



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

**ALMIRO WEISS**

**DESENVOLVIMENTO DE UM LISÍMETRO PARA ENSAIOS DEMONSTRATIVOS  
DA DINÂMICA DA ÁGUA NO SOLO**

**Medianeira – Paraná - Brasil  
SETEMBRO 2013**

**ALMIRO WEISS**

**DESENVOLVIMENTO DE UM LISÍMETRO PARA ENSAIOS DEMONSTRATIVOS  
DA DINÂMICA DA ÁGUA NO SOLO**

Tese apresentada à Universidade Federal de Campina Grande, Centro de Tecnologia e Recursos Naturais, para a obtenção do Título de Doutor em Engenharia Agrícola, área de concentração Irrigação e Drenagem.

Orientador: Prof. Ph.D. Hugo O. Carvalho Guerra

Coorientadora: Profa. Dra. Sirlei da Rosa

2013

## Dados Internacionais de Catalogação na Publicação

W429d Weiss, Almiro

Desenvolvimento de um lisímetro para ensaios demonstrativos da dinâmica da água no solo / Almiro Weiss. – 2013.

71 f. : il. ; 30 cm.

Orientador: Hugo O. Carvalho Guerra

Coorientadora: Sirlei da Rosa

Tese (Doutorado) – Universidade Federal de Campina Grande. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola. Campina Grande, 2013.

Inclui bibliografias.

1. Dinâmica da água no solo. 2. Redistribuição. 3. Condutividade hidráulica. 4. Sistemas de irrigação localizada. I. Guerra, Hugo O. Carvalho, orient. II. Rosa, Sirlei da., coorient. III. Universidade Federal de Campina Grande. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola. IV. Título.

CDD: 631.432

Biblioteca Câmpus Medianeira  
Marci Lucia Nicodem Fischborn 9/1219

**ALMIRO WEISS**

**DESENVOLVIMENTO DE UM LISÍMETRO PARA ENSAIOS DEMONSTRATIVOS  
DA DINÂMICA DA ÁGUA NO SOLO**

Tese apresentada à Universidade Federal de Campina Grande, Centro de Tecnologia e Recursos Naturais para a Obtenção do Título de Doutor em Engenharia Agrícola, área de concentração: Irrigação e Drenagem.

**APROVADO em: 01/10/2013**

Prof. Ph.D. Hugo Orlando Carvalho Guerra (UFCG)  
Orientador

Prof. Dra. Sirlei da Rosa (UFTPR)  
Examinador

Prof. Dr. Lucia Helena Garofalo Chaves (UFCG)  
Examinador

Prof. Dr. Iêde de Brito Chaves (UFPB)  
Examinador

Prof. Dr. José Airton Azevedo dos Santos (UTFPR)  
Examinador

Prof. Dr. Décio Lopes Cardoso (UNIOESTE)  
Examinador

## **Dedicatória**

Dedico este trabalho aos meus Pais Ivo Weiss (in memoriam) e Selma Franck Weiss (in memoriam) que me ensinaram o caminho a ser trilhado na minha vida, com dedicação e perseverança. Os seus exemplos de vida foram fundamentais para a minha realização como profissional e como pessoa.

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço primeiramente ao Prof Ph.D. Hugo Orlando Carvalho Guerra pelos ensinamentos, pela dedicação e orientação objetiva para o sucesso na realização deste trabalho.

Agradeço o apoio recebido da minha esposa Nilse Schek Weiss e dos meus filhos Rubiam Marcel Weiss e Alan Daniel Weiss e nora Ana Paula Justi, pela compreensão do tempo dedicado a este trabalho.

## Pensamento

“A persistência é o menor caminho do êxito.”

Charles Chaplin

## RESUMO

O solo e a água são elementos essenciais para o desenvolvimento das culturas agrícolas. O conhecimento da dinâmica da água através do perfil do solo permite um racional planejamento do manejo do solo e água que permita a otimização dos rendimentos. O presente trabalho teve o objetivo de desenvolver e construir um lisímetro de laboratório que permita estudar e demonstrar a dinâmica da água em perfis de solo. Foi projetado, desenvolvido, construído e testado no Laboratório de Processos Mecânicos da UTFPR – Universidade Tecnológica do Paraná, Campus Medianeira, Medianeira, Paraná. Os ensaios foram conduzidos em duas classes texturais de solo, argiloso e arenoso, em amostras semideformadas, em condições de solo saturado e não saturado, usando dois sistemas de irrigação, microaspersão e gotejamento, com diferentes vazões e tempos de irrigação. Através dos ensaios realizados com o sistema de irrigação por microaspersão em solos saturados observou-se claramente a formação do bulbo molhado na superfície do solo e a diferença entre solos argilosos e arenosos. Nos solos não saturados a utilização de ambos os sistemas de irrigação nas diferentes vazões permitiu a visualização da formação do bulbo molhado na superfície e no perfil do solo. Baseado nos resultados obtidos pode-se concluir que o lisímetro desenvolvido constitui uma ferramenta didática demonstrativa, que possibilita compreender e visualizar na prática a distribuição da água no solo, permitindo determinar todos os parâmetros da equação de Darcy que determina o movimento da água no solo, inclusive o coeficiente importante, a condutividade hidráulica. Apresenta versatilidade para ser usado em diferentes estudos da dinâmica da água no perfil de solo tais como pesquisas com diversas classes texturais de solo, conteúdos de água, compactação; infiltração, ascensão capilar; solos estratificados, distribuição da água no solo, quando utilizados diferentes sistemas de irrigação, vazões e tempos de irrigação. Apresenta praticidade e comodidade para testes demonstrativos quando comparado com testes feitos no campo, pois estes requerem muito tempo de execução.

**Palavras-chave:** Dinâmica da água no solo, Redistribuição, Condutividade hidráulica, Sistemas de irrigação localizada.



## ABSTRACT

The soil and the water are essential elements for agricultural crop development. The knowledge of the water dynamic on the soil allows a rational planning aiming to optimize crop yields. The present work aimed to develop and build a laboratory lysimeter that allows studying and demonstrating the water dynamics in soil profiles. It was projected, developed and tested at the Mechanical Processes Laboratory of the UTFPR – Universidade Tecnológica do Paraná, Campus Medianeira, Medianeira, Paraná. The tests were conducted in two textural soil classes, clay and sandy, in semi-disturbed soil samples, saturated and unsaturated soil conditions, using two irrigation systems microaspersion and drip with different irrigation rates and application times. Through the performed trials using microaspersao in saturated soils it was possible observe clearly the formation of the wet bulb on the soil surface. In the non saturated soils, using both irrigation systems with different rates and irrigation times it was possible to observe the wet bulb on the surface and on the soil profile. Based on the obtained results it can be concluded that the constructed lysimeter constitutes a didactic and demonstrative tool that permits to understand and observe practically the soil water distribution, allowing also the determination of all the parameters of the Darcy equation, including the important coefficient, the hydraulic conductivity. It is a very versatile tool that can be used to aboard other soil water dynamic studies in different textural soils, water contents, compaction, infiltration, capillary water rise, stratified soils, irrigation rates and times for different irrigation systems. It is practical and easy to conduct demonstrative tests when compared to “in situ” time consuming alternatives.

**Keywords:** Soil water dynamic, Water infiltration, Hydraulic conductivity. Localized irrigation systems.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Conteúdo de água do solo em função da textura do solo.....	21
Figura 2 - Detalhamento de um tensiômetro de Hg .....	22
Figura 3 - Detalhamento do tensiômetro e do vacuômetro .....	23
Figura 4 - Piezômetros.....	24
Figura 5 - Irrigação por gotejamento .....	30
Figura 6 - Irrigação por aspersão .....	31
Figura 7 - Dimensões do bulbo molhado inscrito em um cilindro .....	33
Figura 8 - Formação do bulbo úmido na superfície do solo (charco) .....	34
Figura 9 - Desenho em perspectiva do Lisímetro para ensaios da dinâmica da água no solo .....	36
Figura 10 - Estrutura principal .....	37
Figura 11 - Detalhe dimensional das caixas porta-amostra do lisímetro .....	38
Figura 12 - Sistema de fornecimento de água do lisímetro .....	39
Figura 13 - Tubulações de abastecimento de água do lisímetro .....	40
Figura 14 - Tubulação hidráulica de saturação .....	41
Figura 15 - Disposição dos tensiômetros na face posterior da caixa porta amostra .....	42
Figura 16 - Sistema de medição com piezômetros e tensiômetros .....	42
Figura 17 - Disposição dos piezômetros na face posterior da caixa porta amostra .....	43
Figura 18 - Lisímetro desenvolvido.....	48
Figura 19 - Sistemas de medição, A) Sistema com piezômetros para medição dos potenciais de pressão e B) Sistema com tensiômetros para medição dos potenciais matriciais .....	49
Figura 20 - Sistemas de saturação e de drenagem de água do solo .....	49
Figura 21 - Curva de retenção de água do solo argiloso ajustada segundo modelo van Genuchten (1980) .....	51

Figura 22 - Curva de retenção da água do solo arenoso ajustada segundo modelo van Genuchten (1980) .....	51
Figura 23 - Distribuição da água no perfil de um solo argiloso quando utilizado um sistema de irrigação por gotejamento superficial após 1, 3 e 5 horas de irrigação com as vazões de 2,9 e 4,9 L h <sup>-1</sup> .....	53
Figura 24 - Distribuição da água no perfil de um solo arenoso quando utilizado um sistema de irrigação por gotejamento superficial, 1; 3 e 5 horas de irrigação com as vazões de 1,9 e 5,6 L h <sup>-1</sup> .....	55
Figura 25 - Distribuição da água no perfil de um solo argiloso quando utilizado um sistema de irrigação por microaspersão depois de 0,5; 1,0 e 1,5 horas de irrigação com as vazões de 7,7 e 23,7 L h <sup>-1</sup> .....	57
Figura 26 - Distribuição da água aplicada num perfil de solo arenoso quando utilizado um sistema de irrigação por microaspersão depois de 1, 2 e 3 horas de irrigação para a vazão de 10,6 L h <sup>-1</sup> .....	59
Figura 27 - Formação do bulbo úmido .....	61
Figura 28 - Formação do bulbo molhado na superfície de a) um solo arenoso b) um solo argiloso irrigado por gotejamento .....	62
Figura 29 - Formação do bulbo molhado no perfil de um solo arenoso e de um argiloso irrigado por microaspersão .....	63
Figura 30 - Piezômetros instalados nas diferentes profundidades do solo .....	64

## LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Vazões de água aplicadas no solo para cada tratamento.....	46
Quadro 2 - Determinação da condutividade hidráulica em solo arenoso, com aplicação de irrigação por microaspersão, na vazão de $25,7 \text{ L h}^{-1}$ , para o intervalo de profundidade do solo de 10 e 50 cm .....	65
Quadro 3- Determinação da condutividade hidráulica solo argiloso, com aplicação de irrigação por microaspersão, na vazão de $20 \text{ L h}^{-1}$ , para o intervalo de profundidade do solo de 10 e 50 cm.....	65

**LISTA DE SÍMBOLOS E ABREVIACÕES**

- $\Psi_t$  – potencial total da água do solo;  
 $\Psi_g$  – potencial gravitacional;  
 $\Psi_p$  – potencial de pressão;  
 $\Psi_s$  – potencial osmótico;  
 $\Psi_m$  – Potencial matricial do solo;  
 $D_s$  – Diâmetro superficial do bulbo molhado;  
 $D_{m\acute{a}x}$  – Diâmetro máximo do bulbo molhado;  
 $Z_{m\acute{a}x}$  – Profundidade máxima do bulbo molhado;  
 $ZD_{m\acute{a}x}$  – Profundidade onde ocorre o diâmetro máximo;  
 $K$  – Coeficiente de condutividade hidráulica;  
 $K_0$  – Condutividade capilar;  
 $dH_\theta/dz$  – Gradiente de Potencial;  
 $q$  – Fluxo de água;  
 $A$  – Área do lisímetro;  
 $Q$  – Volume de água percolada;  
 $z$  – Potencial gravitacional;  
 $h$  – Potencial de pressão;  
 $\Delta z$  – Gradiente gravitacional;  
 $\Delta h$  – Gradiente de pressão;  
 $\nabla H$  – Gradiente hidráulico.

## SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO .....</b>	<b>16</b>
<b>2 OBJETIVOS.....</b>	<b>17</b>
2.1 GERAL .....	17
2.2 ESPECÍFICOS .....	17
<b>3 REVISÃO DE LITERATURA .....</b>	<b>18</b>
3.1 INTRODUÇÃO .....	18
3.2 DINÂMICA DA ÁGUA NO SOLO .....	19
3.2.1 Medição dos potenciais .....	21
3.2.1.1 Tensiômetro .....	22
3.2.1.2 Piezômetro .....	24
3.2.2 Condutividade hidráulica .....	24
3.2.2.1 Métodos para determinar a condutividade hidráulica .....	25
3.2.3 Distribuição da água no solo .....	26
3.3 SISTEMAS DE IRRIGAÇÃO .....	28
3.3.1 Irrigação por gotejamento .....	29
3.3.2 Irrigação por microaspersão .....	30
3.4 BULBO MOLHADO (BULBO ÚMIDO) .....	31
3.4.1 Características .....	32
3.4.2 Fatores que interferem na formação do bulbo molhado .....	34
<b>4 MATERIAL E MÉTODOS .....</b>	<b>35</b>
4.1 LOCAL DO EXPERIMENTO .....	35
4.2 PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS .....	35
4.2.1 Elaboração do projeto .....	35
4.2.2 Desenvolvimento do projeto .....	35
4.3 CONDUZINDO OS TESTES .....	44
4.3.1 Ensaios em condições de solo não saturado .....	44
4.3.2 Ensaios em condições de saturação .....	44
4.4 TIPOS DE FLUXO, IRRIGAÇÃO E SOLOS USADOS .....	45
4.5 DETERMINAÇÕES .....	46
<b>5 RESULTADOS E DISCUSSÃO .....</b>	<b>47</b>
5.1 A CONSTRUÇÃO DO LISÍMETRO .....	47

5.2 RESULTADOS DOS ENSAIOS .....	50
5.2.1 Resultados dos ensaios em solo não saturado .....	50
5.2.1.1 Formação do bulbo molhado (bulbo úmido) .....	60
5.2.2 Ensaios em solos saturados .....	63
<b>6 CONCLUSÕES .....</b>	<b>67</b>
<b>7 REFERÊNCIAS .....</b>	<b>68</b>

## 1 INTRODUÇÃO

Com a expansão gradativa das áreas agrícolas no Brasil e com as práticas de manejo inadequadas das terras, várias mudanças nas características dos solos agrícolas tem ocorrido, como, por exemplo: a desertificação das terras do semiárido, o assoreamento dos rios do pantanal e dos demais rios brasileiros, arenização de algumas áreas agrícolas do Rio Grande do Sul, degradação em função da erosão, poluição das águas devido aos defensivos e fertilizantes aplicados nas lavouras e a salinização do solo. Esta expansão das fronteiras agrícolas está acontecendo de maneira bastante acentuada, principalmente nas áreas do cerrado e nas regiões norte e nordeste do País. Nestas regiões o uso de irrigação geralmente tem sido utilizado para aumentar a produtividade; com a aplicação da água nas lavouras pela irrigação pode-se provocar a contaminação das mesmas, através dos solutos existentes no solo, caso forem carregados até o lençol freático. Portanto o estudo da movimentação da água nos solos agrícolas torna-se importante para prevenir e diminuir os problemas causados pela atividade agrícola.

As atividades de pesquisa são necessárias para conhecer melhor a dinâmica da água no solo e, portanto, a construção do lisímetro para realização de ensaios em laboratório vem para contribuir nestes estudos, colocando-se como ferramenta auxiliar de ensino e pesquisa possibilitando compreender melhor a dinâmica que a água assume no solo, quando são aplicados os sistemas localizados de irrigação por microaspersão e gotejamento. O lisímetro é o equipamento normalmente usado para conduzir o balanço da água no solo. Este é um recipiente cilíndrico, quadrado ou retangular, geralmente metálico, onde o solo recebe água na sua superfície, por irrigação ou através da chuva. Ao infiltrar nesta coluna de solo, a quantidade de água aplicada pode ser medida em termos de lâmina de água por unidade de tempo ( $\text{mm h}^{-1}$  ou  $\text{cm h}^{-1}$ ). Estes ensaios geralmente são realizados no campo, ou seja, é necessário construir o lisímetro no local onde será realizada a pesquisa (BERNARDO, 2006). Com a utilização de um lisímetro de laboratório as atividades de pesquisa e de ensino serão facilitadas, servindo como material didático bastante útil. Para Fiscarelli (2007) fazer uso de um material didático em sala de aula, de maneira a tornar o processo de ensino aprendizagem mais concreto, menos verbalístico, mais eficaz e eficiente, é uma preocupação que tem acompanhado a educação brasileira ao longo de sua história.



## **2 OBJETIVOS**

### **2.1 Geral**

Desenvolver e construir um lisímetro para demonstração de laboratório, para realização de ensaios de movimentação da água no solo.

### **2.2 Específicos**

- a) Desenvolver e construir um lisímetro de laboratório que permita demonstrar a dinâmica da água usando dois sistemas de irrigação, por microaspersão e por gotejamento, em amostras semideformadas em condições de saturação e não saturação.
- b) Demonstrar a distribuição da água em diferentes classes texturais de solo, sistemas de irrigação e condições de fluxo, em solos saturados e não saturados;

### 3 REVISÃO DE LITERATURA

#### 3.1. INTRODUÇÃO

O solo funciona como suporte físico e reservatório de água para as plantas, além de, na maioria dos casos, ser o fornecedor dos principais nutrientes necessários à produção. As partículas do solo, arranjadas em grânulos e agregados, constituem um meio poroso com grande diversidade de forma, o que confere ao sistema solo-água grande complexidade. Esse tipo de arranjo afeta a interação entre a água e o solo no sistema maior solo-água-planta-atmosfera que, traduzida em termos de estado de energia da água na forma potencial, governa inúmeros processos, entre os quais o movimento da água, nutrientes, sais e agroquímicos no solo, além da absorção de água e nutrientes pela planta (ALBUQUERQUE & DURÃES, 2008).

A água funciona como solvente de nutrientes do solo e como meio de transporte destes na planta, afirma Kiehl (1979). A água do solo contém gases e sais dissolvidos, daí ser mais propriamente denominada “solução do solo”. O mesmo autor postula que a dinâmica da solução, sofre contínuas flutuações em quantidade de líquido, em sua composição química e em sua concentração, pois, os íons que nela se encontram estão permanentemente passando para as partículas coloidais e vice-versa.

A retenção e a movimentação da água nos solos, sua captação e transporte pelas plantas, assim como sua liberação para a atmosfera são, todos eles, fenômenos relacionados à energia. Há implicação de vários tipos de energia, inclusive potencial, cinética e elétrica segundo Brady (1989). Ainda descreve que o solo argiloso retém muito maior quantidade de água a um determinado nível de tensão, do que os solos franco e arenoso. De modo semelhante, a um determinado teor de umidade, a água é retida com muito maior tenacidade na argila, quando comparada aos outros dois solos.

Ao terminar a chuva e/ou irrigação, descrevem Albuquerque & Durães (2008), se a água da superfície tiver desaparecido, diz-se que o processo de infiltração terminou. Fazendo uma análise por observação visual pode-se dizer que a infiltração cessou, porém estudando a dinâmica da água no interior do solo a infiltração da água continua, enquanto houver diferença no potencial gravitacional e mátrico. Num solo saturado, a água tem diferentes caminhos para percorrer. Parte percola para camadas mais profundas do solo, sob a ação do

potencial gravitacional; outra parte move-se, segundo outros potenciais, fenômeno que é conhecido por “redistribuição”.

### 3.2. DINÂMICA DA ÁGUA NO SOLO

No estudo da dinâmica da água no solo devem-se considerar as inter-relações entre os três elementos que compõe o solo, a parte sólida, a líquida e a gasosa. Dependendo das condições do solo ele é considerado solo saturado ou não saturado. No solo saturado a água ocupa todos os espaços vazios antes ocupados pelo ar. No solo não saturado existe certo equilíbrio entre a água e o ar existentes no mesmo. Para Albuquerque & Durães (2008) o conteúdo de água no solo é a quantidade de água armazenada até uma dada profundidade do solo, comumente, a profundidade efetiva do sistema radicular. Geralmente, o conteúdo de água no solo é expresso como lâmina, ou seja, em mm. Esse é um parâmetro importante no dimensionamento de sistemas e manejo da irrigação.

De modo geral, os solos se encontram não saturados de água, mas mesmo assim armazenam considerável quantidade de água, parte da qual deve ser utilizada pelas plantas. Os processos dinâmicos da água em solos que fazem parte de assuntos científicos terrestres da fase do ciclo hidrológico e de problemas relacionados com irrigação, ecologia de plantas, e com a biologia da fauna e flora do solo. Processos específicos de grande interesse e importância incluem infiltração, redistribuição e evaporação da água pelos solos (<http://estudonline.tripod.com/toppage11.htm>, acessado em 15 julho 2013).

Levando em consideração estes fatos pode-se afirmar que a dinâmica da água no solo tem fundamental importância para suprir as necessidades de água e nutrientes das plantas.

O movimento da água no solo é regido pela Lei de Darcy em solos saturados (equação 1) e pela Lei de Darcy e Buckingham em solos não saturados (equação 2).

$$q = -K \frac{dH}{dz} \quad \text{solos saturados} \quad (1)$$

$$q_{\theta} = -K_{\theta} \frac{dH_{\theta}}{dz} \quad \text{solos não saturados} \quad (2)$$

onde:

q - densidade de fluxo;

K – coeficiente de condutividade hidráulica;

- $K_{\theta}$  - Condutividade capilar;
- $dH_{\theta}/dz$  - Gradiente de Potencial;
- $\theta$  - Conteúdo de água do solo.

Como a condutividade hidráulica depende da natureza do espaço poroso, ela varia enormemente de solo para solo e mesmo dentro de um mesmo solo, em função das variações estruturais, compactação do solo, entre outras características próprias. (REICHARDT, 1996). Tal variação pode ser causada por uma carga externa podendo mudar a estrutura do solo (compactação), adensamento das camadas do solo, por efeito da expansividade das argilas e por colmatação dos poros (BRANDÃO *et al.* 2006).

Segundo Albuquerque & Durães (2008) a água no solo movimenta-se devido a seu conteúdo de energia. No escopo da Física clássica, são reconhecidas duas formas principais de energia: cinética e potencial. A energia cinética no solo pode ser desprezível, pois a velocidade da água no solo é muito pequena. Porém a energia potencial, devida à posição, ou à condição interna, é determinante do estado energético e do movimento da água no solo, onde a água se movimenta de um ponto com potencial maior para um ponto com potencial menor. Também descrevem que o potencial total da água do solo ( $\Psi_t$ ) é determinado por todos os fatores que afetam a energia livre da água. Os principais fatores do sistema solo-planta são: a força gravitacional, a pressão hidrostática, a concentração de solutos e a interação da água com a matriz do solo, originando, segundo Brandão *et al.* (2006), no potencial gravitacional ou de posição ( $\Psi_g$ ) o potencial de pressão ( $\Psi_p$ ) que surge quando a pressão que atua sobre a água no solo é maior que a atmosférica, o potencial osmótico ( $\Psi_s$ ) que surge quando a água no solo for uma solução de sais minerais e outros solutos e o potencial matricial ( $\Psi_m$ ) que está associado à interação entre a matriz sólida do solo e a água, levando a pressões menores que a atmosférica.

Brady (1989) afirma que tanto o potencial matricial quanto o osmótico são negativos, porque as forças de atração e osmótica, responsáveis por ambos, reduzem o nível de energia livre da água do solo. São chamados de sucções ou tensões. Também descreve que o solo argiloso retém muito maior quantidade de água a um determinado nível de tensão, do que solo franco e arenoso.

Os potenciais matriciais gerados entre a água e a matriz do solo, segundo Reichardt (1993) são governadas pelas forças de adesão, coesão e tensão superficial das partículas sólidas. As curvas 1, 2 e 3, figura 1, mostram o volume de água retida em solos de textura arenosa, média e argilosa, respectivamente, em função da tensão gerada entre a água e

a matriz do solo, relacionando também com os limites de capacidade de campo e ponto de murcha permanente. Mostrando também as faixas de água não disponível, de água disponível e o ar existente em cada classe textural de solo.

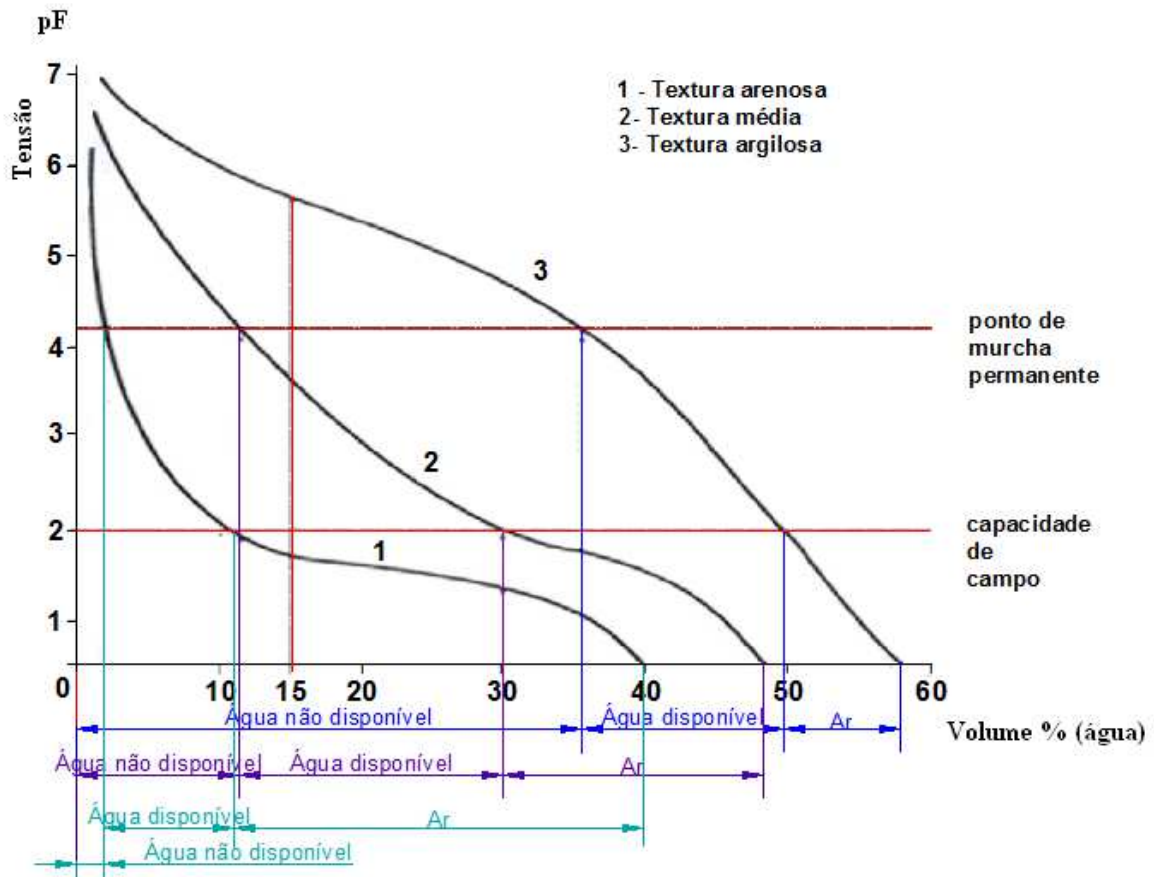


Figura 1 - Conteúdo de água do solo em função da textura do solo

Fonte: Lepsch (2002).

### 3.2.1 Medição dos Potenciais

A medição do potencial matricial de determinado solo agrícola é a determinação da energia com que a água é retida na sua matriz e pode ser obtida através do uso de instrumentos de medição, até mesmo de construção simples, como por exemplo, os tensiômetros, vale lembrar que em solos saturados são usados os piezômetros.

### 3.2.1.1 Tensiômetro

A tensiometria é a técnica usada para medir a tensão (força) com que a água é retida no solo, que interfere diretamente na adsorção desta água pelas plantas. O tensiômetro é composto por uma cápsula porosa, um corpo tubular e um vacuômetro. Os tensiômetros mais conhecidos e utilizados são aqueles em que o potencial matricial é medido com um manômetro de mercúrio (figura 2) ou de Bourdon em que o potencial é medido com um vacuômetro (figura 3). Também se tem os tensiômetros digitais de menor uso e maior preço. O uso do tensiômetro digital, no entanto, vem aumentando, devido à facilidade da leitura da tensão matricial e que o mesmo pode ser conectado a um aparelho coletor de dados (datalogger).

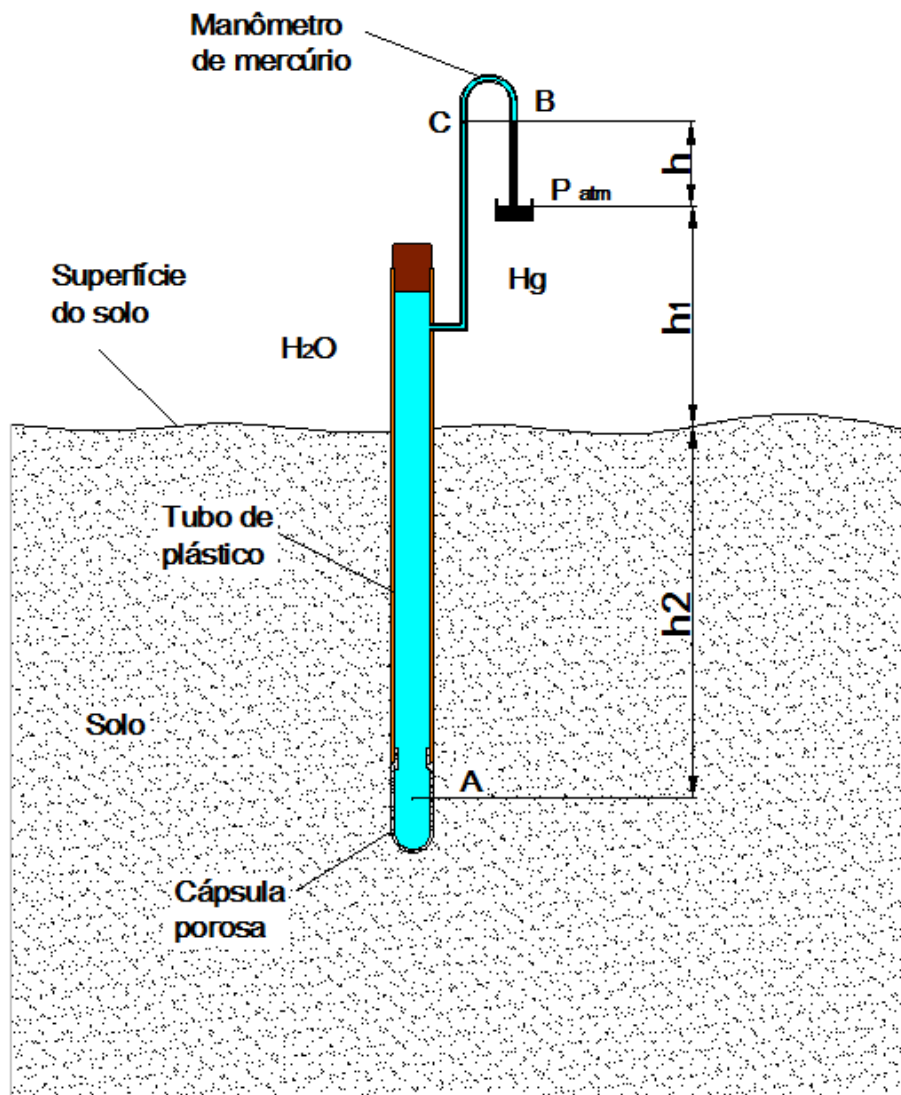


Figura 2 - Detalhamento de um tensiômetro de mercúrio (Hg)

O tensiômetro é adequado apenas para medir a umidade do solo com tensões entre 0 e 60 cm Hg (0,8 bar).

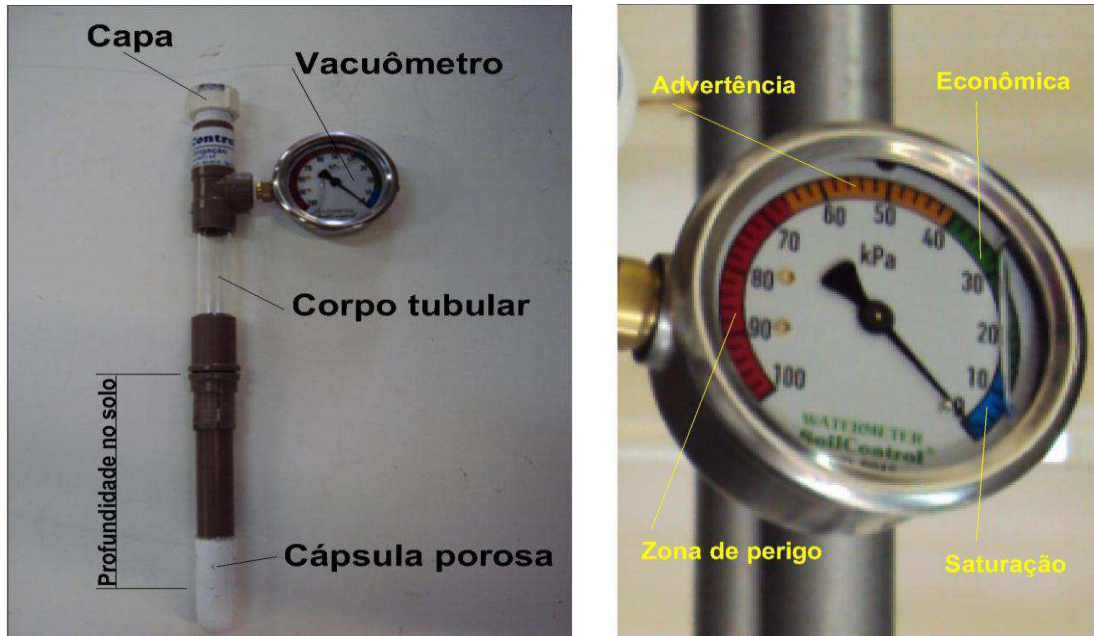


Figura 3 - Detalhamento do tensiômetro e do vacuômetro

Para usar o tensiômetro o corpo tubular do mesmo deverá ser preenchido com água destilada, eliminando todo ar existente neste corpo. Posteriormente o tensiômetro é colocado em pé ao lado de uma das plantas da cultura irrigada, enterrando a sua ponta porosa no solo, na profundidade média do sistema radicular. A extremidade com a cápsula porosa fica enterrada no solo na profundidade onde a maioria das raízes desta cultura fica localizada. A outra extremidade, com o manômetro, fica fora do solo.

Com o uso do tensiômetro têm-se algumas vantagens, que facilitam o trabalho de irrigação, permitindo que o irrigante aplique a irrigação no momento certo. Destaca-se as seguintes vantagens deste instrumento: redução dos custos com energia elétrica ou diesel; redução de perdas de água e fertilizantes usados; saber quando e quanto irrigar; evitar a salinização dos solos; evitar a desestruturação dos solos; obter um aumento efetivo na produtividade e obter aumento da vida útil dos equipamentos.

### 3.2.1.2 Piezômetro

O piezômetro é um instrumento utilizado para medir o potencial de pressão em solo saturado. O piezômetro também chamado de manômetro de altura é constituído de um tubo, feito de PVC ou alumínio, geralmente de cor transparente, que é inserido no solo no qual se deseja medir a pressão. As vantagens do uso deste tipo de instrumento de medição são a sua construção simples, o baixo custo para sua construção, não requer manutenção frequente; é calibrado de forma especial, além disso, permite medições com grande precisão.

A figura 4 apresenta uma bateria com vários piezômetros instalados no laboratório.

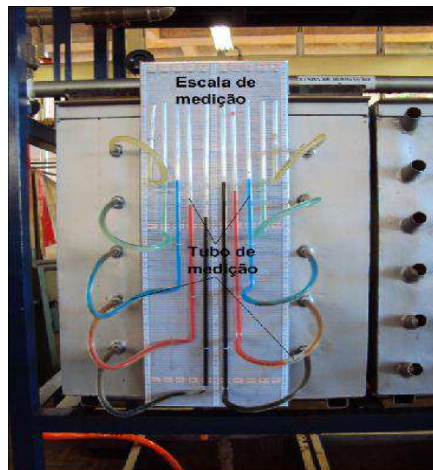


Figura 4 - Piezômetros

### 3.2.2 Condutividade hidráulica ( $K_{\theta}$ )

A condutividade hidráulica é um parâmetro que mostra a facilidade com que a água se movimenta no perfil do solo. Sendo a condutividade hidráulica do solo um parâmetro que traduz a facilidade com que a água se movimenta ao longo do perfil de solo, sua determinação, principalmente no campo, torna-se imprescindível, visto que o movimento da água no solo está diretamente relacionado à produção das culturas agrícolas.

Para Carvalho *et al.* (2003) o movimento da água no sistema solo-planta envolve processos como infiltração, redistribuição, drenagem, adsorção e absorção pela planta. Nesse contexto, a condutividade hidráulica ocupa papel de destaque, pois está diretamente relacionada à capacidade do solo em conduzir água. Ainda descreve que a função condutividade hidráulica  $K(\theta)$ , isto é a condutividade hidráulica de um solo em função da umidade desse solo, tem especial importância para os estudos e solução de problemas práticos



relacionados, como por exemplo, a irrigação, a lixiviação de nutrientes e de poluentes. Com isso, a aplicação de um método confiável que quantifique a condutividade hidráulica, certamente contribuirá muito para uma correta avaliação da dinâmica da água do solo.

### 3.2.2.1 Métodos para determinar a condutividade hidráulica

A condutividade hidráulica é determinada por vários métodos, descreve (GUERRA, 2000). Os empíricos encontrados na bibliografia frutos de pesquisas realizadas em diferentes classes e condições de solo, usando relações empíricas simples, baseadas em propriedades físico-hídricas. Observam-se, como exemplo, tabelas e correlações que apresentam valores de condutividade hidráulica em função da textura, da densidade e da porosidade do solo.

Os permeâmetros são métodos que permitem a determinação da condutividade hidráulica no laboratório. O de carga constante para sua determinação em solos de textura média a grossa e o de carga variável em solos de textura média a fina. O método do permeâmetro de carga constante é um procedimento simples e muito utilizado. Consiste em medir o fluxo de água no solo quando submetido a uma carga de água constante na superfície do solo. Quando é atingido um regime estacionário, aplica-se a equação de Darcy, lembrando que, nesse caso, o gradiente de potencial total vale  $(h + L)/L$  (equação 3), onde:

$$K\theta = \frac{V_a * L}{A * t * (h + L)} \quad (3)$$

$K_\theta$  - Condutividade hidráulica [ $\text{cm h}^{-1}$ ];

$V_a$  - volume de água coletado na proveta ou medido pela bureta de Mariotte [ $\text{cm}^3$ ];

$A$  - área da secção transversal da amostra [ $\text{cm}^2$ ];

$t$  - tempo [s];

$L$  - comprimento da amostra [cm];

$h$  - potencial de pressão ou carga hidráulica constante no topo do solo [cm].

A condutividade hidráulica determinada no laboratório por meio de permeômetros é beneficiada por exigir um menor esforço físico, além de ser relativamente prática e rápida. Porém requer bastante prática e atenção na coleta e preparação das amostras indeformadas para evitar qualquer tipo de desagregação estrutural.

O método de campo mais exato é o método do perfil instantâneo (HILLEL *et al.*, 1972), que se baseia na análise dos componentes da equação de Richards em perfis de potenciais e fluxos transientes durante a drenagem vertical que ocorre após a saturação do solo por uma chuva ou irrigação. O Método apresenta como vantagem principal a possibilidade de se medir diretamente no campo as propriedades hidráulicas, sem a necessidade de aguardar o estabelecimento de um equilíbrio dinâmico ("steady state"). Vários autores, comparando resultados do método do perfil instantâneo com os de outros métodos, inclusive de laboratório, concluíram que o método do perfil instantâneo resulta em determinações mais consistentes, além de sua relativa facilidade de realização (PREVEDELLO *et al.*, 1981; PAIGE & HILLEL, 1993; MARION *et al.*, 1994), chegando a considerá-lo o método padrão.

### 3.2.3 Distribuição da água no solo

O conhecimento da distribuição da água no solo é de grande importância para a agricultura, uma vez que a água é um dos fatores que mais influenciam no rendimento das culturas. A movimentação da água no solo começa com a infiltração que é o processo pelo qual a água penetra a superfície do solo. Ela varia com o tempo, iniciando-se com taxas altas e progressivamente diminuindo até atingir valores constantes. As forças responsáveis por esse movimento são a gravitacional e a matricial, essa última originada nos meniscos côncavos resultantes da interação entre as fases sólida, líquida e gasosa (forças de adsorção, coesão e tensão superficial). Quando o solo se encontra relativamente seco no início da infiltração, as forças matriciais dominam o processo e, por isso, as taxas de infiltração são altas. Com o passar do tempo, essas forças vão se anulando e a força gravitacional passa a ser a principal responsável por esse movimento. O conhecimento desse processo é particularmente importante em estudos de irrigação, conservação do solo e da água (<http://estudonline.tripod.com/toppage11.htm>, acessado em 15 julho 2013).

Afirmações feitas por Bertoni & Lombardi Neto (1999) dão conta de que a infiltração é o movimento da água através da superfície do solo. O movimento de água através

do solo é realizado pelas forças da gravidade e de capilaridade: esse movimento através dos grandes poros, em solo saturado, é fundamentalmente governado pela gravidade, enquanto em um solo não saturado é principalmente pela capilaridade. Ainda afirmam que durante a chuva, a velocidade máxima de infiltração ocorre no começo, e usualmente decresce muito rapidamente, de acordo com alterações na estrutura da superfície do solo. Descrevem também que o tamanho e a disposição dos espaços porosos têm a maior influência na velocidade de infiltração de um solo. Em solos arenosos, com grandes espaços porosos, pode-se esperar mais alta velocidade de infiltração que nos limosos ou argilosos, que têm relativamente menores espaços porosos.

A infiltração da água no solo depende de vários fatores como: da água disponível para infiltrar, da constituição e declividade do solo, da cobertura vegetal, das quantidades de água e ar inicialmente presentes no interior do solo (teor de umidade). Características que intervêm diretamente na infiltração da água no solo são: a umidade do solo, a permeabilidade do solo (alterada pelos elementos como: cobertura vegetal, a compactação do solo, formação de crosta na superfície do solo), a temperatura do solo e a profundidade da camada impermeável do solo. Outro fator importante que acontece durante ou após a infiltração da água no solo é a redistribuição da mesma.

O processo de redistribuição consiste na dinâmica da água no solo durante e em seguida ao processo de infiltração, quando se verifica contínuo movimento da água em decorrência de gradientes de potencial gravitacional e matricial da água no solo. É um processo complexo, uma vez que o conteúdo de água tende a reduzir-se nas zonas inicialmente mais úmidas e a aumentar nas zonas inicialmente mais secas. Esse processo é sensivelmente afetado pela absorção de água pelas raízes, o que torna a dinâmica de água ainda mais complexa (ALBUQUERQUE & DURÃES, 2008). O processo da redistribuição ou drenagem interna tem início quando cessa a infiltração da água de chuva ou irrigação. Portanto, o tempo final da infiltração é o tempo zero da redistribuição. No início desse processo, a força gravitacional é a principal responsável pelas alterações ocorrentes, e a umidade nas proximidades da superfície do solo é a que mais rapidamente decrescerá, se o solo apresentar boas condições para a drenagem livre. Tanto a taxa de fluxo descendente quanto a umidade serão progressivamente diminuídas com o tempo, até quando essas variações se tornarem tão pequenas quanto desprezíveis.

O conhecimento do processo de distribuição de água no solo é útil no dimensionamento do projeto e no manejo da irrigação localizada possibilitando a determinação de critérios de projeto, como área molhada dimensões do bulbo molhado,

eficiência dos sistemas e posicionamento de sensores de conteúdo de água e do potencial matricial.

### 3.3 SISTEMAS DE IRRIGAÇÃO

A irrigação tornou-se essencial em algumas regiões do mundo para a produção agrícola, onde os índices de precipitação em tais regiões são insuficientes para a adequada produção agrícola. Tais características climáticas destes locais exigem que para obter produção agrícola é necessário lançar mão das técnicas da irrigação.

Dentre os sistemas de irrigação existentes, destacam-se a irrigação por aspersão convencional, microaspersão, autopropelido, pivô-central, sulco, inundação e o gotejamento. É importante destacar que não existe um método melhor que o outro em relação à fisiologia da planta, segundo Faria & Rezende (1997), porém eles diferem na sua adaptabilidade em relação às condições locais de solo, topografia, clima, cultura, qualidade de água, fatores econômicos e determinadas influências externas e agronômicas, conforme Oliveira *et al.* (2010).

Os métodos por microaspersão e gotejamento, classificados como irrigação localizada, se adequam a várias culturas, como plantações de: café, mangueira, uva, acerola, hortaliças, entre outras, e segundo estudos apresentam algumas vantagens, como a economia de água, pois possibilita a adequada aplicação da quantidade de água necessária para a planta, permitindo também adicionar a fertilização. Nos métodos de irrigação localizada, ou de microirrigação, a água é aplicada apenas na área adjacente às plantas. Empregam-se emissores instalados na linha de irrigação ou em um prolongamento da linha, cuja vazão pode variar de 0,5 L h<sup>-1</sup> a 120 L h<sup>-1</sup>. No sistema de gotejamento, a água é aplicada com baixas vazões (0,5 L h<sup>-1</sup> a 10 L h<sup>-1</sup>), de forma pontual na superfície do solo, (ALBUQUERQUE & DURÃES, 2008).

A irrigação por gotejamento superficial e subsuperficial tem aumentado a produtividade em cafeeiros (VICENTE *et al.*, 2003). É inerente ao gotejamento a formação no perfil do solo de molhamento mais desuniforme quando comparado à aspersão (ZUR, 1996). Porém, quando há sobreposição de bulbos, a umidade do solo na camada de 0 a 20 cm de profundidade tem maior coeficiente de uniformidade, sem sobreposição, isto ocorre entre 20 e 40 cm de profundidade (SOUZA, 2002). O espaçamento entre emissores, juntamente com a

profundidade de instalação, proporcionam diferentes condições de molhamento do solo, segundo Barreto *et al.* (2008).

Para tanto, é necessário conhecer as características do solo e irrigar com a quantidade de água adequada, fazendo com que a água cumpra o seu papel na cultura, retribuindo em produção agrícola. É necessário escolher e usar o método adequado de irrigação. Para isso o processo de seleção requer análise detalhada das condições apresentadas (clima, cultura, solo e topografia), em virtude da exigência de cada tipo de irrigação (ALBUQUERQUE & DURÃES, 2008). Ainda descrevem que a decisão de irrigar ou não, deve levar em consideração diversos fatores, entre os quais a quantidade e a distribuição da chuva, o efeito da irrigação na produção, a necessidade de água das culturas, a qualidade e a disponibilidade de água da fonte, além dos óbvios aspectos econômicos.

Conhecer o movimento que a água realiza no solo é importante para a escolha correta do sistema de irrigação a ser usado. Maia (2005) descreve que na última década verificou-se avanço no desenvolvimento de equipamentos, no desenvolvimento e no manejo da irrigação localizada. Isto se deveu principalmente ao melhor entendimento do movimento da água no solo quando se utiliza o ponto de emissão de água na superfície.

### 3.3.1 Irrigação por gotejamento

O uso da irrigação por gotejamento, figura 5, vem recebendo destaque para várias culturas agrícolas, pois apresenta algumas vantagens importantes como a economia de água, ou seja, consegue-se aplicar a quantidade de água necessária logicamente com o uso de instrumentos de controle da irrigação. A água é aplicada de forma pontual na superfície do solo. O emissor é o gotejador que é instalado sobre a linha, na linha ou podem ser manufaturados na parede do tubo. São usados basicamente dois tipos de gotejadores, os de labirinto e os de compensação de pressão (ALBUQUERQUE & DURÃES, 2008), este último tem sido crescentemente utilizado, sobretudo pela sua maior eficiência no uso da água. A água é aplicada ao solo em pequenas quantidades, embora com alta frequência, diretamente sobre a região radicular, mantendo o conteúdo de água do solo, nessa região, próximo à capacidade de campo (SOUZA & MATSURA, 2004).



Figura 5 - Irrigação por gotejamento  
Fonte: Frizzone (2013)

O uso da irrigação por gotejamento vem aumentando em culturas que são cultivadas com determinadas distâncias entre as plantas. Estudos feitos por Maia (2005) mostram que durante a irrigação por gotejamento, usando um ponto fonte localizado na superfície do solo, o fluxo de água é dividido em partes, em fluxo horizontal e vertical. As características físico-hídricas de cada tipo de solo são determinantes na dinâmica do movimento que a água assume neste solo. Estas características determinam a quantidade de água que a matriz deste solo consegue reter. Sendo que esta capacidade de retenção de água é composta por relações complexas e difíceis de serem determinadas. Muitos estudos e pesquisas foram e são realizadas para determinar com maior certeza a dinâmica que a água assume nas diferentes classes texturais de solo. Para tanto há a necessidade de se valer de modelos matemáticos que procuram estimar esta dinâmica, permitindo construir e ajustar a curva característica de retenção de água do solo em questão.

### 3.3.2 Irrigação por microaspersão

Trata-se de um sistema de irrigação localizada onde a água é aspergida através de microaspersores (miniaturas de aspersores) próximo ao sistema radicular das plantas. É largamente utilizado em fruticultura, irrigação em casas de vegetação, jardins etc. Se adapta a diversas culturas e a qualquer tipo de condições topográficas. Neste sistema a água é aplicada

por emissores rotativos ou fixos, molhando um diâmetro de 2 m a 6 m. O sistema de irrigação por microaspersão geralmente tem custo de manutenção mais baixo se comparado com o sistema de gotejamento e principalmente nos de gotejamento subsuperficial (ALBUQUERQUE & DURÃES, 2008). Os sistemas de irrigação localizada por microaspersão, figura 6, além de permitirem total automação, otimizam o uso de fertilizantes, via fertirrigação, permitindo o parcelamento das dosagens de acordo com as necessidades nutricionais de cada período da cultura, evitando perdas e diminuindo o trânsito de máquinas e pessoas nas lavouras.



Figura 6 - Irrigação por aspersão  
Fonte: Frizone (2013)

#### 3.4 BULBO MOLHADO (BULBO ÚMIDO)

A água aplicada sobre a superfície do solo por irrigação localizada se infiltra e se distribui vertical e transversalmente resultando um volume molhado em forma de bulbo ao redor da planta. O bulbo molhado formado no solo é afetado pela umidade inicial do solo, pela vazão do emissor, pela frequência e duração da irrigação, pelo movimento capilar da água e pela capacidade de retenção de água pelo solo. O emissor cria padrões de molhamento no solo que determinam o tamanho e forma da zona radicular da cultura (EVAN *et al.*, 2007).

### 3.4.1 Características

Informações sobre a geometria do bulbo molhado são importantes para o dimensionamento e manejo da irrigação localizada, principalmente para estimar o volume de solo molhado, a vazão do emissor e o tempo de aplicação de água. O conhecimento da forma e do tamanho do volume molhado do solo é um aspecto importante a considerar para otimizar o uso da água, evitando percolação profunda. A avaliação da forma e do tamanho do volume molhado permite definir aspectos importantes, tais como lâmina e frequência de irrigação, número de gotejadores e dimensionamento hidráulico (COOK *et al.*, 2006), como também no manejo da irrigação (HAO *et al.*, 2007). As dimensões e as características de formação do bulbo úmido são valiosas para dimensionar corretamente o sistema de irrigação localizada. O bulbo molhado assume características próprias que estão relacionadas com as características do solo que está sendo irrigado.

A dimensão do diâmetro superficial do bulbo molhado ( $D_s$ ) possibilita que os seus valores sejam correlacionados com as outras dimensões deste bulbo, como diâmetro máximo ( $D_{max}$ ), a profundidade máxima ( $Z_{max}$ ), a profundidade onde ocorre o diâmetro máximo ( $Z_{D_{max}}$ ) e também com a vazão do emissor, como também o tempo de aplicação de água. A figura 7 mostra as dimensões do bulbo molhado descritas acima.

A relação entre  $D_{max}$ ,  $Z_{max}$ ,  $D_s$  e  $Z_{D_{max}}$  em função da vazão do emissor e do tempo de aplicação de água é importante para o dimensionamento e manejo da irrigação. Por exemplo, se usar emissores de baixa vazão, o bulbo molhado pode apresentar a profundidade maior que a largura, implicando que pode não haver superposição, porém com vantagem da menor área de exposição para a evaporação da água do solo, contrário do que acontece quando se usa gotejadores de maior vazão (MAIA, 2005). Para determinadas culturas a aplicação da irrigação individual por planta apresenta eficiência maior se comparado com a irrigação por pivô central, revertendo em economia de água e fertirrigação durante a aplicação da irrigação.



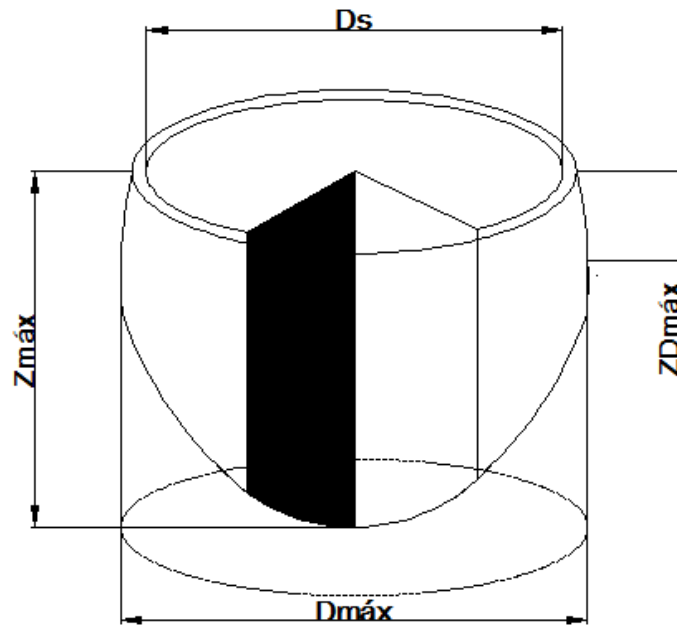


Figura 7 - Dimensões do bulbo molhado inscrito em um cilindro  
 Fonte: Maia (2005)

Um modelo semi-empírico foi desenvolvido por Schwartzman & Zur (1986) para determinar o diâmetro máximo do bulbo em função da profundidade máxima, vazão do emissor e de condutividade hidráulica saturada do solo ( $K_s$ ) para fluxo cilíndrico em três dimensões, porém este modelo é limitado pela necessidade das dimensões do diâmetro ou da profundidade máxima em condições de campo (MAIA, 2005). Resultados obtidos por Schwartzmann & Zur (1986), descrito por Maia (2005), fazendo simulações para que não houvesse sobreposição do bulbo molhado, observaram pela análise de sensibilidade que, duplicando a vazão do emissor resulta no aumento de 10% no diâmetro e um decréscimo de 30% na profundidade molhada e que o efeito na mudança na vazão do emissor é mais pronunciado em solos argilosos que em solos arenosos.

Resultados empíricos e simulados da distribuição da água no solo sob irrigação localizada enfatizam duas características práticas: a) quando o solo seco é irrigado, ocorre a formação do volume de solo molhado onde a frente de molhamento separa o solo seco do solo molhado; b) a maior fração do volume de solo úmido tem um relativo teor uniforme de água. Estes dois fatores são usados na fertirrigação onde a frente de molhamento define o volume do solo, podendo ser mantidos próximo do ótimo contribuindo para a maior eficiência na aplicação de fertilizante, (MAIA, 2005).

### 3.4.2 Fatores que interferem na formação do bulbo molhado

Os fatores que interferem na formação do bulbo molhado durante a irrigação são segundo Maia (2005). o tipo de solo e sua estratificação; a vazão do emissor; o tempo de irrigação; a estrutura do solo; o sistema de irrigação; a altura do emissor em relação ao solo; a umidade inicial do solo e a presença de concreções e cascalho. Descreve em detalhe que no caso dos solos argilosos o bulbo molhado tem uma dimensão horizontal maior, devido a menor taxa de infiltração, explicado pela maior influência da capilaridade sobre a gravidade.

Em solo com camadas estratificadas as camadas com diferentes porosidades afetam o fluxo e a retenção de água, interferindo na forma do bulbo molhado. Para os fatores, diferentes vazões do emissor e para o mesmo tempo de irrigação, quando menores vazões forem aplicadas, tendem a formar bulbos molhados mais profundos e com menor raio superficial e para mesma vazão dos emissores, quanto maior o tempo de irrigação, maior o raio superficial. A quantidade que infiltra nestas direções depende da taxa de infiltração e das propriedades hidráulicas do solo que controlam o processo de infiltração, formando uma zona saturada, cujo diâmetro aumenta com o tempo de irrigação até se estabilizar, sendo maior em solos argilosos do que nos solos arenosos. A aplicação da água em um ponto-fonte superficial produz uma área circular (ou quase circular) saturada, denominada de charco (figura 8). Isto acontece quando a vazão do emissor é maior que a taxa de infiltração da água no solo. No início da aplicação da água, a região saturada aumenta até um tamanho constante com tempo de irrigação.



Figura 8 - Formação do bulbo úmido na superfície do solo (charco)

## **4 MATERIAL E MÉTODOS**

### **4.1 LOCAL DO EXPERIMENTO**

O lisímetro foi projetado, desenvolvido e construído no laboratório de Processos Mecânicos – J 25, da UTFPR – Universidade Tecnológica do Paraná, Campus Medianeira, situado à Avenida Brasil, 4232, Parque Independência, Medianeira, Paraná. Os ensaios da dinâmica e infiltração de água no solo também foram realizados neste local.

### **4.2 PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS**

#### **4.2.1 Elaboração do projeto**

A primeira etapa consistiu na elaboração do projeto do lisímetro, adequando-o a natureza dos ensaios a serem conduzidos. Em linha geral o lisímetro é um equipamento constituído de dois reservatórios feitos em aço inoxidável, chamados aqui de caixas porta amostra, nos quais foram realizados os ensaios com solos saturados e não saturados. Sendo a parede frontal da caixa porta amostra feita de vidro, que permite a visualização da frente de molhamento e a formação do bulbo úmido nos ensaios com solos não saturados.

#### **4.2.2 Desenvolvimento do projeto**

O desenvolvimento do lisímetro iniciou-se com a elaboração do projeto, conforme mostra o desenho em perspectiva da figura 9. Suas dimensões principais são: altura de 280 cm, largura de 100 cm e comprimento de 118 cm. As partes principais que compõe o lisímetro são: estrutura principal, caixas porta amostra, tanques de resíduo e água, reservatório de água, sistema de fornecimento de água, tubulações para irrigação (linhas 1 e 2) e tubulação hidráulica para saturação.

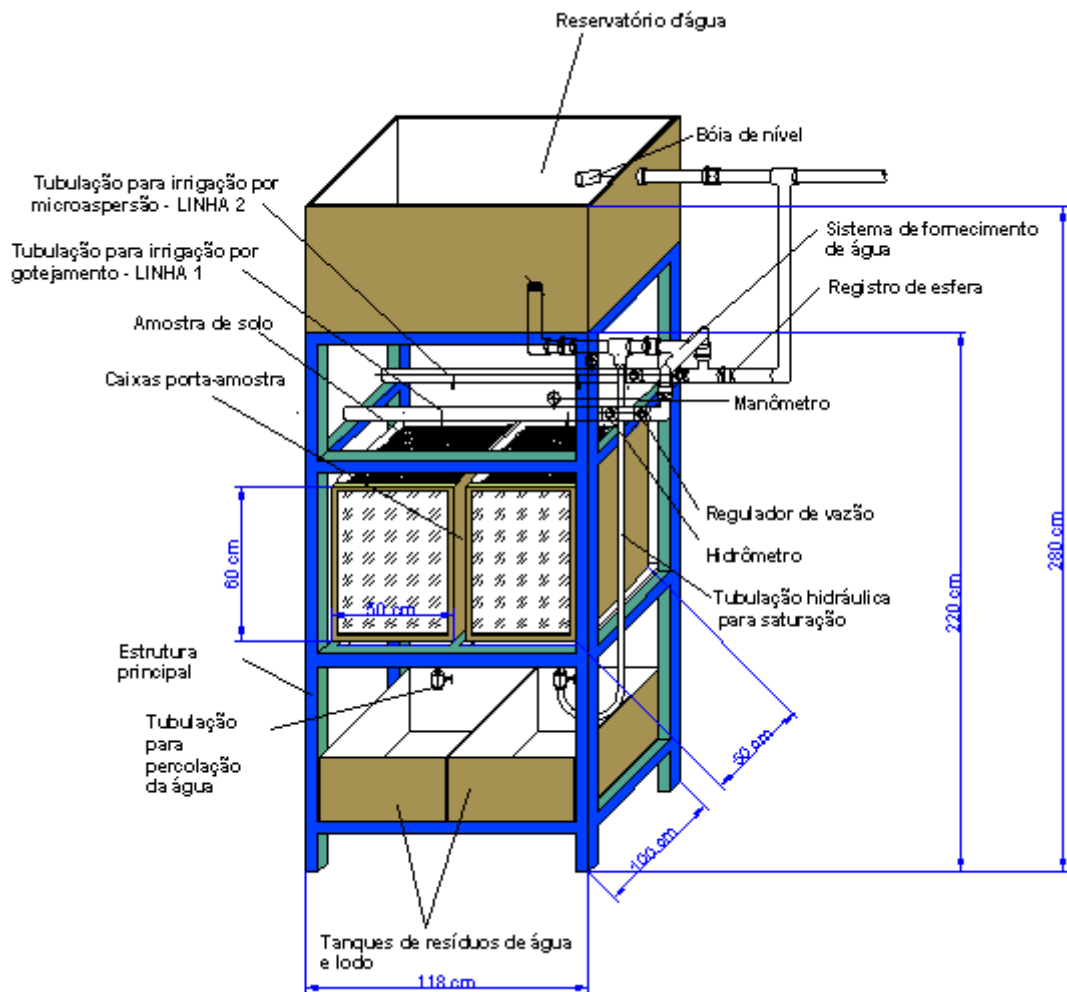


Figura 9 - Desenho em perspectiva do lisímetro para ensaios da dinâmica da água no solo

O lisímetro é constituído de seis partes principais:

- a) Estrutura principal;
- b) Caixas porta amostra;
- c) Sistema de fornecimento e tubulações de abastecimento de água;
- d) Tubulação hidráulica para saturar o solo;
- e) Sistema de drenagem para coleta da água de percolação e tanques coletores de resíduos e água;
- f) Sistema de medição com uso de tensiômetros e piezômetros.

a) A construção do lisímetro iniciou-se pela estrutura principal do equipamento (figura 10).



Figura 10 - Estrutura principal

A estrutura foi feita de tubo mecânico de aço carbono SAE 1020, de perfil quadrado, com 40 mm de largura e 1,2 mm de espessura da parede. As peças que constituem a estrutura foram cortadas através do uso do processo de corte por poliacorte. Em seguida as peças foram ponteadas e soldadas, usando o processo de soldagem MAG (metal gás ativo), com adição de arame eletrodo de aço cobreado.

b) As caixas porta amostra de solo foram projetadas e construídas de forma a conduzir os testes com os dois sistemas de irrigação, na condição de saturação e não saturação. As duas caixas foram construídas com 60 cm de altura, com 50 cm de largura e com 50 cm de comprimento, figura 11, feitas com chapa de aço inoxidável AISI 304.

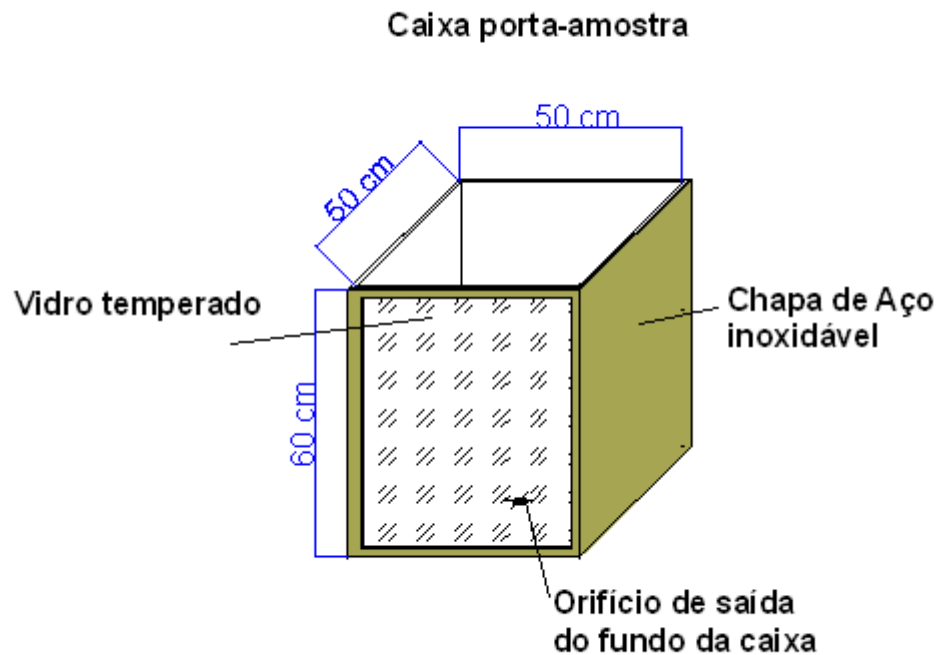


Figura 11 - Detalhe dimensional das caixas porta-amostra do lisímetro

As caixas porta amostra de solo possuem a parede frontal de vidro, permitindo a visualização da formação do bulbo molhado durante a irrigação na amostra de solo não saturado, mostrando assim a formação do bulbo úmido na superfície do solo e a frente de molhamento na parede frontal.

Na face traseira das caixas foram feitos orifícios para encaixar os tensiômetros e piezômetros. As caixas porta amostra possuem no fundo das mesmas um orifício para a saída da água percolada através da amostra de solo ensaiada, com diâmetro de 1,6 cm.

c) A tubulação de abastecimento de água, figura 12, abastece o lisímetro com água proveniente da rede local. A tubulação conectada na rede local de água, distribuí a água para duas derivações, sendo uma para abastecer o reservatório e a outra para abastecer as linhas de irrigação 1 e 2, diretamente da rede local de água.



Figura 12 - Tubulações de abastecimento de água do lisímetro

Para conduzir os testes com os sistemas de irrigação por microaspersão e gotejamento foi instalado um sistema de fornecimento de água para condução da água até as linhas de irrigação. Estas linhas foram feitas com tubo de aço galvanizado, com diâmetro de 1 ¼ de polegada, onde uma extremidade da linha foi conectada à tubulação do sistema de fornecimento de água e a outra extremidade foi fechada por tampa roscada. Uma linha foi preparada com dois furos com rosca M12, para a instalação dos gotejadores, modelo GA-4, Agrojet. Na outra linha foram instalados os microaspersores do tipo nebulizador 7110 Naandanjain, através de dois furos feitos na tubulação, com rosca 3/8 de polegada (figura 13).



Figura 13 – Registros de esfera e gaveta do lisímetro.

O sistema de fornecimento de água é constituído pelos registros de esfera (1, 2, 3, 4, 5, 6 e 7); registros de gaveta (1 e 2), para o controle manual de vazão e pressão da água; um hidrômetro e um manômetro para cada linha de irrigação. O registro 1 permite abastecer o reservatório com água vindo da rede local de abastecimento. Para saturar a amostra de solo abre-se os registros 2 e 3, aplicando a mesma carga hidráulica, em ensaios a serem realizados em solos saturados. O registro 4 permite a passagem da água do reservatório para as linhas de irrigação 1 e 2. Os registros 5 e 6 servem para selecionar a linha de irrigação que receberá o fluxo de água. O registro 7 por sua vez permite abastecer as linhas de irrigação com água proveniente diretamente da rede local de abastecimento. Os registros de gaveta 1 e 2 servem para regular a vazão de água que abastece as linhas de irrigação 1 e 2.

d) A tubulação hidráulica para saturação da amostra de solo, em destaque na figura 14, tem função importante na realização dos ensaios em solo saturado. Esta tubulação conduz a água do reservatório até a caixa porta amostra número 2. O sistema de saturação foi planejado de tal forma que a amostra de solo seja saturada de forma ascendente, objetivando a eliminação do ar acondicionado nos poros do solo.





Figura 14 - Tubulação hidráulica de saturação

e) O sistema de drenagem para coleta da água de percolação é composto por dois tanques coletores de resíduos e água. Os tanques foram construídos com chapa de aço inoxidável 304, com espessura de 1,2 mm e as bordas superiores dos mesmos foram reforçadas com cantoneira de abas iguais de aço carbono SAE 1020.

f) Os sistemas de medição escolhidos para medir os potenciais matriciais e de pressão no lisímetro durante os ensaios são compostos por tensiômetros e piezômetros. O sistema de medição para os ensaios em solos não saturados é composto por 30 tensiômetros, do tipo vácuo-tensiômetro analógico, MOD WS-76 (P10). Possui no seu vacuômetro escala de medição quantitativa de 0 a 100 kPa, juntamente com a escala qualitativa, composta de 4 zonas de níveis de umidade. A caixa porta amostra número 1 está dotada com trinta orifícios situados na face traseira da caixa, para o encaixe dos tensiômetros. Os trinta orifícios estão distribuídos em 6 linhas e 5 colunas, distantes 10 cm um do outro, com 5 cm de afastamento das bordas laterais da caixa (figura15).

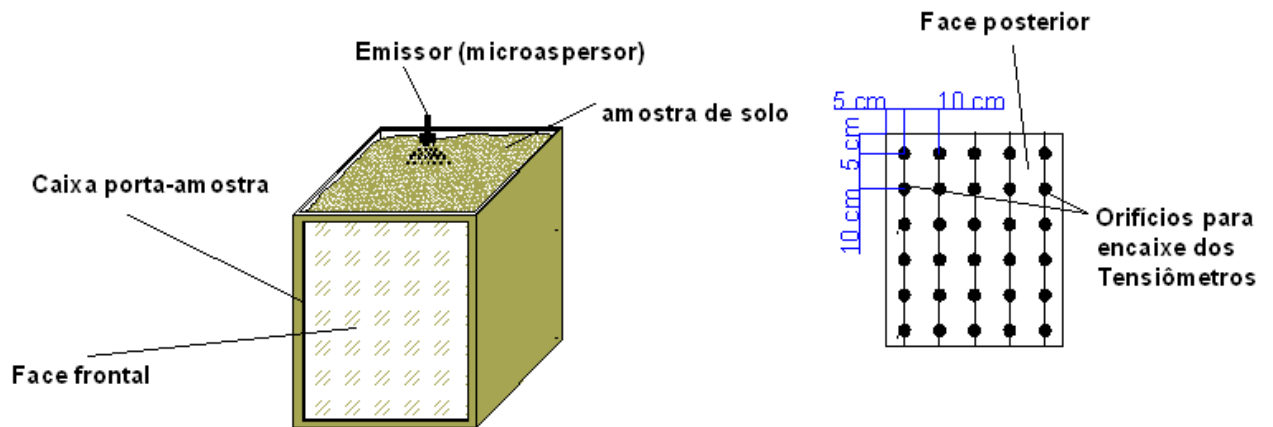


Figura 15 - Disposição dos tensiômetros na face posterior da caixa porta amostra

A cápsula porosa do tensiômetro fica alojada com 10 cm de profundidade no solo, medindo-se a partir da face posterior da caixa. Os tensiômetros são encaixados nas extensões tubulares soldadas na face traseira da caixa, com inclinação de 20 graus, para o correto funcionamento dos instrumentos (figura 16). Os tensiômetro tem a função de fazer a medição do potencial matricial em cada ponto, nos intervalos de tempo do ensaio.



Figura 16 - Sistema de medição com piezômetros e tensiômetros

O sistema de medição dos potenciais de pressão instalado na caixa porta amostra número 2 é constituído por 10 piezômetros, montados sobre uma chapa de aço inoxidável AISI 304. Sobre esta chapa também foi fixada a escala de medição, com graduação de 0 a 66 cm. A caixa porta amostra possui 10 orifícios na sua parede posterior, com pequenas extensões feitas de tubo metálico, para permitir a conexão da mangueira transparente dos piezômetros. Os orifícios estão distribuídos em duas colunas, com 5 orifícios em cada coluna. As colunas estão distantes 30 cm uma da outra, afastadas 10 cm das paredes laterais da caixa (figura 17).

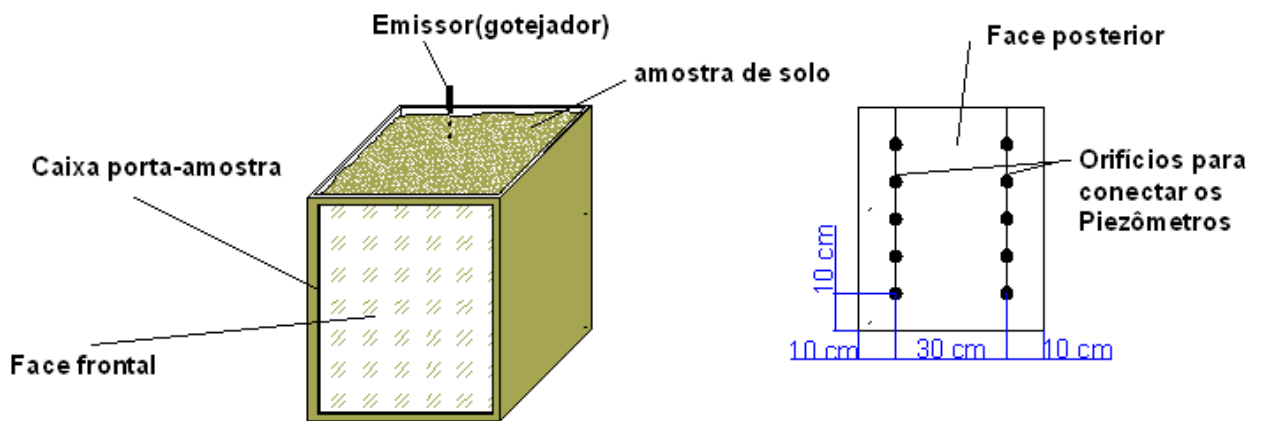


Figura 17 - Disposição dos piezômetros na face posterior da caixa porta amostra

A mangueira transparente é o elemento de ligação entre o tubo do piezômetro e o orifício de saída da caixa porta amostra. Para a medição dos potenciais de pressão em cada ponto de medição da amostra de solo, coloca-se o líquido auxiliar de medição na mangueira, composto de água e corante, que melhorar a visualização da medição destes potenciais.

### 4.3 CONDUZINDO OS TESTES

#### 4.3.1 Ensaio em condições de solo não saturado

Uma vez montado o sistema de medição por tensiômetros e o solo semideformado colocado no interior da caixa, pode-se iniciar a condução dos testes.

Para a realização dos testes seguiu-se as seguintes etapas:

- a) acionar o sistema de irrigação (microaspersão e gotejamento);
- b) marcar o tempo de início da irrigação;
- c) observar visualmente na parte superior do solo a formação do bulbo molhado e através do vidro temperado transparente da caixa porta amostra o avanço da frente molhada e a distribuição do bulbo molhado. Anotar o tempo do avanço e as dimensões do bulbo molhado;
- d) efetuar a leitura dos tensiômetros. De posse da curva de retenção da água do solo submetido ao ensaio, converter os potenciais matriciais determinados em volume de água;
- e) Anotar o volume total de água aplicada ao solo e o volume de água percolada e armazenada no coletor localizado na parte inferior das caixas porta-amostra, e;
- f) registrar os dados em planilha.

#### 4.3.2 Ensaio em condições de saturação

Uma vez o solo seco semideformado colocado no interior da caixa de amostra, procede-se a saturação do mesmo, de forma lenta, através da tubulação hidráulica de saturação, com água vinda do reservatório, saturando o mesmo de forma vertical ascendente, diminuindo assim a possibilidade de formação de bolhas de ar nos poros e assim obtendo uma saturação homogênea.

Uma vez montado o sistema de medição por piezômetros procedeu-se a condução dos testes, seguindo-se os passos abaixo relacionados:

- a) acionar o sistema de irrigação (microaspersão);
- b) marcar os tempos de irrigação;
- c) proceder a leitura dos piezômetros;
- d) medir o volume total de água aplicada em cada caixa porta amostra;
- e) medir o volume percolado na parte inferior da caixa porta amostra;

f) registrar os dados em planilha.

#### 4.4 TIPOS DE FLUXO, IRRIGAÇÃO E SOLOS USADOS

Os tratamentos ou situações sob as quais o lisímetro foi testado foram aplicadas:

- Duas condições de fluxo: Solo Saturado e Não Saturado;
- Duas classes texturais de solo: Arenoso e Argiloso;
- Dois sistemas de irrigação: Gotejamento e Microaspersão;
- Três vazões dos sistemas de irrigação.

Para realização dos testes com o lisímetro foram utilizadas duas classes texturais de solo, argiloso e arenoso, para a realização dos ensaios. As amostras de solo da classe textural do tipo argiloso foram coletadas em área adjacente ao laboratório J-25, pertencente a Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Campus Medianeira, situada na Av. Brasil, 4232, Parque Independência, localizado na cidade de Medianeira, que faz parte da região oeste do estado do Paraná, cuja localização geográfica é  $25^{\circ} 17' 42''$  S,  $54^{\circ} 5' 38''$  W. As classes texturais das amostras de solo usadas nos ensaios foram determinadas no laboratório de solos da UFCG. O primeiro tipo de solo submetido ao teste de análise granulométrica para classificação textural, determinou que é do tipo franco argiloso, onde a distribuição dos componentes texturais é: argila 33,99 %, silte 38,94 % e areia 27,07 %.

O segundo tipo de solo usado nos ensaios é da classe textural arenosa. As amostras foram coletadas em área localizada à 2 Km da cidade de Altônia, localizada na região noroeste do estado do Paraná, cuja localização geográfica é  $23^{\circ} 52' 26''$  S,  $53^{\circ} 54' 7''$  W. No teste de análise granulométrica a classificação textural do solo é do tipo Areia, onde a distribuição dos componentes texturais é: areia 94%, argila 04%, silte 02%.

**Quadro 1** - Vazões de água aplicadas no solo para cada tratamento.

Condições de fluxo	Classe textural do solo	Sistema de irrigação	Vazões aplicadas (L h <sup>-1</sup> )
Saturado	Argiloso	Microaspersão	20,0
	Arenoso		25,7
Não Saturado	Argiloso	Gotejamento	2,9 e 4,9
	Arenoso		1,9 e 5,6
	Argiloso	Microaspersão	7,7 e 27,3
	Arenoso		10,6 e 25,7

#### 4.5 DETERMINAÇÕES

Em cada classe textural de solo, para cada vazão dos sistemas de irrigação utilizados foram feitas as seguintes determinações.

Em solos não saturados:

- a) Potenciais matriciais;
- b) Conteúdo de água;
- c) Fluxo;
- d) Avanço da frente molhada;
- e) Características do bulbo molhado.

Em solos saturados:

- a) Potenciais de pressão;
- b) Fluxo;
- c) Coeficiente de condutividade hidráulica.

## 5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 5.1 CONSTRUÇÃO DO LISÍMETRO

A construção de equipamentos para laboratório e para ensaios de campo tem contribuído grandemente para a realização dos estudos e pesquisas para compreender e determinar o manejo adequado da irrigação nas culturas. A construção do lisímetro de laboratório veio para contribuir nestes estudos e pesquisas, servindo como ferramenta auxiliar demonstrativa para uso em laboratório, permitindo compreender melhor a dinâmica que a água assume nos solos, aplicando sistemas localizados de irrigação por microaspersão e gotejamento. Equipamento que oferece possibilidades para visualizar o movimento da água no solo através da parede frontal de vidro das caixas porta amostra, permitindo visualizar passo-a-passo o deslocamento da água no perfil do solo, à medida que o trabalho de pesquisa está sendo realizado. Poderá ser usado como material didático ou de pesquisa com diversas possibilidades, permitindo a instalação de diferentes instrumentos de medição nas amostras de solos a serem estudadas. Permitindo também com pequenas adaptações a obtenção da curva de retenção de água pelo solo.

A figura 18 apresenta o lisímetro com as seis partes principais descritas no Capítulo anterior: Estrutura principal, Caixas porta amostra, Sistema de fornecimento e tubulações de abastecimento de água, Tubulação hidráulica para saturar o solo, Sistema de drenagem para coleta da água de percolação e tanques coletores de resíduos e água e Sistema de medição com uso de tensiômetros e piezômetros.



Figura 18 – Lisímetro desenvolvido

O lisímetro foi equipado com dois sistemas de medição para realização de ensaios em solos não saturados e saturados. Sendo o sistema de medição da caixa porta amostra 2 (figura 19A), composto por 10 piezômetros para medição dos potenciais de pressão em solo saturado e a caixa porta amostra 1 (figura 19B) com 30 tensiômetros para medir os potenciais matriciais no solo não saturado. Ambos os sistemas de medição são facilmente instalados e removidos conforme a necessidade, como por exemplo, para a colocação do solo na caixa porta amostra. Outra vantagem deste lisímetro é que as caixas porta amostra são móveis, permitindo que possam ser levadas para o campo, para acondicionar uma amostra de solo indeformada, inclusive transplantar uma cultura na caixa porta amostra e posteriormente levá-la ao laboratório, instalando-a no lisímetro e realizar os estudos da dinâmica da água em solo indeformado com a planta, permitindo a realização dos ensaios em condições mais próximas das condições reais de campo.



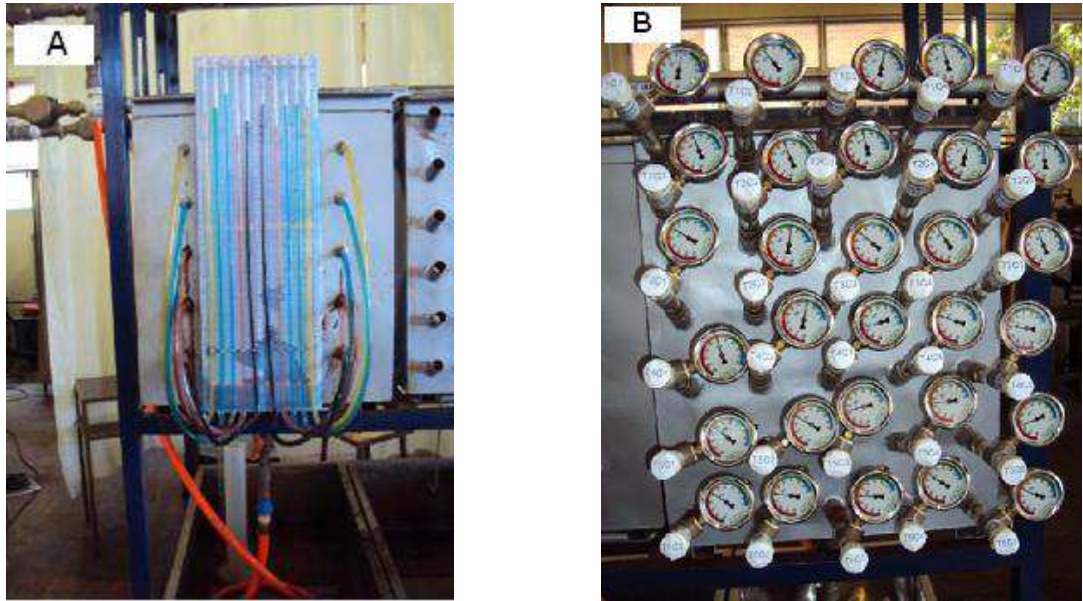


Figura 19 - Sistemas de medição, A) Sistema com piezômetros para medição dos potenciais de pressão e B) Sistema com tensiômetros para medição dos potenciais matriciais

O sistema de saturação foi elaborado de tal forma que a amostra de solo é saturada de forma ascendente, objetivando a eliminação de todo o ar acondicionado nos poros do solo.

O sistema de drenagem faz a coleta de resíduos sólidos do solo e água percolados durante o ensaio e ao mesmo tempo serve como tanque de retenção da água, diminuindo o derrame de água no ambiente do laboratório (figura 20).

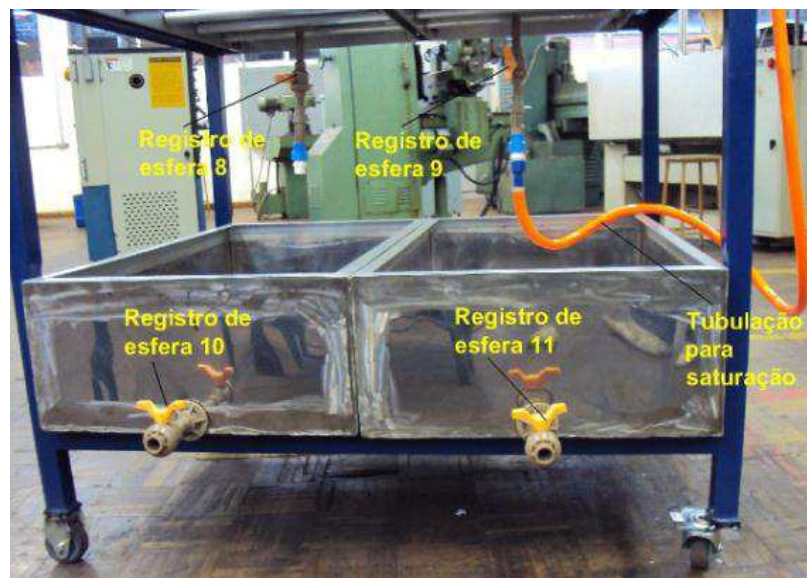


Figura 20 - Sistemas de saturação e de drenagem de água do solo

Os registros de esfera 8 e 9 permitem interromper a drenagem da água para as caixas de resíduos e água, proveniente das caixas porta amostra de solo, porém o registro 9 também tem a função de reter a água após a completa saturação do solo antes de iniciar efetivamente o ensaio, momento em que o mesmo é aberto para permitir a percolação da água. Os registros 10 e 11 servem para drenar a água das caixas de resíduos e água, durante a limpeza das mesmas.

## 5.2. RESULTADOS DOS ENSAIOS

### 5.2.1 Resultados dos ensaios em solo não saturado

A distribuição da água no solo durante os ensaios de irrigação pode ser visualizada e analisada através de gráficos dos perfis de distribuição do conteúdo de água do solo, elaborados através do programa Surfer Mapping System. Os potenciais matriciais, coletados, utilizando os tensiômetros, conforme descrito nos Materiais e Métodos, foram compilados e transformados em conteúdos de água (em volume) através da Curva de retenção de água do solo ajustada de acordo com o modelo de van Genuchten (1980), utilizando o programa computacional Soil Water Retention Curve – SWRC, versão 3.0 beta (DOURADO NETO *et al.*, 2001). As figuras 21 e 22 mostram as curvas de retenção ajustadas para o solo argiloso e arenoso, respectivamente.

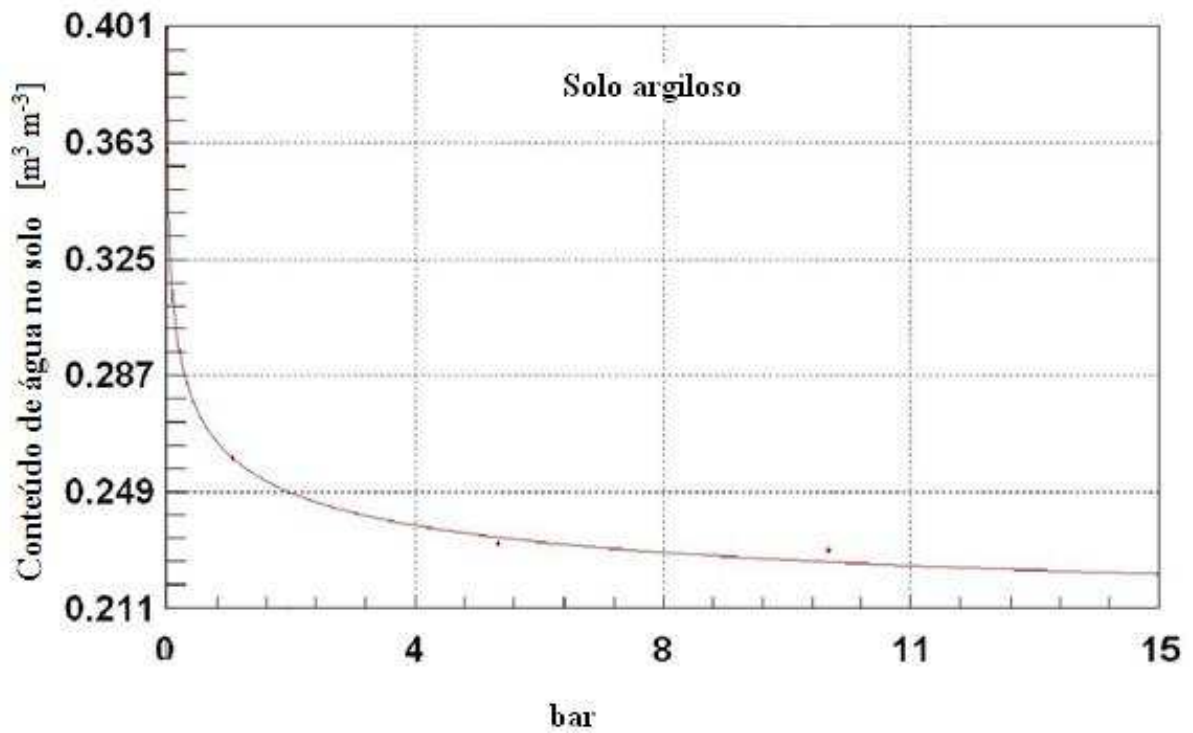


Figura 21 - Curva de retenção de água do solo argiloso ajustada segundo modelo van Genuchten (1980)

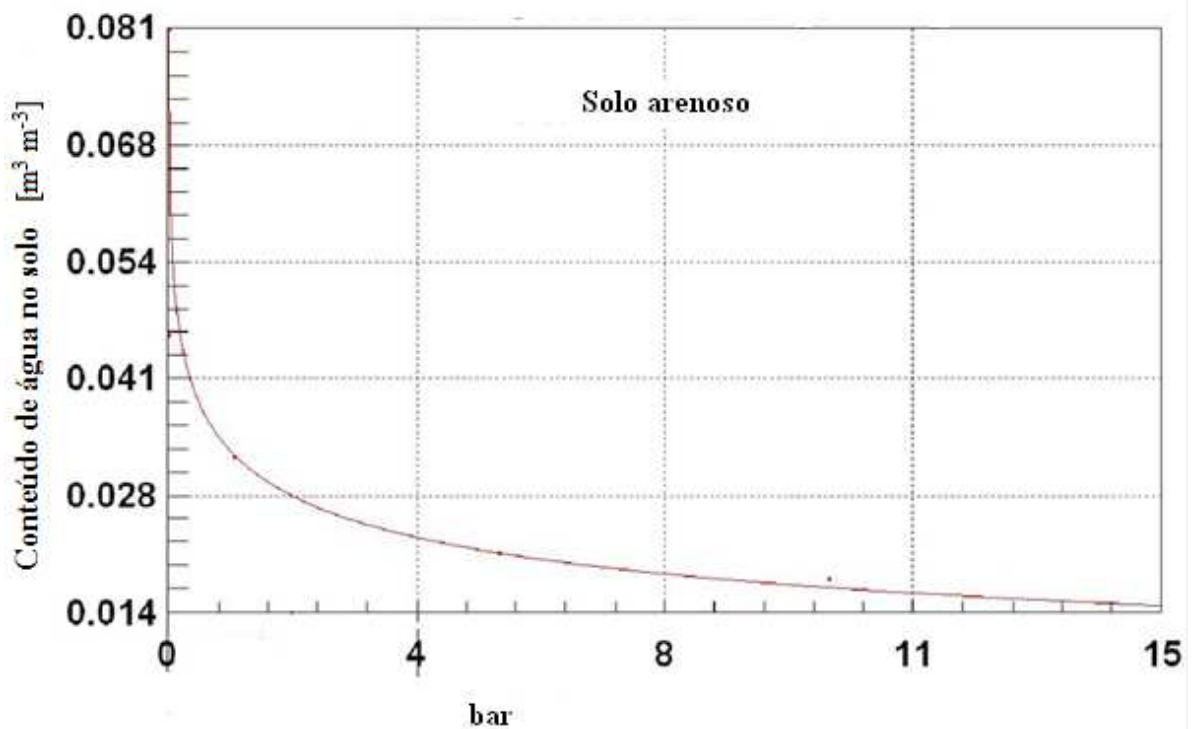


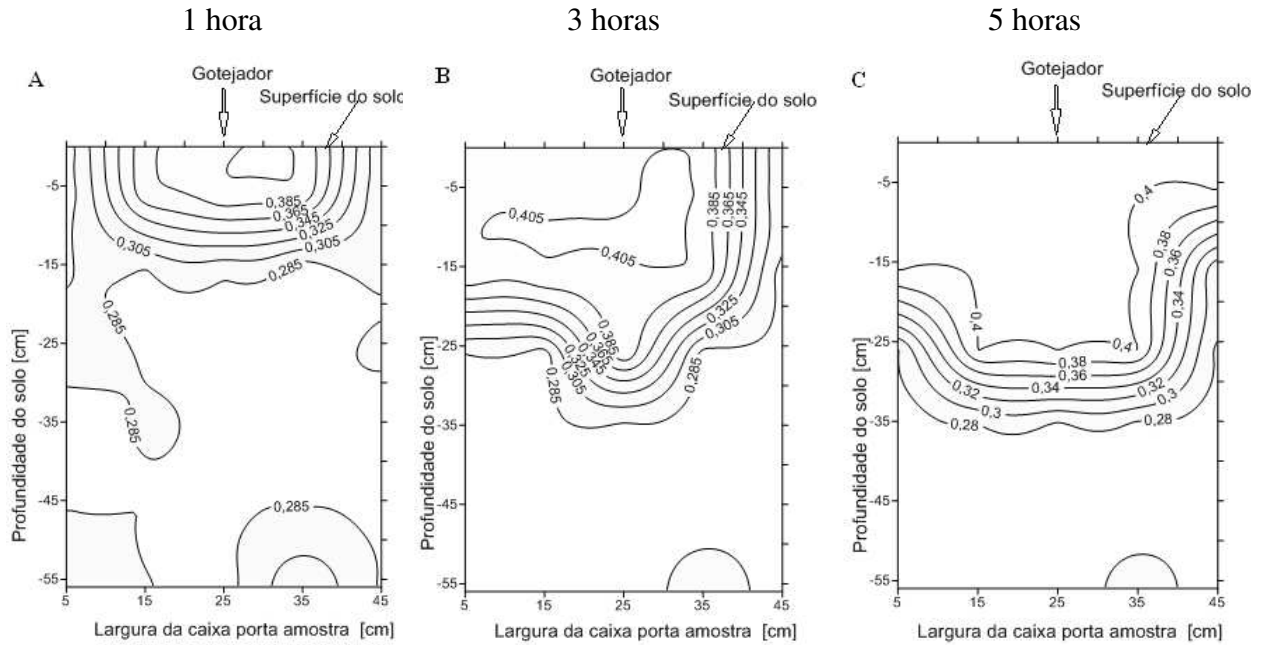
Figura 22 - Curva de retenção da água do solo arenoso ajustada segundo modelo van Genuchten (1980)

Através dos gráficos que mostram o perfil de distribuição da umidade do solo, pode-se visualizar a dinâmica da água no solo argiloso e arenoso. Desta forma o lisímetro serve como ferramenta didática demonstrativa, possibilitando observar as semelhanças e diferenças no comportamento da água nestes solos, em laboratório. Apresentando praticidade e comodidade para testes demonstrativos se comparado com testes feitos no campo, que requerem muito tempo de preparação e de execução. Vale lembrar que os ensaios realizados no campo necessitam do deslocamento dos equipamentos e pessoas para a área de campo, onde serão realizados os mesmos.

A figura 23 a seguir mostra a distribuição da água aplicada num solo argiloso pelo sistema de irrigação por gotejamento superficial em diferentes tempos de observação após o começo da irrigação (1, 3 e 5 horas) quando utilizadas vazões de 2,9 e 4,9 L h<sup>-1</sup>. Quando utilizada a vazão de 2,9 L h<sup>-1</sup> (figura 23A), após 1 hora de ensaio observou-se um armazenamento final de água de 0,30 m<sup>3</sup> m<sup>-3</sup> até 15 cm de profundidade, aumentando para 32 cm, após 3 horas de ensaio (figura 23B) e até os 35 cm após 5 horas de irrigação (figura 23C). Observa-se também que após 5 horas de irrigação a distribuição da água com a profundidade foi mais homogênea. Aplicando a vazão de 4,9 L h<sup>-1</sup>, observa-se a formação de uma área molhada com teor de umidade de 0,30 m<sup>3</sup> m<sup>-3</sup>, numa profundidade de aproximadamente 15 cm após 1 hora de irrigação (figura 23D) que com o passar do tempo foi aumentando para atingir 34 cm de profundidade 3 horas após o começo da irrigação (figura 23E) e 44 cm após 5 horas de ensaio (figura 23F). O aumento do armazenamento de água no solo (aumento do bulbo molhado) com o tempo é explicado pela maior oportunidade que esta tem para infiltrar-se, redistribuir-se no perfil do solo, fato corroborado por Brandão *et al.* (2006).

Indicava-se que com a vazão de 2,9 L h<sup>-1</sup> (figura 23A), após 5 horas de ensaio o bulbo molhado atingiu 35 cm de profundidade. Ao aumentar a vazão para 4,9 L h<sup>-1</sup> o armazenamento aumentou, atingindo a profundidade de 45 cm de profundidade na formação do bulbo. Assim, como esperado, quanto maior a vazão maior a percolação da água no solo. Estes resultados estão de acordo com aqueles encontrados por Levien *et al.* (2010) e Maia (2010) que também em condições de laboratório demonstraram haver uma relação positiva entre o armazenamento da água dentro do bulbo molhado e a vazão.

### Solo argiloso, Gotejamento, $2,9 \text{ L h}^{-1}$



### Solo argiloso, gotejamento, $4,9 \text{ L h}^{-1}$

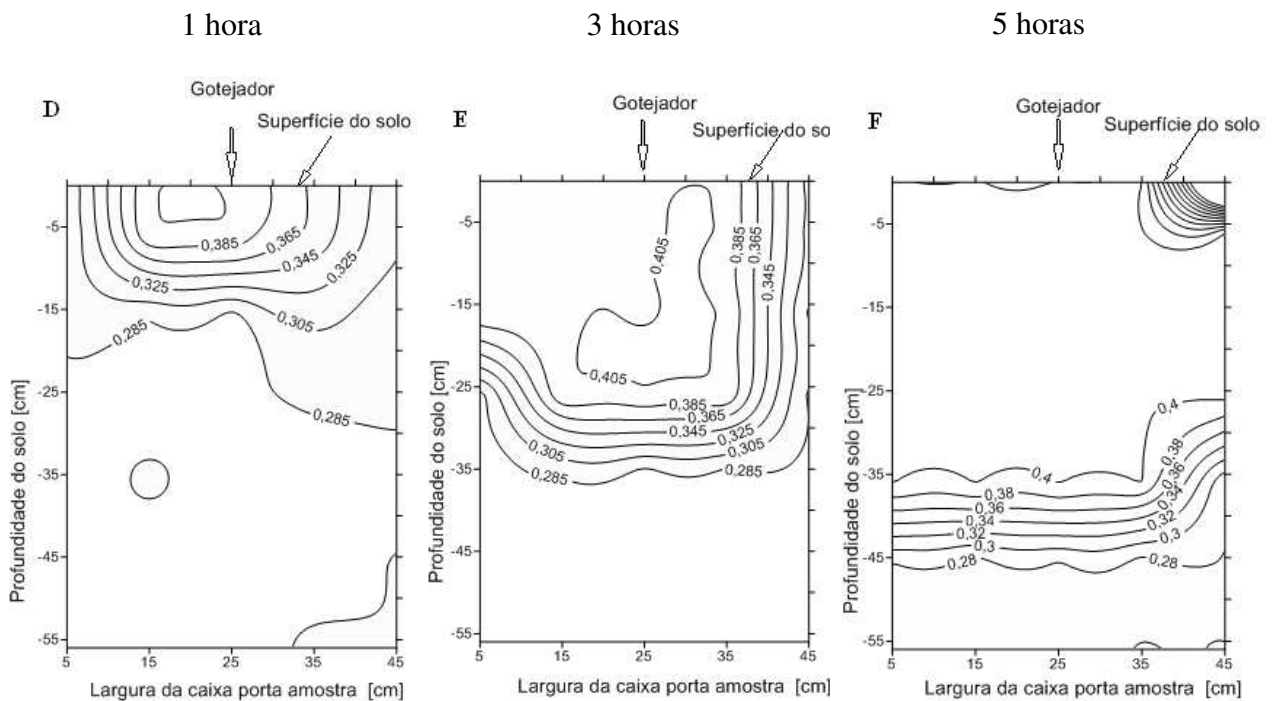


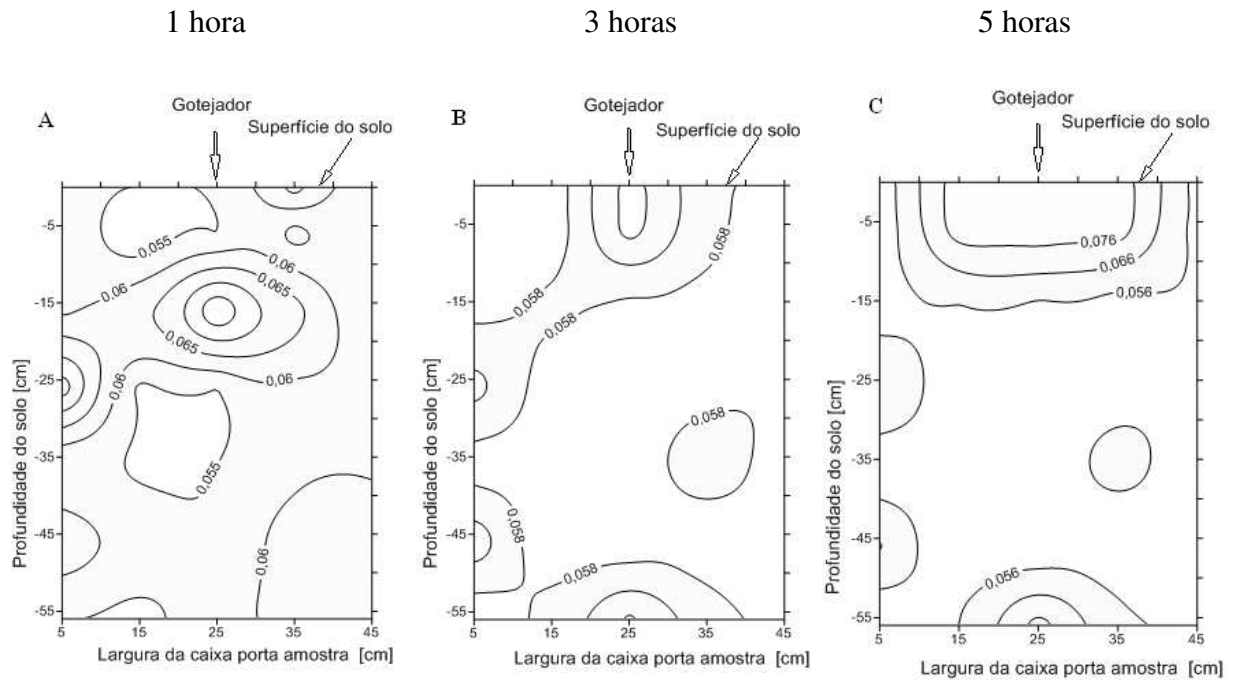
Figura 23 - Distribuição da água no perfil de um solo argiloso quando utilizado um sistema de irrigação por gotejamento superficial após 1, 3 e 5 horas da irrigação com as vazões de  $2,9$  e  $4,9 \text{ L h}^{-1}$

A figura 24 mostra a distribuição da água aplicada num solo arenoso pelo sistema de irrigação por gotejamento superficial em diferentes tempos de irrigação, quando utilizadas as vazões de 1,9 e 5,6 L h<sup>-1</sup> de água.

Analisando os gráficos dos conteúdos de água do perfil do solo arenoso aplicando a irrigação por gotejamento com baixa vazão de água, de 1,9 L h<sup>-1</sup>, somente após 5 horas de ensaio o teor de umidade atingiu 0,076 m<sup>3</sup> m<sup>-3</sup>, numa área pequena 7 cm abaixo do emissor (figura 24C). Com a vazão de 5,6 L h<sup>-1</sup> (figura 24D), após 1 hora de ensaio observou-se um armazenamento final de água de 0,082 m<sup>3</sup> m<sup>-3</sup>, até 15 cm de profundidade, porém numa área muito estreita logo abaixo do gotejador, aumentando para os 35 cm após 3 horas (figura 24E) atingindo todo perfil do solo após 5 horas de ensaio (figura 24F).

Analisando os resultados obtidos nos testes aplicando irrigação por gotejamento nas amostras de solo argiloso, com vazões de 2,9 e 4,9 L h<sup>-1</sup> e comparando com os resultados dos testes utilizando o mesmo sistema de irrigação em solo arenoso, com vazões de 1,9 e 5,6 L h<sup>-1</sup> pode-se observar que houve a formação de um volume molhado maior no solo argiloso em relação ao solo arenoso. Os bulbos molhados formados nos diferentes tempos de irrigação, mesmo utilizando a mesma vazão, apresentaram variações nos seus formatos, devido serem uma fonte pontual e ocasionar uma infiltração tridimensional no solo gerando uma distribuição desuniforme. Ainda assim, os volumes de água aplicados formaram bulbos úmidos com características semelhantes ao descrito por Thornburn (2003), onde afirma que o formato do bulbo molhado é mais arredondado na medida em que o solo é mais argiloso, fato similar ao observado no presente trabalho. Resultados semelhantes encontrados pela Embrapa (2010) também corroboram os encontrados no presente trabalho que em solos de textura argilosa, a irrigação localizada proporciona um bulbo molhado maior que nos solos de textura arenosa. Pires *et al.* (1999) mostraram que para um gotejador com a mesma vazão, em solos argilosos o bulbo molhado tende a ser mais raso e largo; já em solos arenosos ocorre o inverso: o movimento vertical da água predomina e o bulbo fica mais alongado; em solos de textura média, o formato do bulbo é intermediário.

### Solo arenoso, Gotejamento, $1,9 \text{ L h}^{-1}$



### Solo arenoso, Gotejamento - $5,6 \text{ L h}^{-1}$

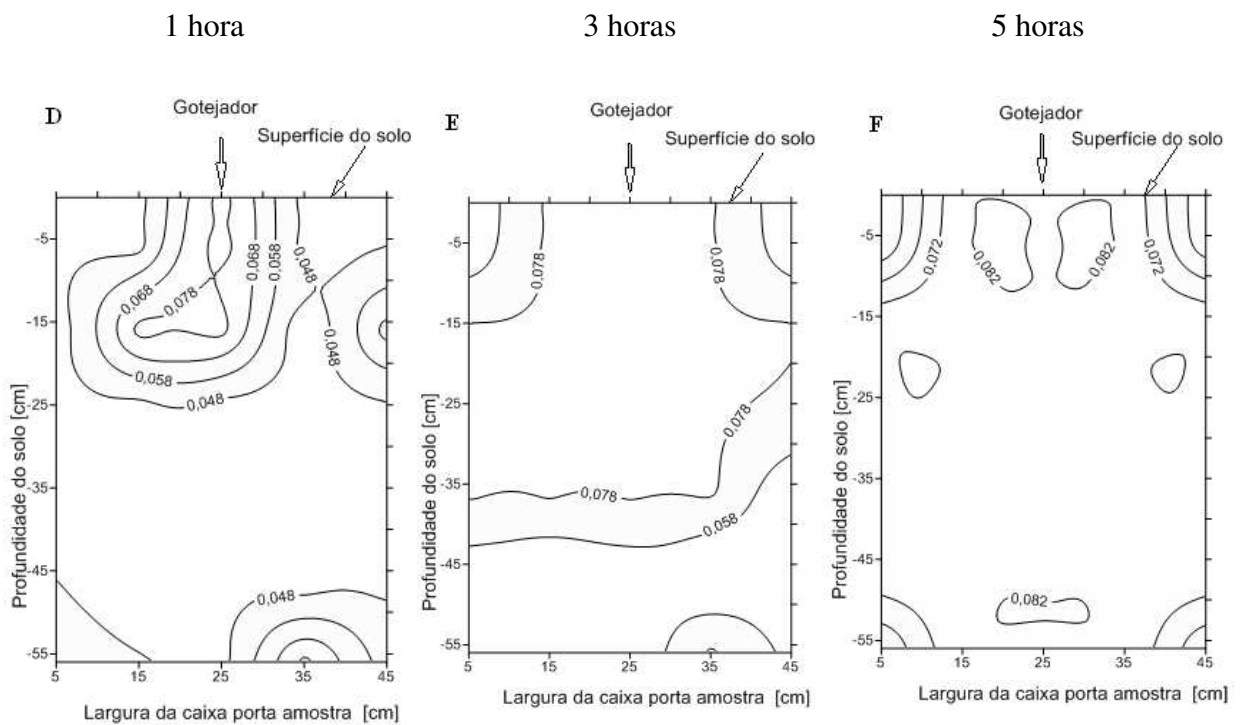


Figura 24 - Distribuição da água no perfil de um solo arenoso quando utilizado um sistema de irrigação por gotejamento superficial após 1, 3 e 5 horas de irrigação com as vazões de  $1,9$  e  $5,6 \text{ L h}^{-1}$

A figura 25 apresenta os perfis de distribuição da água aplicada num solo argiloso por microaspersão depois de 1, 2 e 3 horas de aplicação quando utilizadas as vazões de água de 7,7 e 27,3 L h<sup>-1</sup>.

Os perfis de distribuição do conteúdo de água do solo, através da aplicação da irrigação por microaspersão em solo argiloso, aplicando a vazão de 7,7 L h<sup>-1</sup>, formou uma área logo abaixo do gotejador com teor de umidade com 0,395 m<sup>3</sup> m<sup>-3</sup>, até a profundidade 15 cm em 1 hora (figura 25A) que com o passar do tempo do ensaio foi aumentando atingindo 25 cm em 2 horas (figura 25B) e chegando a 35 cm após 3 horas do teste (figura 25C).

Analisando os resultados obtidos nos testes irrigando por microaspersão em um solo argiloso, com a vazão de 27,3 L h<sup>-1</sup>, se observam que após 0,5 hora, o conteúdo de água atingiu 0,400 m<sup>3</sup> m<sup>-3</sup>, a aproximadamente 25 cm de profundidade (figura 25D). Após 1 hora de irrigação o conteúdo de água de 0,400 m<sup>3</sup> m<sup>-3</sup> atingiu aproximadamente 45 cm (figura 25E) e após 1,5 horas, 50 cm aproximadamente, reafirmando o conceito que quanto maior a vazão de água aplicada pelo sistema de irrigação no solo maior e mais rápida a percolação da água (figura 25F). Os resultados para ambas as vazões corroboram Pires *et al.* (1999) que dizem que quanto maior o tempo de irrigação, mais profundo a água percola.

Por outro lado aplicando a vazão de 7,7 L h<sup>-1</sup> com o mesmo sistema de irrigação e num solo da mesma classe textural, o conteúdo de água 0,400 m<sup>3</sup> m<sup>-3</sup> a 35 cm foi atingido em 3 horas de ensaio (figura 25C). Quando se usou 27,3 L h<sup>-1</sup> somente em uma hora e meia de ensaio (figura 25F), foi atingido igual conteúdo de água, molhando quase todo o perfil do solo estudado, indicando que o aumento da vazão favorece a percolação da água no perfil do solo. Estes resultados estão de acordo com aqueles encontrados por Levien *et al.* (2010) e Maia (2010) que também em condições de laboratório demonstraram haver uma relação positiva entre o armazenamento da água dentro do bulbo molhado e a vazão.

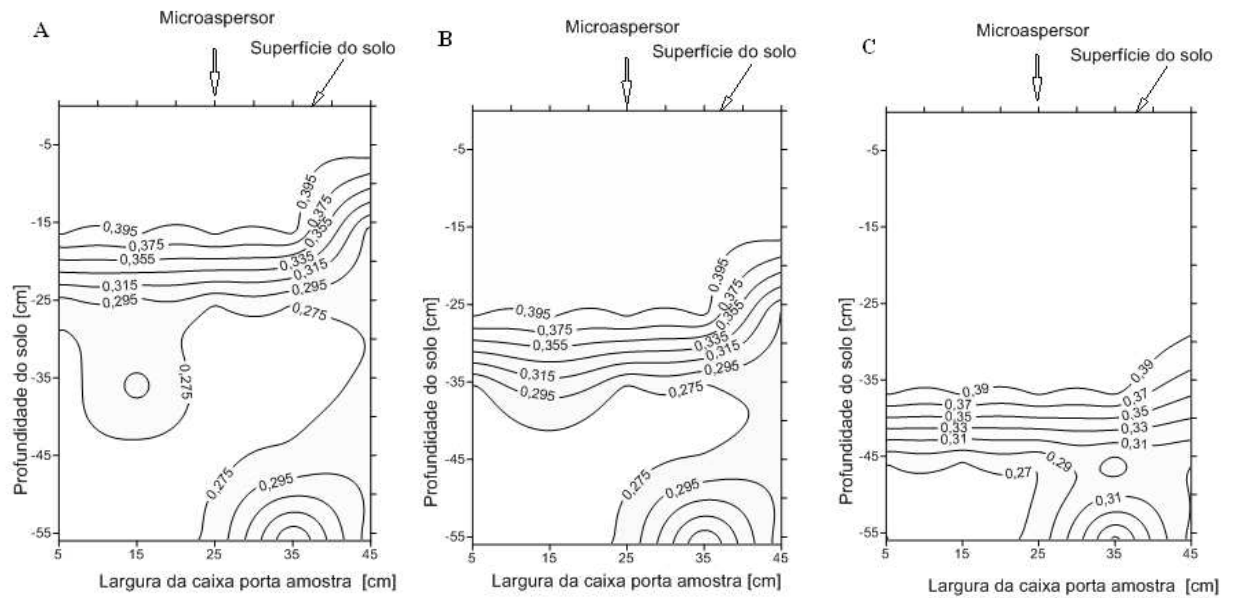


Solo argiloso, Microaspersão -  $7,7 \text{ L h}^{-1}$ 

1 hora

2 horas

3 horas

Solo argiloso, Microaspersão -  $27,3 \text{ L h}^{-1}$ 

0,5 hora

1 hora

1,5 hora

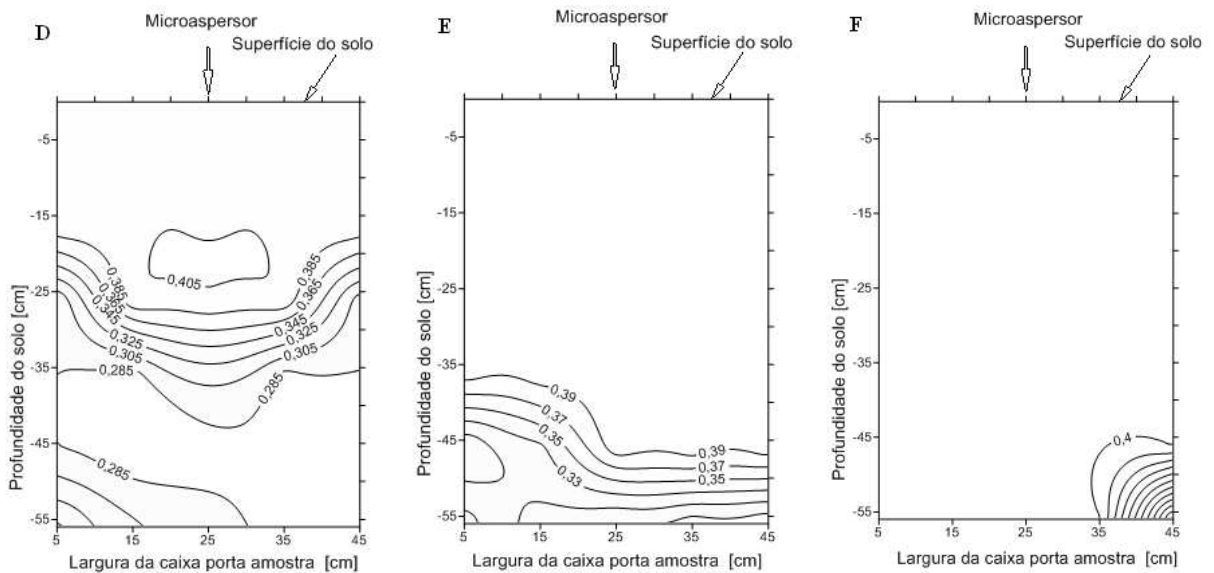


Figura 25 - Distribuição da água no perfil de um solo argiloso quando utilizado um sistema de irrigação por microaspersão depois de 0,5, 1 e 1,5 horas de irrigação com as vazões de  $7,7$  e  $27,3 \text{ L h}^{-1}$

As figuras 26A, 26B e 26C apresentam a distribuição de água no solo quando um solo arenoso é irrigado através de um microaspersor do tipo nebulizador com vazão de  $10,6 \text{ L h}^{-1}$ . Observa-se um teor de umidade de  $0,080 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ , atingindo a profundidade 15 cm após 1 hora de ensaio, chegando a aproximadamente 35 cm após 2 horas e atingindo os 45cm, após 3 horas de ensaio.

Aplicando a vazão de  $25,7 \text{ L h}^{-1}$  com o mesmo sistema de irrigação e num solo da mesma classe textural, após 0,5 hora o conteúdo de água  $0,074 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$  atingiu aproximadamente 25cm de profundidade (figura 26D) , após 1 hora, 45 cm (figura 26E) e após 1,5 horas molhou quase totalmente o perfil de solo estudado, 55 cm (figura 26F).

Novamente os resultados obtidos concordam com aqueles encontrados por Pires *et al.* (1999) que encontraram que para uma mesma vazão do microaspersor, quanto maior o tempo de irrigação, mais profundo a água percola.

Por outro lado, aplicando a vazão de  $25,7 \text{ L h}^{-1}$  com o mesmo sistema de irrigação e num solo da mesma classe textural, um conteúdo de água  $0,074 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ , em quase todo o perfil de solo estudado, foi atingido em somente uma hora e meia de ensaio (figura 26F), a metade do tempo necessário para atingir a mesmo conteúdo de água e na mesma profundidade quando se usou  $10,6 \text{ L h}^{-1}$ , indicando novamente que o aumento da vazão favorece a percolação da água no perfil do solo. Estes resultados estão de acordo com aqueles encontrados por Levien *et al.* (2010) e Maia (2010) que também em condições de laboratório demonstraram haver uma relação positiva entre o armazenamento da água dentro do bulbo molhado e a vazão.

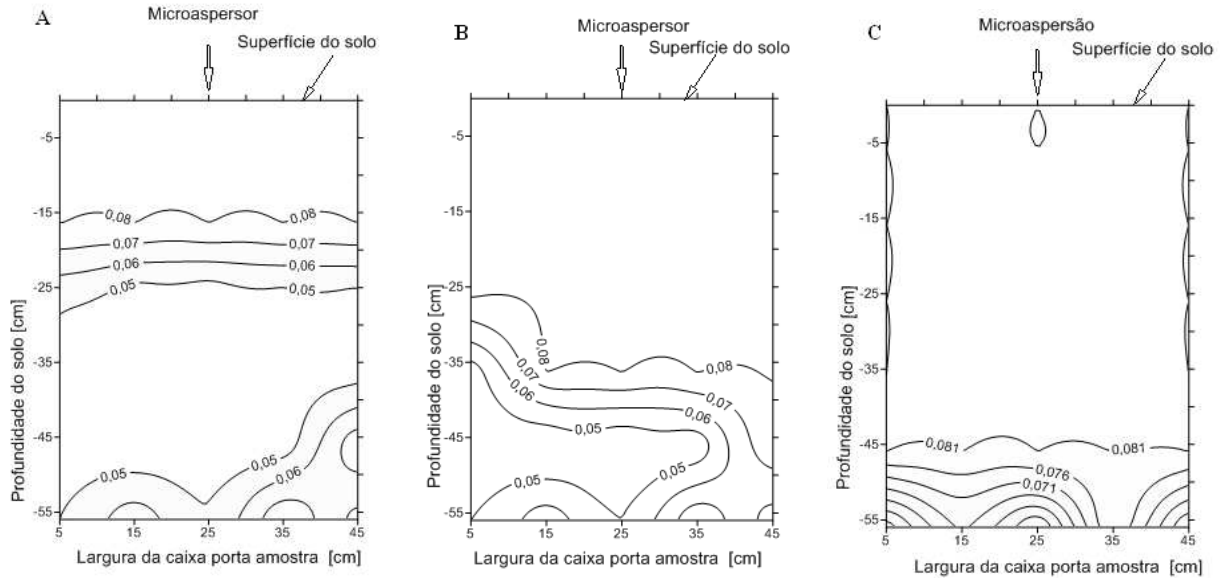
Analisando as figuras 23 a 26 (distribuição da água no perfil do solo quando utilizado um sistema de irrigação por gotejamento e microaspersão em solos argilosos e arenosos) se observa que quando se utiliza a microaspersão, a distribuição de umidade lateralmente ao emissor é maior quando comparada ao gotejamento.

Solo arenoso, Microaspersão – 10,6 L h<sup>-1</sup>

1 hora

2 horas

3 horas

Solo arenoso, Microaspersão – 25,7 L h<sup>-1</sup>

0,5 hora

1 hora

1,5 horas

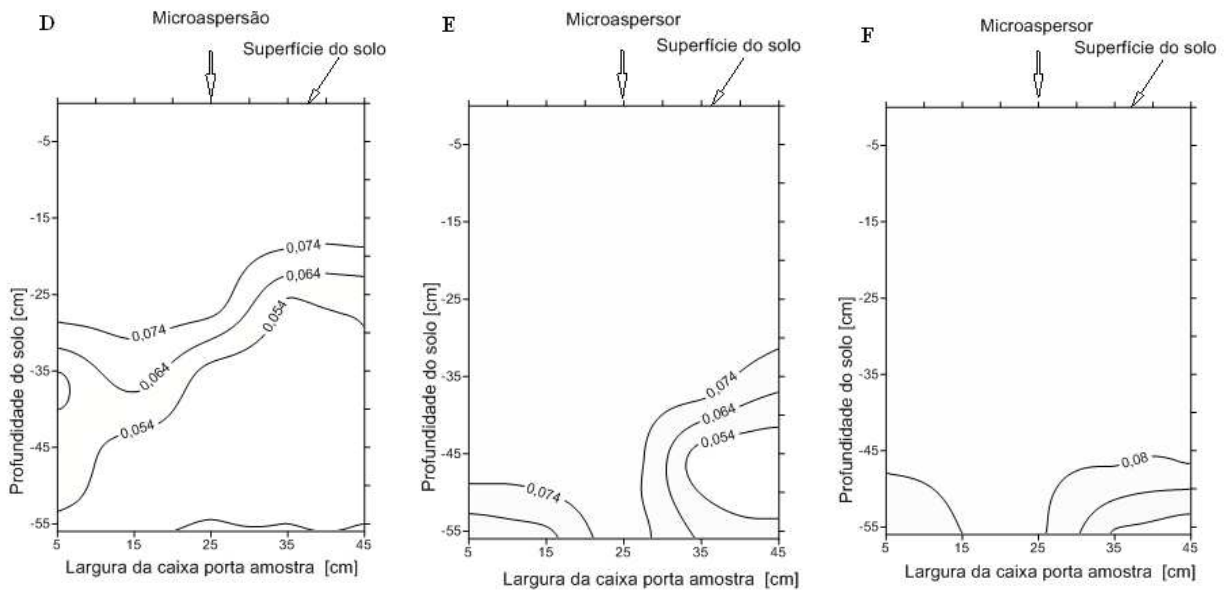


Figura 26 - Distribuição da água aplicada num perfil de solo arenoso quando utilizado um sistema de irrigação por microaspersão depois de 1, 2 e 3 horas de irrigação para a vazão de 10,6 e 25,7 L h<sup>-1</sup>

Ao analisar os resultados obtidos nos testes aplicando irrigação por gotejamento nas amostras de solo argiloso, com vazões de 2,9 e 4,9 L h<sup>-1</sup> e compará-los com os resultados dos testes utilizando o mesmo sistema de irrigação em solo arenoso, com vazões de 1,9 e 5,6 L h<sup>-1</sup> pode-se afirmar que houve a formação de um volume molhado maior no solo argiloso que no solo arenoso, análise feita através das isolinhas das figuras 23 e 24. No solo arenoso, com vazões de 10,6 e 25,7 L h<sup>-1</sup> ao comparar os resultados dos testes aplicando o mesmo sistema de irrigação em solo argiloso, com vazões de 7,7 e 27,3 L h<sup>-1</sup> pode-se observar que também houve a formação de volume molhado encharcado maior no solo argiloso que no solo arenoso, análise feita através das isolinhas das figuras 25 e 26.

Os resultados obtidos nos testes concordam com afirmações feitas por Reichardt (1993) e Souza (1999) que descrevem que solos com texturas diferentes divergem quanto à capacidade de retenção de água no solo. Segundo Reichardt (1993) os solos de textura fina retêm mais água do que os de textura grossa, cuja variação depende dos fenômenos de capilaridade e adsorção, que são governados pelas forças de adesão, coesão e de tensão superficial.

Resultados semelhantes encontrou Souza (2009) ao realizar ensaios aplicando a irrigação por gotejamento superficial em três tipos de solos: franco arenoso, argilo-arenoso e argiloso, onde demonstrou através de mapas de isolinhas a formação do bulbo molhado após 60 e 120 min e mostra que o mesmo atingiu maior profundidade no solo franco arenoso se comparado com a profundidade do bulbo molhado no solo argiloso.

#### 5.2.1.1 Formação do bulbo molhado (bulbo úmido)

O lisímetro desenvolvido no presente trabalho apresenta como característica relevante o fato de que ele permite observar visualmente na superfície e através do perfil do solo a formação do bulbo molhado, também chamado de bulbo úmido. Isto é importante devido a que o conhecimento das características do bulbo molhado no solo permite planejar e dimensionar a irrigação, principalmente no que se refere a amplitude da área irrigada e uniformidade da irrigação. Suas dimensões dependem das características do solo (textura, densidade, conteúdo de água), da vazão de água aplicada, do tempo de aplicação e do sistema de irrigação utilizado. O tamanho e a forma do bulbo molhado são parâmetros importantes para projetos e manejo de sistemas de irrigação localizada. Considerando-se um gotejador com a mesma vazão, em solos argilosos o bulbo molhado tende a ser mais raso e largo; já em

solos arenosos ocorre o inverso: o movimento vertical da água predomina e o bulbo fica mais alongado; em solos de textura média, o formato do bulbo é intermediário.

a) Área molhada na superfície do solo

A Figura 27 apresenta uma imagem do bulbo molhado formado na superfície de um solo argiloso irrigado por gotejamento.



Figura 27 - Formação do bulbo úmido

Alguns autores consideram que o valor mínimo da área molhada pelos emissores em relação ao espaçamento da cultura deve ser de 33%, em condições onde a irrigação é prática essencial; e de 20% para condições de irrigação suplementar. Outros consideram como ideal uma faixa que varia de 33 a 50% para o primeiro caso e de 80% da área sob a projeção da copa quando em caráter de suplementar. Convém salientar que a área molhada pelo bulbo corresponde a uma área maior do que a visualizada na superfície do solo. A área molhada pelo emissor deve ser medida um dia após o teste de campo e na faixa de 10 a 20 cm de profundidade, onde normalmente situa-se o maior diâmetro molhado (PIRES *et al.* 1999).

A figura 28 apresenta a formação do bulbo molhado na superfície de um solo arenoso e de um solo argiloso irrigado por gotejamento, 60 minutos após iniciada a aplicação de água. Observa-se que o solo argiloso apresenta o diâmetro do bulbo molhado maior que o bulbo formado no solo arenoso. Estes resultados corroboram aqueles encontrados por Levien *et al.* (2010) e Maia (2010).

Comparando solos não saturados de texturas diferentes Brady (1989) encontrou que o solo argiloso retém muito maior quantidade de água a um determinado nível de tensão, do que solo franco e arenoso. Isto devido a que em solos argilosos as forças de adsorção, chamadas de sucções ou tensões, são grandes reduzindo o nível de energia livre da água do solo aumentando assim a capacidade do solo para reter água. Considerando-se um gotejador com a mesma vazão, em solos argilosos o bulbo molhado tende a ser mais raso e largo; já em solos arenosos ocorre o inverso: o movimento vertical da água predomina e o bulbo fica mais alongado; em solos de textura média, o formato do bulbo é intermediário.

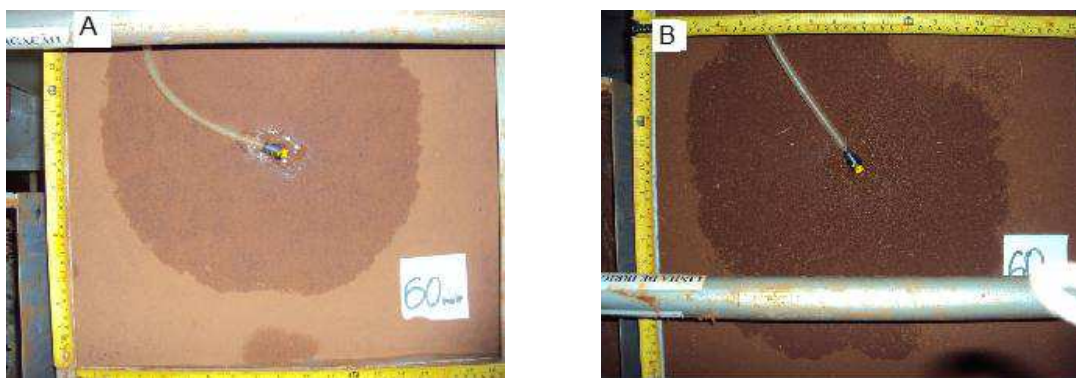


Figura 28 - Formação do bulbo molhado na superfície de A) um solo arenoso B) um solo argiloso irrigado por gotejamento

#### b) Formação do bulbo molhado no perfil do solo

Convém considerar que pelo fato do gotejador encontrar-se localizado justamente no meio da caixa de amostra, a 25 cm da parede frontal transparente, a visualização do bulbo molhado nesta, sem alterar o perfil do solo, foi bastante prejudicada. Se tivesse sido feito um corte longitudinal do perfil do solo justo abaixo onde o gotejador estava localizado o bulbo molhado poderia ter sido observado fácil e claramente. Desafortunadamente isto não foi feito devido a que o perfil amostra era utilizado para mais ensaios e preparar outras amostras era praticamente impossível, além da necessidade de preparar um excessivo volume de solo. Por outro lado devido a problemas de localização do lisímetro no laboratório (excessiva iluminação do recinto) e falta de material fotográfico profissional adequado (câmaras fotográficas com um alta resolução) a qualidade das fotografias foi afetada.

Ainda assim, pode se observar na figura 29 bulbos molhados no perfil de um solo arenoso e de um solo argiloso irrigado por microaspersão, após 350 e 420 minutos de aplicação de água, respectivamente. Foram demarcadas as isolinhas de umidade de solo nos

perfis obtidas com o tempo de irrigação. Observa-se que o bulbo molhado no solo arenoso se estendeu a uma maior profundidade no solo. No solo arenoso após 350 minutos de ensaio o bulbo molhado atingiu aproximadamente 45 cm. Já no solo argiloso após 420 minutos o bulbo molhado atingiu somente 25 cm de profundidade. Estes resultados estão de acordo com aqueles encontrados por Pires *et al.* (1999) que mostraram que em solos argilosos com um gotejador, com a mesma vazão, o bulbo molhado tende a ser mais raso e largo e em solos arenosos ocorre o inverso: o movimento vertical da água forma um bulbo mais alongado.

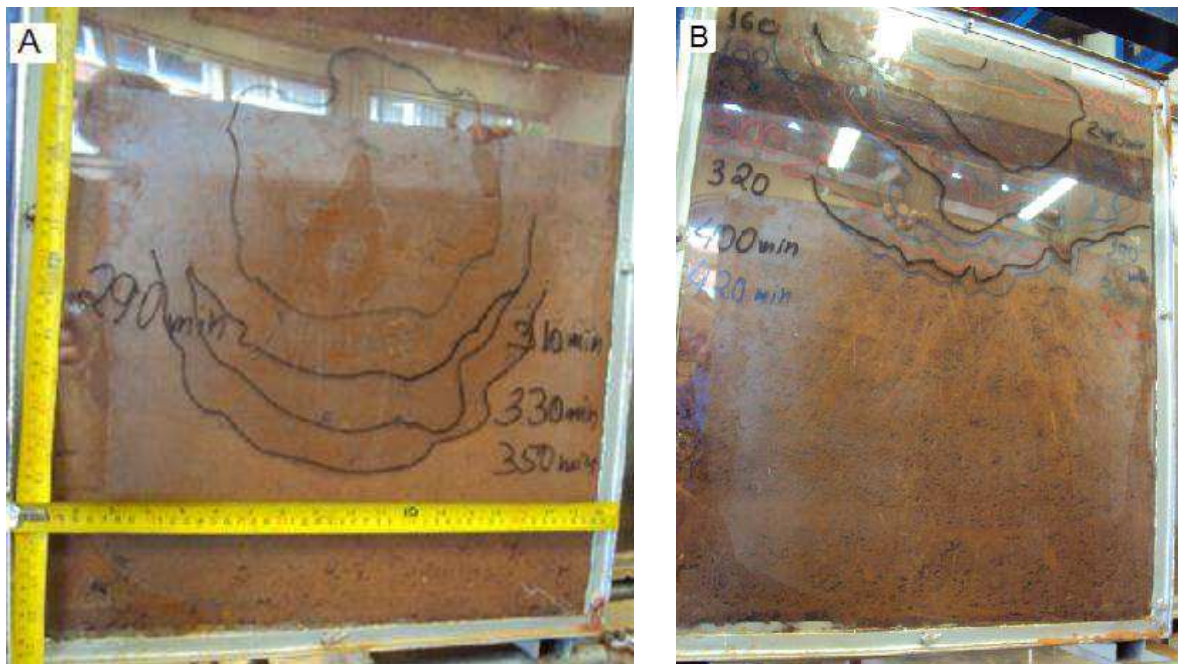


Figura 29 - Formação do bulbo molhado no perfil, A) de um solo arenoso e B) de um Argiloso, irrigado por Microaspersão

### 5.2.2 Ensaio em solo saturado

O lisímetro através do uso da caixa porta amostra 2 permite realizar testes em solos saturados de qualquer classe textural, podendo aplicar a irrigação através dos sistemas por microaspersão ou por gotejamento. O lisímetro permite saturar o solo através da tubulação de saturação, fazendo com que o movimento da água aconteça de forma ascendente, diminuindo a formação de bolhas de ar no interior do solo a ser ensaiado.

A bateria de piezômetros instalada no lisímetro permitiu a medição dos potenciais de pressão em cada profundidade do solo e a determinação da condutividade hidráulica para qualquer intervalo de profundidade (figura 30).

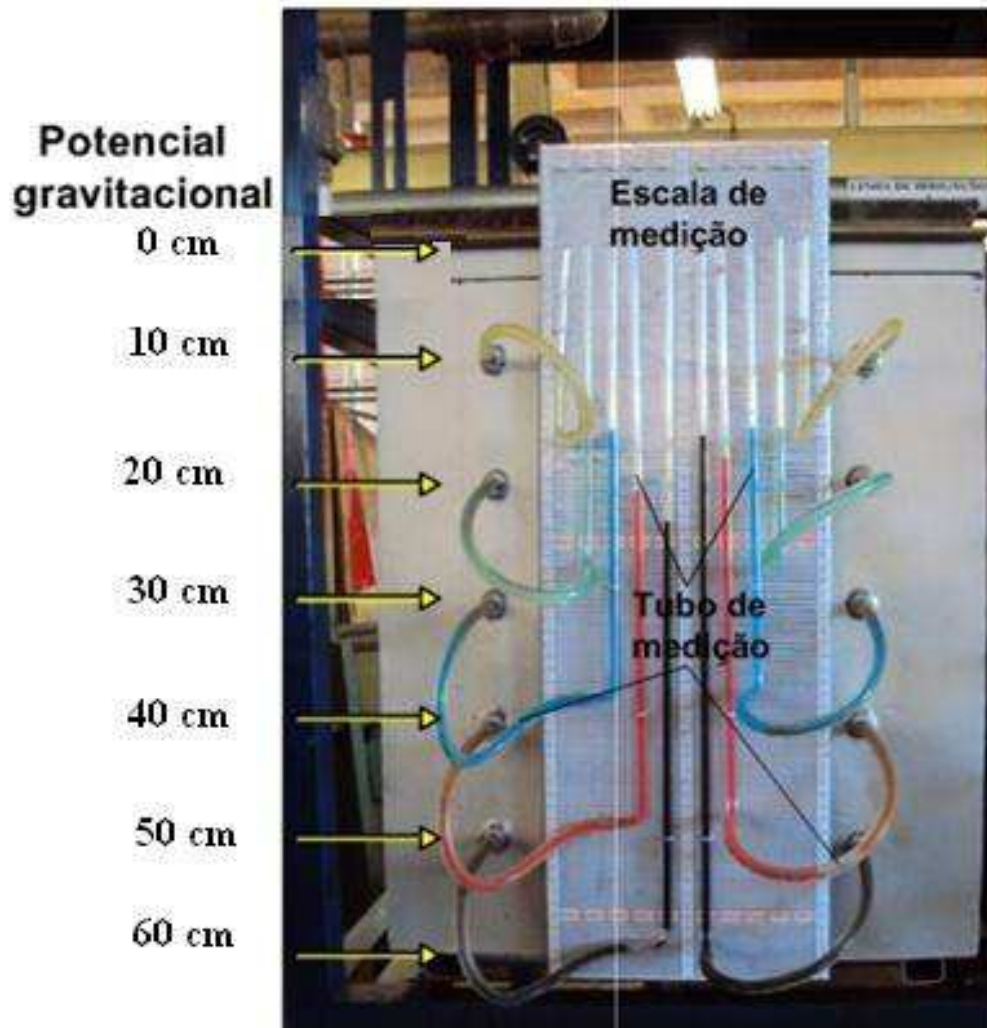


Figura 30 - Piezômetros instalados nas diferentes profundidades do solo

Os quadros 3 e 4 apresentam os potenciais gravitacionais ( $z$ ), os potenciais de pressão ( $h$ ), os seus respectivos gradientes ( $\Delta z$  e  $\Delta h$ ), os gradientes hidráulicos ( $\nabla H$ ), o volume de água percolado ( $Q$ ), a área do lisímetro ( $A$ ), a densidade de fluxo ( $q$ ) e a condutividade hidráulica ( $K$ ) para cada intervalo de profundidade de solo e a media da condutividade hidráulica medida para todo o perfil de solo, para um solo arenoso e argiloso, respectivamente.



**Quadro 2** - Determinação da condutividade hidráulica em um solo arenoso, com aplicação de irrigação por microaspersão, na vazão de 25,7 L h<sup>-1</sup>.

Prof. (cm)	Cota z (cm)	h (cm)	z + h (cm)	$\Delta h$ (cm)	$\Delta z$ (cm)	$\Delta h/\Delta z$ ( $\nabla H$ )	Q (cm <sup>3</sup> )	A (cm <sup>2</sup> )	t (h)	q (cm/h)	$q/\nabla H=K$ (cm/h)
10	50	3.6	53.6								
				8.7	10	0.87	24.000	2500	1	9.60	11.03
20	40	4.9	44.9								
				1.4	10	0.14	24.000	2500	1	9.60	68.57
30	30	13.5	43.5								
				15.4	10	1.54	24.000	2500	1	9.60	6.23
40	20	8.1	28.1								
				12.3	10	1.23	24.000	2500	1	9.60	7.80
50	10	5.8	15.8								
Media do perfil de solo (0 -50 cm)											23,41

Observa-se que a condutividade hidráulica (K) media do solo arenoso, aplicando a irrigação por microaspersão, com vazão de 25,7 L h<sup>-1</sup>, no intervalo de profundidade do solo de 0 a 50 cm foi de 23,41 cm h<sup>-1</sup> (6,5 x 10<sup>-3</sup> cm seg<sup>-1</sup>). Estes valores podem ser considerados valores normais de condutividade hidráulica, pois corrobora a afirmação de Guerra (2000), que indica que os valores da condutividade hidráulica para solos saturados arenosos de estrutura estável, são geralmente da ordem de 10<sup>-2</sup> a 10<sup>-3</sup> cm seg<sup>-1</sup>. O alto valor encontrado para o intervalo de profundidade 20-30 cm deve-se provavelmente a problemas durante a preparação e/ou compactação do solo ao colocar o mesmo na caixa porta amostra.

**Quadro 3** - Determinação da condutividade hidráulica em um solo argiloso, com aplicação de irrigação por microaspersão, na vazão de 20 L h<sup>-1</sup>.

Prof. (cm)	Cota z (cm)	h (cm)	z + h (cm)	$\Delta h$ (cm)	$\Delta z$ (cm)	$\Delta h/\Delta z$ ( $\nabla H$ )	Q (cm <sup>3</sup> )	A (cm <sup>2</sup> )	t (h)	q (cm/h)	$q/\nabla H=K$ (cm/h)
10	50	0.4	50.4								
				10.5	10	1.05	4.050	2500	1	1.62	1.54
20	40	-0.1	39.9								
				9.8	10	0.98	4.050	2500	1	1.62	1.65
30	30	0.1	30.1								
				9.8	10	0.98	4.050	2500	1	1.62	1.65
40	20	0.3	20.3								
				11.8	10	1.18	4.050	2500	1	1.62	1.37
50	10	-1.5	8.5								
Media do perfil de solo (0 -50 cm)											1,55

A condutividade hidráulica (K) média do solo argiloso, determinada aplicando a irrigação por microaspersão, com vazão de 20 L h<sup>-1</sup>, no intervalo de profundidade do solo de 0 a 50 cm foi de 1,55 cm h<sup>-1</sup> (4,3 x 10<sup>-4</sup> cm seg<sup>-1</sup>). Estes valores podem ser considerados valores normais de condutividade hidráulica para solos argilosos, pois corrobora a afirmação de Guerra (2000), que indica que os valores da condutividade hidráulica para solos saturados argilosos de estrutura estável, são geralmente da ordem de 10<sup>-4</sup> a 10<sup>-7</sup> cm seg<sup>-1</sup>.

Os resultados encontrados estão de acordo com as conclusões que Righes (2009) encontrou em seus estudos, onde ele indica que em geral o espaço poroso ocupado pelo ar representa a percentagem de macroporos por onde ocorre o fluxo saturado da água, ou seja, a drenagem. Os solos arenosos retêm pouca água, porque representam menor volume de espaço poroso. Os solos de textura argilosa absorvem, relativamente, maiores quantidades de água devido à grande percentagem de poros pequenos que retêm mais água contra a força da gravidade (RIGHES *et al.*, 2009). Quando os solos estão saturados, todo espaço poroso encontra-se disponível à movimentação da água e assim os solos arenosos conduzem água mais rapidamente que os argilosos (GUERRA, 2000). Por outro lado, deve-se considerar que em solos saturados arenosos, com os poros grandes cheios de água, o potencial gravitacional joga um papel mais importante que o potencial matricial e a água percola assim rapidamente através deles (GARDNER, 1968).

## 6 CONCLUSÕES

1. O lisímetro desenvolvido constitui uma ferramenta didática demonstrativa, que possibilita compreender e visualizar na prática a distribuição da água no solo, permitindo determinar a densidade de fluxo e todos os parâmetros da equação de Darcy.
2. Apresenta versatilidade para ser usado em diferentes estudos da dinâmica da água no perfil de solo tais como pesquisas com diversas classes texturais de solo, condições de saturação e não saturação, compactação; infiltração, ascensão capilar; solos estratificados, distribuição da água no solo, quando utilizados diferentes sistemas de irrigação, vazões e tempos de irrigação.
3. Apresenta praticidade e comodidade para testes demonstrativos se comparado com testes feitos no campo, que requerem muito tempo de preparação e de execução.
4. A dificuldade encontrada para construção do lisímetro foi a impossibilidade de adquirir instrumentos de medida com recursos do projeto do curso, o que inviabilizou a instalação de instrumentos com maior precisão para medição da vazão e pressão da água nas linhas de irrigação e para aquisição de tensiômetros digitais.
5. Apresenta a principal vantagem que é a sua instalação em qualquer laboratório, sala ou ambiente mais adequado para a realização dos ensaios, por ser móvel, podendo ser deslocado com facilidade, necessitando somente ser conectado à rede de água.

## 7 REFERÊNCIAS

- ALBUQUERQUE, P. E. P. de; DURÂES, F. O. M. **Uso E manejo da irrigação.** Embrapa. Brasília-DF. 528p. 2008.
- BARRETO, P.A.B.; GAMA-RODRIGUES. E. F.; GAMA-RODRIGUES, A.C.; BARROS, N.F. & FONSECA, S. Atividade, carbono e nitrogênio da biomassa microbiana em plantações de eucalipto, em uma sequência de idades. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, 32, 2008.
- BERNARDO, S. **Manual de Irrigação.** 2 ed. Viçosa: UFV, Impr. Univ. 2006.
- BERTONI, J.; LOMBARDI, N. F. **Conservação do solo.** 4. ed. São Paulo: Ícone, 1999.
- BRANDÃO, V. dos S.; CECÍLIO, R. A.; PRUSKI, F. F.; SILVA, D. D. da. **Infiltração da água no solo.** 3ª edição atualizada e ampliada, Viçosa Ed. UFV. 2006.
- BRADY, N. C.; **Natureza e propriedades dos solos.** 7ª edição, Rio de Janeiro, Ed. Freitas Bastos, 1989.
- CARVALHO, L. A. **Condutividade hidráulica do solo no campo: Simplificações do método do perfil instantâneo.** Dissertação de Mestrado, ESALQ, Piracicaba, 2003.
- COOK, F. J.; FITCH, P.; THORBURN, P. J.; CHARLESWORTH, P. B.; BRISTOW, K. L. Modelling trickle irrigation: comparison of analytical and numerical models for estimation of wetting front position with time. **Environmental Modelling & Software**, v. 21, n. 9, 2006.
- DOURADO NETO, D.; NIELSEN, D. R.; HOPMANS, J. W.; REICHARDT, K.; BACCHI, O. O. S.; LOPES, P. P. **Programa para confecção da curva de retenção de água no solo, modelo Van Genuchten. Soil Water Retention Curve, SWRC** (version 3,00 beta). Universidade de São Paulo, Piracicaba, SP, Brasil, 2001.
- EMBRAPA. **Cultivo da Videira.** Semiárido: Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária, 2010.
- MAIA, C. E.; LEVIEN, S. L. A.; MEDEIROS, J. F.; NETO, J. D. Dimensões de bulbo molhado na irrigação por gotejamento superficial. *Ciências Agrônomicas*, Fortaleza-CE, v.41, n.1, 2010.
- EVAN, R. G.; WU, I.; SMAJSTRALA, A. G. **Microirrigation systems.** In: HOFFMAN, G. J.; EVANS, R. G.; JENSEN, M. E.; MARTIN, D. L.; ELLIOTT, R. L. Design and operation of farm irrigation systems. 2 ed. ASABE, St. Joseph, 2007.
- FARIA, M. A.; REZENDE, F. C. **Cafecultura empresarial: produtividade e qualidade - irrigação na cafeicultura.** Lavras: UFLA/FAEPE, 1997. 110 p. (Curso de Especialização *Lato Sensu* por Tutoria a Distância).
- FISCARELLI, R. B. de O. Material didático e prática docente. **Revista Ibero-Americana de Estudos em Educação.** V.2 n.1 2007.
- FRIZZONE, J. A. **Irrigação localizada.** Material didático. ESALQ SP 2013.

GARDNER, W. R. Some steady state solutions of unsaturated moisture flow equations with application to evaporation from water table. **Soil Science**, v.85, 1968.

GENUCHTEN, M. van Th. **A closed-forma equation for predicting the hydraulic of unsaturated soils**. Soil Science Society Journal, v.44, 1980.

GUERRA, H. O. C.; **Física dos Solos**. 2ª edição. Campina Grande-PB. CTRN/UFCG. 2000.

HAO, A.; MARUI, A.; HARAGUCHI, T.; NAKANO, Y. Estimation of wet bulb formation in various soil during drip irrigation. **Journal of the Faculty of Agriculture, Kyushu University**, v. 01, n. 52, 2007.

HILLEL, D.; KRENTOS, V.D. & STYLIANOU, Y. Procedure and test of an internal drainage method for measuring soil hydraulic characteristics in situ. **Soil Science**, 114. 1972.

KIEHL, E. J.; **Manual de edafologia relações solo-planta**. São Paulo. Editora Agronômica Ceres, 1979.

LEVIEN, S. L. A.; SILVA, C. A. da; MAIA, C. E; MEDEIROS, J. F. de; Estimativa de largura e profundidade de bulbo molhado em solos de textura média sob irrigação por gotejamento superficial. **Enciclopédia Biosfera, Centro Científico Conhecer - Goiânia**, vol.6, N.11; 2010.

LEPSCH, I.F. **Formação e conservação dos solos**. Oficina de textos, 2002.

MAIA, C. E.; **Modelos matemáticos para estimativa da geometria do volume de bulbo molhado por irrigação por gotejamento superficial no agropolo assu-mossoró**-Tese de doutorado. UFCG. Campina Grande. 2005.

MARION, J. M.; OR, D.; ROLSTON, D. E.; KAVVAS, M. L. & BIGGAR, J. W. Evaluation of methods for determining soil-water retentivity and unsaturated hydraulic conductivity. **Soil Science**, 158, 1994.

OLIVEIRA, E. L. de; FARIA, M. A. de; REIS, R. P.; SILVA, M. de L. O. e. Manejo e viabilidade econômica da irrigação por gotejamento na cultura do cafeeiro acaíá considerando seis safras. **Revista Engenharia Agrícola**. vol.30 no.5 Jaboticabal Sept./Oct. 2010.

PAIGE, G. B. & HILLEL, D. Comparison of three methods for assessing soil hydraulic properties. **Soil Science**, 155, 1993.

PIRES, R. C. de M.; SAKAI, E.; ARRUDA, F. B.; FUJIWARA, M.; CALHEIROS, R. de O. **Métodos e manejo da irrigação**. Centro de Ecofisiologia e Biofísica . Instituto agrônomo. Novembro – 1999.

PRADO, R. B.; TURETTA, A. P. D.; ANDRADE, A. G. de; **Manejo e conservação do solo e da água**. Embrapa solos. Rio de Janeiro. 2010.

PREVEDELLO, B. M. S.; PREVEDELLO, C. L. & LIBARDI, P. L. Simplificação analítica do método do perfil instantâneo para obtenção da condutividade hidráulica não saturada em condições de campo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, 5, 1981.

REICHARDT, K. **Dinâmica da matéria e da energia em ecossistemas**. Piracicaba: Departamento de Física e Meteorologia, 1993.

REICHARDT, K. **Dinâmica da matéria e da energia em ecossistemas**. 2.ed. Piracicaba: Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz. 1996.

RIGHES, A. A.; SILVA, R. F. **Escoamento Superficial, Erosão e contaminação do solo**. In: RIGHES, A. A.; BURIOL, G. A.; BOER, N. Água e educação: Princípios e estratégias de uso e conservação. Cap.V, p.137-168. Santa Maria: Centro Universitário Franciscano, 2009.

SCHWARTZMAN, M., ZUR, B. Emitter spacing and geometry of wetted soil volume. **Journal Irrigation and Drainage Engineering**, v.112, n.3, 1986.

SOUZA, C. F. **A utilização da reflectometria no domínio do tempo (TDR) na modelagem do bulbo molhado do solo irrigado por gotejamento**. 2002. 115f .Tese (Doutorado Engenharia Agrícola) - Faculdade de Engenharia Agrícola, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2002.

SOUZA, C. C. de. **Avaliação de métodos de água disponível em diferentes solos na cultura do algodoeiro herbáceo**. Areia-PB: CCA/UFPB, 1999. (Dissertação de Mestrado), Universidade Federal da Paraíba.

SOUZA, L. A. de A.; **Software para predição do movimento de água no solo**. IV Congresso de Pesquisa e Inovação da Rede Norte e Nordeste de Educação Tecnológica. Belém. Pará. 2009.

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

VICENTE, M. R.; SOARES, A. R.; MANTOVANI, E. C.; FREITAS, A. R. **Efeito da irrigação e do posicionamento do gotejadores (superficial e subsuperficial) na profundidade dos cafeeiros na região do cerrado**. In: SIMPÓSIO DE PESQUISA DE CAFÉS DO BRASIL, 3; 2003. Anais.... Brasília: Embrapa Café, 2003.

THORNBURN, P. J.; COOK, F.J.; BRISTOW, K. L. Soil dependent wetting from trickle emitters: Implications for system design and management. **Irrigation Science**, New York, v.22, n.3, Nov., 2003.

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

<http://estudonline.tripod.com/toppage11.htm>, (acessado em 15 de julho 2013) material elaborado pelo prof. Dr. Celso L. Prevedello, Curitiba PR.