

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO

Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”

Departamento de Engenharia Rural

Grupo de Mecanização e Agricultura de Precisão - gMAP

**Equação de calibração de um TDR comercial
para determinação do teor de água em solos de Piracicaba-SP**

Graduando: Gustavo Fedrizzi da Silva

Orientadores: Prof. Dr. José Paulo Molin

Prof. Dr. Carlos T. dos Santos Dias

Piracicaba, agosto de 2009

Equação de calibração de um TDR comercial para determinação de teor de água em solos de Piracicaba-SP

Introdução

A água é o recurso renovável com maior probabilidade de se tornar escasso, devido à sua poluição por esgoto doméstico, e também por resíduos químicos agrícolas e industriais, por isso deve ter seu uso racionalizado em situações que não o consumo humano, como é o caso de seu largo e elevado uso na irrigação agrícola. Segundo JOAQUIM (2003), a evolução da conscientização da necessidade do uso racional dos recursos naturais, principalmente da água, aliada ao avanço da eletrônica, tem contribuído para a intensificação dos estudos de monitoramento da água no solo. A agricultura é um dos maiores consumidores de água, por volta de 70% do consumo total, e a otimização do uso da irrigação, baseado na melhoria de informações sobre a umidade do solo garante substancial contribuição, evitando o desperdício observado em diversas situações. Logo, a determinação *in situ* do conteúdo de água no solo é de grande interesse para a irrigação de precisão, como para manejo e conservação de solos. A importância de tecnologia empregada em irrigação é evidenciada na evolução da área irrigada do Brasil de 64.000 ha em 1950 para 3.149.000 ha em 2001 (CHRISTOFIDIS, 2002).

A água é essencial para a agricultura como um nutriente no desenvolvimento químico-fisiológico das plantas, como por exemplo, sua participação na fotossíntese, sua influência pode ser observada, segundo CHAVES (1991), na taxa de assimilação de CO₂ nas folhas das plantas que é deprimida sob deficiência moderada de água, primordialmente como consequência do fechamento de estômatos. Em consequência desses decréscimos na assimilação de CO₂ e levando-se em conta a importância desses assimilados às plantas, e conseqüentemente ao rendimento agrônômico e econômico da cultura, estabelece-se a importância tecnoeconômica da água, e dos sistemas de irrigação, às culturas. Para outros processos também é de vital importância na planta, como para o transporte de nutrientes, meio para reações químicas, regulação de temperatura e crescimento celular.

JENSEN et al. (2000), apud GARZELLA (2004), afirmam que nos últimos vinte anos, o potencial para se melhorar o manejo da irrigação aumentou substancialmente devido, entre outros fatores, principalmente à disponibilidade comercial de instrumentos de medição da umidade do solo para determinação de quando e quanto irrigar.

TOMMASELLI (1997) afirma que os métodos para determinação da umidade no solo dividem-se em dois grupos: os métodos diretos e os indiretos. Os métodos diretos se utilizam da medição efetiva da água contida no solo, e tem como representante o método gravimétrico com secagem por estufa, usado como padrão ou referência para todos os outros. Os métodos indiretos se utilizam de propriedades físicas ou físico-químicas do solo que sejam proporcionais ao seu teor de água e tem como representantes a medida da condutividade elétrica, termalização de nêutrons rápidos, atenuação de raios gama, tensiometria e reflectometria de microondas no domínio do tempo (TDR).

Segundo GARZELLA (2004), a técnica do TDR consiste em medir a velocidade (razão entre o deslocamento de um corpo ou ponto material e o tempo despendido para realizar esse deslocamento) de propagação de um pulso eletromagnético e, através desse valor, estimar a constante dielétrica do material circundante, no caso o solo. O aparelho mede o tempo transcorrido entre a emissão do pulso de voltagem e a recepção do pulso ressoante.

Algumas equações clássicas já foram criadas para explicar a constante dielétrica, como a equação de TOPP et al. (1980), utilizada para estimar o conteúdo de água no solo. Esta apresenta uma relação entre umidade e constante dielétrica aparente do solo demasiado generalista, que poderia ser utilizada para uma ampla diversidade de solos, desconsiderando-se praticamente toda a influência pertinente aos demais componentes do solo que concorrem para a constante dielétrica aparente, tais como sais, textura e densidade. Além desses, JOAQUIM (2003) explica que outras características do solo influenciam as medidas do TDR, como, temperatura, teor de matéria orgânica, teor de óxidos de ferro e manganês e teor de água higroscópica no solo. É consenso entre pesquisadores do assunto (SILVA, 1998; CICHOTA, 2002; TOMMASELLI, 1997, entre outros) que a relação proposta por TOPP et al. (1980) não possui aplicabilidade universal, uma vez que alguns atributos do solo podem conferir erros às medições. Por exemplo, em solos tropicais, nos quais o elevado teor de óxido de ferro frequentemente constitui-se como fonte significativa de erros (TOMMASELLI, 1997).

Objetivo

Obter equações de calibração para um TDR comercial (reflectômetro no domínio do tempo) em solos da região de Piracicaba – SP, de forma empírica, em campo, buscando variar tanto quanto possível a textura desses solos, visando melhorar a exatidão de suas medidas tendo como referência o método gravimétrico de estufa.

Metodologia

Visto que parte do trabalho insere-se no contexto de verificar a influência textural do solo na acurácia do aparelho quanto à mensuração da umidade, escolheu-se 10 solos diferentes, de relevo plano a ligeiramente ondulado, caracterizados morfologicamente como: Vertissolo hidromórfico órtico chernozólico (solo 1), Nitossolo vermelho eutroférico típico (solo 2), Latossolo vermelho-amarelo distrófico típico (solo 3), Latossolo vermelho distrófico típico (solo 4), Neossolo regolítico eutrófico léptico (solo 5), Cambissolo háplico distrófico léptico (solo 6), Neossolo quartzarênico órtico típico (solo 7), Argissolo vermelho-amarelo distrófico abruptico (solo 8), Argissolo vermelho eutroférico abruptico (solo 9) e Argissolo vermelho-amarelo distrófico espessarênico (solo 10). Estes solos representam a maior amplitude textural possível para a região, auxiliando na posterior representatividade dos modelos criados.

Nos dez solos fora demarcado uma parcela de 3 m x 3 m georreferenciada para cada, suas localizações constam na tabela 1, sendo que em cada uma, foram retiradas cinco sub-amostras, na profundidade de 0-20 cm, a mesma profundidade mensurada pelo aparelho, que misturadas formaram uma amostra composta por parcela. Nestas, realizou-se em laboratório, pelo método de densímetro de BOUYOUCOS, a análise para caracterização textural.

Como o aparelho obtém leituras de umidade em base volumétrica adotou-se os dois nessa mesma base e para a conversão utilizou-se o valor de densidade para cada solo. Assim, em cada parcela, retiraram-se três amostras indeformadas na profundidade de 0-20 cm com o auxílio de trado do tipo Uhland. Dividiu-se o peso seco de cada amostra por seu respectivo volume e calculou-se a média das três amostras para obter a densidade de cada solo, em duas visitas, na terceira e na sétima leitura.

Quadro 1. Localização das parcelas representativas dos tipos de solo utilizados no estudo

Solo	Latitude	Longitude
1	-22,70013	-47,62190
2	-22,70528	-47,62633
3	-22,73096	-47,60258
4	-22,73827	-47,53896
5	-22,67399	-47,75780
6	-22,64064	-47,81667
7	-22,70333	-47,79727
8	-22,75298	-47,89585
9	-22,74501	-47,83527
10	-22,74009	-47,72197

Posteriormente, foram realizadas as leituras nas parcelas com o equipamento TDR e com a coleta de amostras para a obtenção da umidade pelo método gravimétrico da estufa. Utilizou-se de um equipamento de TDR portátil (Figura 1), modelo TDR 300 (Spectrum Technologies, Inc., Plainfield, Illinois, USA), que se caracteriza por utilizar como unidade o conteúdo volumétrico de água. Utiliza como fonte de energia quatro pilhas alcalinas do tipo AAA e pesa aproximadamente 1,4 kg. Apresenta uma porta serial para comunicação e alimentação de sinal de GPS e tem capacidade de armazenar até 3250 leituras não georreferenciadas e 1350 leituras georreferenciadas, tela LCD de dezesseis caracteres e duas linhas. Existem dois tamanhos de haste, uma de 0,12 m e outra de 0,20 m de comprimento, ambas com diâmetro de 0,05 m. A transferência dos dados se dá por um cabo que conecta a sua porta serial à do computador.

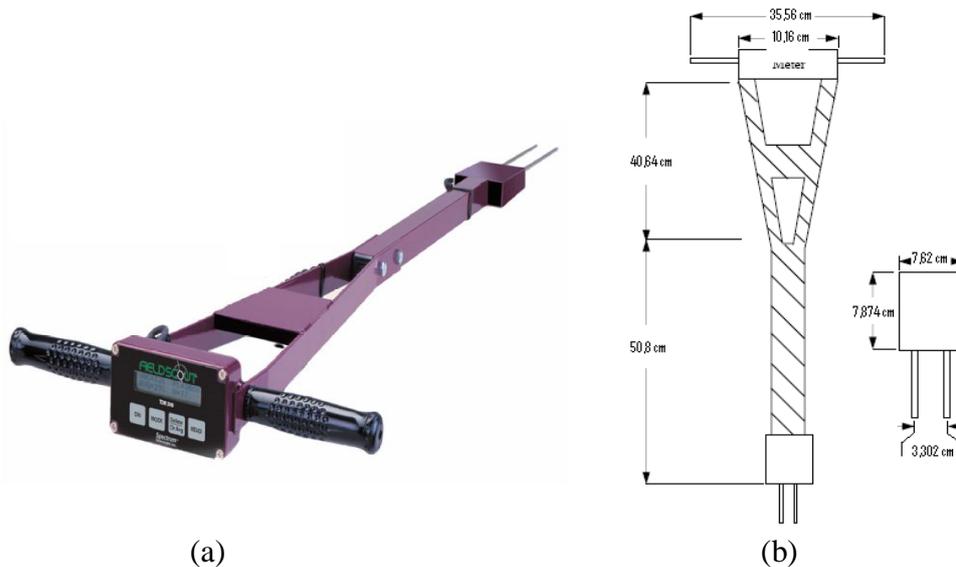


Figura 1. Equipamento de TDR utilizado nos experimentos (a) e suas dimensões (b)

A determinação da umidade do solo via método gravimétrico foi feita em estufa a 105°C e o valor obtido, em porcentagem, pela equação 1.

$$U(\%) = (M_u - M_s) \times 100 / M_s \quad (1),$$

onde:

$U(\%)$ = umidade do solo, em porcentagem

M_u = massa do solo úmido

M_s = massa do solo seco.

Foram realizadas sete visitas às parcelas para leituras, totalizando, nos dias 27/05, 29/07, 05/08, 09/08, 23/09, 09/10 e 30/12/2008. Em cada leitura, mensurou-se o valor de umidade do solo em cinco pontos aleatórios com o aparelho, dentro das parcelas, na profundidade de 0-20 cm e foram retiradas duas amostras, na mesma profundidade, para determinação da umidade do solo pelo método gravimétrico da estufa.

Como CICHOTA e LIER (2002) relatam que a relação entre a leitura do equipamento de TDR e a determinação do método da estufa será mais significativa quanto maior for a faixa de umidade abrangida pelo teste, o agendamento das visitas priorizou condições diferentes de umidade no solo, baseado na ocorrência de chuvas na região.

Para a análise estatística definiu-se para o delineamento experimental blocos casualizados, em que as visitas foram interpretadas como sendo os blocos e cada solo como um tratamento diferente.

Realizou-se a remoção de dados suspeitos de serem inconsistentes utilizando o software estatístico SAS[®], pelo método proposto por BELSLEY et al. (1980). Salienta-se que os dados foram removidos por serem estatisticamente discrepantes, mas que são erros gerados pelo próprio equipamento, pois são médias de cinco leituras. Para a análise de regressão, previamente utilizou-se a transformações de dados, quando necessário, utilizando a raiz quadrada nos dados de umidade do solo obtidos com o TDR para atender a normalidade de erros.

Realizou-se a análise estatística dos valores obtidos em cada leitura, em cada solo. Analisou-se a precisão de cada método, através do coeficiente de variação em relação à média e a análise da acurácia do aparelho pelo erro bruto médio entre os dois métodos, tanto para o de estufa como para o aparelho. Para tais análises não foram retirados dados discrepantes, devido ao que se quer analisar, ser realmente os possíveis erros do aparelho. Na sequência, analisou-se a diferença estatística da leitura de umidade entre o TDR para todas as visitas e o método de estufa e suas significâncias, para cada solo, pelo teste de comparação múltipla de médias de Tukey a 5%; grau de significância escolhido a partir do conhecimento da heterogeneidade da matriz e gênese dos nossos solos. Como a diferença estatística para alguns solos fora representativa, estudou-se uma correlação estatística através de regressão linear do método da estufa com as leituras obtidas no TDR, sendo possível a constituição de uma equação de calibração para o mesmo.

Resultados e Discussão

Para caracterização física das parcelas obtiveram-se a textura e densidade de cada solo, apresentados na Tabela 2. A análise textural dos solos demonstrou boa amplitude, com solos de 2,25 até 47,9% de argila e areia variando de 30,12 a 95,8%. Segundo o Sistema Brasileiro de Classificação de Solos (EMBRAPA, 1999), classificam-se texturalmente como arenosos, os solos, 6, 7, 8 e 10; argilosos, 1, 2 e 5; e de textura média, 3, 4 e 9. Segundo KIEHL (1979), para solos arenosos os valores médios de densidade variam de 1,2 a 1,4 g.cm⁻³ e para solos argilosos de 1,0 a 1,2 g.cm⁻³, os valores apresentados para os argilosos condizem com a média relatada pelo autor, mas para solos arenosos encontraram-se valores bem superiores ao relatado, podendo ser um fator que agrave a leitura do aparelho, pois a densidade do solo é um fator que guarda correlação com sua constante dielétrica.

Tabela 2. Valores das frações texturais e densidade das amostras de solo das parcelas experimentais

Solo	Argila (%)	Silte (%)	Areia (%)	Densidade (g cm ⁻³)
1	43,42	16,35	40,23	1,38
2	47,96	21,92	30,12	1,19
3	17,47	8,00	74,53	1,59
4	23,88	37,54	38,58	1,32
5	35,65	32,96	31,39	1,27
6	10,16	25,59	64,25	1,52
7	8,14	10,43	81,43	1,56
8	2,25	1,91	95,84	1,63
9	17,00	9,45	73,55	1,71
10	8,86	15,75	75,39	1,48

Análise das interações

Com o objetivo de uma análise do comportamento de cada método nas leituras em relação a cada solo, mensurou-se o coeficiente de variação mínimo, médio e máximo e também o erro médio entre métodos, este que fora obtido da média, para cada solo em cada visita, da subtração do valor mensurado pela estufa menos o valor lido pelo equipamento, tal valor fora transformado em módulo, e são apresentados na Tabela 3.

Tabela 3. Coeficiente de variação e erro médio para cada método em cada solo

Solo	CV Min TDR(%)	CV Méd. TDR(%)	CV Máx TDR(%)	CV Min Estufa(%)	CV Méd. Estufa(%)	CV Máx Estufa(%)	Erro méd(%)	% Argila
1	2,4	13,7	30,4	2,4	10,5	17,9	30,1	43,4
2	6,5	16,4	33,4	0,3	5,8	21,5	14,2	48,0
3	6,7	16,6	42,9	1,2	9,1	26,7	2,0	17,5
4	7,0	16,7	39,1	0,8	15,9	57,3	6,0	23,9
5	6,6	16,4	32,7	0,4	6,5	18,9	9,1	35,7
6	9,7	15,2	22,6	1,4	13,0	30,0	3,5	10,2
7	6,6	15,3	22,0	4,1	19,1	77,4	2,3	8,1
8	0,0	29,3	86,1	11,9	24,1	52,3	3,2	2,3
9	1,8	11,2	25,0	5,2	15,2	45,4	5,6	17,0
10	3,4	21,1	31,3	5,1	26,7	46,0	3,1	8,9

Encontrou-se um erro maior da mensuração do TDR para os solos mais argilosos, porém, os coeficientes de variação não oscilaram consideravelmente de um solo para outro, com exceção do solo 8, que apresentou um valor nulo, sendo tal valor dificilmente encontrado para um solo em condições normais.

O solo 1, Vertissolo hidromórfico, apresentou o maior erro(30,1%), possivelmente devido a sua forte estrutura e agregação que podem ter interferido na superestimação de seus valores frente ao método da estufa, salienta-se que o método TDR também é influenciado por densidade e estrutura de um solo (TOPP et al.,1980). Nota-se o fato que mesmo para uma parcela de 9 m² e considerando o método padrão da estufa, a oscilação é notável para os coeficientes de variação e para os valores extremos de umidade do solo, ao contrário do que normalmente se afirma, que a umidade não varia tanto para um local de relevo plano a ligeiramente ondulado. Outro fato notável é que os coeficientes de variação médios para os dois métodos não diferem consideravelmente entre si. A partir dos resultados mostrados analisa-se que a acurácia do aparelho é menor para solos mais argilosos e melhor para solos arenosos, fato provavelmente explicado que pelo fato de que a água livre presente nos macroporos dos solos arenosos pode ser mensurada facilmente, diferente do que ocorre nos mais argilosos onde parte dela está presa nos microporos do solo, ou também explicado pela presença de algum outro fator daqueles já conhecidos que influenciam o princípio de TDR nos solos analisados.

Visando um estudo da relação entre os métodos estudados, na tentativa de acurar a medição do aparelho, realizou-se a comparação múltipla de médias pelo método de Tukey a 5% de significância, frente ao método padrão da estufa para definir-se uma possível diferença estatística entre os valores (Tabela 4).

Tabela 4. Resultado da comparação múltipla de médias dos valores de umidade mensurados pelo aparelho e pela estufa pelo Método de Tukey

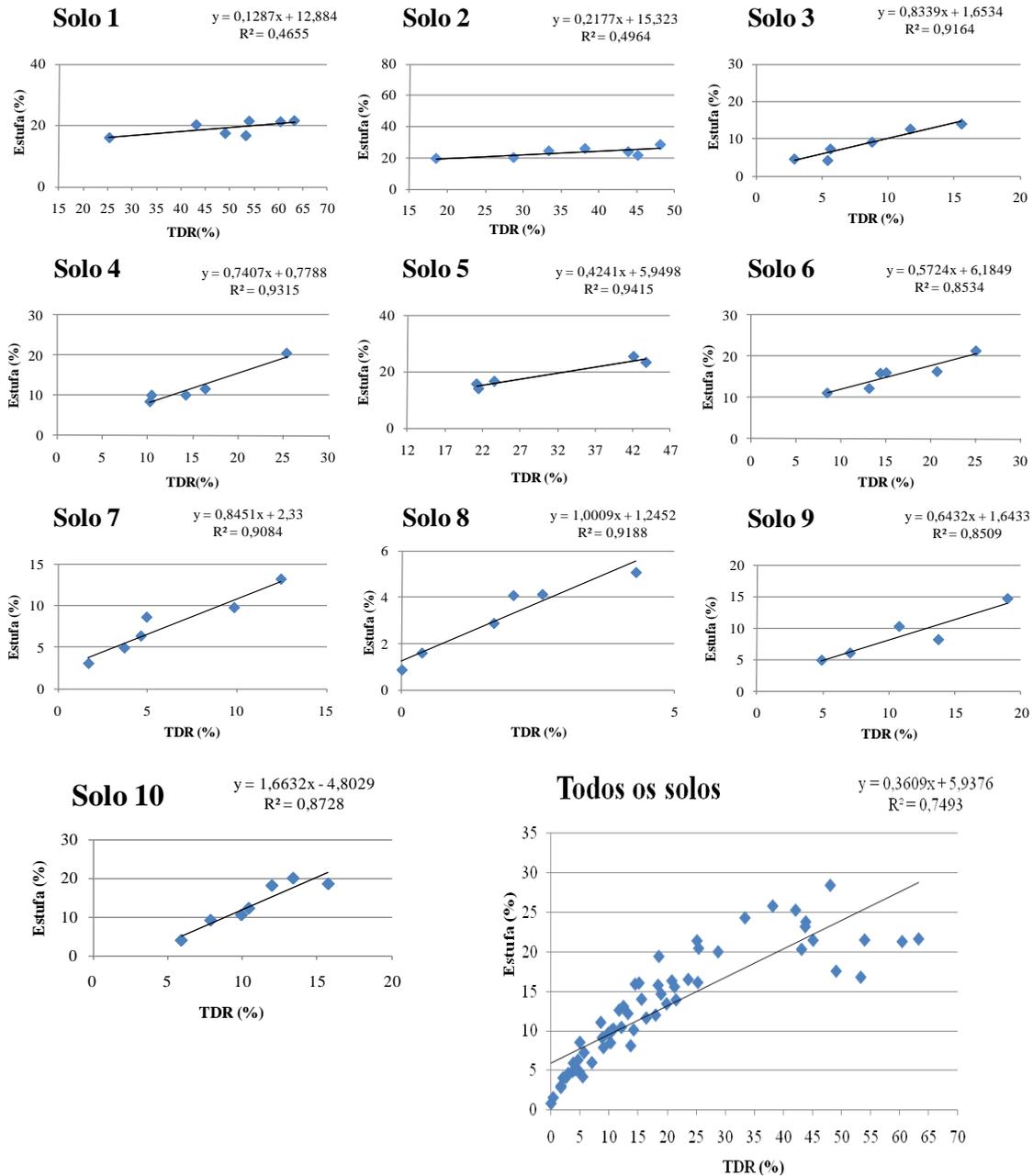
Solo	Método	Média	Probabilidade
1	Estufa	19,3	<0,0001
1	TDR	49,8	
2	Estufa	23,3	<0,0001
2	TDR	36,6	
3	Estufa	8,0	1
3	TDR	8,5	
4	Estufa	12,1	0,8473
4	TDR	17,0	
5	Estufa	19,0	<,0001
5	TDR	31,0	
6	Estufa	14,8	1
6	TDR	17,1	
7	Estufa	7,0	1
7	TDR	6,7	
8	Estufa	3,3	1
8	TDR	2,0	
9	Estufa	8,7	0,7518
9	TDR	13,8	
10	Estufa	10,8	1
10	TDR	13,1	

Interpretando-se a comparação entre médias dos métodos, percebe-se que houve diferença estatística para os solos 1, 2, 5 e 9, ou seja, para estes solos a média das leituras em todas as visitas para o aparelho estudado foi significamente diferente da

média do método da estufa. Devido a tal fato, procedeu-se ao estudo de correlação para todos os solos e geraram-se os gráficos e equações presentes na Figura 2.

Para tal análise, optou-se pela análise linear de regressão, pois se esperava que um aumento na umidade do solo gerasse um aumento proporcional ou próximo disso para o valor mensurado pelo aparelho.

Figura 2. Correlação entre a umidade do solo pelo método da estufa e pelo aparelho TDR-300



Percebe-se que somente para os solos 1 e 2, justamente os mais argilosos, a equação de calibração não conseguiu alcançar um coeficiente de determinação considerado excelente, fato talvez explicado por suas características especiais, sendo que os restantes apresentaram valores acima de 0,7 para coeficiente de determinação, ou seja, as retas encontram-se bem ajustadas para o intervalo de umidade analisado para cada solo. Necessita-se verificar que outros fatores podem estar influenciando a calibração do solos 1 e 2, lembrando que tais solos possuem os maiores valores de

argila dentre os estudados, estudando uma possível interferência no princípio físico de funcionamento do equipamento, ou de outros fatores inerentes ao solo que possam levar a este fato, além de uma possível necessidade de maior quantidade de leituras e amplitude da umidade para conseguir-se um aumento da correlação e consequente calibração do aparelho para tais solos.

Por fim, explana-se sobre uma possível interação complexa para a calibração da reta baseada em todos os solos, verifica-se em tal gráfico que a linha de tendência para ajuste está partindo de um grau linear para um grau polinomial quadrático. Ou seja, a relação entre os dois métodos está fortemente tendendo a uma não-linearidade.

Conclusões

Conclui-se que as retas de calibração encontram-se ajustadas para os solos analisados, exceto para os solos 1 e 2; que para solos muito arenosos e muito secos o aparelho apresenta erros de mensuração, fato recorrente quando se trata de solos muito argilosos sejam estes em condições secas ou úmidas e por fim, constatou-se a importância do estudo da influência de texturas mais argilosas no funcionamento do aparelho, além de outras características físicas do solo. Importância também verificada de uma validação em campo das equações de calibração geradas.

Dificuldades surgidas

Não foram encontradas grandes dificuldades para realização da estrutura do experimento. Salienta-se que é trabalhoso, pois requer percorrer as 10 parcelas com significativas distâncias entre as mesmas. As maiores limitações se encontram no equipamento. O aparelho realiza leituras de, no máximo, 0-20 cm, não chegando ao que normalmente se analisa 0-40 cm, que abrange a maior parte das raízes das culturas. Também, o equipamento apresenta uma haste muito frágil que facilmente se deforma, possivelmente alterando as leituras (geometria). O processo de retirada dos dados que está suscetível a falhas e perdas, e ao equipamento que apresenta pilhas em compartimento interno, necessitando desmontá-lo para a troca.

Não se conseguiu realizar a validação das equações geradas conforme planejado devido à quebra do aparelho. Salienta-se que os resultados serão apresentados no 17º SIICUSP.

Referências bibliográficas

BELSLEY, D.A., KUH, E., WELSCH, R.E. *Regression Diagnostics. Identifying Influential Data and Sources of Collinearity*. John Wiley & Sons, New York, 292 pp., 1980.

CHAVES, M.M. **Effects of water deficits on carbon assimilation**. *Journal of Experimental Botany*, Oxford, 42:1-16, 1991.

CHRISTOFIDIS, D. **Recursos hídricos, irrigação e produção de alimentos no Brasil**. Curso gestão sustentável da agricultura irrigada. In: CURSO DE GESTÃO SUSTENTÁVEL DA AGRICULTURA IRRIGADA, 2002, Brasília. Brasília: UnB/Centro de Desenvolvimento Sustentável, 2002.

CICHOTA, R.; LIER, Q. J. V. **Calibração no campo de um equipamento de TDR segmentado**. In: REUNIÃO BRASILEIRA DE MANEJO E CONSERVAÇÃO DO SOLO E DA ÁGUA, 14., 2002, Cuiabá. Anais...Cuiabá: SBCS/UFMT, 2002. 1CDROM.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA. Centro Nacional de Pesquisa de Solos. **Sistema Brasileiro de Classificação de Solos**. Brasília: EMBRAPA-CNPS, 1999. 412p.

GARZELLA, T.C.1; Molin, J. P. **Calibração em campo de um TDR para determinação de umidade**. 2004. 14 p. – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba – SP, 2004.

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

KIEHL, E. J. **Manual de edafologia**. São Paulo: Ed.Agronômica Ceres, 1979. 264p.

SILVA, E. L. **Determinação automática do teor de água em latossolo roxo distrófico com uso de reflectometria de onda**. In: XXVII CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA AGRÍCOLA, 1998, Poços de Calda. Anais..Poços de Calda: SBEA, 1998.

TOMMASELLI, J. T. G. **Influência de algumas características do solo sobre a calibração de um aparelho de TDR (Time Domain Reflectometry)**. 1997. 109 p. Tese (Doutorado em Energia Nuclear na Agricultura) – Centro de Energia Nuclear na Agricultura, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 1997.