

SEÇÃO I - FÍSICA DO SOLO

DESEMPENHO DO TENSÍÔMETRO COM DIFERENTES SISTEMAS DE LEITURA⁽¹⁾

Alexsandro dos Santos Brito⁽²⁾, Paulo Leonel Libardi⁽³⁾, Jaedson Cláudio Anunciato Mota⁽²⁾ & Sergio Oliveira Moraes⁽³⁾

RESUMO

O tensiômetro é o instrumento mais utilizado no campo para medida do potencial mátrico da água, pelo que a avaliação dos seus diferentes sistemas de leitura é muito importante. Este trabalho objetivou avaliar diferentes sistemas de leitura do tensiômetro tradicional em campo e justifica-se porque vai indicar a situação na qual cada sistema deve ou não ser utilizado. Foi realizado um experimento em delineamento inteiramente aleatório e em esquema fatorial $3 \times 2 \times 2 \times 11$, ou seja, três sistemas de leitura do tensiômetro (manômetro de mercúrio, vacuômetro de Bourdon e tensímetro digital com transdutor de pressão), duas profundidades de instalação (0,2 e 1,0 m), dois horários de leitura (manhã e tarde) e 11 leituras, com quatro repetições. Os dados foram submetidos à análise de variância pelo teste F, e as médias foram contrastadas pelo teste de Tukey, a 5 %. Os sistemas também foram analisados com base nos indicadores estatísticos índice de concordância de Willmott, erro máximo, erro absoluto médio, raiz quadrada do erro médio normalizado, coeficiente de determinação, coeficiente de massa residual e eficiência, adotando-se o tensiômetro com manômetro de mercúrio como referência. Concluiu-se que: (a) o vacuômetro de Bourdon é mais exato e eficiente que o tensímetro digital e, na ausência do manômetro de mercúrio, deve ser preferido para a medida do potencial mátrico da água no solo; (b) sempre que o vacuômetro de Bourdon for instalado ao longo do comprimento do tensiômetro sob determinada carga hidráulica, esta deve ser considerada no cálculo do potencial mátrico; e (c) o tensímetro digital superestimou os valores de potencial mátrico em comparação ao manômetro de mercúrio e vacuômetro de Bourdon.

Termos de indexação: manômetro de mercúrio, vacuômetro, transdutor de pressão.

⁽¹⁾ Programa de Pós-Graduação em Solos e Nutrição de Plantas, Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo – ESALQ/USP. Recebido para publicação em julho de 2008 e aprovado em janeiro de 2009.

⁽²⁾ Departamento de Solos e Nutrição de Plantas, Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo – ESALQ/USP. Av. Pádua Dias, 11, 13418-900, Piracicaba (SP). E-mail: alexsb@esalq.usp.br; jcamota@esalq.usp.br

⁽³⁾ Departamento de Ciências Exatas, ESALQ/USP. E-mail: pllibard@esalq.usp.br; somoraes@esalq.usp.br

SUMMARY: TENSIO METER PERFORMANCE WITH DIFFERENT READING SYSTEMS

The tensiometer is the most used instrument in the field to determine the soil water matric potential, so that the evaluation of its reading systems is very important. The purpose of this study was to evaluate different reading systems for the traditional field tensiometer traditional field tensiometer and it is justified because it will indicate the situation in which each system should be used. The experiment was carried out in a completely randomized factorial design (3 x 2 x 2 x 11), using three tensiometer reading systems (mercury manometer, Bourdon gauge and digital tensimeter with pressure transducer), two installation depths of the porous cup (0.2 and 1.0 m), two readings per day (morning and afternoon) during 11 days of readings, with four replications. The data were submitted to the F test (variance analysis) and the means compared by the Tukey test at 5 %. Besides, the systems were also evaluated using the statistical indicators Willmott concordance index, maximum error, mean absolute error, normalized root mean-square error, determination coefficient, coefficient of residual mass and efficiency, based on the mercury manometer as reference. It was concluded that (a) whenever the Bourdon vacuumeter is installed at a particular hydraulic load in the tensiometer length, this should be considered in the matric potential calculation, (b) the Bourdon's vacuumeter was more precise and efficient than the digital tensiometer and (c) the digital tensiometer overestimated the soil water matric potential in comparison to the mercury manometer and Bourdon's vacuumeter.

Index terms: mercury manometer, vacuum gage, pressure transducer.

INTRODUÇÃO

Conhecer o comportamento da água no solo é essencial para a tomada de decisões referentes ao manejo racional dos cultivos irrigados ou não. Nesse aspecto, uma importante variável a ser mensurada é a energia com que a água está retida pela fração sólida do solo, conhecida na literatura que trata do tema por potencial mátrico.

O tensiômetro com manômetro de mercúrio, implementado inicialmente por Livingston em 1908 (Or, 2001), é um instrumento de medida direta do potencial mátrico da água no solo (Libardi, 2005), possibilitando uma medida *in situ*, com precisão e sensibilidade.

Embora apresente algumas limitações (Bakker et al., 2007) como qualquer instrumento, o tensiômetro tem sido utilizado de modo satisfatório na determinação da energia com que a água está retida pela matriz do solo. Uma das limitações é que ele funciona até cerca de -0,085 MPa. Considerando que o intervalo do potencial mátrico agronomicamente importante varia de 0 a -1,5 MPa, o tensiômetro poderia ser considerado um instrumento por demais limitado. No entanto, para a atividade agrícola comercial, a faixa de interesse é de 0 a -0,1 MPa, na qual a densidade de fluxo da solução no solo é apreciável para a maioria dos solos cultivados. Nesse contexto, portanto, o tensiômetro é um excelente instrumento de campo para o monitoramento da água no solo (Reichardt, 1990) durante o ciclo da cultura, visando ao controle da irrigação ou à realização do balanço de água no solo.

As características externas dos tensiômetros mudaram pouco ao longo do tempo, embora algumas

modificações tenham permitido ampliar sua faixa de trabalho e a confiabilidade em suas respostas (Bakker et al., 2007). Melhorias foram realizadas muito mais para facilitar sua instalação e seu manuseio. Em linhas gerais, o tensiômetro, para medida do potencial mátrico na faixa de 0 a -0,085 MPa, mantém as suas características originais, sendo um instrumento bastante simples e, principalmente, com um custo relativamente baixo, quando comparado a instrumentos de medição indireta do potencial mátrico, como sondas capacitivas, TDRs, sonda de nêutrons (Moraes et al., 2006).

Os tensiômetros clássicos ou convencionais utilizam o manômetro de mercúrio para a obtenção das leituras de potencial mátrico da água no solo. Além de ser de medida direta, é o mais sensível e um dos mais exatos, sendo utilizado como padrão para aferição dos demais modelos. Porém, apresenta a desvantagem de o Hg, quando oxidado, ser tóxico e poder contaminar o ambiente, se não foi adequadamente manuseado.

Uma das alternativas ao uso de Hg foi a introdução de outros sensores que, acoplados ao tensiômetro, se prestam à medição do potencial mátrico. Embora tenha sido patenteado na França, no século XIX, pelo engenheiro Eugene Bourdon (Çengel & Boles, 2006), o vacuômetro que leva o seu nome tem sua aplicação em tensiômetros mais recentemente. É um dispositivo mecânico que, a partir da deformação de uma espiral, proporcional a uma dada tensão, transmite o sinal analógico a um eixo com um ponteiro em sua extremidade, indicando o valor da tensão em um visor.

O tensiômetro digital utiliza um transdutor de pressão (Marthaler et al., 1983) como elemento sensível para transmitir um sinal correspondente à

tensão no interior do tensiômetro quando do momento da leitura. Esse sinal é mostrado, também, digitalmente no visor do instrumento.

Quando se pretende substituir um instrumento convencional, seja por questão de automação na aquisição dos dados, por exemplo, ou por uma outra melhoria qualquer, a confiabilidade no instrumento a ser substituído para o novo modelo de equipamento é um aspecto importante (Sentelhas et al., 1997). Esse é um ponto fundamental a ser avaliado, uma vez que os dados obtidos no novo modelo de instrumento devem ser semelhantes aos obtidos pelo modelo substituído.

O objetivo deste trabalho foi avaliar o desempenho de tensiômetro convencional com diferentes sistemas de leitura (manômetro de mercúrio, vacuômetro de Bourdon e tensiômetro digital) na medida do potencial mátrico da água no solo.

MATERIAL E MÉTODOS

O experimento foi conduzido em área experimental do campus da Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, em Piracicaba-SP. O solo é classificado como Latossolo Vermelho-Amarelo distrófico (Embrapa, 1999; Fernandes, 2006). Trata-se de um solo de textura média, com teor de argila não excedendo a 27 % e o teor de areia maior que 60 % para todo o perfil de 0,0 a 1,2 m de profundidade.

O experimento foi realizado considerando o delineamento estatístico inteiramente casualizado, com quatro repetições, em esquema fatorial $3 \times 2 \times 2 \times 11$, ou seja, três sistemas de leitura para o cálculo do potencial mátrico da água no solo (tensiômetro com manômetro de mercúrio, tensiômetro com vacuômetro de Bourdon e tensiômetro digital com transdutor de pressão), duas profundidades de instalação da cápsula porosa (0,2 e 1,0 m), dois horários de leitura (manhã e tarde) e 11 dias de leitura.

Os tensiômetros foram construídos de modo a permitir que o manômetro de mercúrio, o vacuômetro de Bourdon e o tensiômetro com transdutor de pressão funcionassem em um mesmo instrumento, evitando a variabilidade entre os pontos de instalação. Os tensiômetros foram confeccionados com tubos de PVC rígido, com diâmetros externo e interno de 0,021 e 0,016 m, respectivamente, e comprimento correspondente à profundidade de instalação mais 0,3 m. O aparato destinado ao funcionamento do manômetro de mercúrio empregou uma mangueira de “nylon”, com diâmetro interno de 0,002 m, colada ao tubo de PVC, conectando o tensiômetro a uma cuba com Hg. Para o tensiômetro de Bourdon, utilizou-se um vacuômetro com fundo de escala de 760 mmHg, com divisões de 20 mmHg, e, para medição com o tensiômetro digital com transdutor de pressão, os tubos de PVC continham em sua parte superior um tubo de

acrílico, medindo 0,1 m e diâmetros externo e interno de 0,015 e 0,012 m, respectivamente, cuja vedação foi feita com uma rolha de silicone própria para essa finalidade (Figura 1). O tubo de acrílico foi coberto por um tubo de PVC (diâmetro de 0,0254 m – uma polegada) para evitar a isolação direta que pode levar à dilatação diferencial e, conseqüentemente, a vazamentos pela interface rolha-tubo de acrílico.

As cápsulas porosas para os tensiômetros foram selecionadas levando em consideração a pressão de borbulhamento e a condutância hidráulica, segundo apontamentos de aula prática – CENA/ESALQ/USP, Piracicaba/SP (Libardi, 1999). O primeiro teste objetivou eliminar cápsulas defeituosas, ou seja, as que apresentassem borbulhamento a tensões inferiores a 100 kPa, que corresponde, aproximadamente, ao valor máximo de pressão de funcionamento do instrumento. O segundo teve por objetivo uniformizar as cápsulas a fim de que o tempo de resposta dos tensiômetros fosse o mais uniforme possível.

Após a construção, os tensiômetros foram instalados no campo com as cápsulas porosas em suas respectivas profundidades e, a partir de então, foram realizadas leituras diárias em dois horários distintos (entre 7 e 8 h e entre 16 e 17 h) por um período de 11 dias. Para evitar modificações no equilíbrio estabelecido entre a câmara de ar, localizada na porção superior do

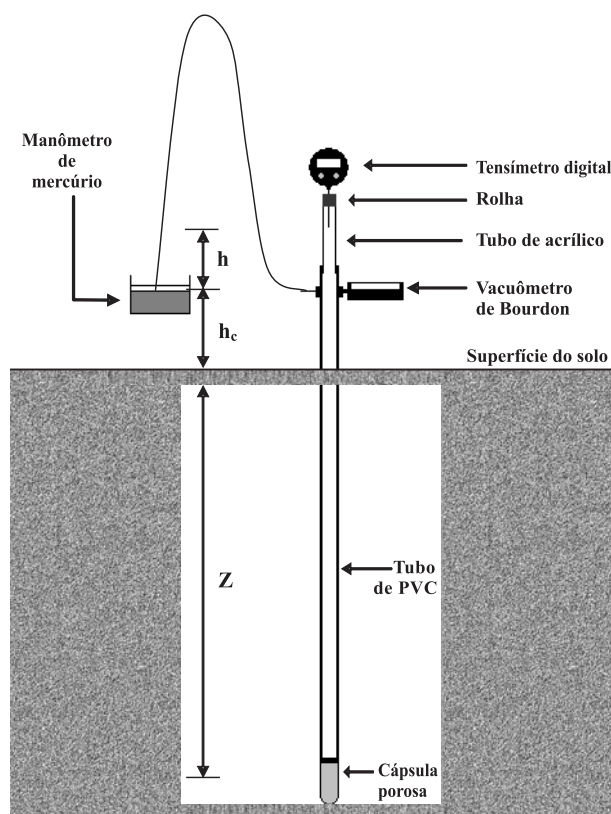


Figura 1. Diagrama esquemático do tensiômetro construído com os três sistemas de leitura acoplados em um tubo de PVC.

tensiômetro, a água do tensiômetro e a água no solo, procedeu-se inicialmente à leitura no manômetro de mercúrio e vacuômetro de Bourdon, nessa ordem, para, em seguida, proceder à leitura com o tensiômetro digital.

Os dados dos tensiômetros com manômetro de mercúrio foram obtidos medindo-se a elevação da coluna de Hg na mangueira de “nylon”, e com o vacuômetro de Bourdon as leituras foram feitas diretamente no visor. Para o tensiômetro digital com transdutor de pressão, os dados foram obtidos conectando-se o sensor com a câmara de ar por meio de uma agulha “cega”, com dois orifícios laterais para a transferência de tensão para o instrumento medidor. A câmara de ar mantida no interior do tensiômetro foi de $2,4 \times 10^{-6} \text{ m}^3$, com variação de no máximo $4,8 \times 10^{-6} \text{ m}^3$.

A determinação do potencial mátrico da água no solo para os tensiômetros com manômetro de mercúrio, com vacuômetro de Bourdon e tensiômetro digital com transdutor de pressão foi realizada, respectivamente, pelas equações 1, 2 e 3:

$$\phi_m = - 12,6 h_{Hg} + h_c + z \quad (1)$$

em que ϕ_m - potencial mátrico da água no solo, m de água; h_{Hg} - altura da coluna de Hg (leitura do tensiômetro), m; h_c - altura do nível de Hg na cubeta em relação à superfície do solo, m de água; z - profundidade de instalação do centro da cápsula porosa do tensiômetro, m de água;

$$\phi_m = - (L \times 0,136) - h + h_c + z \quad (2)$$

em que L - leitura no visor analógico, mm/Hg; h - altura da coluna de água acima do ponto de inserção do manômetro, m de água; e h_c - altura de inserção, em relação à superfície do solo, do manômetro de Bourdon no tubo de PVC, m de água; e

$$\phi_m = - (Ld \times 0,136) + h_c + z \quad (3)$$

em que Ld - leitura no visor digital, mm/Hg; $h_a = h_c + h$, m de água.

Paralelamente às leituras dos instrumentos, registrou-se a temperatura do solo com termopares tipo K, também instalados nas profundidades de 0,2 e 1,0 m. Esses termopares foram instalados no centro de cada bateria de tensiômetros e a uma distância de 0,2 m, aproximadamente, da linha de tensiômetros. Utilizou-se um multímetro digital (Minipa ET-2040) para obter, diretamente, valores de temperatura em °C.

Os dados obtidos, exceto os de temperatura, foram submetidos à análise de variância pelo teste F e as médias contrastadas pelo teste de Tukey a 5 %. Além disso, para a comparação dos dados, foram utilizados os seguintes índices: índice de concordância de Willmott - d; erro máximo - Emax; erro absoluto médio - EAmed; raiz quadrada do erro médio normalizado -

RQEM; coeficiente de determinação - CD; coeficiente de massa residual - CMR; e eficiência - E, conforme Zacharias et al. (1996) e Sentelhas et al. (1997). Esses indicadores foram obtidos a partir das seguintes equações:

$$d = 1 - \left[\frac{\sum_{i=1}^n (P_i - O_i)^2 / \sum_{i=1}^n (|P_i - \bar{O}| + |O_i - \bar{O}|)^2}{\sum_{i=1}^n (P_i - \bar{O})^2} \right] \quad (4)$$

$$E_{max} = \max (|O_i - P_i|)_{i=1}^n \quad (5)$$

$$EA_{med} = \left[\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (O_i - P_i) \right] \quad (6)$$

$$RQEM = \left[\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (O_i - P_i)^2 \right]^{0,5} \times \left(\frac{100}{\bar{O}} \right) \quad (7)$$

$$CD = \frac{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})^2 / \sum_{i=1}^n (P_i - \bar{O})^2}{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})^2} \quad (8)$$

$$CMR = \left[\frac{\sum_{i=1}^n O_i - \sum_{i=1}^n P_i}{\sum_{i=1}^n O_i} \right] \quad (9)$$

e

$$E = \left[\frac{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})^2 - \sum_{i=1}^n (O_i - P_i)^2}{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})^2} \right] \quad (10)$$

nas quais P_i corresponde aos dados obtidos para o instrumento-padrão (manômetro de mercúrio); O_i são os dados obtidos para o instrumento objeto de comparação; n é o número de observações; e $\bar{O} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n O_i$.

Foram obtidas as equações de calibração para o tensiômetro com vacuômetro de Bourdon e tensiômetro digital em relação ao instrumento com manômetro de mercúrio durante o período considerado. O tensiômetro com manômetro de mercúrio foi considerado como referência devido à sua alta sensibilidade às variações do potencial mátrico da água no solo.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Com a finalidade de testar a exatidão das medidas realizadas com o vacuômetro de Bourdon, Brito (2007) avaliou dois vacuômetros utilizando um tubo graduado com a extremidade inferior imersa em um becker com mercúrio e a extremidade superior conectada, juntamente com o vacuômetro, a uma bomba de vácuo. As leituras, concomitantes, realizadas com um manômetro de mercúrio e no vacuômetro de Bourdon foram equivalentes (Figura 2).

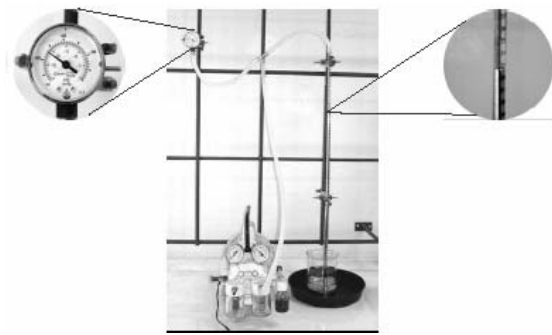


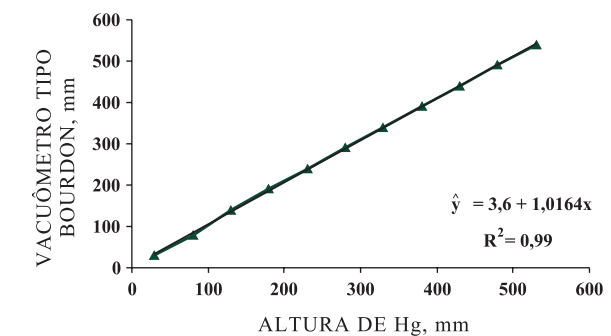
Figura 2. Calibração do vacuômetro de Bourdon e a equação de ajuste (Brito, 2007).

A leitura do vacuômetro de Bourdon no tensiômetro instalado (Figura 1), em que há uma carga hidráulica h sobre o vacuômetro, precisa ser corrigida, isto é, a ela (depois de transformada em m de água) deve ser adicionado o valor de h (Equação 3). Comumente, não se efetua a correção desse efeito sobre a leitura do vacuômetro. Nesse caso, é recomendável a instalação do vacuômetro no topo do tubo, eliminando-se a carga h ou, alternativamente, calibrando-se o vacuômetro de Bourdon com a correção dessa carga.

A inserção da agulha do tensímetro, que possui um volume de ar, em sua câmara e na própria agulha submetida à pressão atmosférica causa um pequeno decréscimo na tensão e um novo equilíbrio há que se estabelecer (Marthaler et al., 1983). Isso é uma das possíveis causas da menor leitura observada no tensímetro. Esses autores ressaltam ainda que a inserção da agulha do tensímetro pode provocar uma pequena deflexão da rolha para baixo e, conseqüentemente, uma saída de água. Essas perturbações podem retardar o equilíbrio da tensão da água no interior do tensiômetro com a tensão da água no solo, o que também é dependente da condutividade hidráulica do solo e da condutância da cápsula porosa. Assim, quanto mais seco se encontrar o solo, maior deverá ser o tempo para que se atinja um novo equilíbrio, uma vez que a condutividade hidráulica é função da umidade do solo. Marthaler et al. (1983) observaram tempo de reequilíbrio variando de dois a 10 min.

O efeito da introdução da agulha ligada à câmara leva a um aumento de volume que será acompanhado por uma queda de tensão e temperatura, considerando-se um processo adiabático. A queda de temperatura poderá ser desprezível, mas a de pressão não. Há de se aguardar o tempo para reestabelecer o equilíbrio hidráulico e proceder à leitura. Assim, é importante observar a variação do volume da câmara de ar no tensiômetro conforme o solo seca ou umedece. Marthaler et al. (1983) observaram que um volume de 2 cm^3 resultou em boas medidas.

O tensiômetro com manômetro de mercúrio revelou valores menores de potencial mátrico, diferindo significativamente daqueles do tensímetro, como tam-



bém foi observado por Moraes et al. (2006), e no vacuômetro de Bourdon, mesmo após a correção sugerida anteriormente. Para o experimento em questão, a não-correção das leituras do vacuômetro de Bourdon o tornaria semelhante ao tensímetro digital com transdutor de pressão. Apesar de os sistemas de leitura serem significativamente diferentes, na profundidade de 1,0 m o vacuômetro de Bourdon não diferiu do manômetro de mercúrio nos dois horários de leitura, e o tensímetro digital não foi significativamente diferente do vacuômetro de Bourdon nas leituras realizadas pela manhã. Nos horários de leitura, não houve diferença significativa para os sistemas de leituras nas duas profundidades, enquanto para as duas profundidades estudadas eles foram significativamente diferentes (Quadro 1). Um aspecto importante nesse comportamento contrastante entre as duas profundidades é o fato de o solo estar mais seco na profundidade de 1,0 m, o que causa um aumento do tempo de equilíbrio dos sistemas, repercutindo em maior desvio padrão nas leituras, sobretudo no horário vespertino.

Azooz & Arshad (1994), comparando tensiômetros com transdutor de pressão e com vacuômetro de Bourdon, e estudando o efeito da temperatura, verificaram que esses dois equipamentos não diferiram significativamente em laboratório e campo, e que houve decréscimo nas leituras de tensão com acréscimo na temperatura. Nas condições ambientais às quais estiveram submetidos os tensiômetros deste trabalho, é provável que a temperatura não tenha influenciado as leituras obtidas pelos sistemas, uma vez que não foi observada diferença significativa entre os horários. A temperatura do solo na profundidade de 0,2 m variou de 25 a 32 °C à manhã e de 26 a 36 °C pela tarde, enquanto para 1,0 m de profundidade variou de 27 a 31 °C pela manhã e de 24 a 29 °C à tarde.

O vacuômetro de Bourdon, embora diferindo do manômetro de mercúrio, possibilitou leituras de potencial mátrico da água no solo mais próximas ao sistema de referência, quando comparado ao tensímetro digital, em ambas as profundidades e horários (Figura 3), como também foi observado por Brasil et al. (2003). Como se pode notar pelos gráficos (Figura 3), os valores medidos de potencial mátrico

variaram de -2 a -13 kPa, faixa bem úmida, de extrema importância para a quantificação da drenagem interna pela equação de Darcy-Buckingham, visto que a capacidade de campo ocorre em torno do valor do conteúdo de água correspondente a um potencial mátrico da ordem de -10 kPa. Além disso, é nessa faixa que as medidas precisam ser mais sensíveis. Pode-se inferir também, pelos da figura 3, que para valores de potencial mátrico menores do que os menores valores nela apresentados, a disparidade entre os sistemas de medidas parece que tende a aumentar, notadamente no caso do tensímetro digital.

Na profundidade de 1,0 m, as leituras do vacuômetro de Bourdon mostraram-se mais bem ajustadas, quando comparadas às da profundidade de 0,2 m. Para o tensímetro, esse comportamento foi o oposto. Observa-se uma tendência de paralelismo entre as retas de ajustes dos equipamentos com as cápsulas porosas instaladas na profundidade de 0,2 m, enquanto para a profundidade de 1,0 m não há essa tendência. Entretanto, os potenciais mátricos medidos a 1,0 m de profundidade aproximaram-se mais da condição ideal (reta 1:1), o que sugere maior variação das condições edafoclimáticas na profundidade de 0,2 m,

Quadro 1. Valores médios de potencial mátrico para os sistemas de leitura em função da profundidade de instalação da cápsula porosa, do horário de leitura e do período de avaliação

Sistema de leitura	Profundidade/horário				Média
	0,2 m		1,0 m		
	Manhã	Tarde	Manhã	Tarde	
Mercúrio	-5,882 a A	-5,786 a A	-7,241 b A	-9,655 b A	-7,141 c
Bourdon	-4,642 a A	-4,039 a A	-6,765 ab A	-8,202 b A	-5,912 b
Tensímetro	-3,851 a A	-3,531 a A	-4,173 a A	-5,348 a A	-4,226 a
Média da profundidade	4,622 A'		6,897 B'		-

Médias seguidas da mesma letra minúscula na coluna não diferem pelo teste de Tukey ($p < 0,05$). Médias seguidas da mesma letra maiúscula na linha e para cada profundidade não diferem pelo teste de Tukey ($p < 0,05$). Médias seguidas da mesma letra maiúscula (com apóstrofo) na linha não diferem pelo teste de Tukey ($p < 0,05$).

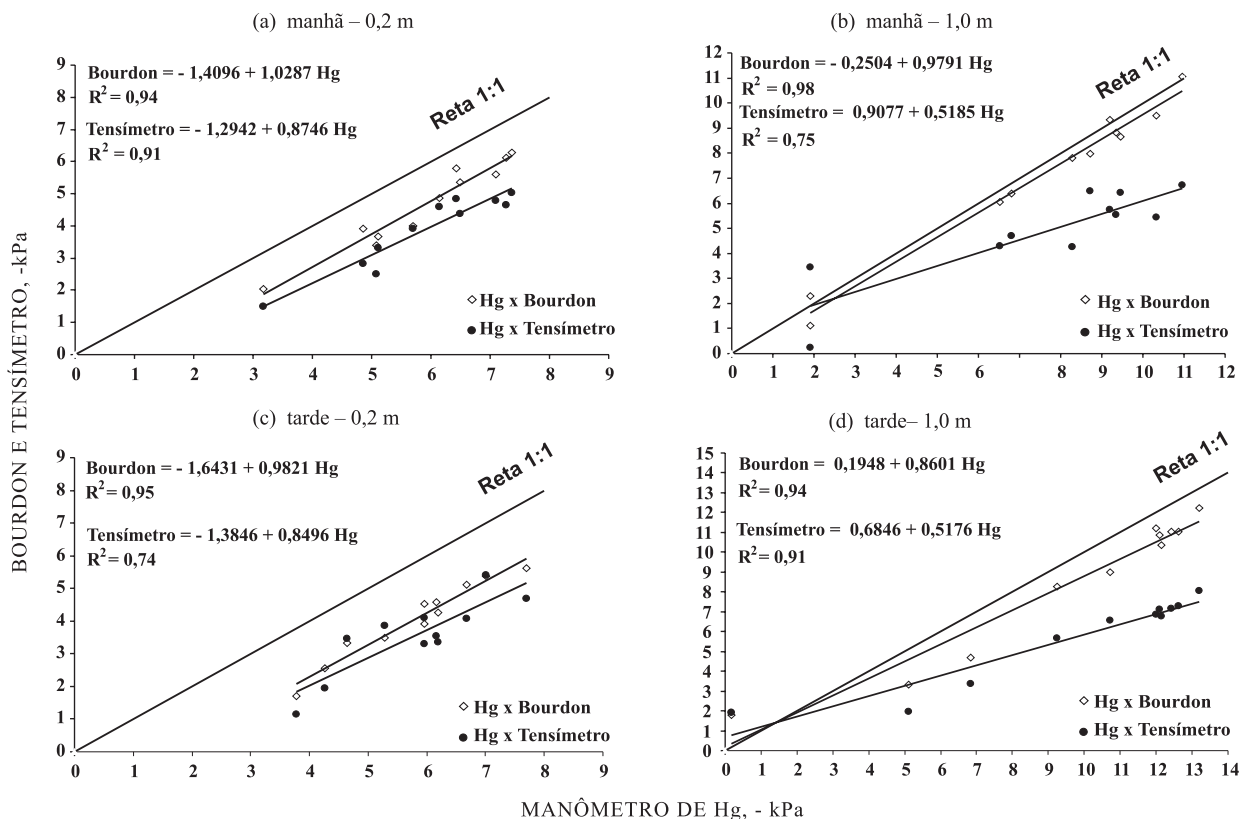


Figura 3. Relação entre o potencial mátrico medido pelo manômetro de mercúrio, vacuômetro de Bourdon e tensímetro digital a 0,2 m (a) e 1,0 m (b) pela manhã, e a 0,2 m (c) e 1,0 m (d) à tarde.

como o secamento/umedecimento do solo e a variação da temperatura.

Os índices estatísticos (Quadro 2), calculados por modelos que não exigem distribuição normal de probabilidade para os resultados das medições (técnicas robustas, exceção para o índice d de Willmott que não se enquadra nessa classificação), foram utilizados para evidenciar o comportamento dos instrumentos quanto a uma condição ideal, complementando a análise paramétrica e a regressão. Pelo modelo aplicado, uma perfeita concordância entre os dois pares de instrumentos analisados resultaria em $d = CD = E = 1$ e $E_{max} = E_{Amed} = RQEM = CMR = 0$.

O índice de concordância d , que reflete a precisão dos instrumentos, ou seja, a repetibilidade das medidas, foi mais próximo da unidade em ambas as profundidades para o vacuômetro de Bourdon, principalmente na profundidade de 1,0 m, concordando com a maior aproximação da condição ideal mostrada na figura 3b,d. Nessas condições, pode-se inferir que sucessivas leituras obtidas pelo vacuômetro de Bourdon tendem a distribuir-se em torno da média dos valores medidos. Quanto aos erros máximo (E_{max}) e absoluto médio (E_{Amed}), o vacuômetro de Bourdon também apresentou melhor desempenho que o tensímetro digital, especialmente a 1,0 m de profundidade. Para a profundidade de 0,2 m, o coeficiente de determinação (CD) foi semelhante para ambos os instrumentos, indicando comportamentos parecidos quanto à dispersão dos dados em torno das respectivas médias. Entretanto, no período da tarde, a variabilidade foi superior sugerindo efeito da oscilação térmica durante o dia, ao contrário das medidas realizadas pela manhã, quando os instrumentos são submetidos às condições térmicas mais estáveis do período noturno.

Embora não haja diferença significativa para os horários de leitura, sugere-se o período matinal como o mais adequado à leitura dos tensímetros, uma vez que os desvios-padrão foram menores para esse horário. Embora determinadas situações, como a determinação da condutividade hidráulica em campo (Libardi, 2005), possam exigir leituras ao longo do dia, a utilização do manômetro de mercúrio é recomendada, pois a leitura pode ser feita com sensibilidade de 1 mm. Cuidados devem ser tomados quanto à disposição do manômetro no campo em relação à incidência direta dos raios solares. Na determinação da condutividade hidráulica em campo (método do perfil instantâneo), a experiência tem evidenciado que o vacuômetro de Bourdon, com fundo de escala de 20 mm/Hg, não permite estudo detalhado da variação do potencial mátrico ao longo do tempo, notadamente nas primeiras horas de redistribuição, que correspondem às condições de maior conteúdo de água no solo. Uma sugestão à substituição do manômetro de mercúrio é a utilização de tensímetro contendo dois vacuômetros de Bourdon, sendo um com fundo de escala de 2 mm/Hg (variando de 0 a 100 mm/Hg) para maior umidade, e outro com fundo de escala de 20 mm/Hg (variando de 0 a 760 mm/Hg) para situações mais secas.

Os índices $RQEM$ e CMR calculados para o tensímetro digital estão mais distantes da medida realizada no instrumento controle, quando comparado ao Bourdon. Mas é o índice eficiência (E) que aparece como o mais sensível às variações dos instrumentos quanto ao controle, como também à condição ideal. Em comparação ao Bourdon, o valor de eficiência do tensímetro digital está mais distante da unidade, o que demonstra menor eficiência nas duas profundidades. A 1,0 m de profundidade, o Bourdon mostrou-se eficiente a ponto de poder substituir o

Quadro 2. Índices estatísticos para comparação do vacuômetro de Bourdon e tensímetro digital em relação ao manômetro de mercúrio

Medidor	Índices de comparação ⁽¹⁾						
	d	E_{max}	E_{Amed}	CD	$RQEM$	CMR	E
				0,2 m – manhã			
Bourdon	0,98	1,69	1,36	0,54	28,83	-0,27	0,00
Tensímetro	0,93	2,63	2,23	0,62	56,23	-0,53	-1,30
				1,0 m – manhã			
Bourdon	1,00	0,82	0,45	0,96	8,36	-0,06	0,96
Tensímetro	0,96	4,90	3,02	0,96	69,59	-0,57	-0,21
				0,2 m – tarde			
Bourdon	0,96	2,09	1,92	0,30	45,84	-0,43	-1,37
Tensímetro	0,93	3,01	2,48	0,35	69,28	-0,64	-2,59
				1,0 m – tarde			
Bourdon	1,00	2,16	1,28	0,72	18,54	-0,14	0,81
Tensímetro	0,96	5,35	4,39	0,76	81,95	-0,70	-0,59

⁽¹⁾ d : índice de concordância de Willmott; E_{max} : erro máximo; E_{Amed} : erro absoluto médio; CD = coeficiente de determinação; $RQEM$: raiz quadrada do erro médio; CRM : coeficiente de massa residual; E : eficiência.

modelo de referência sem prejuízo na confiabilidade dos dados.

CONCLUSÕES

1. O vacuômetro de Bourdon é mais exato e eficiente que o tensímetro digital e, na ausência do manômetro de mercúrio, com base nestes aspectos, deve ser preferido para a medida do potencial mátrico da água no solo.

2. Sempre que o vacuômetro de Bourdon for instalado sob determinada carga hidráulica, esta deverá ser levada em conta no cálculo do potencial mátrico.

3. O tensímetro digital superestimou os valores de potencial mátrico em comparação aos valores obtidos pelo manômetro de mercúrio e vacuômetro de Bourdon.

AGRADECIMENTO

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), pelo apoio financeiro.

LITERATURA CITADA

- AZOOZ, R.H. & ARSHAD, M.A. Laboratory calibration of pressure transducer-tensiometer system for hydraulic studies. *Canadian J. Soil Sci.*, 74:315-19, 1994.
- BAKKER, G.; van der PLOEG, M.J.; DE ROOIJ, G.H.; HOOGENDAM, C.W.; GOOREN, H. P.A.; HUISKES, C.; KOOPAL, L.K. & KRUIDHOF, H. New polymer tensiometers: Measuring matric pressures down to the wilting point. *Vadose Zone J.*, 6:196-202, 2007.
- BRASIL, R.P.C.; CASARINI, E.; FOLEGATTI, M.V. & VASQUEZ, M.A.N. Avaliação de vacuômetros de Bourdon utilizados em tensiômetros no manejo da irrigação. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA AGRÍCOLA, 32., Goiânia, 2003. Resumos. Goiânia, SBEA, 2003. CD ROM
- BRITO, A.S. Balanço de água em um Latossolo Vermelho cultivado com cana-de-açúcar. Piracicaba, Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, 2007. 82p. (Tese de Mestrado)
- ÇENGEL, Y.A. & BOLES, M.A. *Termodinâmica*. 5.ed. São Paulo, McGraw-Hill, 2006. 740p.
- EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA - EMBRAPA. Sistema brasileiro de classificação de solos. Rio de Janeiro, 1999. 412p.
- FERNANDES, F.C.S. Dinâmica do nitrogênio na cultura do milho (*Zea mays* L.) em cultivo sucessivo com aveia preta (*Avena strigosa*), sob implantação do sistema plantio direto. Piracicaba, Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, 2006. 197p. (Tese de Doutorado)
- LIBARDI, P.L. Determinação da condutância hidráulica e da pressão de borbulhamento de cápsulas porosas para tensiômetros. Piracicaba, Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, 1999. (Nota de Aula)
- LIBARDI, P.L. Dinâmica da água no solo. São Paulo, EDUSP, 2005. 329p.
- MARTHALER, H.P.; VOGELSANGER, W.; RICHARD, F. & WIERENGA, P.J. A pressure transducer for field tensiometers. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 47:624-627, 1983.
- MORAES, N.B.; MEDEIROS, J.F.; LEVIEN, S.L.A. & OLIVEIRA, A.M.S. Avaliação de cápsulas de cerâmica de instrumentos de medida de tensão usados em tensiômetros. *R. Bras. Eng. Agríc. Amb.*, 10:58-63, 2006.
- OR, D. Who invented the tensiometer? *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 65:1-3, 2001.
- REICHARDT, K. A água em sistemas agrícolas. São Paulo, Manole, 1990. 188p.
- SENTELHAS, P.C.; MORAES, S.O.; PIEDADE, S.M.S.; PEREIRA, A.R.; ANGELOCCI, L.R. & MARIN, F.R. Análise comparativa de dados meteorológicos obtidos por estações convencional e automática. *R. Bras. Agrometeorol.*, 5:215-221, 1997.
- ZACHARIAS, S.; HEATWOLE, C.D. & COAKLEY, C.W. Robust quantitative techniques for validating pesticide transport models. *Trans. Am. Soc. Agric. Eng.*, 39:47-54, 1996.