextSubScan

TDR100 (LaL(1),0,0,1001,4,1,0,251,18.50,4,0,0,3,0.085,1,0)
TDR100 (LaL(2),0,0,2001,4,1,0,251,29.80,4,0,0,3,0.085,1,0)
TDR100 (LaL(3),0,0,3001,4,1,0,251,18.50,4,0,0,3,0.085,1,0)
TDR100 (LaL(4),0,0,4001,4,1,0,251,24.20,4,0,0,3,0.085,1,0)
TDR100 (LaL(5),0,0,5001,4,1,0,251,18.40,4,0,0,3,0.085,1,0)
TDR100 (LaL(6),0,0,6001,4,1,0,251,24.00,4,0,0,3,0.085,1,0)
TDR100 (LaL(7),0,0,7001,4,1,0,251,29.80,4,0,0,3,0.085,1,0)
TDR100 (LaL(8),0,0,8101,4,1,0,251,18.20,4,0,0,3,0.085,1,0)
TDR100 (LaL(9),0,0,8201,4,1,0,251,18.20,4,0,0,3,0.085,1,0)
TDR100 (LaL(10),0,0,8301,4,1,0,251,22.30,4,0,0,3,0.085,1,0)
TDR100 (LaL(11),0,0,8401,4,1,0,251,18.20,4,0,0,3,0.085,1,0)
TDR100 (LaL(12),0,0,8501,4,1,0,251,33.60,4,0,0,3,0.085,1,0)
TDR100 (LaL(13),0,0,8601,4,1,0,251,28.00,4,0,0,3,0.085,1,0)
TDR100 (LaL(14),0,0,8701,4,1,0,251,28.00,4,0,0,3,0.085,1,0)
TDR100 (LaL(15),0,0,8801,4,1,0,251,18.20,4,0,0,3,0.085,1,0)

For I=1 To 15

LaL2(I) = LaL(I)^2 'Constante Dieletrica Aparente K = (La/L)^2
ToppVWC(I)=a0+a1*LaL2(I)+a2*LaL2(I)^2+a3*LaL2(I)^3) 'Umidade em cm3/cm3
LedieuVWC(I)=0.1138*LaL(I)+(-0.1758) 'Umidade em cm3/cm3

Next I

CallTable Data_TDR

NextScan

EndProg

