

**UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO**

**Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”**

**Departamento de Engenharia de Biossistemas**

**Projeto de Pesquisa**

**Validação de equação de calibração de um sensor TDR visando  
à determinação de umidade volumétrica do solo**

Graduando: Danilo Yasuhiro Yida

Orientador: Prof. Dr. José Paulo Molin

Piracicaba, Agosto de 2011

# **Validação de equação de calibração de um sensor TDR visando à determinação de umidade volumétrica do solo**

## **Resumo**

O objetivo do trabalho foi validar uma equação de calibração para a medição da umidade volumétrica do solo através da técnica de TDR gerada em uma fase anterior, para os solos da região de Piracicaba - SP. Foram realizadas leituras com o sensor de TDR em 15 pontos aleatórios, aonde também se realizou a coleta de amostras de solo para a medição da umidade volumétrica pelo método de estufa, análise textural e densidade. A equação de calibração não se ajustou de forma adequada aos solos utilizados, apresentando diferença estatística entre a umidade considerada referência (método de estufa) e apresentando um erro superior às leituras realizadas diretamente com o sensor de TDR.

## **Introdução**

A água é um recurso fundamental na agricultura responsável pela manutenção do desenvolvimento químico-fisiológico das plantas, vital para o transporte de nutrientes, regulação da temperatura e no processo da fotossíntese. CHAVES (1991), apud SILVA (2009) afirma que a taxa de assimilação de CO<sub>2</sub> é deprimida sob deficiência moderada de água, primordialmente como consequência do fechamento dos estômatos. Tendo-se em vista haver redução na assimilação de nutrientes e levando-se em conta a importância desses assimilados às plantas, e conseqüentemente ao rendimento agrônômico e econômico da cultura, estabelece-se a importância técnica e econômica do manejo da água nos sistemas de irrigação das culturas.

Devido à importância da água no desenvolvimento das plantas e suas implicações em várias propriedades do solo, a determinação do teor de água no solo sempre foi de grande interesse, tanto no aspecto científico como no econômico. Vários são os métodos e equipamentos para a determinação da umidade do solo; nenhum, porém, consegue fornecer uma estimativa rápida, confiável e de baixo custo, em particular. A reflectometria no domínio do tempo (TDR) vem despertando interesse sobretudo pela possibilidade de leituras em tempo real e automatizadas, com equipamento de fácil manuseio, porém seu custo é elevado e há necessidade de calibração para cada condição de campo (CHICOTA et al., 2004).

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.

Segundo TOMMASELLI (2001), a idéia básica da técnica (TDR) é medir o tempo de deslocamento  $t$  (ns) de uma seqüência de pulsos que possuem harmônicos na freqüência de microondas em uma linha de transmissão (antena), composta de duas hastes de aço de comprimento conhecido  $L$  (cm), introduzidas no solo. Quanto maior este tempo de deslocamento, maior a constante dielétrica relativa aparente do solo  $k$ . Como a água tem constante dielétrica relativa (81) bem maior que a dos materiais do solo (3 a 5) e do ar (1) (Wang, 1980), quanto maior o conteúdo de água do solo, maior será a sua constante dielétrica aparente, e maior será o tempo de deslocamento do pulso aplicado. A grande disparidade do valor da constante dielétrica da água em relação aos materiais do solo permite a sua determinação através desta técnica, uma vez que a maior parte do efeito do retardamento do pulso na antena é decorrente do conteúdo de água do solo.

No intuito de se explicar a constante dielétrica, equações como a de TOPP et al. (1980) foram criadas, utilizadas para se estimar o conteúdo de água no solo. SILVA (2009) explica que esta equação apresenta uma relação entre umidade e constante dielétrica aparente do solo demasiadamente 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. É consenso entre os pesquisadores (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 freqüentemente constitui-se como fonte significativa de erros (TOMMASELLI, 1997).

## **Objetivo**

O projeto tem como objetivo validar, independente da regionalização, a equação de calibração para um TDR comercial gerada em uma fase anterior que é específica para solos da região de Piracicaba – SP, procurando avaliar sua abrangência para solos de outras regiões.

## **Material e Métodos**

Foram obtidos dados em 15 pontos amostrais com distribuição geográfica aleatória, em função do tipo de solo, procurando abranger solos de diferentes classes texturais. O resultado

utilizado foi a média de dez leituras do equipamento de TDR em cada ponto e data de amostragem. A data das leituras foi definida de acordo com as condições hídricas dos locais visando-se abranger desde condições de solo muito secos até encharcado, abrangendo o ponto de murcha permanente e capacidade de campo dos solos. As leituras com o equipamento de TDR foram feitas à profundidade de 0 a 0,2m e ao lado retirou-se uma amostra indeformada (anel), para obter a real umidade volumétrica do solo em estufa (EMBRAPA, 1997). Em cada ponto foram medidas as umidades do solo pelo sensor e pelo método da estufa, também foram determinadas em laboratório a textura dos solos nos pontos amostrados e sua densidade. Dessa forma tornou-se possível comparar o conteúdo de água pelos dois métodos. Foi utilizado o equipamento 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 no solo. 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; apresenta uma 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, sendo que se utilizou a de 0,20m. A transferência dos dados se dá por um cabo que conecta a sua porta serial à do computador.



Figura 1. Vista do sensor TDR utilizado no estudo

A determinação da umidade do solo via método volumétrico tradicional foi feita com secagem do solo em estufa a 105°C por 48 horas e o valor obtido em porcentagem a partir da equação 1:

$$(1) \Theta(\%) = \frac{V_a(100)}{V}$$

onde:

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

$V_a$ =volume de água

$V$ =volume total.

Os valores obtidos das leituras de TDR foram calibrados utilizando-se a seguinte equação sugerida por Silva e Molin (2009) para solos da região de Piracicaba-SP:

$$y=0,3609x+5,9376$$

Foi calculado o erro médio em função da umidade volumétrica obtida em estufa, considerada como o método referência, sendo comparada as umidades obtidas através dos outros métodos. A determinação do erro médio foi feita da seguinte forma:

$$\text{Erro Médio} = \frac{|(\text{Umidade Estufa} - \text{Outro método de medição de umidade})|}{\text{Umidade Estufa}} \times 100$$

Os valores calibrados foram comparados aos resultados obtidos pelo método volumétrico de estufa realizando-se o Teste de Tukey a 5% de significância. Assim, evidenciou-se a diferença obtida entre esses resultados, verificando a representatividade da equação para outros tipos de solos.

Dessa forma foi possível avaliar a equação de calibração sugerida por Silva e Molin(2009) no seu uso em solos com diferentes características.

## **Resultados e discussão**

Na Tabela 1 é apresentada a localização das 15 amostras coletadas. As coordenadas geográficas foram registradas para cada ponto utilizando-se um receptor de GPS Garmin modelo Etrex (Garmim®).

Na Tabela 2 são apresentados os resultados referentes às análises texturais de cada amostra e suas respectivas densidades os quais são fatores que podem estar associados aos erros obtidos pela leitura do aparelho. Obteve-se uma grande faixa de texturas e densidades, variando de 9,03% a 60,13% de argila e 1,11 a 2,02g cm<sup>-3</sup> respectivamente.

Tabela1. Localização e coordenadas geográficas das 15 amostras coletadas

Ponto	Município	Latitude	Longitude
1	Pradópolis	S 21° 20' 46,61"	W 48° 04' 23,96"
2	Regente Feijó	S 22° 12' 34,81"	W 51° 20' 50,34"
3	Taciba	S 22° 23' 25,77"	W 51° 14' 07,61"
4	Rio das Pedras	S 22° 50' 02,7"	W 047° 35' 21,4"
5	Iracemópolis	S 22° 34' 40,6"	W 047° 30' 32,7"
6	Torrinha	S 22° 27' 14,87"	W 48° 09' 08,6"
7	Torrinha	S 22° 27' 24,98"	W 48° 09' 13,28"
8	Piracicaba	S 22° 43' 31,53"	W 47° 33' 46,71"
9	Piracicaba	S 22° 42' 18,8"	W 47° 35' 50,88"
10	Piracicaba	S 22° 42' 33"	W 47° 37' 55,2"
11	Piracicaba	S 22° 49' 33,2"	W 47° 34' 41"
12	Piracicaba	S 22° 49' 39,9"	W 47° 34' 37,7"
13	Piracicaba	S 22° 43' 12,08"	W 47° 36' 50,88"
14	Piracicaba	S 22° 42' 20,07"	W 47° 37' 42,51"
15	Piracicaba	S 22° 41' 33,18"	W 47° 38' 38,62"

Tabela 2. Análise textural e densidade dos solos

Ponto	Argila	Silte	Areia	Densidade
1	60,13	6,67	33,20	1,11
2	9,03	10,95	80,02	1,68
3	12,11	10,45	77,44	1,33
4	36,66	21,02	42,32	1,76
5	52,19	12,40	35,41	1,59
6	20,94	3,82	75,24	2,02
7	45,45	11,16	43,39	1,50
8	31,73	19,35	48,92	1,66
9	32,83	19,14	48,03	1,46
10	49,53	14,63	35,84	1,54
11	46,46	43,86	9,68	1,48
12	23,67	28,84	47,49	1,43
13	15,50	8,23	76,27	1,98
14	57,07	13,56	29,37	1,73
15	51,40	13,54	35,06	1,72

Salienta-se que a equação de calibração utilizada nesse trabalho, criada por SILVA e MOLIN (2009), foi gerada a partir de 10 tipos de solos representativos da região de Piracicaba-SP. Cada solo de forma isolada possui uma calibração específica, aonde fatores como textura, densidade e teor de óxidos de ferro são fatores que podem provocar diferenças significativas no comportamento do aparelho de TDR. No trabalho anterior gerou-se uma equação

específica para cada tipo de solo (10 equações); e com a união dos valores que foram obtidos em cada um desses solos gerou-se uma equação geral para os solos da região.

Devido ao fato de que a equação de calibração geral não se ajustou de forma adequada aos pontos coletados no presente trabalho, foram utilizadas também as equações geradas de forma isolada por cada um dos 10 solos, sendo selecionadas as equações que foram geradas por solos de textura mais semelhante, para comparar o efeito da calibração mais específica sobre uma calibração mais generalista. As equações específicas associadas a textura do pontos amostrais que às geraram são apresentadas na Tabela 3.:

Tabela 3. Equações de calibração específicas utilizadas na estimativa do conteúdo de água

Ponto	Equação Específica	Argila	Silte	Areia
1	$y=0,1287x+12,884$	43,42	16,35	40,23
2	$y=0,2177x+15,323$	47,96	21,92	30,12
4	$y=0,7407x+0,7788$	23,88	37,54	38,58
5	$y=0,4241x+5,9498$	35,65	32,96	31,39
6	$y=0,5724x+6,1849$	10,16	25,59	64,25
7	$y=0,8451x+2,3300$	8,14	10,43	81,43
9	$y=0,6432x+1,6433$	17,00	9,45	75,35

Visando um estudo da relação entre os métodos, realizou-se a comparação múltipla de médias pelo método de Tukey a 5% de significância utilizando-se o software estatístico SAS®.

A Tabela 4 apresenta as médias obtidas das leituras de umidade em porcentagem, pelo método volumétrico de estufa, TDR, estimados pela equação de calibração geral e pela equação de calibração específica.

Conforme a Tabela 4, houve diferença estatística entre todos os métodos de obtenção de umidade. Os dados obtidos pelas leituras do equipamento de TDR foram os que mais se aproximaram dos valores considerados referência (umidade obtida em estufa). Com relação às equações de calibração, as diferenças estatísticas permitem afirmar que não é possível utilizá-las na calibração do equipamento de TDR visto que tanto as equações específicas como a geral apresentaram um erro muito maior do que o equipamento de TDR, porém é importante ressaltar que as equações específicas se comportaram melhor que a equação geral, chegando a valores mais próximos aos da referência, podendo direcionar futuras pesquisas no sentido de buscar calibrações mais detalhistas quanto aos fatores que podem influenciar no processo.

Tabela 4. Umidades volumétricas (%) obtidas nas mensurações de laboratório, estimadas em campo com o TDR e valores estimados pela equação geral e por equações específicas selecionadas

Ponto	Umidade Estufa	Umidade TDR	TDR Calibrado (%)	Equação Específica	C.V.	Probabilidade
1	26,64 A	22,22 AB	13,95 C	20,16 B	20,11	<0,0001
2	21,79 A	18,78 AB	12,71 C	18,20 B	14,02	0,0166
3	2,24 B	6,825 A	8,40 A	10,09 A	26,89	0,1396
4	29,21 A	28,56 A	16,24 B	18,06 B	13,23	<0,0001
5	22,95 AB	32,4 A	17,63 B	22,37 AB	27,36	0,0004
6	36,71 A	24,32 B	14,71 C	18,79 BC	13,21	<0,0001
7	58,42 A	41,37 B	20,86 C	18,20 C	13,95	<0,0001
8	29,39 A	28,78 A	16,32 B	18,15 B	5,89	<0,0001
9	29,04 A	21,58 B	13,72 C	15,10 C	8,16	<0,0001
10	28,37 A	25,68 AB	15,20 C	20,91 C	13,41	0,0002
11	22,46 A	22,64 A	14,10 A	20,25 A	33,11	0,0232
12	14,77 A	9,5 AB	9,36 B	7,81 B	27,32	0,1348
13	26,88 A	18,26 B	12,52 C	13,38 C	6,18	<0,0001
14	41,74 B	45,10 A	22,21 D	25,14 C	3,43	<0,0001
15	28,73 A	28,72 A	16,30 C	21,57 B	6,56	<0,0001
Geral	28,36 A	24,92 B	14,93 D	18,07 C	23,02	<0,0001

O equipamento de TDR comportou-se de forma instável nos pontos amostrais 3, 11 e 12 não tendo uma correlação linear entre o aumento de umidade identificado em estufa e a leitura do aparelho de TDR. Estes pontos amostrais foram coletados em solo recém preparado, sendo assim, características como densidade, porosidade, e umidade variam abruptamente pelo terreno, o que explica o alto coeficiente de variação encontrado.

Nota-se que de forma geral o método que apresenta menos erros é a leitura da umidade com o aparelho de TDR, embora tenha casos em que os erros chegam a valores extremos como em 5, 6, 7, 9, 12 e 13, abrangendo nesse grupo texturas argilosa, média e arenosa. No caso do ponto 3, em que a umidade era baixa, o erro obtido foi grande devido ao fato de que pequenos acréscimos em umidade já representariam um grande incremento percentual na umidade volumétrica da amostra.

Os resultados obtidos com o equipamento ajustaram-se bem, de forma a não necessitar de forma fundamental da calibração nas amostras 4, 8, 10, 14 e 15.

Na tabela 5 são apresentados os valores de Erro médio em relação ao método volumétrico de estufa das leituras com o equipamento de TDR, equação geral e equação específica.



Tabela 5. Erro médio do equipamento de TDR, equação geral e equação específica

Ponto	Erro (%)		
	TDR	Equação Geral	Equação Específica
1	16,5	47,6	24,3
2	13,8	41,6	16,4
3	204,6	275,0	350,5
4	4,9	41,2	34,5
5	41,1	23,1	2,5
6	33,7	59,9	48,8
7	29,1	64,2	68,8
8	2,0	44,4	38,2
9	25,6	52,7	48,0
10	9,5	46,4	26,3
11	0,7	37,2	9,8
12	35,7	36,6	47,1
13	32,0	53,4	50,2
14	8,0	46,7	39,7
15	0,1	43,2	24,9
média	10,18	46,3	35,79

Observa-se que o aparelho de TDR no ponto 11 teve um erro médio mínimo que, no entanto, deve ser desconsiderado devido ao elevado coeficiente de variação, considera-se que a compensação do erro encontrado ocorreu ao acaso.

Os valores de erro obtidos pela equação geral e equação específica foram em média sempre superiores aos obtidos pelas leituras do aparelho, evidenciando que não se deve usá-las como forma de calibração.

### Conclusões

A equação geral de calibração não se ajustou às amostras de solo coletadas nesse estudo, tanto dentro como fora da região de onde foram coletadas as amostras que deram origem ao modelo inicial não devendo, portanto, ser utilizado como calibração universal. Foi possível observar que a interferência dos diferentes tipos de solo nas leituras obtidas com o equipamento de TDR estudado vão além das classes texturais dos solos. Destaca-se a necessidade de se realizar estudos em intervalos mais restritos dos fatores que interferem no funcionamento do equipamento como textura, densidade e teor de óxidos de ferro de forma mais detalhada.

## **Referências Bibliográficas**

TOMMASELLI, J. T. G.; BACCHI, O. O. S. Calibração de um equipamento de TDR para medida de umidade de solos. **Pesq. agropec. bras.**, Brasília, v. 36, n. 9, Set. 2001.

CICHOTA, R.; JONG, V. L. Q. Avaliação no campo de um TDR segmentado para estimativa da umidade do solo. **Rev. bras. eng. agríc. ambient.**, Campina Grande, v. 8, n. 1, Apr. 2004 .

SILVA, G.F.; MOLIN, J.P.; DIAS, C.T.S. **Equação de calibração de um TDR comercial para determinação do teor de água em solos de Piracicaba-SP**. 2009. 10p. Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba-SP, 2009

GARZELLA, T.C.; MOLIN, J.P. **Avaliação em campo de um TDR para determinação de umidade**. 2004. 11p. Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba-SP, 2004.

EMBRAPA/SCNLS. **Manual de métodos de análise de solos**, Rio de Janeiro, 1997. 212p.