



**UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE
CENTRO DE TECNOLOGIA E RECURSOS NATURAIS
UNIDADE ACADÊMICA DE ENGENHARIA AGRÍCOLA
CURSO DE BACHARELADO EM ENGENHARIA AGRÍCOLA**

ROGÉRIO DANTAS DE LACERDA

**AVALIAÇÃO DE UM TDR PARA DETERMINAÇÃO DO
CONTEÚDO DE ÁGUA DO SOLO**

CAMPINA GRANDE - PB

2004

ROGÉRIO DANTAS DE LACERDA

**AVALIAÇÃO DE UM TDR PARA DETERMINAÇÃO DO
CONTEÚDO DE ÁGUA DO SOLO**

Monografia apresentada ao Curso de Bacharelado em Engenharia Agrícola do Centro de Tecnologia e Recursos Naturais da Universidade Federal de Campina Grande, como requisito parcial para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Agrícola.

Orientador: Professor Dr. Hugo Orlando Carvalho Guerra.

CAMPINA GRANDE - PB

2004



L131a Lacerda, Rogério Dantas de.
Avaliação de um TDR para determinação do conteúdo de água do solo. / Rogério Dantas de Lacerda. - Campina Grande - PB: [s.n], 2004.

35 f.

Orientador: Professor Dr. Hugo Orlando Carvalho Guerra.

Trabalho de Conclusão de Curso - Monografia (Curso de Bacharelado em Engenharia Agrícola) - Universidade Federal de Campina Grande; Centro de Tecnologia e Recursos Naturais.

1. Umidade do solo. 2. Tensiometria. 3. Reflectometria no domínio do tempo. 4. Retenção de água no solo. 5. Conteúdo de água do solo. 6. Método gravimétrico. 7. Curva de retenção de água no solo. I. Guerra, Hugo Orlando Carvalho. II. Título.

CDU:556.14(043.1)

Elaboração da Ficha Catalográfica:

Johnny Rodrigues Barbosa
Bibliotecário-Documentalista
CRB-15/626



UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE
CENTRO DE CIÊNCIAS E TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA AGRÍCOLA

ROGÉRIO DANTAS DE LACERDA

AVALIAÇÃO DE UM TDR
PARA DETERMINAÇÃO DO CONTEÚDO DE ÁGUA DO SOLO

Aprovado em 12 de novembro de 2004

BANCA EXAMINADORA

Orientador: Prof. Dr. Hugo Orlando Carvalho Guerra. UFCA/CCT/DEAg

Examinador: Dr. Adilson David de Barros. UFCA/CCT/DEAg

Examinador: Doutorando Genival Barros Junior. UFCA/CCT/DEAg

SUMARIO

| | |
|---|----|
| RESUMO | 2 |
| ABSTRACT | 3 |
| 1. INTRODUÇÃO | 4 |
| 2. REVISÃO DE LITERATURA | 6 |
| 2.1. Calibração dos equipamentos..... | 6 |
| 2.2. Conteúdo de água do solo..... | 7 |
| 2.3 Métodos para determinação do conteúdo de água do solo | 8 |
| 2.3.1 Método gravimétrico | 9 |
| 2.3.2 Tensiometria..... | 9 |
| 2.3.3 Reflectometria no domínio do tempo | 11 |
| 2.4. Retenção de água no solo..... | 15 |
| 3. MATERIAL E MÉTODOS..... | 20 |
| 3.1. Caracterização da área experimental | 20 |
| 3.1.1. Localização..... | 20 |
| 3.1.2. Solo | 20 |
| 3.2. Obtenção da curva de retenção de água do solo | 21 |
| 3.3 Descrição dos Equipamentos utilizados na determinação da água do solo | 21 |
| 3.4 Instalação e condução..... | 23 |
| 4. RESULTADOS E DISCUSSÃO | 25 |
| 5. CONCLUSÕES | 30 |
| 6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRAFICAS..... | 31 |

RESUMO

Das várias técnicas utilizadas para a determinação da umidade do solo, a técnica da reflectometria no domínio do tempo (TDR) vem despertando bastante interesse, pois apresenta características desejáveis, como a mensuração em tempo real e a possibilidade de leituras automatizadas. Com o objetivo de avaliar o comportamento de um equipamento de TDR, utilizando o tensiômetro como método de referência, foi conduzido um experimento, com a coleta de valores da umidade do solo através da leitura do TDR em sondas colocadas a três diferentes profundidades no perfil, tendo um tensiômetro para cada profundidade da sonda, em uma trincheira de solo localizado em casa de vegetação no campus da UFCG em Campina Grande/PB. A tensiometria apresentou-se como método de referência bastante eficiente para as medições, pois sua metodologia é bem definida e seu funcionamento não influencia nem é influenciado pelo TDR. As curvas de umidade obtidas, quando comparadas mostraram grande variabilidade para as profundidades investigadas, quanto ao padrão de resposta, expresso pelo coeficiente angular das retas e o R^2 e o desvio percentual. Os ajustes efetuados a partir dos dados obtidos por camada, permitem observar dispersão dos valores principalmente na segunda e terceira profundidades.

ABSTRACT

Of the several techniques used for the determination of the humidity of the soil, the technique of the time domain reflectometry (TDR) is waking up plenty of interest, because it presents desirable characteristics, as the measure in real time and the possibility of automated readings. On the other hand, besides the high cost of the equipments, this method still presents calibration need. With the objective of evaluating the behavior of an equipment of TDR, using the tensiometer as reference method, an experiment was led, with the collection of values of the humidity of the soil and of the respective reading of TDR with three probes placed to three different depths tends a tensiometer for each probe, in a profile of located soil in vegetation house in the campus of UFCG in Campina Grande/PB. The tensiometer came as method of quite efficient reference for the measurements, because your methodology is very established and your operation doesn't influence nor it is influenced by TDR. The comparison curves showed great variability among the depths, for the answer pattern, expressed for the angular coefficient of the straight line and R^2 and the percentile deviation. The fittings made starting from the data obtained by layer they exhibited dispersion of the values mainly in Monday and third layer as display the comparison equations. The results of this work come to complement other studies reported in the literature, showing that the application of this model of TDR is practically unviable without one foresaw calibration for each soil type, because the variations of the answer of very big healthy TDR.

1. INTRODUÇÃO

A necessidade do uso racional dos recursos hídricos, aliado ao avanço da eletrônica, tem contribuído para a intensificação dos estudos do monitoramento da água no solo. O conhecimento do conteúdo de água no solo é importante na dinâmica de solutos, calor, gases e da própria água no solo. Em escala global, sua importância está relacionada com o importante sistema solo/água/planta/atmosfera. A otimização do uso da irrigação, baseado na melhoria de informações sobre a umidade do solo, fornecerá substancial contribuição evitando o desperdício do recurso água observado em diversas situações. Para isto, a determinação *in situ* do conteúdo de água no solo é de grande interesse.

O uso da instrumentação voltada para a obtenção de informações sobre o sistema água-solo é muito importante. Um método de quantificação ideal da água do solo deve basear-se numa propriedade física dependente apenas do seu conteúdo, produzindo uma resposta direta, rápida e confiável. Assim, algumas características desejáveis de um método (ou instrumento) para monitoramento da água no solo são:

- Evitar a amostragem destrutiva;
- Permitir repetição no espaço e no tempo;
- Permitir automação;
- Facilidade de calibração se necessária;
- Custo acessível;
- Segurança do operador;
- Rapidez na obtenção de resultados.

Várias são as alternativas para a determinação do conteúdo de água do solo, porém nenhuma consegue satisfazer todas as necessidades e requisitos básicos para que se torne o método ideal. Neste sentido, a Reflectometria no Domínio do Tempo (Time Domain Reflectometry – TDR), vem despertando muito interesse ultimamente, devido principalmente à possibilidade de leituras em tempo real e de automatização. O método baseia-se na relação que existe entre a umidade do solo e sua constante dielétrica. É uma técnica que preenche a maioria dos requisitos previamente buscados. Porém o seu custo é alto, devido principalmente à eletrônica sofisticada para medição do tempo da ordem de nanossegundos. Sua superioridade na detecção de variações do conteúdo de água do solo, sob diferentes condições hídricas, passa a ser um fator adicional que justifique sua adoção entre as demais técnicas.

Várias pesquisas têm sido conduzidas com o intuito de encontrar uma relação entre a umidade do solo e a leitura obtida pelo TDR, porém nenhuma ainda é utilizável universalmente sem um procedimento de verificação, resultados de estudos dessa natureza poderão esclarecer dúvidas sobre a aplicabilidade desta técnica. Portanto, torna-se necessária a calibração do equipamento utilizando um método que sirva de referência. Embora o melhor método de referência para determinação de umidade seja o método gravimétrico, por ser destrutivo, este método não permite a realização de muitas repetições, o que torna o ajuste final mais difícil. O uso da tensiometria poderia possibilitar várias repetições além de permitir a obtenção de resultados num melhor intervalo de tempo. Embora trabalhosa, a determinação do conteúdo de água no solo através da curva de retenção com as medidas do tensiômetro é bem estabelecida, não influenciando nem é influenciada pelo funcionamento do dispositivo de TDR.

O objetivo geral deste trabalho foi avaliar o desempenho da técnica de TDR na determinação do conteúdo de água do solo comparando seu comportamento com a tensiometria.

2. REVISÃO DE LITERATURA

2.1. Calibração dos equipamentos

Todo trabalho científico nas mais diversas áreas está relacionado à determinação de grandezas e das relações entre grandezas. As grandezas físicas são medidas por instrumentos para serem comparadas entre si ou a outras de interesse da pesquisa e para isso devem estar em conformidade com algum padrão, ou seja, as medições devem ser relativas a uma medida materializada ou a um sistema de medição estabelecido (BARTHEM, 2004). Qualquer medição requer pelo menos duas notações: o número, que representa a quantidade mensurada, e a unidade, que expressa o padrão de referência utilizado. Normalmente a medição está sujeita a desvios relativos ao instrumento ou à operação de medição em si, ao que se denomina acaso; um outro membro pode ser adicionado na expressão do resultado da medição: uma estimativa dos erros, normalmente conhecidos como desvio padrão (GOMES, 2000).

Todas as grandezas físicas básicas de uso generalizado possuem padrão internacional e órgãos que referendam os instrumentos e equipamentos de sua determinação. Métodos de medição alternativos ou ainda medições de grandezas de interesse em áreas mais restritas, especialmente em pesquisa, não apresentam em geral padrões definidos e a aferição de suas leituras requer procedimento específico (CICHOTA, 2003). O surgimento de novos métodos e equipamentos também requer que se verifique a correspondência de suas medidas com aquelas consideradas de referência. Quer sejam tradicionais, alternativos ou novos, os equipamentos e métodos de mensuração, para uso com segurança e confiabilidade mínimas, devem passar pelo processo denominado de calibração.

A calibração consiste na coleta de dados (leituras) feitas pelo equipamento ou sistema a ser calibrado, da coleta dos respectivos valores de referência e da análise da relação entre elas. Esta análise fornece a relação matemática ou estatística entre o valor de referência e a leitura do dispositivo calibrado, em adição, e talvez mais importante ainda, fornece a estimativa dos erros de medição. Erro é entendido como a diferença do valor medido para o valor real, que não pode ser conhecido e cuja estimativa é feita com base no valor de referência (VUOLO, 1996). A quantificação dos erros possibilita estimar a incerteza atribuível à medição, ou seja, caracterizar a dispersão dos valores medidos atribuível ao mensurando. Sua finalidade principal é a apuração da confiabilidade das medições e a seleção ou o teste de viabilidade do uso de um instrumento ou sistema de medição (SEBRAE, 2001).

2.2. Conteúdo de água do solo

O conteúdo de água de um solo é um dos atributos mais importante no sistema solo-agua-plantas, e um dos mais variáveis. O deslocamento e reciclagem dos elementos químicos, o desenvolvimento dos processos bioquímicos do solo, o crescimento das plantas e uma série de outras propriedades físicas do próprio solo como densidade, resistência à penetração, tensão de cisalhamento, etc., são significativamente influenciadas pelo teor de água. Sua quantificação é, portanto, de grande importância (CICHOTA, 2003).

Não é conveniente trabalhar-se com a quantidade absoluta de água no solo, mas sim com uma forma intensiva de expressá-la, a qual denomina-se teor de água ou umidade do solo. Pode-se ainda expressar a umidade em base de massa (U , kg. kg^{-1}) ou em base de volume (θ , $\text{m}^3. \text{m}^{-3}$), que é a forma mais usual (DIRKSEN, 1999).

$$U = \frac{m_a}{m_s} \quad (\text{Base de Massa}) \quad (1)$$

$$\theta = \frac{V_a}{V_t} \quad (\text{Base de Volume}) \quad (2)$$

Onde: m_a (kg) é a massa de água no solo, m_s (kg) é a massa de solo seco, V_a (m^3) é o volume de água no solo e V_t (m^3) é o volume total do solo. Sendo conhecidas as massas específicas do solo (ρ_s , $kg\ m^{-3}$) e da água (ρ_a , $kg\ m^{-3}$), as duas equações acima podem ser relacionadas para expressar a umidade conforme eq. (3):

$$\theta = U \cdot \frac{\rho_s}{\rho_a} \quad (3)$$

2.3 Métodos para determinação do conteúdo de água do solo

Os métodos de determinação do conteúdo de água no solo são comumente divididos em métodos diretos e indiretos.

O método gravimétrico é considerado como método direto, pois utiliza apenas as diferenças de pesagens entre o solo seco e úmido. Já os métodos indiretos utilizam alguma propriedade física do solo que seja dependente da quantidade de água presente nele (GARDNER, 1986 APUD CICHOTA, 2003). Há vários processos e equipamentos que permitem a determinação indireta do conteúdo de água do solo, como por exemplo, os métodos elétricos (resistência ou a capacitância do solo), os métodos térmicos (condutividade térmica), os métodos radioativos (atenuação de nêutrons rápidos ou de raios gama), a tensiometria (potencial matricial) e a reflectometria no domínio do tempo (constante dielétrica), entre outras.

O método direto é sem dúvida o que oferece a maior exatidão, não entanto é um método destrutivo e precisa de um intervalo de 24 a 48 horas para se conhecer o conteúdo de água do solo (GUERRA, 2000). Os indiretos têm vantagem sobre os métodos diretos por não ser destrutivo, permitir repetibilidade das leituras num mesmo ponto e dar resultados imediatos.

2.3.1 Método gravimétrico

Os métodos diretos ou gravimétricos baseiam-se na pesagem de amostras de solo úmido onde depois são submetidas a secagem, que pode ser realizada em estufa a 105°C ate atingir peso constante (GUERRA; 2000). A diferença entre as duas medidas representa a massa de água presente naquela amostra. Com a quantificação destas massas determina-se a umidade gravimétrica (U) equação (1) do solo e caso a densidade do solo ou o volume da amostra também for conhecido pode-se obter a umidade volumétrica (θ) pela equação (3).

Este método é bastante simples e barato, além de apresentar bastante precisão, motivo pelo qual é considerado como método de referência (método padrão), porém, é um método bastante trabalhoso, demandando um tempo entre a coleta da amostra e a obtenção do resultado de no mínimo 24 h. Além de ser um método não automatizável e destrutivo: (a amostra de solo deve ser retirada do campo e levada ao laboratório). Impossibilitando a obtenção de repetições num mesmo ponto.

2.3.2 Tensiometria

A utilização de tensiômetros para obtenção da umidade no solo através da curva de retenção é uma alternativa barata, sendo por isso mais acessível. Possui ainda, as vantagens de determinar o potencial total da água do solo, ser de utilização relativamente fácil e de produzir resultados de boa precisão.

Um tensiômetro é constituído de uma cápsula porosa, geralmente feito de cerâmica, conectada a um manômetro através de um tubo, geralmente de PVC, preenchido com água. O tensiômetro deve ser instalado de forma a proporcionar um perfeito contato entre a cápsula porosa e o solo. Quando o potencial matricial da água no solo é menor (mais negativo) que o da água nos poros da cápsula, a água se desloca do tensiômetro para o solo, através dos poros saturados, criando uma tensão de sucção medida pelo manômetro. Quando o solo esta úmido, o fluxo ocorre na direção reversa, até que um novo equilíbrio seja alcançado (KLAR, 1988).

Os manômetros de coluna de água são mais precisos, pois uma pequena variação no potencial gera uma grande variação na altura da coluna. No entanto pode-se precisar de

coluna de água muito comprida para altas tensões. Se ao invés de água for utilizado mercúrio (Figura 01), a sensibilidade aumenta por um fator de 12,6, porém a precisão decai na mesma razão. Outros tipos de manômetros e transdutores podem ser usados, existindo vários modelos, que podem apresentar grande sensibilidade e precisão, porém são muito mais caros, necessitam calibração, manutenção e sua resposta é influenciada pela temperatura mais significativamente que os manômetros de água e mercúrio. Assim, em experimentos de campo utiliza-se normalmente o modelo com manômetro de mercúrio (DIRKSEN, 1999).

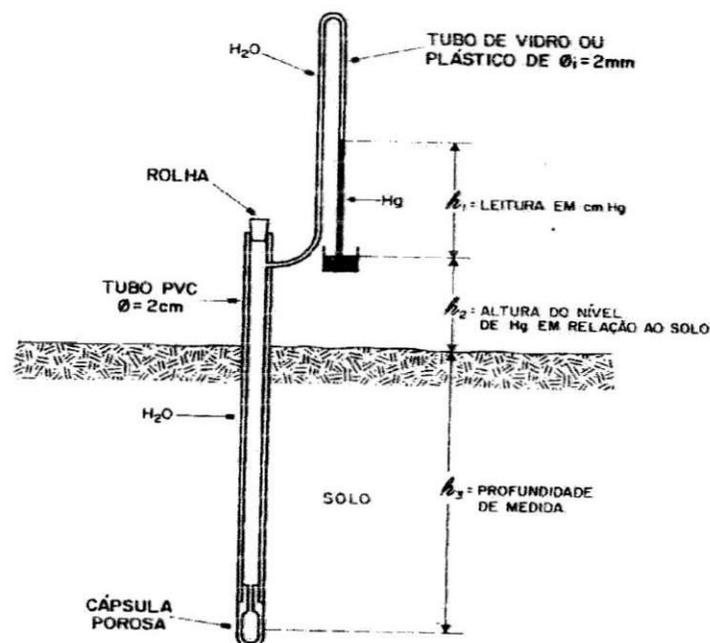


Figura. 01. Esquema de um tensiômetro

Em tensiômetros com manômetro de mercúrio o potencial matricial (Ψ_m , m) é calculado em função da ascensão do mercúrio (L , m) pela equação:

$$\Psi_m = -12,6h_1 + h_2 + h_3 \quad (4)$$

Onde h_1 é a altura da coluna de mercúrio, h_2 é a altura da cuba em relação ao nível solo e h_3 a profundidade de instalação do tensiômetro.

O tempo de resposta de um tensiômetro depende de fatores como a condutância da cápsula e sua instalação no solo (DIRKSEN, 1999; METRI, 1999). Quanto maior a

condutância menor será o tempo de resposta; em solos com muito baixa condutividade ou no caso de um mau contato de instalação com o solo, ou em solos muito expansivos, o tempo de resposta aumentará podendo comprometer a medição.

O tensiômetro apresenta funcionamento confiável até o intervalo de -80 a -90 kPa (KLAR, 1988). As variações das leituras aumentam quando o potencial fica mais negativo. A formação de bolhas de ar na água do tensiômetro é prejudicial ao seu correto funcionamento, por esse motivo a água utilizada deve ser deaerada, o material de confecção deve ser impermeável e ainda evita-se trabalhar em condição muito seca (GUERRA, 2000). Caso formem-se bolhas deve-se fluxar o tensiômetro, ou seja, trocar a água expulsando as bolhas. Para diminuir os erros pelo efeito da temperatura, o manômetro no campo deve estar protegido da luz direta do sol e ainda é aconselhável efetuar as leituras preferencialmente ao longo do tempo na mesma hora do dia.

2.3.3 Reflectometria no domínio do tempo

A técnica do TDR consiste na emissão de um pulso eletromagnético onde a velocidade de propagação deste pulso eletromagnético no meio é função de uma constante (K), denominada constante dielétrica. Assim, o método do TDR depende da determinação do valor do K para o solo. A diferença significativa entre a constante dielétrica da água e a constante dielétrica dos componentes da matriz do solo permite calcular o conteúdo de água no solo.

A velocidade de propagação v , de um pulso eletromagnético ao longo de uma linha de transmissão em um meio como o solo é igual a:

$$v = \frac{c}{\sqrt{k}} \quad (5)$$

Esta relação mostra que as interações eletromagnéticas com o meio retardam o pulso, ou seja, extraem parte de sua energia. Quantificar esta perda e conseqüentemente determinar a permissividade relativa exige dispositivos com precisão suficiente para medir velocidades de ordem de grandeza semelhante à da luz. Se através de uma haste metálica de comprimento L for emitido um pulso de voltagem, ele irá se propagar até o final da haste onde encontrará um

estrangulamento eletrônico, causado pela mudança de impedância, e um pulso ressonante irá retornar até o início. Medindo o tempo t transcorrido entre a emissão do pulso e a recepção do eco pode-se determinar a velocidade de propagação eq. (6) e assim a permissividade dielétrica relativa do meio que contém a haste eq. (7). Este é o princípio de funcionamento da reflectometria no domínio do tempo.

$$v = \frac{2L}{t} \quad (6)$$

$$k = \left(\frac{c \cdot t}{2 \cdot L} \right) \quad (7)$$

Onde: c é a velocidade da luz no vácuo ($3 \times 10^8 \text{ m s}^{-1}$), e K é a constante dielétrica do meio; Embora a velocidade de propagação do pulso não seja diretamente medida é possível deduzi-la, em função do comprimento L da haste ao longo da qual ela se propaga, pela equação(7).

Considerando que a constante dielétrica é uma característica altamente correlacionada com o teor de água, torna-se possível estabelecer uma relação entre ambas de forma que se possa a partir de uma determinar-se a outra.

A Tabela 1 exhibe o valor da constante dielétrica relativa de alguns materiais, onde se pode observar que a constante dielétrica da água é muito superior à dos outros materiais constituintes do solo, fazendo com que a permissividade relativa aparente do solo seja definida basicamente pelo seu teor de água.

Tabela 1. Constante Dielétrica relativa de alguns constituintes do solo.

| Material | Constante Dielétrica |
|-------------|----------------------|
| Ar | 1 |
| Água (20°C) | 80 |
| Gelo(-3 °C) | 3 |
| Basalto | 12 |
| Granito | 7-9 |
| Silte seco | 3,5 |
| Areia seca | 2,5 |

Fonte: Cichota, 2003.

Em 1980, Topp et al. propuseram uma relação empírica entre umidade do solo (θ) e constante dielétrica (k), que serviria para uma ampla gama de tipos e texturas de solos, motivo pelo qual esta relação ficou conhecida como “Equação Universal” de calibração do TDR (GUERRA, 2000).

$$\theta = 0,053k + 0,0229k - 0,00055k^2 + 0,0000043k^3 \quad (8)$$

Onde:

$$\theta = \text{cm}^3 \text{ cm}^{-3}$$

K = constante dielétrica do solo.

Considerando que o tempo de trânsito do pulso eletromagnético é muito pequeno, da ordem de 10^{-9} segundos, a técnica de quantificação necessita ser sofisticada e precisa, exigindo, portanto, equipamento eletrônico complexo e conseqüentemente caro (MELO FILHO, 2003).

A Constante dielétrica do solo é determinada utilizando um equipamento constituído basicamente de um emissor de pulso, cabos, hastes (normalmente duas ou três) e um interpretador de sinal, que percebe a emissão do pulso eletromagnético e a chegada do pulso refletido, determinando assim o tempo de percurso.

A técnica do TDR pode ser utilizada para estudos e investigações em pedologia, inclusive com aplicações para o desenvolvimento de métodos para determinação da condutividade hidráulica do solo (MELO FILHO, 2003). Devido à sua facilidade na obtenção de medidas não destrutivas e sem apresentar riscos para o ser humano e o ambiente, o TDR tem sido bastante utilizado para quantificar o conteúdo de água do solo. Embora apresente desvantagens, como o alto custo, a complexa calibração e a existência de alguns erros inerentes à própria técnica (TOMMASELLI, 1997).

Topp et al. (1980) foram os primeiros pesquisadores que aplicaram o princípio do TDR para determinar o conteúdo de água no solo. Em seu trabalho, os autores mediram o tempo de trânsito do pulso eletromagnético em um cabo coaxial de comprimento conhecido e correlacionaram o valor da constante dielétrica, K , do solo com o seu conteúdo de água, θ . Desde então a técnica passou por diversos aperfeiçoamentos e melhorias que resultaram em sensível aumento tanto da precisão quanto das possibilidades de aplicação (TOMMASELLI, 1997).

Os Fatores que afetam as medidas do TDR são:

1) Temperatura: Segundo Zegelin et al. (1992) apud Otto & Alcaide. (2001) em situações onde podem ocorrer grandes flutuações de temperatura, a influência da mesma na constante dielétrica da água livre deve ser considerada. Ainda segundo o autor, à superfície do solo, onde a temperatura pode chegar a 323 K, a correção da constante dielétrica da água é de quase 11%. Portanto, para medidas próximas à superfície, determinações simultâneas de temperatura são necessárias.

2) Textura do solo: Klemunes (1998) apud Junior (2003), solos argilosos e arenosos têm composições minerais distintas: nos argilosos, predominam magnésio e cálcio, enquanto que nos arenosos, sílica e quartzo. Esta diferença produz uma grande variação nos valores de constante dielétrica: cerca de 4,0 para solos de textura argilosa e 8,0 para solos de textura arenosa. Zegelin et al. (1992) apud Junior (2003) relata que a equação 10 funciona melhor em solos arenosos do que em argilosos.

3) Densidade do solo: A constante dielétrica do solo é função da sua densidade volumétrica. Para solos de textura fina, a densidade é uma variável importante na determinação da constante dielétrica (TOMMASELLI, 1997)

4) Teor de matéria orgânica: de acordo com Herkelrath et al. (1991) apud Junior (2003), a constante dielétrica está relacionada ao conteúdo de matéria orgânica.

5) Teor de sais no solo: a constante dielétrica complexa usada no TDR assume que a sua porção imaginária é insignificante Roth et al. (1990) Apud Junior (2003). Porém este fato não é verdadeiro sob condições salinas. Na sonda pode ocorrer um curto-circuito, tornando o ponto de inflexão final difícil de identificar.

6) Teor de óxidos de ferro e manganês no solo: para Tommaselli (1997), não é variável significativa. Roth et al. (1992) apud Andrade et al. (2003) detectaram variações na curva de calibração para solos com altos teores de óxido de ferro.

2.4. Retenção de água no solo

A energia potencial da água no solo em estado não saturado é menor do que se estivesse livre, fora da influência da matriz do solo, no mesmo nível gravitacional. Esta diferença energética é provocada principalmente pela ação de três forças que se opõe à gravidade e a evaporação para manter a água no solo. Estas forças são a adesão aos componentes sólidos do solo; a capilaridade, devido às forças de coesão entre as moléculas de água e de adesão entre estas e os vários constituintes do solo, e a atração osmótica causada pela diferença de concentração iônica entre dois pontos (REICHARDT, 1985). Dessa forma diz-se que a água fica “retida” no solo.

O nível de energia com que a água encontra-se retida num meio poroso, como o solo, pode ser descrito pelo seu potencial (Ψ), que pode ser expresso da seguinte forma:

- 1- Energia por Unidade de Massa – suas unidades usuais são: erg/g e joule/kg.

- 2- Energia por Unidade de Volume – possui dimensão de pressão, pois da mesma forma com a energia pode ser expressa como um produto de pressão por volume o quociente de energia por volume expressa uma relação de pressão. Suas unidades são: dina/cm², bar, Atm.
- 3- Energia por Unidade de Peso – carga hidráulica - possui dimensão de comprimento L (m).

Estas duas últimas formas de expressar a energia são convenientes para serem usadas em relações entre profundidades e distâncias e também são as unidades utilizadas pelos equipamentos de medição. A relação entre os dois meios equivalentes de expressar o potencial da água no solo é dada pela eq. (9).

$$P = \rho_a \cdot g \cdot h \quad (9)$$

Onde:

ρ_a - representa a massa específica da água (kg m⁻³);

g - a aceleração gravitacional (m s⁻²);

h - a altura da coluna de mercúrio;

Para a determinação do movimento da água e dos solutos no solo e deste para as plantas o estado energético da água quando se encontra retida no solo é muito mais importante que a quantidade (LIBARDI, 2004).

A relação entre o potencial matricial e o conteúdo de água do solo é uma característica do solo, denominada de curva de retenção ou curva característica da água no solo. A retenção de água é uma propriedade do solo, relacionada a forças superficiais que determinam o nível de energia da água do solo. Existe dois processos responsáveis pela retenção um deles ocorre nos microporos (capilaridade) o outro processo ocorre nas superfícies dos sólidos do solo como filmes presos a superfície, pela adsorção (LIBARDI, 2004). A curva de retenção de água do solo é afetada pela estrutura, num solo compacto terá menor porosidade total e menor será conteúdo de água a saturação, diminuindo assim a redução inicial da curva, quando aplicado uma sucção. À medida que os potenciais decrescem, os fenômenos de adsorção se tornam mais atuantes e menos afetados pela distribuição do tamanho dos poros. Para altos

teores de conteúdo de água a curva de retenção depende da geometria e da distribuição dos poros. Já para teores baixos, a curva é praticamente independente do espaço poroso, passando a serem importantes os fenômenos de adsorção, comportamento observado na figura 02 (GUERRA, 2000).

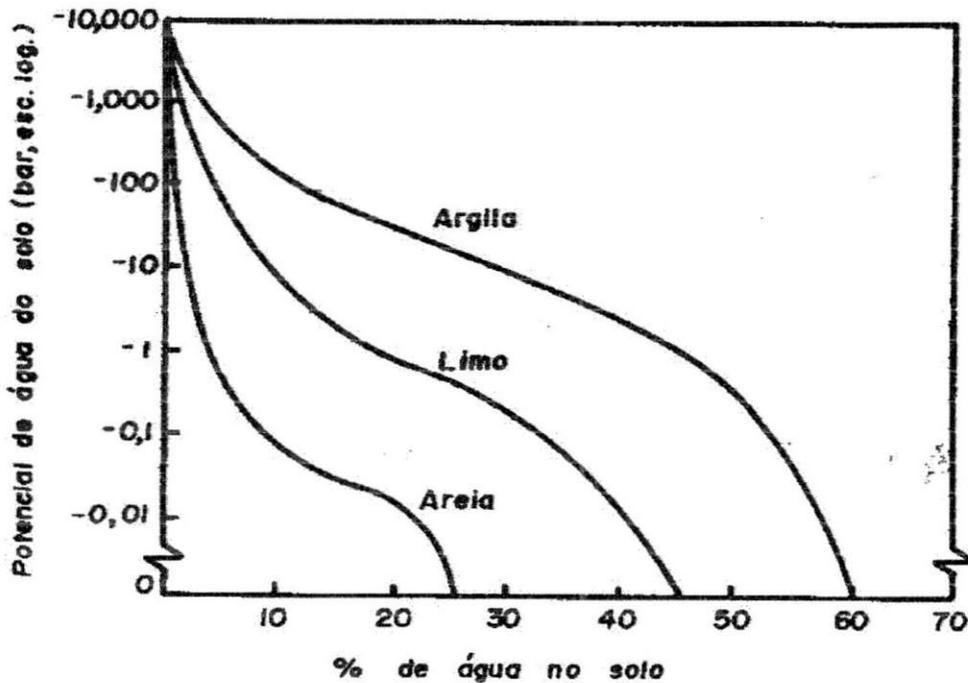


Figura 02. Curvas de retenção de água para diferentes classes texturais.

Para confecção da curva de retenção obtém-se pares de dados do conteúdo de água do solo e o respectivo potencial aplicado, em geral utilizando-se amostras saturadas previamente durante 24 h em laboratório. Estas amostras colocadas sobre placas porosas são submetidas a tensões ou pressões conhecidas e, por meio de pesagens, determina-se o conteúdo de água correspondente. O equipamento utilizado para confeccionar a curva de retenção de água do solo é a câmara de extração de Richards que é uma câmara construída para suportar altas pressões, com uma placa de cerâmica porosa no seu interior (Figura 03). A placa de cerâmica tem sua face inferior coberta por um diafragma de borracha, selado em sua borda. Entre a placa e o diafragma existe uma tela de náilon para permitir o fluxo de solução, quando se aplica uma pressão, (DIRKSEN, 1999; GUERRA, 2000; LIBARDI, 2004).

Existem vários modelos matemáticos que podem ajustar a curva de retenção (BRUCE & LUXMOORE, 1986). Um dos mais utilizados é o modelo descrito pela equação (10), conhecido como modelo de Mualem - van Genuchten (1980) (LIBARDI, 2004), que relaciona a umidade a base de volume (θ) ao valor absoluto do potencial matricial ($|\Psi_m|$):

$$\theta = \theta_r + \frac{\theta_s - \theta_r}{\left[1 + (\alpha \cdot |\Psi_m|)^m\right]^{\frac{1}{n}}} \quad (10)$$

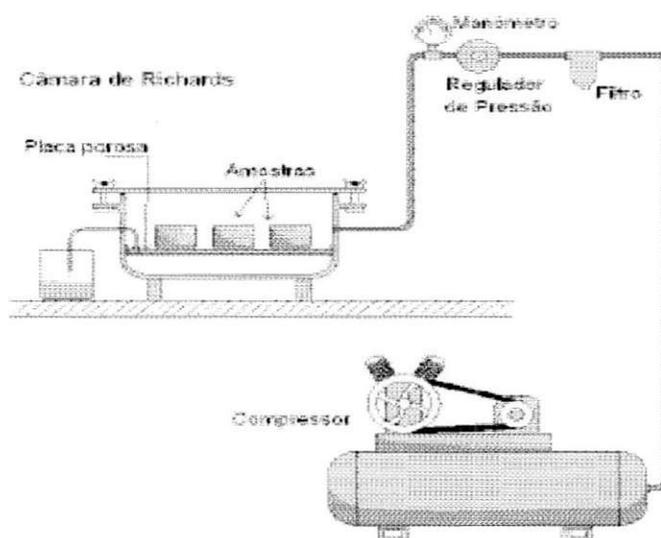


Figura 03. Equipamento laboratorial para determinação da curva de retenção da água no solo, (câmara de Richards).

O modelo proposto considera um valor mínimo para umidade a residual (θ_r), geralmente não nulo, que é atingido em potenciais infinitamente negativos e um valor máximo, θ_s (umidade de saturação), atingida com potencial matricial nulo. Estes dois parâmetros podem ser mensurados ou estimados e os parâmetros empíricos α , m e n são estimados por regressão (LIBARDI, 2004).

A retenção de água no solo, assim como outras propriedades hidráulicas, apresentam variabilidade elevada (REICHARDT, 1990). Durante a confecção da curva de retenção de um solo podem ocorrer erros consideráveis se poucas amostras forem utilizadas, ou se elas forem

mal coletadas ou mal trabalhadas. A variância das leituras e a variabilidade espacial devem sempre ser preocupação em trabalhos com a curva de retenção (BRUCE & LUXMOORE, 1986; CASSEL & KLUTE, 1986). A determinação dos pontos para compor a curva de retenção também deve ser executada com cuidado, pois um mau contato das amostras com as placas porosas e falhas na determinação da umidade, correspondente a certo potencial no qual é submetido podem alterar sensivelmente o resultado final da curva a ser obtida, aumentando a dispersão dos pontos, e em consequência a variância ou a incerteza da relação.

3. MATERIAL E MÉTODOS

3.1. Caracterização da área experimental

3.1.1. Localização

O experimento foi conduzido em ambiente protegido (casa de vegetação) no Departamento de Engenharia Agrícola da Universidade Federal de Campina Grande - Campus de Campina Grande – PB, no período de 12 de setembro a 13 de novembro de 2003.

3.1.2. Solo

O solo utilizado foi uma Argila proveniente da cidade de Lagoa Seca - PB. As características físico-hídricas são apresentadas na Tabela 2.

Tabela 2. Características físico - hídricas do solo utilizado no estudo.

| | |
|--|-------|
| Areia (%) | 43.53 |
| Silte (%) | 15.56 |
| Argila (%) | 40.91 |
| Densidade Global (g/cm ³) | 1.48 |
| Densidade das partículas(g/cm ³) | 2.67 |
| Porosidade (%) | 55.43 |
| Capacidade de campo (%) | 14.70 |
| Ponto de murcha (%) | 7.95 |
| Água Disponível (%) | 6.75 |

3.2. Obtenção da curva de retenção de água do solo

A curva de retenção de água do solo utilizado foi confeccionada no Laboratório utilizando a câmara de extração de umidade de Richards. Nesta foi obtido o conteúdo volumétrico θ (cm³ cm⁻³) com relação a tensões aplicadas pré-estabelecidas (Kpa). Em seguida expressou-se a curva de retenção de água do solo de acordo com os parâmetros da equação de ajuste proposta por van Genuchten (1980).

A curva foi ajustada utilizando-se o software SWRC (*Soil Water Retention Curve* versão Beta 3.0) para ajuste de curvas, que emprega o método iterativo de Newton - Raphson, estimando os cinco parâmetros θ_s , θ_r , α , m e n independentemente, observando-se as seguintes condições: $0 < \alpha < 1$, $0 < m < 1$ e $n > 1$.

3.3 Descrição dos Equipamentos utilizados na determinação da água do solo

Foi utilizado um TDR TRIME – FM IMKO Micromodultechnik constituído de sondas de 2 hastes paralelas e comprimento de 10 cm. De acordo com o fabricante, o software

embutido no equipamento utiliza a equação universal de Topp para quantificar o conteúdo de água do solo em função da constante dielétrica. A Figura 4 apresenta uma fotografia do aparelho utilizado. A performance do TDR foi feita comparando os resultados com leituras de tensiômetros de Hg fabricados pela da SoilTeste.(Ver Figura 5).



Figura 04. TDR TRIME FM

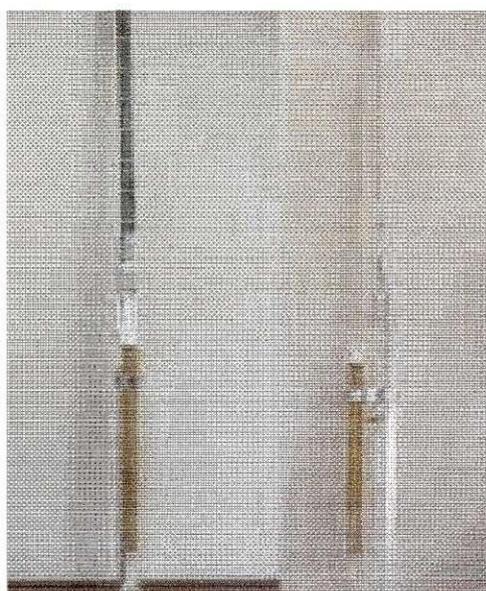


Figura 05.- Tensiômetro de Mercúrio utilizado no ensaio.

3.4 Instalação e condução

Uma trincheira com dimensões de 0,8 x 0,8 x 1,0 m foi aberto no solo da casa de vegetação e em seguida preenchido com solo previamente peneirado através de uma peneira de 2,0 mm e homogeneizado. As profundidades de instalação das sondas de TDR foram de 0 - 10, 20 - 30 e 40 - 50 cm. Os tensiômetros foram instalados em três diferentes profundidades, 10, 30 e 50 cm, distanciados 10 cm de cada haste do TDR. Para a instalação dos equipamentos até a profundidade pré-definida foi utilizado um trado com diâmetro idêntico ao da cápsula do tensiômetro, de modo que proporcionasse o melhor contato desta com o solo. Para a instalação do TDR fez-se o furo com o auxílio do trado até 10 cm antes da profundidade desejada, em seguida introduziu-se a sonda pressionando-a até atingir a profundidade pré-definida.

Logo após a instalação dos equipamentos no perfil do solo, os tensiômetros foram fluxados com água destilada para a retirada do ar do seu interior. Em seguida o perfil foi saturado com água, suspendendo o fornecimento de água quando as leituras dos tensiômetros tornaram-se constantes e próxima a “zero”, o que indicava que o perfil do solo estava saturado (potencial matricial nulo). A Figura 6 mostra o solo com os instrumentos já instalados durante o processo de saturação. A partir deste momento foram iniciadas as leituras diárias dos equipamentos sempre feitas às 16:00 horas, com o intuito de prevenir a ação do efeito da temperatura sobre as mesmas. A Figura 7 mostra o solo após a saturação com os instrumentos instalados. As leituras foram suspensas no momento a partir do qual o tensiômetro localizado a 10 cm de profundidade deixou de funcionar devido ao solo atingir uma condição de não saturação tal em que o tensiômetro não mais funciona. Isto aconteceu aos 60 dias após início das leituras. As leituras obtidas com os tensiômetros foram transformadas em potenciais mátricos e posteriormente em conteúdos de água utilizando a curva de retenção de água do solo.

As leituras do conteúdo de água com o TDR foram feitas simultaneamente com a leitura dos tensiômetros.

Para a avaliação do desempenho do TDR, na detecção de variações de umidade do solo, foram efetuadas leituras sob diferentes conteúdos de água no solo.



Figura 06. Perfil do solo sendo saturado.

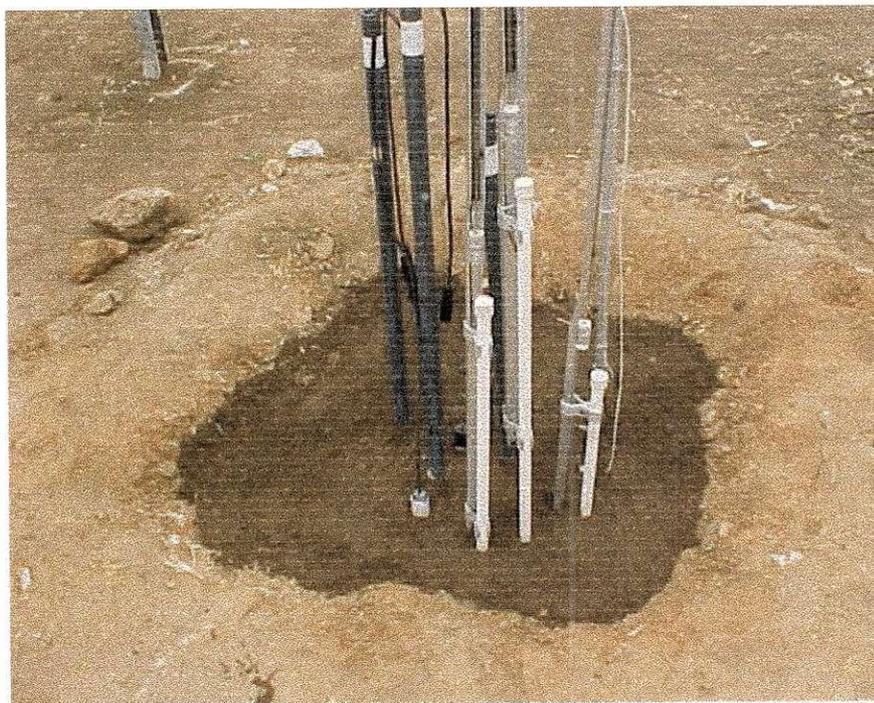


Figura 07. Vista dos instrumentos instalados no perfil.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

A Tabela 3 apresenta os dados de potencial matricial versus conteúdo volumétrico de água do solo utilizados para a construção da curva de retenção. Utilizando a metodologia de van Genuchten 1980 e o Software SWRC, os dados foram ajustados e uma Curva de retenção de água ajustada foi obtida (Figura 8). Os valores ajustados são também apresentados na mesma tabela. A partir da curva de retenção de água ajustada obtiveram-se os parâmetros $\alpha=0.2132$, $m=0.2364$, $n= 2.4273$ $\theta_s =0.385$ e $\theta_r =0.118$ da equação (10) com $R^2 = 0.993$, o que permitiu inferir o conteúdo de água em função do potencial matricial, determinado pelo tensiômetro. Com os dados correspondentes obtidos diariamente foram plotados os gráficos do conteúdo de água determinado pelo tensiômetro e TDR.

Tabela 3. Dados da curva de retenção do solo medido pela câmara de Richards e estimado pela equação de van Genuchten.

| Potencial matricial (Kpa) | Conteúdo de água em volume ($\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$) Medido | Conteúdo de água em volume ($\text{cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$) Estimado |
|------------------------------|--|--|
| 0 | 0,387 | 0,385 |
| 10 | 0,274 | 0,285 |
| 33 | 0,219 | 0,205 |
| 100 | 0,160 | 0,164 |
| 300 | 0,143 | 0,143 |
| 500 | 0,137 | 0,136 |
| 800 | 0,135 | 0,132 |
| 1000 | 0,132 | 0,130 |
| 1200 | 0,126 | 0,129 |
| 1500 | 0,118 | 0,128 |

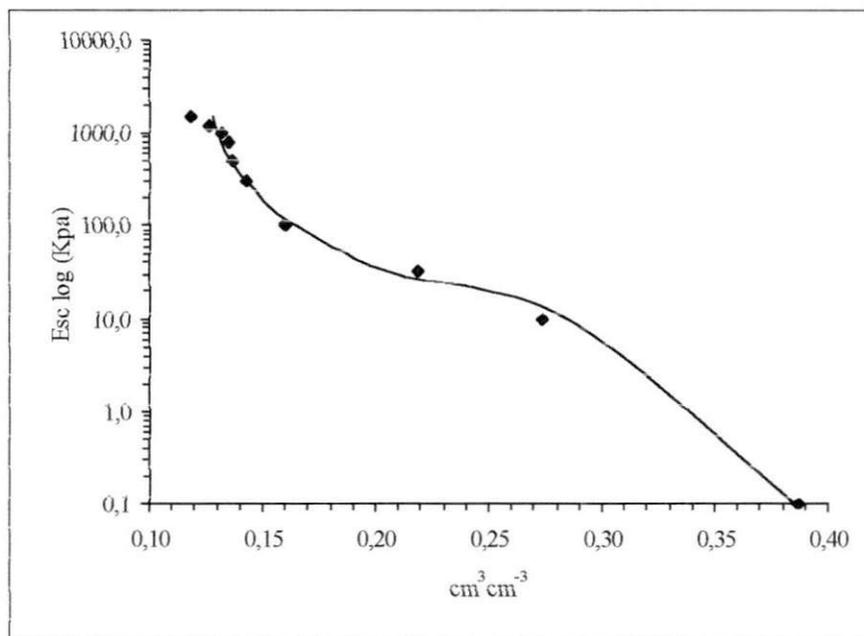


Figura 8. Curva de retenção de água do solo ajustada pelo modelo de van Genuchten.

A regressão comparando os resultados obtidos com o TDR e com os tensiômetros no intervalo de profundidade de 0-10 cm pode ser observada na Figura 9.

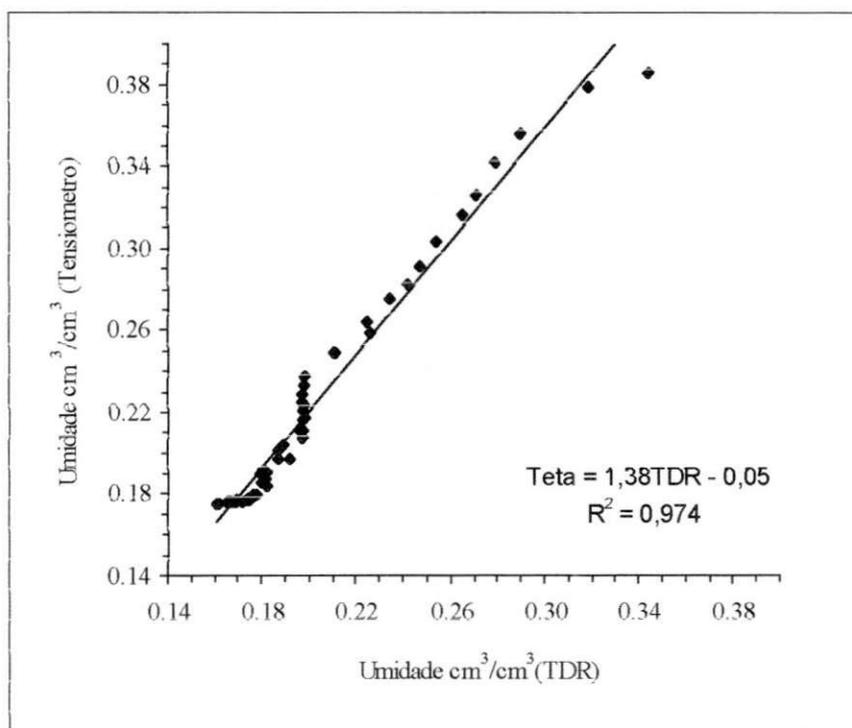


Figura 9. - Comparação dos conteúdos de água do solo obtidos com o TDR e com o tensiômetro, na profundidade de 0-10 cm.

Observa-se considerável discrepância entre os resultados obtidos com ambas metodologias com os conteúdos de água obtidos pelo tensiômetro maiores que aqueles obtidos com o TDR. Observa-se também que esta discrepância aumenta com o conteúdo de água do solo. A maior aproximação entre as leituras do conteúdo de água do solo obtidas pelos equipamentos neste intervalo de profundidade ocorreu para conteúdos de água menores que $0,20 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$. Nesta profundidade a média do conteúdo de água medido pelo tensiômetro foi de $0,221 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$ enquanto que a do TDR foi de $0,201 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$. O desvio percentual das leituras do TDR em relação ao método de referencia, o tensiômetro, variou numa faixa de 1,0 % a 18,6 %. A equação de regressão $Teta = 1,38 \text{ TDR} - 0,05$ da curva nesta profundidade, evidencia com mais precisão o comportamento do TDR, o coeficiente angular da reta apresenta valor igual a 1,38 com $R^2 = 0,975$, constatando que as leituras feitas pelo TDR são subestimadas em relação as do tensiômetro.

Na camada de 20-30 cm de profundidade (Figura 10) pode se observar que a discrepância entre os conteúdos de água obtidos pelo TDR e pelo tensiômetro aumentou sendo novamente os dados obtidos com o TDR subestimados. A equação de regressão obtida apresentou coeficiente angular igual a 2,22 com $R^2 = 0,928$ sendo que a maior aproximação das leituras ocorreu para os valores do conteúdo de água menores que $0,250 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$. Para os valores acima deste a dispersão aumentou entre as leituras, comportamento idêntico ao da profundidade de 0 – 10 cm. Quando o conteúdo de água foi medido com o TDR seu valor foi de $0,247 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$ em comparação com o valor de $0,279 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$ para o tensiômetro. O desvio percentual dos resultados obtidos com ambos métodos variou entre 0,2 % e 24,3 %.

Na camada de 40 – 50 cm de profundidade como mostra a Figura 11 na equação de regressão o coeficiente angular da reta foi igual a 2,10 e $R^2 = 0,747$. Com relação a aproximação dos valores do conteúdo de água do solo obtidos pelos equipamentos, os valores estão menos dispersos para o conteúdo de água menor que $0,286 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$, acima deste valor a tendência se manteve igual a das camadas anteriores, ou seja, aumentou consideravelmente a dispersão das leituras. O conteúdo de água médio obtido pelo tensiômetro foi de $0,315 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$ e de $0,288 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$ para o TDR, com um desvio percentual das leituras ocorrido numa faixa de 0,4 % a 17,2 % menores que a do tensiômetro.

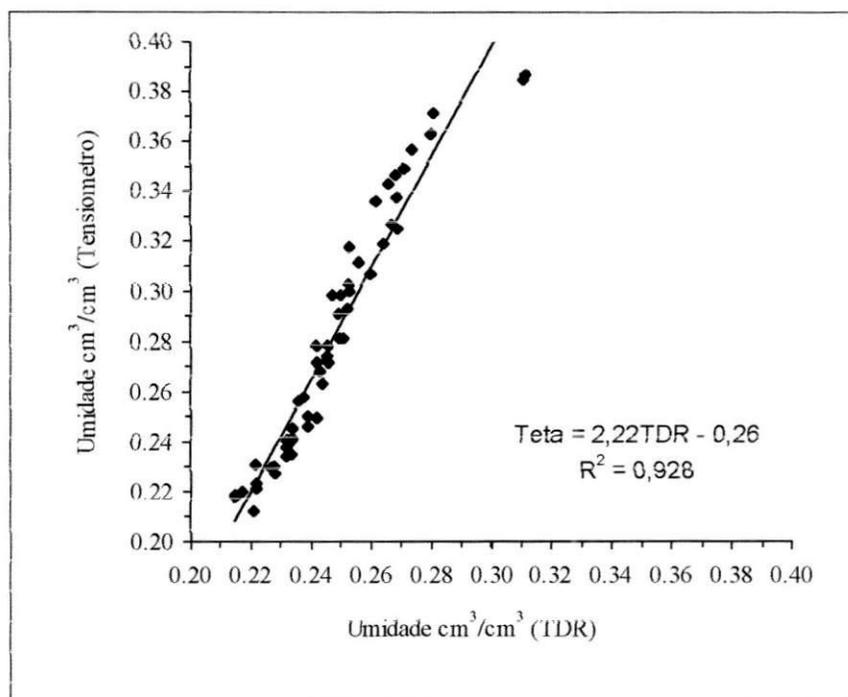


Figura 10.- Comparação dos conteúdos d água do solo obtidos com o TDR e com o tensiômetro na profundidade de 20-30 cm.

O que se pode constatar ao longo das diversas profundidades do perfil do solo é que as relações entre as leituras obtidas pelo TDR e o tensiômetro mantiveram o mesmo comportamento, ocorrendo menor dispersão entre as mesmas quando o solo apresentou um menor conteúdo de água. Ficou também evidenciado que em todas as profundidades os valores do TDR foram subestimados em relação aos do tensiômetro. Resultados estes foram verificados por Silva e Gervásio (1999) e Tomasselli e Bachi (2001).

Otto & Alcaide (1999) em trabalhos conduzidos em solo franco-arenoso constataram que o modelo de TDR utilizado no presente estudo não apresentou bons resultados. Gomide (1998), constatou também que este tipo de equipamento subestimou os valores do conteúdo de água para um solo argiloso.

Zegelin (1992) verificou que para temperaturas da ordem de 323 K ocorreu um aumento de 11 % no valor da constante dielétrica do solo. Seyfred et al (2001) também verificou que a temperatura influencia na constante dielétrica do solo.

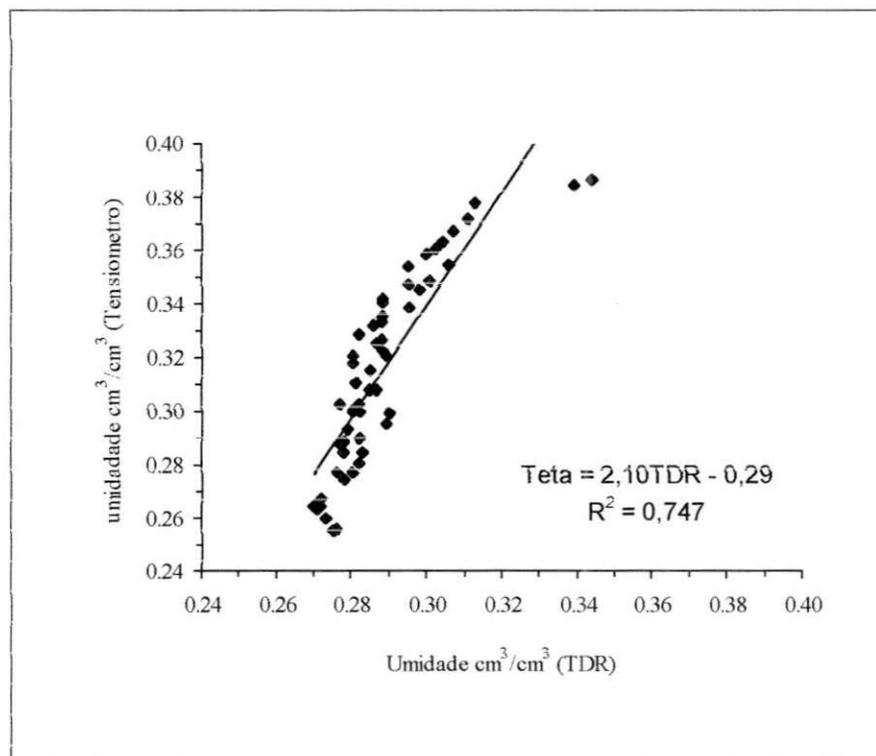


Figura 11.- Comparação dos conteúdos de água do solo obtidos com o TDR e com o tensiômetro, na profundidade de 40-50 cm.

A grande variação de respostas apresentadas pelo conjunto de dados refletiu-se no ajuste das curvas, não sendo possível encontrar uma equação que pudesse ser satisfatoriamente utilizada em todas as profundidades. Logo a avaliação deste equipamento é um procedimento importante para definir sua aplicabilidade em escala.

5. CONCLUSÕES

Houve discrepância entre o conteúdo de água do solo determinado pelo TDR e o tensiômetro, sendo esta discrepância similar nos diferentes intervalos de profundidade de solo estudadas em todas as camadas. O TDR subestimou o conteúdo de água do solo, encontrando-se um desvio percentual médio da ordem de 24,3 %. Esta diferença entre os métodos aumentou a medida que a profundidade do solo aumentou. Os resultados obtidos mostram a necessidade de calibração deste equipamento antes de ser utilizado no campo, ficando assim evidenciando que a equação universal de Topp não se ajusta ao tipo de solo utilizado no estudo.

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRAFICAS

ANDRADE, C. de L. T, COSTA. E. L. da C, ALBUQUERQUE, P. E. de. **Desenvolvimento e Calibração de guias de sonda para TDR**. Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental, Campina Grande, v7, n.1, p.173-176, 2003.

BARTHEM, R. **Vocabulário de metrologia legal**. Instituto de Física-UFRJ. Disponível em: < <http://www.if.ufrj.br/metrologia> >. Acesso em março. 2004.

BRUCE R. R.; LUXMOORE, R. J. Water retention: field methods. In KLUTE, A. (Ed.). **Methods of Soil Analysis I**, Physical and Mineralogical Methods. Madison: Soil Science Societe of America, 1986. cap. 27, p. 663-686.

CASSEL, D. K.; KLUTE, A. Water potential: tensiometry. In KLUTE, A. (Ed.). **Methods of Soil Analysis I**, Physical and Mineralogical Methods. Madison: Soil Science Societe of America, 1986. cap. 23 p. 563-596.

CICHOTA, R. **Avaliação no campo de um TDR segmentado para determinação da umidade do solo**. Piracicaba, 2003. 121p. Dissertação (Mestrado) - ESALQ, USP.

DIRKSEN, C. **Soil physics measurements**. Reiskirchen: Catena-Verlag, 1999, 154 p.

GOMES, F. P. **Curso de estatística experimental**. 14.Ed. Piracicaba, 2000. 477 p.

GUERRA, H. O. C. **Física dos Solos**. Campina Grande: UFCG, 2000. 173p.

GOMIDE, R. L. **Monitoramento para manejo de irrigação: instrumentação, automação e métodos.** In: Congresso Brasileiro de Engenharia Agrícola, 27, 1998, Poços de caldas, MG, Anais, Simpósio. Lavras: UFLA, ISBEA, 1998, p.133-238.

JOAQUIM JUNIOR, G. O. **Desempenho do reflectômetro no domínio do tempo na detecção de variações de umidade do solo.** Piracicaba, 2003. 81 p. Dissertação (mestrado) - Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, USP.

KLAR, A. E. **A água no sistema-solo-planta-atmosfera.** 2ª ed. São Paulo. Nobel 1988.

LIBARDI, P. L. **Dinâmica da Água no Solo.** 2.ed. Piracicaba: O próprio, 2004. 509 p.

MELO FILHO, J. F. de. **Variabilidade dos parâmetros da equação da condutividade hidráulica em função da umidade de um latossolo sob condições de campo.** Piracicaba, 2003. 145p. Tese (Doutorado) - ESALQ, USP.

METRI, J. E da C. **Manejo de solo e água.** Campina Grande. PB. 1999. 170p. UFCG. (notas de aulas).

OTTO, S. R. L, ALCAIDE, M. **Utilização do método TDR -Tensiômetro na obtenção da curva de retenção de água no solo.** Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental, Campina Grande, v5, n.1, p.81-87, 2001.

REICHARDT, K. **Processo de transferência no sistema solo-agua-planta.** 4ª ed. Campinas, Fundação Cargill, 1985, 466p.

REICHARDT, K. **A água em sistemas agrícolas.** São Paulo, ed manolle, 1990.

SEYFRIED, M. S.; MURDOCK, M.D. Response of a new soil water sensor to variable soil, water content and temperature. **Soil Science Society of American Journal**, Madison, v.65, n.1, p. 28-24, 2001.

SERVIÇO BRASILEIRO DE APOIO ÀS MICRO E PEQUENAS EMPRESAS.

Metrologia: Calibração <<http://www.sebraesc.com.br/sebraetib/conceitos/metrologia/calibração>

> acesso em março .2004).

SILVA, E. L, GERVASIO, E. S. **Uso do instrumento TDR para determinação do teor de água em diferentes camadas de um Latossolo Roxo distrófico**. Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental, Campina Grande, v3, n3, p.417-420, 1999.

TOMASELLI, J. T. G. **Influência de algumas características do solo sobre a calibração de um aparelho de TDR (time domain reflectometry)**. Piracicaba, 1997. 109 p. Tese Doutorado – Centro Nacional de Energia na Agricultura, Universidade de São Paulo.

TOMMASELLI, J. T. G, BACHI, O. O. S. Calibração de um equipamento de TDR para medida de umidade de solos. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v.36, n.9, p. 1145-1154, 2001.

VUOLO, J. H. **Fundamentos da teoria dos erros**. 2.ed. São Paulo: Ed. Edgar Blüncher, 1996. 249 p.

