

AVALIAÇÃO DE TRÊS EQUIPAMENTOS PARA DETERMINAÇÃO DO TEOR DE ÁGUA NO SOLO EM CONDIÇÕES DE CAMPO

Aloísio Bianchini¹; Pedro Hurtado de Mendoza Borges¹; João Carlos de Souza Maia¹; Geison Nicareta²

RESUMO

Neste trabalho, foram avaliados três equipamentos para determinar o teor de água no solo em condições de campo, a saber: o speedy, o theta probe e o pulso de calor. O solo foi identificado como LATOSSOLO VERMELHO-AMARELO distrófico. A área experimental foi saturada até a profundidade de 0,20 m por meio de chuva artificial de 0,04 m, administrada por um aspersor. A secagem gradual do terreno possibilitou obter naturalmente quatro níveis do teor de água no solo, compreendidos entre a capacidade de campo e o ponto de murcha permanente. Os dados foram coletados em 16 pontos de amostragem para cada nível de umidade. Logo, os três equipamentos foram calibrados em função do método termogravimétrico. Os valores do teor de água no solo, estimados pelos três equipamentos e determinados pelo método termo gravimétricos, foram comparados, verificando-se que não diferiram estatisticamente conforme o teste t para 5 % de probabilidade. As equações obtidas possibilitaram calibrar com adequada precisão os três equipamentos. Estes equipamentos podem ser uma alternativa viável para determinar o teor de água no solo em condições de campo.

Palavras-chave: umidade do solo, irrigação, manejo do solo.

EVALUATION OF THREE EQUIPMENTS TO DETERMINE SOIL WATER CONTENT UNDER FIELD CONDITIONS

ABSTRACT

Instruments to determine soil water content under field conditions, the “speedy”, the “theta probe” and the “heat pulse” were evaluated. The soil was identified as dystrophic RED-YELLOW LATOSOL. The experimental area was saturated to a depth of 0.20 m with use of artificial rain of 0.04 m. The gradual dryness of the plot permitted, in a natural way, determine soil water content, between the field capacities and the wilting point. The data for four water contents were collected at 16 points for each level of soil moisture. Consequently, the equipments were calibrated according to the greenhouse pattern. The soil water content estimated by the instruments and those determined by the greenhouse pattern did not differ statistically (t-test, $p = 0.05$). The instruments could be calibrated to appropriate accuracy with the use of equations. These instruments can be a viable alternative to determine soil water content under field conditions.

Keywords: soil moisture, irrigation, soil management.

Recebido para publicação em 07/03/2008. Aprovado em 14/02/2009

¹ Professores Adjuntos – DSER/FAMEV/UFMT, Cuiabá – MT, 78.060-900, e-mail: bianchi@ufmt.br; pborges@ufmt.br

² Estudante de Agronomia – FAMEV/UFMT, Cuiabá – MT, 78.060-900

INTRODUÇÃO

A quantidade de água presente no solo pode interferir nas suas propriedades físicas, tais como a compactação, a resistência à penetração e ao cisalhamento, a consistência e em alguns processos químicos e bioquímicos que nele ocorrem (FORSYTHE, 1985; SEGANFREDO et al., 1997; SILVA, 1998; TORMENA et al., 1998; SILVA & GERVÁSIO, 1999). Por outro lado, o manejo racional da água no solo constitui um aspecto importante no planejamento das atividades agrícolas, principalmente para os cultivos irrigados, pois a falta ou excesso pode influenciar negativamente no desenvolvimento das plantas e conseqüentemente no rendimento da cultura.

Para determinar o teor de água no solo utiliza-se o método termogravimétrico como padrão (EMBRAPA, 1997). Este método apresenta elevada precisão, razão pela qual serve de referência na calibração de outros procedimentos e equipamentos empregados na estimativa do teor de água no solo. No entanto, este método requer um tempo mínimo de 24 h para obter os resultados, o que dificulta a sua aplicação em condições de campo.

DNER (1994) tem aplicado o princípio da reação química da água com o carbureto de cálcio. Este procedimento se caracteriza pela sua rapidez no fornecimento de resultados e pode ser aplicado em condições de campo, porém, é muito trabalhoso. O equipamento empregado possui um manômetro que pode perder freqüentemente a calibração, o que sem dúvida interfere na precisão dos resultados.

Existem, ainda, equipamentos compostos por hastes e sondas que possibilitam estimar o teor de água no solo rapidamente com confiabilidade, desde que sejam calibrados adequadamente. Estes equipamentos baseiam-se no princípio de correlacionar as propriedades físicas do solo ao seu teor de água, tais como os blocos

de resistência elétrica (ARMSTRONG et al., 1985), os psicrômetros de solo (RICHARDS & CALDWEIL, 1987), a sonda de pulso de calor (BIANCHINI et al., 2003) e o instrumento TDR (*Time Domain Reflectometry*) (MASTRORILLI et al., 1998; COLETTI, 2000; MEDEIROS et al., 2001; TRINTINALHA et al., 2001).

De acordo com Cruvinel et al. (1998), Mojid et al. (1998), Serrarens et al. (2000), as condições e tipo de solo podem interferir nas medições e conseqüentemente na calibração dos equipamentos para estimar o teor de água no solo. Neste sentido, Tomaselli & Bacci (1995), Silva (1998), Silva & Gervásio (1999) sugerem a elaboração das curvas de calibração para o local do solo específico, visando aumentar a precisão dos resultados. Este problema motivou a realização do presente trabalho, cujo objetivo foi avaliar três equipamentos para determinação do teor de água no solo em condições de campo.

MATERIAL E MÉTODOS

Este trabalho foi realizado no mês de julho de 2006, na Fundação Rio Verde de Pesquisa, localizada ao noroeste do Estado de Mato Grosso, município de Lucas do Rio Verde, coordenadas geográficas 12° 18' 48" S e 58° 32' 17" W. Na região predomina o clima tropical quente e úmido com temperatura média anual entre 27°C e 30°C, precipitação anual média em torno de 2300 mm e umidade relativa média variando de 55 a 75%. A área experimental encontrava-se coberta de gramíneas e sua limpeza foi realizada por meio de capina e retirada dos restos vegetais. O solo desta área foi classificado como LATOSSOLO VERMELHO-AMARELO distrófico (RADAMBRASIL, 1982). Na profundidade de 0 - 0,20 m, o solo apresentou densidade média de 1,3 kg dm⁻³ e textura argila-arenosa, contendo 55,68% de areia, 36,64% de argila e 7,68% de silte.

Neste estudo foram utilizados os três equipamentos seguintes:

- O “Speedy” consta de um reservatório metálico com tampa de fechamento hermético e um manômetro;
- A Sonda “Theta Probe” ML 2X composta por quatro hastes de 0,16 m, um oscilador e um multímetro, com a qual se mede a condutividade elétrica da água no solo (DELTA-T DEVICES, 1999) e
- A Sonda de Pulso de Calor constituída por uma unidade micro-processada e uma haste com resistência elétrica e dois sensores, o que possibilita medir a diferença de temperatura da água no solo ao ser aquecida (BIANCHINI et al. 2003).

A área experimental foi saturada de forma lenta e homogênea para obter umidade uniforme até a profundidade de 0,20 m. A quantidade de água necessária foi calculada conforme a metodologia utilizada por Bianchini (1994), administrando-se uma chuva artificial de 0,04 m com um aspersor. Em seguida, nesta área foi demarcada uma malha formada por 16 quadrículas com 1 m de lado (EMBRAPA, 1997).

A secagem gradual do terreno saturado possibilitou variar naturalmente o teor de água no solo. Optou-se por realizar as medições para 4 teores de umidade compreendidos entre a capacidade de campo e o ponto de murcha permanente. Desta forma disponibilizaram-se 16 pontos de amostragem para cada fase de secagem do solo, totalizando 64 medições por equipamento.

Para estabelecer os momentos de coleta teve-se como referência os trabalhos desenvolvidos por Fabian & Ottoni Filho (2000), Oliveira Filho et al. (2000), Oliveira et al. (2001). Conforme estes trabalhos, o solo selecionado atinge a sua capacidade de campo aproximadamente 12 horas após a saturação, entretanto, o ponto de murcha permanente pode ser estimado a partir de 360 horas. Logo, os dados foram coletados 48, 120, 192 e 288 horas após a saturação da área, sendo

definidas 4 fases de secagem do solo.

Durante as 4 fases de secagem do terreno, em cada quadrícula foi retirada com trado uma amostra de solo na profundidade de 0 - 0,20 m. O material coletado foi devidamente acondicionado em sacola plástica e levado ao laboratório, onde uma parte da amostra foi utilizada para determinar o teor de água pelo método termogravimétrico (padrão da estufa) proposto por EMBRAPA (1997) e apenas 0,01 kg foram colocados no recipiente do equipamento “Speedy”. Nas quadrículas, também, foram inseridas as hastes dos equipamentos “Theta Probe” e Sonda de Pulso de Calor entre 0,08 e 0,13 m de profundidade, registrando-se os valores correspondentes de condutividade elétrica (mV) e diferença de temperatura (°C).

No recipiente do “Speedy” foram adicionadas duas ampolas de vidro, contendo carbureto de cálcio e uma esfera de metal. Em seguida, o equipamento foi agitado vigorosamente por vários minutos para quebrar as ampolas e desta forma misturar o carbureto de cálcio com a água do solo, possibilitando uma reação química. Durante este processo foi observado o manômetro do equipamento, registrando-se o valor indicado à pressão constante (kgf cm^{-2}). Estes valores de pressão foram transformados para a unidade de medida do Sistema Internacional quilopascal (kPa).

Os valores de pressão (kPa), condutividade elétrica (mV) e diferença de temperatura (°C) estimados, respectivamente, pelos equipamentos “Speedy”, “Theta Probe” e Sonda de Pulso de Calor foram correlacionados com os teores de água no solo em base volumétrica determinados pelo método termogravimétrico para obtenção das curvas de calibração. Nas correlações avaliaram-se as funções: linear (polinômio de 1^o), quadrática (polinômio de 2^o), cúbica (polinômio de 3^o), logarítmica, potencial e exponencial.

O ajuste das equações obtidas para cada equipamento foi avaliado de acordo com o coeficiente de determinação (R^2), o gráfico de valores do teor de água estimados em função dos observados, o gráfico de resíduos e o histograma de freqüências dos resíduos. Em

seguida, os valores obtidos com a equação ajustada para cada equipamento foram comparados estatisticamente com os teores de água no solo em base volumétrica determinados pelo método termogravimétrico, aplicando-se o teste t para duas amostras relacionadas em nível de 5% de probabilidade (GOMES, 1990).

A independência dos resíduos ou inexistência de autocorrelação é uma premissa básica para os modelos desenvolvidos na calibração dos equipamentos, uma vez que a coleta de dados variou com o tempo. Esta condição foi analisada com base no gráfico de resíduos em função do tempo de coleta dos dados (fase de secagem do solo) e verificada analiticamente de acordo com a estatística de Durbin-Watson (LEVINE et al., 2005).

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Nas Figuras 1, 2 e 3, apresentam-se os diagramas de dispersão da porcentagem de teor de água no solo em base volumétrica estimados pelo método termogravimétrico, em função dos valores de pressão, condutividade elétrica e diferença de temperatura determinados pelos três equipamentos avaliados, respectivamente, "Speedy", Sonda Theta Probe e Sonda de Pulso de Calor. Também, nestas Figuras foram incluídas as linhas de tendências das funções matemáticas selecionadas para obtenção das correspondentes curvas de calibração.

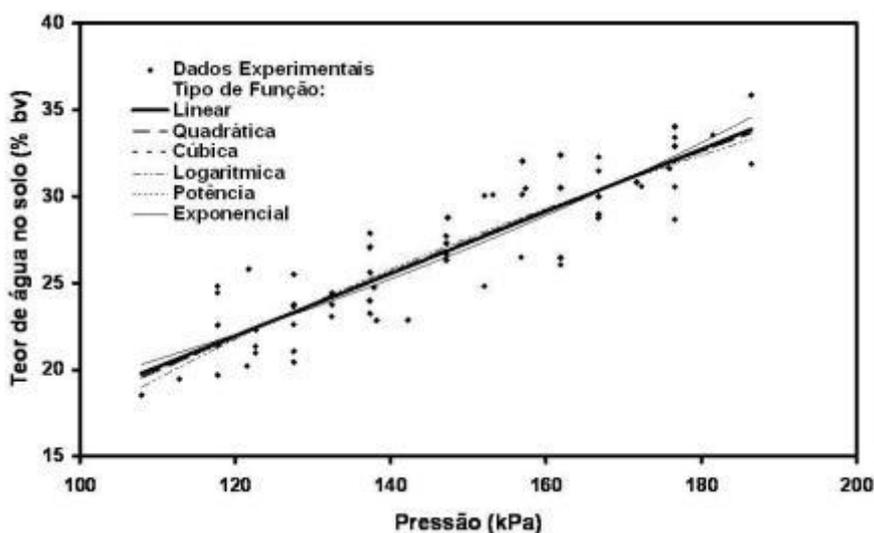


Figura 1. Diagrama de dispersão e linhas de tendência do teor de água no solo¹.

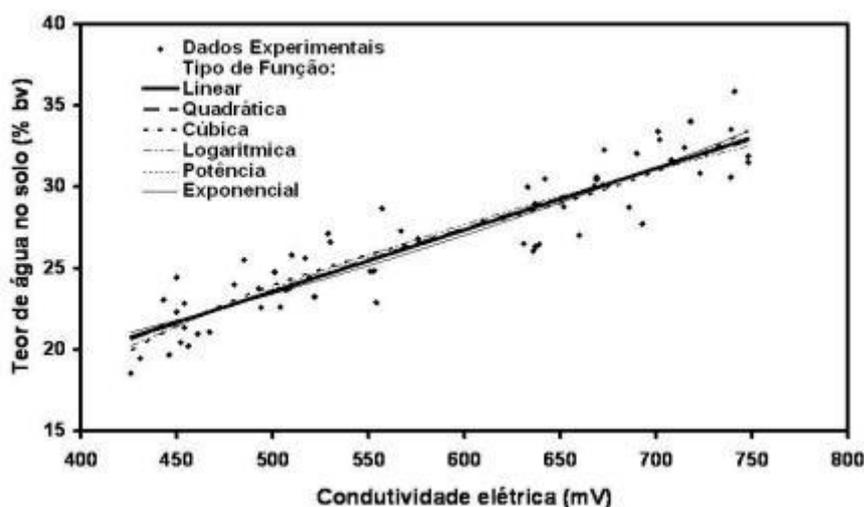


Figura 2. Diagrama de dispersão e linhas de tendência do teor de água no solo².

1 Em função da pressão estimada pelo equipamento "Speedy".

2 Em função da condutividade elétrica estimada pela sonda "Theta Probe".

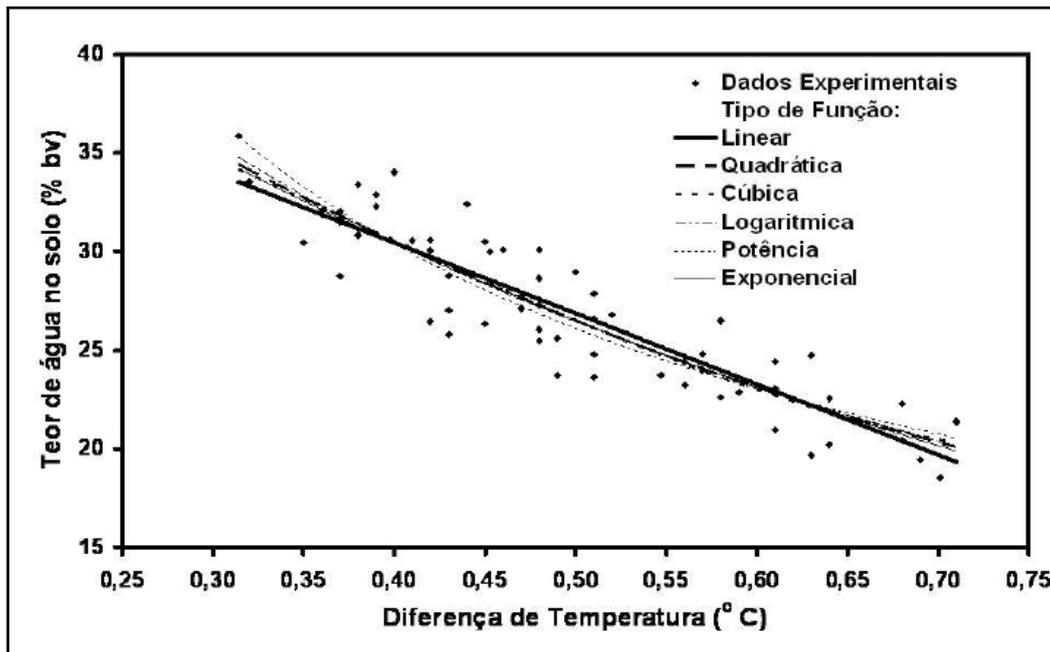


Figura 3. Diagrama de dispersão e linhas de tendência do teor de água no solo³.

Na maior parte do intervalo de valores analisado pode-se observar uma elevada dispersão dos dados e uma superposição das linhas de tendência (Figuras 1, 2 e 3). De acordo com estas características, deduz-se que as equações de calibração para cada equipamento podem apresentar ajuste semelhante, independentemente do tipo de função matemática. Esta afirmação pode ser confirmada analiticamente pelos valores do coeficiente de determinação (R^2), contidos no Quadro 1, embora este não seja o único critério que define a confiabilidade dos modelos propostos para estimar a porcentagem do teor de água no solo em base volumétrica (Θ_{bv}) utilizando-se os três equipamentos.

Os coeficientes de determinação apresentados foram inferiores aos estimados por Tomaselli & Bacci (1995), Silva & Gervásio (1999), Otto & Alcaide (2001), Trintinalha et al. (2001) usando o

instrumento de TDR, os quais foram superiores a 0,95. No entanto, os coeficientes, próximos de 0,81, determinados por SOUZA et al. (2006) foram semelhantes aos deste trabalho. Medeiros et al. (2001) e Molin & Faulin (2006) relacionando a umidade volumétrica e a constante dielétrica do solo estimaram, respectivamente, valores de 0,65 e 0,75. Ainda, o coeficiente de 0,50 obtidos por Chicota & Van Lier (2004) ajustando seus dados experimentais de umidade e condutividade elétrica do solo foi muito inferior aos determinados neste estudo. As discrepâncias encontradas devem-se provavelmente ao modelo de equipamento, tipo e estado de compactação do solo, profundidade de inserção das hastes e número de medições correlacionadas. Contudo, os coeficientes desta pesquisa foram superiores ao valor mínimo de 0,70 sugerido por Spiegel (1977), Draper & Smith (1981) e Veiga & Sáfiadi (1999) para ajustes de curvas.

³ Em função da diferença de temperatura estimada pela sonda de pulso de calor.

Quadro 1. Coeficientes de determinação (R^2) das equações de calibração ajustadas para os equipamentos avaliados.

Equipamento	Função Matemática	Equação de calibração	R^2
“Speedy” $\Theta_{bv} = f(p)$ p: pressão (kPa)	Linear	$\Theta_{bv} = 0,18 p + 0,42$	0,81
	Quadrática	$\Theta_{bv} = -2 \cdot 10^{-4} p^2 + 0,24 p - 3,97$	0,81
	Cúbica	$\Theta_{bv} = -2 \cdot 10^{-7} p^3 - 10^{-4} p^2 + 0,23 p - 3,45$	0,81
	Logarítmica	$\Theta_{bv} = 26,19 \ln p - 103,61$	0,81
	Potencial	$\Theta_{bv} = 0,19,28 p^{0,99}$	0,81
	Exponencial	$\Theta_{bv} = 9,77 e^{0,07 p}$	0,80
Sonda Theta Probe $\Theta_{bv} = f(c)$ c: condutividade elétrica (mV)	Linear	$\Theta_{bv} = 0,04 c + 4,66$	0,86
	Quadrática	$\Theta_{bv} = -9 \cdot 10^{-6} c^2 + 0,05 t + 1,71$	0,86
	Cúbica	$\Theta_{bv} = 4 \cdot 10^{-7} c^3 - 8 \cdot 10^{-4} c^2 + 0,49 c - 81,66$	0,86
	Logarítmica	$\Theta_{bv} = 21,79 \ln c - 111,67$	0,86
	Potencial	$\Theta_{bv} = 0,14 c^{0,83}$	0,86
	Exponencial	$\Theta_{bv} = 11,44 e^{0,001 c}$	0,85
Sonda de Pulso de Calor $\Theta_{bv} = f(t)$ t: temperatura (° C)	Linear	$\Theta_{bv} = -35,82 t + 44,77$	0,84
	Quadrática	$\Theta_{bv} = 30,56 t^2 - 67,46 t + 52,60$	0,84
	Cúbica	$\Theta_{bv} = 70,59 t^3 - 78,58 t^2 - 12,84 t + 43,76$	0,84
	Logarítmica	$\Theta_{bv} = -17,96 \ln t + 14,01$	0,84
	Potencial	$\Theta_{bv} = 16,28 t^{-0,68}$	0,83
	Exponencial	$\Theta_{bv} = 52,58 e^{-1,37 t}$	0,84

Os valores teóricos das porcentagens do teor de água no solo em base volumétrica para cada equipamento foram estimados utilizando-se inicialmente a função matemática linear como equação de calibração. Em seguida foram elaborados os diagramas de dispersão da Figura 4. Nestes gráficos, os valores no eixo horizontal representam a porcentagem real (observado) do teor de água no solo determinado

pelo método termogravimétrico e os valores do eixo vertical correspondem ao valor teórico da referida porcentagem. De acordo com este procedimento, foram definidas as coordenadas dos pontos colocados em cada diagrama. Para identificar a relação entre os valores teóricos e reais, nos gráficos, foi inserida a linha de tendência denominada bissetriz do primeiro quadrante.

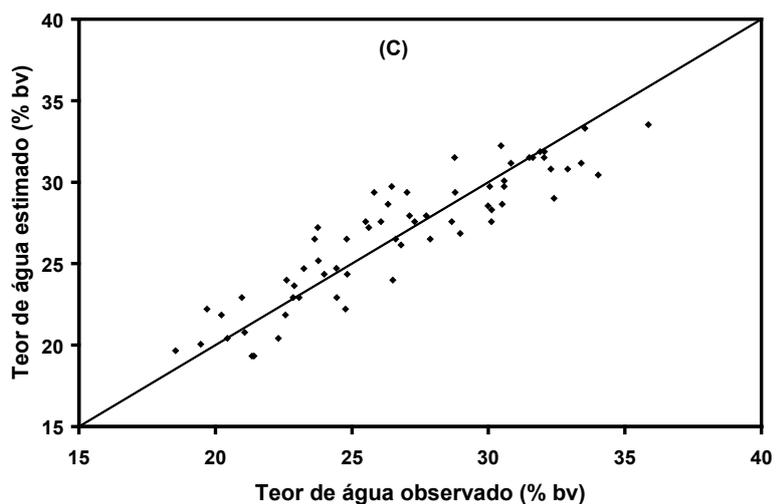
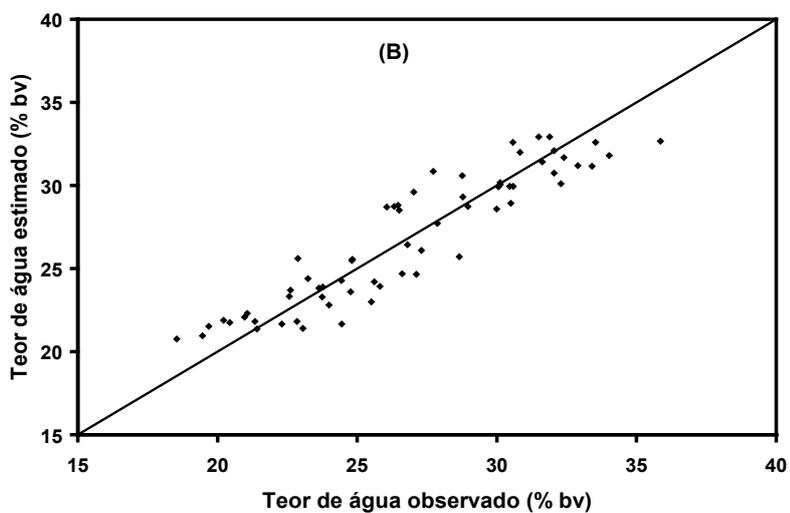
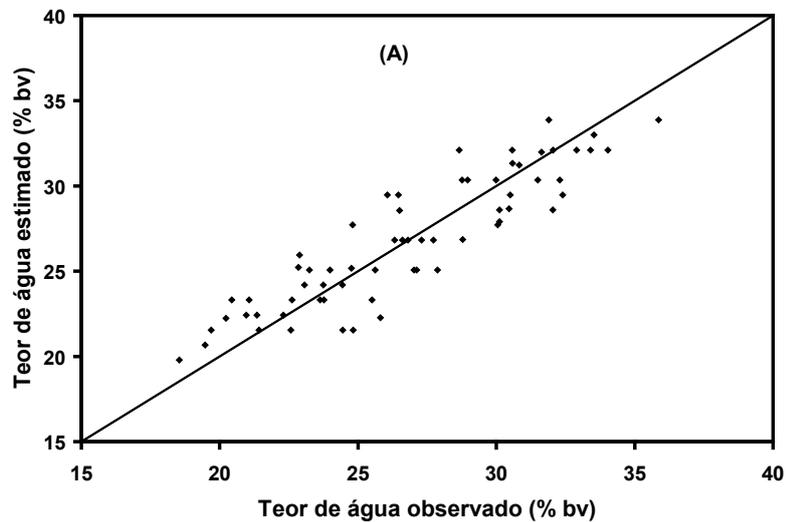


Figura 4. Diagrama de dispersão com os valores teóricos da porcentagem do teor de água no solo estimados pelos três equipamentos⁴.

⁴ Em função dos reais determinados pelo método termogravimétrico, (a) “Speedy”; (b) Sonda “Theta Probe”; (c) Sonda de Pulso de Calor.

Na Figura 4, pode-se constatar que os pontos estão uniformemente distribuídos acima e abaixo da bissetriz para os diferentes valores da porcentagem do teor de água no solo, independentemente do equipamento. Nesta Figura observa-se, ainda, que a maioria dos pontos encontra-se próximos da referida reta, o que indica pouca diferença entre os valores teóricos e reais. Estes resultados possibilitam afirmar que as funções lineares utilizadas podem ser apropriadas para a calibração dos equipamentos avaliados.

Nas Figuras 5, 6 e 7, apresentam-se, respectivamente, os gráficos dos resíduos para os dados relativos às variáveis pressão (kPa), condutividade elétrica (mV) e diferença de temperatura ($^{\circ}$ C). Estes gráficos podem facilitar inferência a respeito de alguma provável relação entre os resíduos dessas variáveis correspondentes aos equipamentos "Speedy", Sonda Theta Probe e Sonda de Pulso de Calor, bem como a avaliação da precisão e exatidão nas medições realizadas, considerando-se a dispersão e magnitude dos erros.

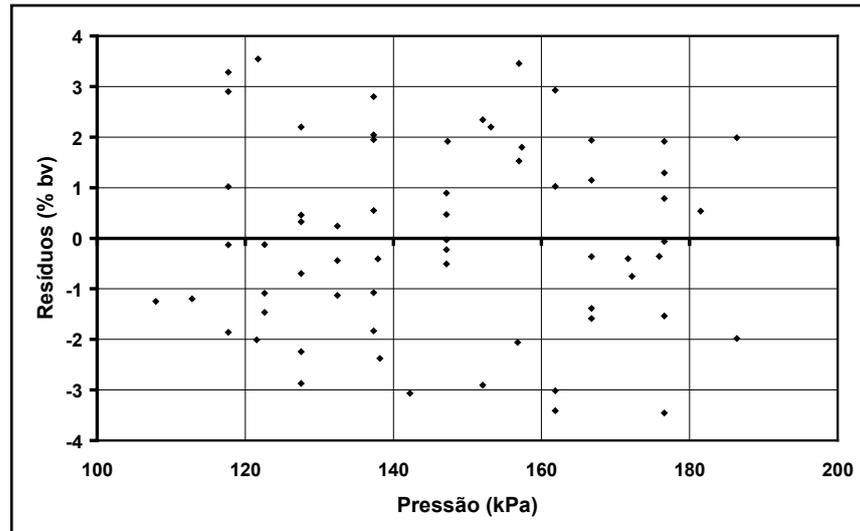


Figura 5. Gráfico dos resíduos para a pressão estimada pelo equipamento "Speedy".

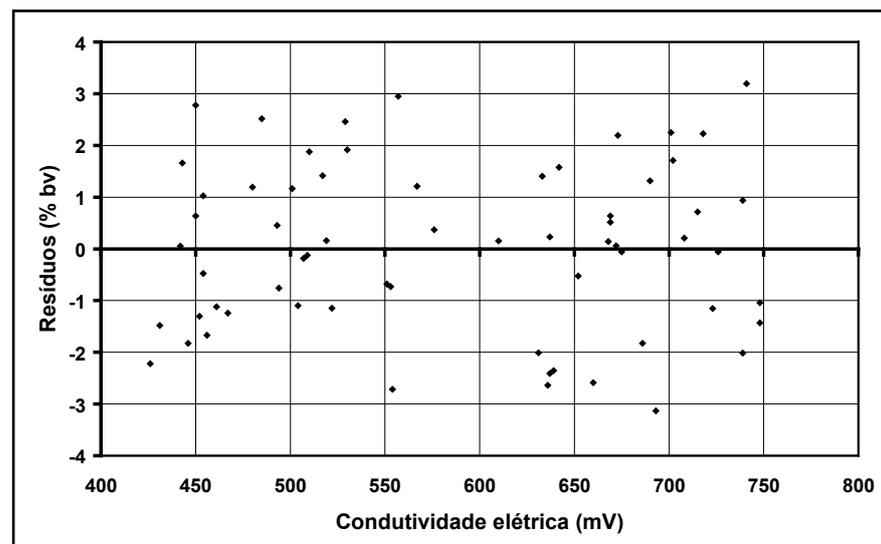


Figura 6. Gráfico dos resíduos para a condutividade elétrica estimada pela sonda "Theta Probe".

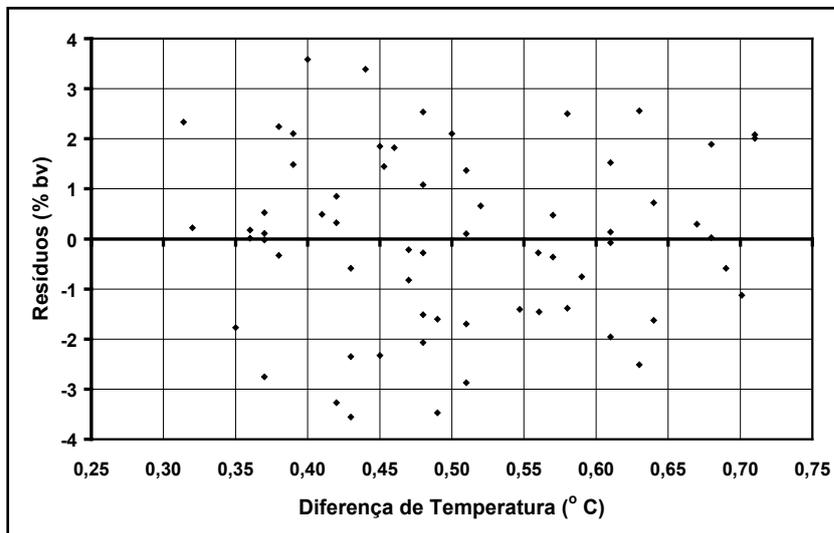


Figura 7. Gráfico dos resíduos para a diferença de temperatura estimada pela sonda de Pulso de Calor.

Com base nas Figuras 5, 6 e 7, deduz-se que não há relação entre os resíduos e as variáveis correspondentes aos três equipamentos, uma vez que os pontos estão distribuídos aleatoriamente acima e abaixo ao longo do eixo horizontal e não existem evidências de algum padrão de dependência funcional. Pela própria Figura pode-se verificar, ainda, que os três equipamentos apresentaram precisão equivalente nas medições, pois, a dispersão dos erros foi semelhante. No entanto, a exatidão utilizando-se a sonda “Theta Probe” foi superior, dada pela menor quantidade de valores de resíduos, maiores do que -4 e

menores do que -3, bem como maiores do que 3 e menores do que 4, onde, nesses intervalos foram determinados, respectivamente, os menores e maiores erros.

A premissa da normalidade nos erros em torno da equação de calibração pode ser avaliada a partir de uma distribuição de freqüências dos resíduos. Este importante aspecto para definir critérios sobre a adequação do modelo ajustado pode ser verificado nos histogramas apresentados nas Figuras 8, 9 e 10.

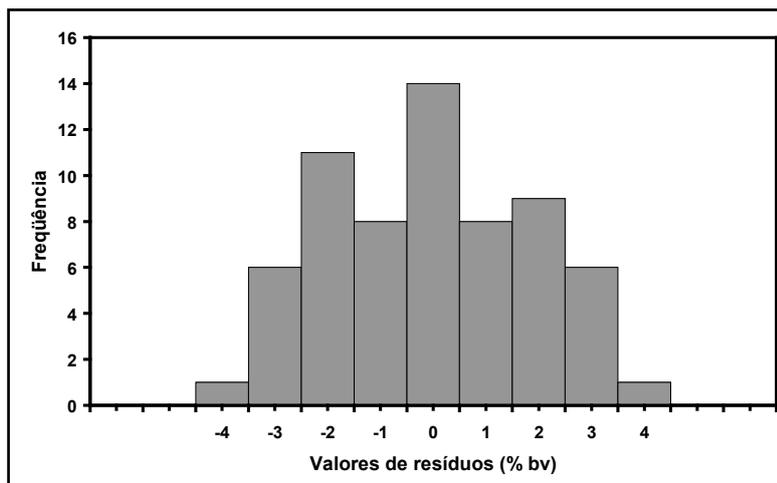


Figura 8. Histograma de resíduos correspondentes ao equipamento “Speedy”.

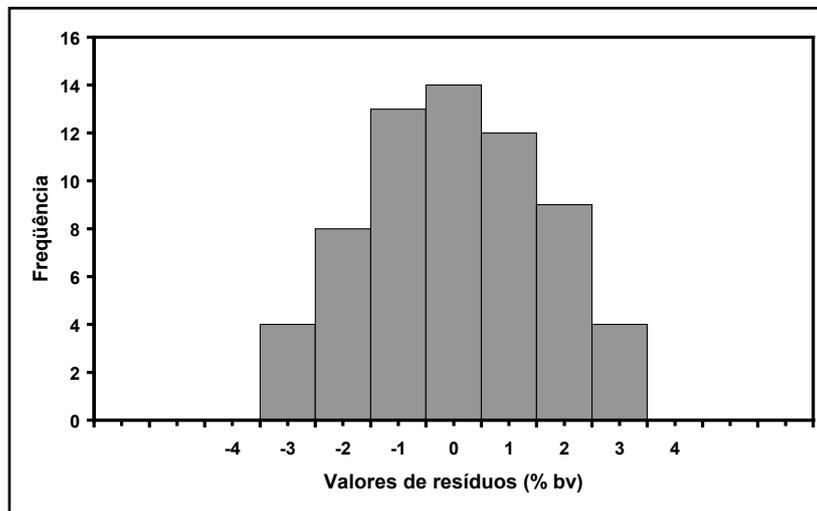


Figura 9. Histograma de resíduos correspondentes à sonda “Theta Probe”.

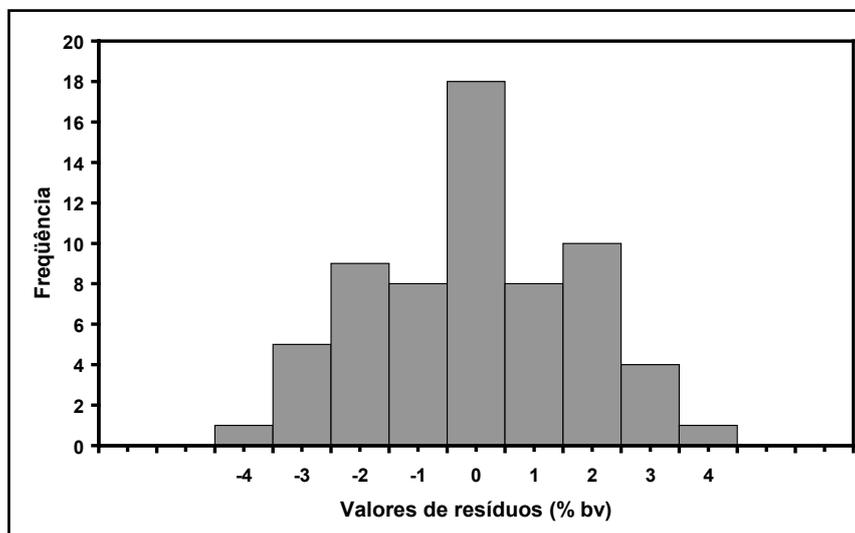


Figura 10. Histograma de resíduos correspondentes à sonda de Pulso de Calor.

De acordo com as Figuras 8, 9 e 10, pode-se afirmar que os valores dos resíduos apresentam uma distribuição normal com adequada simetria, o que foi comprovado pelos testes Kolmogorov-Smirnov e Lilliefors em nível de 5% de probabilidade. Nestas Figuras pode-se verificar, ainda, que aproximadamente 60% dos erros estimados pela sonda “Theta Probe” encontram-se entre -1,5 e 1,5%, no entanto, para os outros dois equipamentos a porcentagem de erros nesse intervalo foi em torno de 53%. Estes resultados

indicam uma pequena vantagem da mencionada sonda quanto à exatidão das medições realizadas.

Para confirmar analiticamente a adequação dos modelos ajustados, os valores reais da porcentagem do teor de água no solo determinados pelo método termogravimétrico e os teóricos estimados pelas equações de calibração foram comparados estatisticamente, aplicando-se o teste t. Os resultados obtidos para cada equipamento apresentam-se no Quadro 2.

Quadro 2: Resultados do teste t para os três equipamentos.

Equipamento	Valores de t			Significância
	Calculado	Tabelado		
		$\alpha = 5 \%$	$\alpha = 1 \%$	
“Speedy”	0,6570	1,6570	2,6157	ns
Sonda “Theta Probe”	0,0272			ns
Sonda de Pulso de calor	0,0655			ns

5

No Quadro 2, pode-se constatar que não houve diferença significativa entre os valores reais e teóricos, aceitando-se a hipótese de que a porcentagem do teor de água no solo estimado pelos três equipamentos é equivalente ao determinado pelo método termogravimétrico. Com base nesta condição pode-se afirmar que os modelos de regressão linear propostos são apropriados para ajustar os dados.

Neste trabalho verificou-se, ainda, a independência dos erros em função do tempo, pois os dados foram coletados em 4 fases de

secagem do solo. Quando os resíduos ao longo do tempo seguem alguma tendência pode existir um padrão denominado autocorrelação e a validade do modelo de regressão proposto pode ficar comprometida. Para detectar se houve autocorrelação no conjunto de dados analisados foram elaborados os gráficos dos resíduos, na ordem seqüencial do tempo (Figura 11). A confirmação analítica foi baseada na estatística de Durbin-Watson para uma variável independente ($k=1$) e 64 observações ($n=64$), cujos resultados são apresentados no Quadro 3.

Quadro 3. Resultados da estatística de Durbin-Watson para os três equipamentos.

Equipamento	Estatística de Durbin-Watson					Autocorrelação
	Calculado	Limites tabelados				
		$\alpha = 5 \%$		$\alpha = 1 \%$		
		Inferior (d_l)	Superior (d_s)	Inferior (d_l)	Superior (d_s)	
“Speedy”	1,69	1,57	1,63	1,41	1,47	Não existe
Sondas “Theta probe”	1,99					Não existe
Pulso de calor	1,65					Não existe

6

5 Obs.: α : Nível de probabilidade; ns: não significativo

6 Obs.: α : Nível de probabilidade

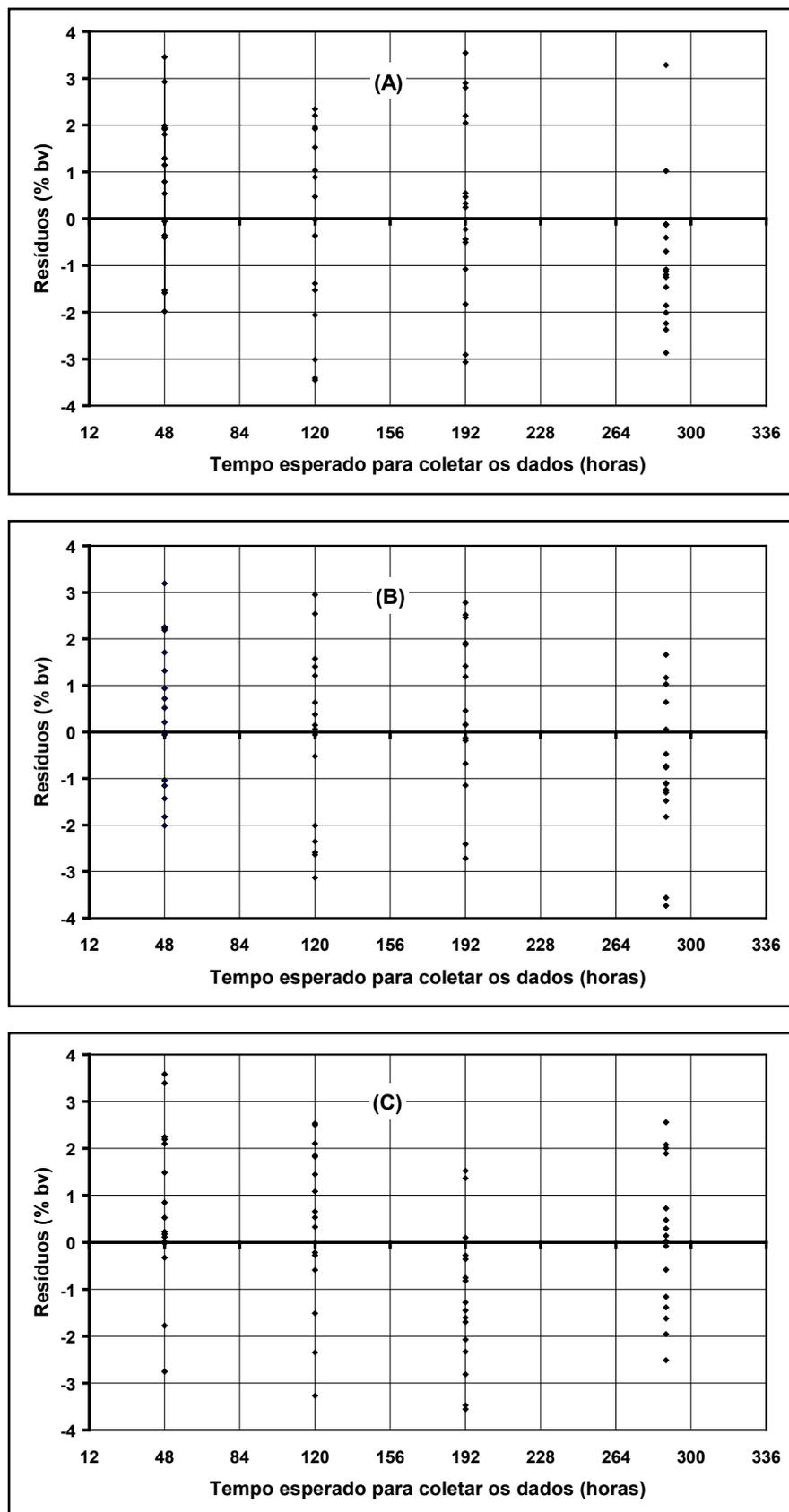


Figura 11. Gráficos dos resíduos. ⁷

⁷ Em função do tempo esperado para coletar os dados relativos às variáveis estimadas pelos três equipamentos, (a) “Speedy”; (b) Sonda “Theta Probe”; (c) Sonda de Pulso de Calor.

Na Figura 11, observa-se que os resíduos, em função do tempo esperado para coletar os dados com os três equipamentos, não apresentaram qualquer evidência de um padrão, ou seja, os erros ficaram distribuídos aleatoriamente acima e abaixo do eixo horizontal, independentemente da fase de secagem do solo. A estatística de Durbin-Watson pode confirmar analiticamente a ausência de autocorrelação dos erros em função do tempo, pois os valores calculados para cada equipamento foram maiores do que o limite superior para 5% de probabilidade (Quadro 3). A não existência de autocorrelação dos resíduos significa que o ajuste dos dados ao modelo de regressão proposto pode ser adequado.

Neste trabalho verificou-se que todas as premissas da regressão foram satisfeitas e, ainda, que o valor médio dos resíduos teve uma variação máxima de $\pm 1,75\%$ em relação ao valor real. Essa magnitude de erro não tem grande influência nas medições para fins práticos, sobretudo no intervalo de umidade de maior interesse agrônomo, ou seja, entre a capacidade de campo e o ponto de murcha. Estes resultados permitem afirmar que a função linear correlacionou satisfatoriamente os dados experimentais, sendo apropriada para estimar o teor de água no solo em condições de campo utilizando-se os três equipamentos.

O modelo linear, também, foi utilizado por Trintinalha et al. (2001) para ajustar o conjunto de pontos experimentais e correlacionar a umidade volumétrica com a constante dielétrica do solo. O referido modelo

foi proposto por Ruiz et al. (2003) para avaliar a capacidade de campo de acordo com o equivalente de umidade. Maia et al. (2005) desenvolveram equações lineares para expressar a relação da umidade do solo na capacidade de campo e no ponto de murcha, em função de doses de vermicomposto. Nesses trabalhos foram obtidos coeficientes de determinação superiores a 0,90. Estes resultados indicam que o modelo linear é amplamente utilizado para representar dependências funcionais de variáveis relacionadas com o teor de água no solo.

O adequado ajuste apresentado pelas três equações de retas propostas, bem como a sua facilidade de aplicação e análise constituem as principais razões para não avaliar as outras funções matemáticas. Esta decisão foi baseada, também, na dispersão dos dados experimentais, que não mostraram um padrão específico de comportamento, na superposição das linhas de tendência, na pequena diferença entre os coeficientes de determinação (R^2) e nas experiências positivas obtidas por outros autores.

No Quadro 4, apresentam-se os valores médios reais e teóricos da porcentagem do teor de água no solo em base volumétrica obtidos pelo método termogravimétrico e pelas equações lineares de calibração, em função da fase de secagem. Observa-se que os valores reais e teóricos tiveram uma tendência decrescente de acordo com o tempo de coleta dos dados e que a diferença entre ambos foi baixa, sendo estatisticamente equivalentes conforme o teste t para 5% de probabilidade.

Quadro 4. Valores médios reais e teóricos da porcentagem do teor de água no solo em base volumétrica.⁸

Fase de secagem (horas)	Teor de água no solo em base volumétrica (%)			
	Real	Teórico		
		"Speedy"	Sondas	
			"Theta Probe"	Pulso de calor
48	32,13	31,39	31,65	31,38
120	28,48	28,66	28,63	28,06
192	24,99	24,67	24,51	26,21
288	21,63	22,54	22,43	21,58

⁸ em função da fase de secagem.

CONCLUSÕES

De acordo com os resultados obtidos, concluiu-se que:

- Os três equipamentos avaliados tiveram desempenho satisfatório na determinação do teor de água no solo em condições de campo;
- As funções lineares apresentaram adequado ajuste para correlacionar os valores teóricos e experimentais e
- Os equipamentos estudados mostraram-se como ferramentas práticas e eficientes para estimar o teor de água no solo em condições de campo.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ARMSTRONG, C.F.; LIGON, J.T.; McLEOD, M.F. **Automated system for detailed measurement of soil water potential profiles using watermark brand sensors**. Technical Publication, n. 2707, S.C. Agricultural Experimental Station, p.201-206. 1985.

BIANCHINI, A. **Desempenho de tração de um trator agrícola 2RM em solo aluvial**. Viçosa: UFV, 1994. 76p. (Dissertação de Mestrado)

BIANCHINI, A.; MAIA, J.C.S.; MAGALHÃES, P.S.G. **Sonda para determinação de umidade de solo**. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA AGRÍCOLA, 32, 2003, Goiânia. Resumos... Goiânia: SBEA, 2003. CD Rom.

CHICOTA, R.; VAN LIER, Q. J. **Avaliação no campo de um TDR segmentado para a estimativa da umidade do solo**. Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental, v.8, n.1, p.72-78, 2004.

COLETTI, C. **Caracterização da irrigação de uma cultura citrícola com a utilização do TRD**. Campinas: UNICAMP, 2000. 90p. (Dissertação de Mestrado)

CRUVINEL, P.E.; HERRMANN, P.S.P.; INAMASU, R.Y.; NETO, A.T.; CRESTANA, S. **Reflectometria**

no domínio de tempo (TDR). In: FARIA, M.A.; SILVA, E.L.; VILELA, L.A.A.; SILVA, A.M. **Manejo de irrigação**. Lavras: UFLA/SBEA, 1998. Cap.2, p194-204.

DELTA-T DEVICES. **ThetaProbe soil moisture sensor. User Manual ML2-UM-1**. New York: Macaulay Land use Research Institute, 1999. 20 p.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS E RODAGEM - DNER. **Solos e agregados miúdos – Determinação da umidade com emprego do “Speedy”**. Método de Ensaio (DNER-ME 052/94). Brasília, 1994. 8 p.

DRAPER, N.R.; SMITH, H. **Applied regression analysis**. John Wiley, 1981. 232 p.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA - EMBRAPA. Centro Nacional de Pesquisas de Solos. **Manual de métodos de análise de solo**. Rio de Janeiro, 2ª edição, 1997. 212p.

FABIAN, A.J.; OTTONI FILHO, T.B. **Determinação de capacidade de campo IN SITU ou através de equações de regressão**. Pesquisa Agropecuária Brasileira, v.35, n.5, p.1029-1036, 2000.

FAULIN, G.C.; MOLIN, J.P. **Amplitude dos valores da umidade e sua influência na mensuração da condutividade elétrica do solo**. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE AGRICULTURA DE PRECISÃO, 2, 2006, São Pedro. Trabalhos Completos ... São Pedro, CONBAP, 2006.

FORSYTHE, D. **Física de Suelos**. 2. ed. San José, Costa Rica: IICA, 1985. 214 p.

GOMES, F.P. **Curso de estatística experimental**. Piracicaba: Livraria Nobel, 1990. 468 p.

LEVINE, D.M.; STEPHAN, D.; KREHBIEL, T.C.; BERENSON, M.L. **Estatística – Teoria e aplicações usando-se o Microsoft EXCEL em português**. Rio de Janeiro: Livros Técnicos e Científicos Editora S.A., 2005. 819 p.

MAIA, C.E.; MORAIS, E.R.C.; MEDEIROS, J.F. **Capacidade de campo, ponto de murcha permanente e água disponível para as plantas em função de doses de vermicomposto.** Revista Caatinga, v.18, n.3, p.195-199, 2005.

MASTRORILLI, M.; KATERJI, N.; RANA, G.; NOUNA, B.B. **Daily actual evapotranspiration measured with TDR technique in Mediterranean conditions.** Agricultural and Forest Meteorology, v.90, p.81-89, 1998.

MEDEIROS, G.A.; BOMFIM, M.B.; LUCARELLI, J.R.F.; DANIEL, L.A. **Avaliação de sondas segmentadas multihaste e TDR em latossolo vermelho conduzido sob dois sistemas de preparo e cultivado com feijoeiro irrigado.** Ecosistema, v.26, n.1, p.48-53, 2001.

MOJID, M.A.; WYSEURE, G.C.L.; ROSE, D.A. **The use of insulated time-domain reflectometry sensors to measure water content in highly saline soils.** Irrigation Science, v.18, n.2, p. 56-61, 1998.

OLIVEIRA, L.F.C.; BOMO, R.; CORTÊS, F. C. **Desenvolvimento matemático de uma equação para estimativa da capacidade de campo.** Pesquisa Agropecuária Tropical, v.31, n.1, p.65-69, 2001.

OLIVEIRA FILHO, D.; MANTOVANI, E. C.; PEREIRA, S. **Tecnologia de determinação da umidade do solo via reflectometria no domínio do tempo.** In: ENCONTRO DE ENERGIA NO MEIO RURAL, 3, 2000, Campinas. Trabalhos Completos ... Campinas, AGREENER, 2000.

OTTO, S.R.L.; ALCAÍDE, M. **Utilização do método TDR-tensiômetro na obtenção da curva de retenção de água no solo.** Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental, v.5, n.2, p.265-269, 2001.

RADAMBRASIL. **Levantamento de Recursos Naturais.** Rio de Janeiro: Ministério das Minas e Energia, 1982. 540p.

RICHARDS, J.H.; CALDWELL, M.M. Hydraulic lift: **Substantial nocturnal water transport between soil layers by *Artemisia tridentate***

roots. Oecologia, v. 73, p. 486-489, 1987.

RUIZ, H.A.; FERREIRA, G.B.; PEREIRA, J.B.M. **Estimativa da capacidade de campo de latossolos e neossolos quartzarênicos pela determinação do equivalente de umidade.** Revista Brasileira de Ciência do Solo, v.27, n.3, p.389-393, 2003.

SEGANFREDO, M. L.; ELTZ, F. L. F.; DE BRUM, A. C. R. **Perdas de solo, água e nutrientes por erosão em sistemas de culturas em plantio direto.** Revista Brasileira de Ciência do Solo, v.21, n.2, p.287-291, 1997.

SERRARENS, D.; McINTYRE, J.L.; HOPMANS, J.W.; BASSOI, L.H. **Soil moisture calibration.** Scientia Agrícola, v.57, n.2, p.349-354, 2000.

SILVA, E.L. **Determinação automática do teor de água em Latossolo Roxo Distrófico com uso de reflectometria de onda.** In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA AGRÍCOLA, 27, 1998, Poços de Caldas. Resumos...Poços de Caldas: UFLA-SBEA, 1998.

SILVA, E.L.; GERVÁSIO, 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, v.3, n. 3, p.417-420, 1999.

SOUZA, C.F.; FOLEGATTI, M.V.; MATSURA, E.E.; OR, D. **Calibração da reflectometria no domínio do tempo (TDR) para a estimativa da concentração da solução no solo.** Engenharia Agrícola, v.26, n.1, p. 282-291, 2006.

SPIEGEL, M.R. **Teoría y problemas de estadística.** La Habana: Editorial Pueblo y Educación, 1977. 358 p.

TOMASELLI, I.T.G.; BACCI, O.O.S. **Calibração de um instrumento de reflectometria de microondas para dois solos paulistas típicos.** In: CONGRESSO BRASILEIRO DE CIÊNCIA DO SOLO, 25, 1995, Viçosa. Resumos...Viçosa: UFF, 1995.

TORMENA, C. A.; SILVA, A. P.; LIBARDI, P. L. **Caracterização do intervalo hídrico ótimo de um latossolo roxo sob plantio direto.** Revista Brasileira de Ciência do Solo, v.22, n.4, p.573-581, 1998.

instalação e da variabilidade entre sondas no uso da técnica de TDR em um Nitossolo Vermelho Distroférrico. Acta Scientiarum, v.23, n.5, p.1165-1171, 2001.

TRINTINALHA, M.A.; GONÇALVES, A.C.A.; FOLEGATTI, M.V.; TORMENA, C.A.; BERTONHA, A.; TSUKADA, J. **Efeito da**

VEIGA, R.D; SÁFADI, T. **Análise de regressão e séries temporais.** Lavras: Universidade Federal de Lavras, 1999. 57 p. Alabust L. Romne