

AVALIAÇÃO DO TENSIOMETRO ELETRÔNICO NO MONITORAMENTO DO POTENCIAL MATRICIAL DE ÁGUA NO SOLO¹

SILVANA L. COELHO², ADUNIAS DOS S. TEIXEIRA³

RESUMO: O presente trabalho apresenta o monitoramento do potencial de água no solo obtido por meio do uso de um tensiômetro eletrônico. Os testes foram conduzidos no Laboratório de Mecânica e Eletrônica do Departamento de Engenharia Agrícola da UFC, tendo sido utilizados nove exemplares de tensiômetro eletrônico e três exemplares de tensiômetro convencional de mercúrio. Durante o período de um mês, os dados foram armazenados a uma frequência de 2 Hz, sendo possível obter detalhes quanto ao monitoramento do potencial da água do solo, o efeito das flutuações de temperatura nas leituras do tensiômetro e a realização de testes de tempo de resposta e de sensibilidade. O efeito das flutuações de temperatura acentuou-se à medida que o potencial matricial diminuiu, sendo o uso de sensores de temperatura em transdutores de pressão de fundamental importância para corrigir o erro de leitura, principalmente para leituras coletadas em horário em que ocorrem as maiores temperaturas do dia. O tempo de resposta do equipamento aumenta à medida que o potencial matricial diminui. Os dispositivos testados apresentaram sensibilidades, em média, de 42,833 mV (kPa)⁻¹ e precisão média de 0,02334 kPa ou 0,2380 cm c H₂O.

PALAVRAS-CHAVE: sensor de pressão, tempo de resposta, sensibilidade.

EVALUTATION OF AN ELECTRONIC TENSIO METER IN THE MONITORING OF THE SOIL WATER MATRIX POTENTIAL

SUMMARY: This paper presents the monitoring of the soil matrix potential using the electronic tensiometer. The trials were conducted at the Mechanics and Electronics Lab of the Department of Agricultural Engineering of the Federal University of Ceara. Nine samples of electronic tensiometers and three conventional mercury tensiometers were tested for a month period of data gathered at a 2 Hz frequency. The monitoring made it possible to produce insights on the soil drying process, on the effect of temperature fluctuation on the readings, and it was possible to evaluate the response time and sensitivity of the electronic tensiometer. It was found that the temperature effect on the readings increases as the matrix potential decreases, thus it is essential to install temperature sensors on the electronic tensiometers in order to remove the errors induced by temperature variation especially if the sensors are to be used at the peak hours. The response time increases as the matrix potential decreases and the tensiometers tested presented average sensitivity of 42.833 mV(kPa)⁻¹, and precision of 0.02334 kPa or 0.2380 cm c H₂O.

KEYWORDS: pressure sensor, response time, sensitivity.

¹ Pesquisa conduzida com recursos do CNPq/CTHIDRO e FUNCAP.

² Eng^a Agrônoma, Mestre em Irrigação e Drenagem, UFC, Fortaleza - CE, Fone: (0XX85) 217.1147, e-mail coelhosl@yahoo.com.br

³ Prof. Adjunto, Ph.D., Departamento de Engenharia Agrícola, UFC, Caixa Postal 12.168, Fortaleza - CE, Fone: (0XX85) 288.9760, e-mail: adunias@ufc.br

Recebido pelo Conselho Editorial em: 17-9-2003

Aprovado pelo Conselho Editorial em: 8-6-2004

INTRODUÇÃO

Instrumento desenvolvido em 1922, por Gardner e colaboradores, o tensiômetro fornece de forma direta o potencial ou a tensão de água no solo e de forma indireta a umidade. O tensiômetro utilizado por RICHARDS & NEAL (1936) era composto, basicamente, por uma membrana porosa, a qual consiste na parte sensível do equipamento, e de um medidor de pressão capaz de medir a energia com que a água é retida no solo, conectados por uma tubulação em um sistema vedado para a atmosfera.

O princípio de funcionamento do tensiômetro baseia-se na formação do equilíbrio entre a solução do solo e a água contida no interior do aparelho. O equilíbrio ocorre quando a cápsula porosa entra em contato com o solo e a água do tensiômetro entra em contato com a água do solo. Caso a água do solo esteja sob tensão, ela exerce uma sucção sobre o instrumento, retirando água deste, fazendo com que a pressão interna diminua. Como o instrumento é vedado, ocorre a formação do vácuo; a leitura dessa pressão negativa fornece o potencial matricial da água no solo.

O tensiômetro de leitura automática vem sendo utilizado já há algum tempo, tendo como destaque o tensiômetro (MARTHALER et al., 1983) e o tensiômetro com transdutor (THIEL et al., 1963; HUBBELL & SISSON, 1998). Porém, os tensiômetros de leitura e gravação automática possuem elevado custo, e o seu uso ainda não está difundido no Brasil, com algumas aplicações restritas à pesquisa.

TEIXEIRA & COELHO (2003) desenvolveram e calibraram um tensiômetro de leitura automática o qual denominaram de “tensiômetro eletrônico” e, durante o período de um mês, coletaram dados que foram utilizados para gerar equações de calibração do tipo $C = offset + b\Psi_m$, em que C é a resposta do sensor em contadores digitais (counts) convertidos em 12 bits (resultando em valores de 0 a 4095) e Ψ_m o valor de potencial matricial fornecido pelo tensiômetro de mercúrio. Os valores máximo e mínimo obtidos pelos autores para “offset” foram de 348,572 e 261,026, respectivamente, e de coeficiente angular de 3,597 e 3,376, respectivamente. Os resultados obtidos para o ajuste de regressão linear simples indicaram a existência de regressão a menos de 0,1% de significância e coeficientes de correlação nunca inferiores a 0,9994.

Segundo KLUTE & PETERS (1962), o uso de transdutores de pressão resulta no aumento da velocidade de resposta do tensiômetro. Para KLUTE & GARDNER (1962), o tempo de resposta do tensiômetro é limitado pelo volume de água que passa através dos poros da cápsula, sendo registrado após uma mudança lenta de pressão de água dentro do tensiômetro. Esses autores concluíram que maior será o tempo para o equipamento atingir o equilíbrio, quanto mais negativo for o potencial de água no solo. TOWNER (1982) ressalta que a gravação automática da leitura torna o equipamento mais eficiente, porém o tempo de resposta é influenciado pela hidráulica do tensiômetro em si, ou seja, é dependente do tempo necessário para que a pressão dentro do tensiômetro entre em equilíbrio com a pressão do transdutor.

Mudanças de pressão registradas por transdutores devido a pequenas flutuações de temperatura, segundo WATSON & JACKSON (1967), podem ser ocasionadas por dois fatores dependentes da temperatura, porém de sinais opostos. O primeiro efeito é causado pelo aumento do volume físico do tensiômetro devido à expansão das paredes do tubo, que ocasiona diminuição da pressão interna relativa à pressão atmosférica. O outro fator citado pelos autores estaria relacionado ao aumento da temperatura da água, resultando na expansão do fluido, aumento na carga hidráulica e conseqüente aumento da pressão relativa à atmosférica. O trabalho desenvolvido pelos autores teve como objetivo modificar a estrutura física do tensiômetro a fim de reduzir o efeito do primeiro fator. Já AZOOZ & ARSHAD (1994), em trabalhos realizados com tensiômetros/transdutor e tensiômetro de Bourdon, concluíram que, à medida que a temperatura aumenta, ocorre um declínio gradual nas leituras de

ambos os aparelhos. Assim, pode-se concluir, dos trabalhos anteriormente citados, que é de fundamental importância a existência de um sensor de temperatura associado ao medidor de tensão.

O presente trabalho teve como objetivo avaliar o tensiômetro eletrônico desenvolvido por TEIXEIRA & COELHO (2003) no monitoramento do potencial de água no solo, o efeito das flutuações de temperatura na resposta do equipamento, o tempo de resposta e a sensibilidade do equipamento.

MATERIAL E MÉTODOS

Esquema de instalação dos tensiômetros

Os ensaios do tensiômetro eletrônico foram conduzidos no Laboratório de Mecânica e Eletrônica do Departamento de Engenharia Agrícola da UFC. A bancada de ensaios constou de um conjunto de três caixas plásticas medindo 0,34 m x 0,53 m x 0,30 m, fechadas nas laterais e com a face inferior perfurada para permitir a drenagem do solo. Essas caixas receberam a denominação de caixas-teste.

O solo utilizado no preenchimento das caixas-teste é de textura franco-arenosa, com 5% de areia grossa, 61% de areia fina, 24% de silte e 10% de argila. O solo coletado foi seco ao ar, destorroado e peneirado em malha de 2 mm de diâmetro. As caixas foram preenchidas, primeiramente, com uma camada de brita e areia grossa de diâmetro superior a 2 mm e densidade $1,3 \text{ g cm}^{-3}$. No topo da areia, foram depositadas camadas de solo de forma a manter-se uma densidade do solo de aproximadamente $1,4 \text{ g cm}^{-3}$ (Figura 1a).

Após alguns dias de preenchimento das caixas, o solo foi saturado com aproximadamente 20 L de água aplicados uniformemente. Após a drenagem do excesso de água, os tensiômetros foram instalados a uma profundidade de 10 cm. Quatro tensiômetros foram instalados por caixa, sendo um de mercúrio e três eletrônicos. No total, foram utilizadas três caixas com três tensiômetros de mercúrio e nove sensores. A distribuição dos tensiômetros nas caixas foi feita de forma aleatória (Figura 1b).

Após a instalação do tensiômetro, foi efetuada a fluxagem, que, para o tensiômetro de mercúrio, consiste na substituição do ar no interior do microtubo por água destilada, utilizando-se de uma seringa de 50 mL. Já no tensiômetro eletrônico, o microtubo que interliga o sensor à cápsula foi preenchido com água destilada com a ajuda de uma seringa de 10 mL, com agulha presa a um tubo capilar. O tubo capilar foi inserido através do microtubo até o sensor de pressão, e a seringa pressionada para que a água destilada contida no interior da mesma preenchesse o microtubo de baixo para cima. Em seguida, o tubo de PVC foi preenchido com água destilada e o dispositivo contendo os sensores, preso ao topo do tubo de PVC.

Sistema de aquisição de dados

O sistema de aquisição de dados constituiu-se, basicamente, de um conversor analógico/digital de 12 bits, um microcontrolador e um microcomputador projetado conforme TEIXEIRA & COELHO (2003). Dez canais foram utilizados para receber os dados enviados pelos sensores com a caixa-teste A, recebendo os canais 0; 5 e 8, e o canal 1 para leitura do sensor de temperatura; a caixa-teste B, os canais 2; 6 e 10; a caixa-teste C, os canais 3; 7 e 9 (Figura 1 b).

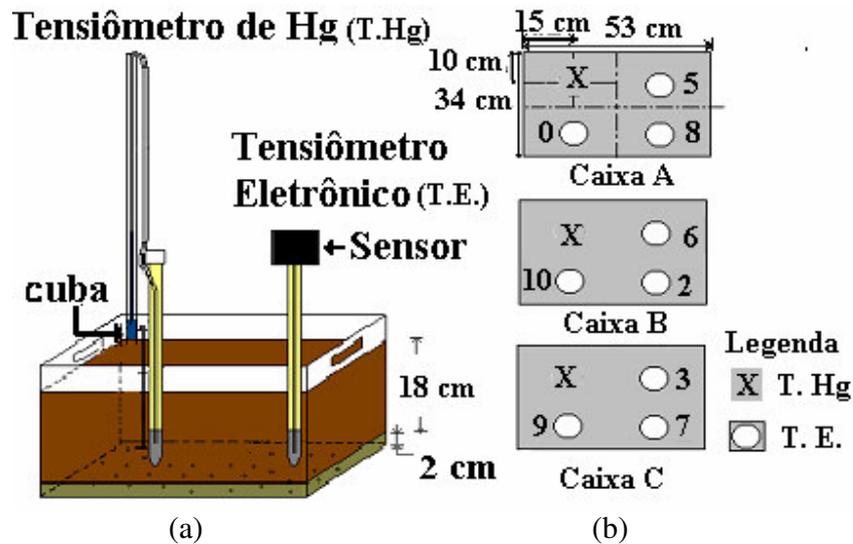


FIGURA 1. Esquema da disposição do solo na caixa (a) e disposição dos sensores na caixa-teste (b).

Tempo de resposta

O experimento de resposta dinâmica dos equipamentos teve o objetivo de determinar o tempo necessário para o tensiômetro eletrônico registrar a tensão atual da água no solo, isto é, o tempo necessário para que o equilíbrio hidrostático fosse estabelecido e o tensiômetro retornasse à condição anterior ao teste, sendo avaliados três tensiômetros.

No início dos testes, foram tomadas leituras dos tensiômetros eletrônicos e do tensiômetro de mercúrio, em seguida os tensiômetros eletrônicos foram desinstalados e fluxados. O sistema de aquisição de dados foi mantido ligado durante todo o decorrer do teste. Um programa em linguagem C foi desenvolvido para a agregação dos dados em dez segundos.

Concluídos os trabalhos nos tensiômetros eletrônicos, o teste foi realizado no tensiômetro de mercúrio. Para isso, o tensiômetro foi fluxado e as leituras efetuadas a cada variação de 1 cm de mercúrio até que a coluna atingisse 50 cm, para então fazerem as leituras em intervalos de 30 min a 1 h até que a leitura se aproximasse do valor tomado no início do teste.

Um segundo teste foi realizado visando a determinar a resposta a uma ruptura instantânea do selo de vácuo no tensiômetro eletrônico, isto é, para verificar a resposta dinâmica do sensor. Nesse teste, foi instalada uma válvula no tensiômetro (Figura 2) que permitiu a entrada de ar no sistema, mantendo-o sob pressão atmosférica durante um período de 30 segundos, após o qual a válvula foi fechada, tempo necessário para que o equilíbrio fosse restabelecido.



FIGURA 2. Mecanismo para avaliação da resposta do tensiômetro eletrônico a uma ruptura instantânea do vácuo.

Sensibilidade

O teste de sensibilidade visa a determinar a razão entre a variação de leituras do sensor e a variação observada no potencial matricial lido pelo tensiômetro de mercúrio em diversas faixas de tensão, conforme a relação a seguir:

$$S = \frac{\Delta C}{\Delta \Psi} \quad (1)$$

em que,

S - sensibilidade, em número de contadores (counts) por kPa;

ΔC - faixa de variação nas leituras no tensiômetro eletrônico, counts, e

$\Delta \Psi$ - faixa de variação nos valores de potencial matricial obtido pelo tensiômetro de mercúrio, kPa.

Os testes foram realizados com o tensiômetro nas seguintes faixas de potenciais: -0,142 a -10 kPa; -10 a -20 kPa; -20 a -30 kPa; -30 a -40 kPa; -40 a -50 kPa; -50 a -60 kPa; -60 a -70 kPa, e de -70 a -82,546 kPa. O valor representativo da faixa foi obtido pela média de todos os valores de leitura na faixa, tanto para o tensiômetro de mercúrio quanto para o tensiômetro eletrônico.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Monitoramento do potencial matricial

Para o desenvolvimento do trabalho, os solos das caixas-teste foram submetidos a um excesso de irrigação, encontrando-se, a princípio, saturados. Na Figura 3, apresenta-se o monitoramento do potencial matricial com valores gerados pelos sensores dos tensiômetros eletrônicos 0; 2 e 3, durante o ciclo de secamento observado entre as datas de 26-9-2002 e 28-10-2002, perfazendo um total de 42.700 pontos por sensor.

Observa-se que, seguindo o início da dessaturação, levando-se em consideração que o solo utilizado é um franco-arenoso, o solo entra em capacidade de campo, que teoricamente ocorre quando o potencial matricial atingir o valor de aproximadamente 10 kPa, sendo este o instante definido como o momento em que o excesso de água é drenado e o solo tende a perder água mais lentamente. O ponto identificado pela letra “a”, na Figura 3, indica o momento no qual se pode observar o ponto de inflexão da curva, indicando o valor da capacidade de campo.

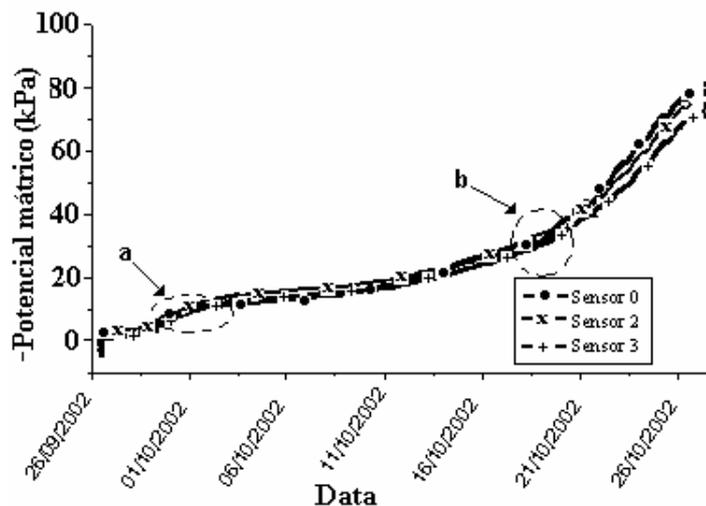


FIGURA 3. Monitoramento do potencial matricial para os tensiômetros eletrônicos 0; 2 e 3 pertencentes às caixas-teste A, B e C, respectivamente.

Ocorreram quatro falhas durante o monitoramento dos sensores aproximadamente entre as datas de 28-9-2002 às 16,30 h e 29-9-2002 às 8,16 h; 20-10-2002 às 9,25 h e às 17,38 h; 21-10-2002 às 9,45 h e às 17,52 h, e 26-10-2002 às 16,86 h e 27-10-2002 às 9,92 h. Tais falhas foram ocasionadas pela ausência de dados devido à queda da energia elétrica na rede. Foi observada ligeira diminuição dos valores de potenciais do sensor 0, ocasionada pela fluxagem de mercúrio na referida caixa, ocasionando elevação da umidade do solo e, conseqüentemente, o aumento do potencial mátrico.

Efeito das flutuações de temperatura

Flutuações da temperatura podem explicar as pequenas oscilações observadas nas curvas que descrevem o monitoramento do potencial na Figura 3. Os valores de potenciais (em counts) e de temperatura, observados entre as datas de 30-9 a 10-10-2002, encontram-se evidenciados na Figura 4, para o sensor 10, em que é possível verificar que, para baixos valores de potenciais, entre -55 e -65 kPa, sendo as leituras feitas ao meio dia, o tensiômetro eletrônico apresenta erro de leitura de aproximadamente 1,5 kPa, o que equivale a 15,29 cm c H₂O ou 1,1 cm c Hg. Esse valor foi obtido traçando-se uma linha que simula a continuidade da curva de potenciais para 24-10-2002 (Figura 5).

O mesmo procedimento foi realizado para verificar o comportamento do tensiômetro eletrônico 10, quanto ao erro devido às flutuações diurnas de temperatura, para potenciais variando entre -6 e -11 kPa, em dados coletados na data de 30-9-2002 (Figura 6). Observou-se erro de leituras, se tomadas ao meio-dia, de aproximadamente 0,5 kPa o equivalente a 5,09 cm c H₂O ou 0,375 cm c Hg. Assim, o efeito da temperatura é maior para menores potenciais. Pode-se afirmar, ainda, que os potenciais tendem a aumentar nas horas de maior temperatura, particularmente em torno do meio-dia, confirmando as teorias de WATSON & JACKSON (1967). Também são confirmadas as recomendações tradicionais de fazer as leituras dos tensiômetros nas primeiras horas do dia. Ainda é possível observar que os valores de potenciais estão melhor linearizados nos horários noturnos, podendo assim ser indicados os horários próximos do final do dia para fazer as leituras manuais. Leituras em horários, tais como, ao meio-dia, podem resultar em erros na estimativa do potencial matricial, sendo os valores de potenciais superestimados. Os dados também corroboram as observações de AZOOZ & ARSHARD (1994), que observaram um declínio das leituras em ambos os aparelhos com o aumento da temperatura em tensiômetros com transdutor e com manômetro de Bourdon.

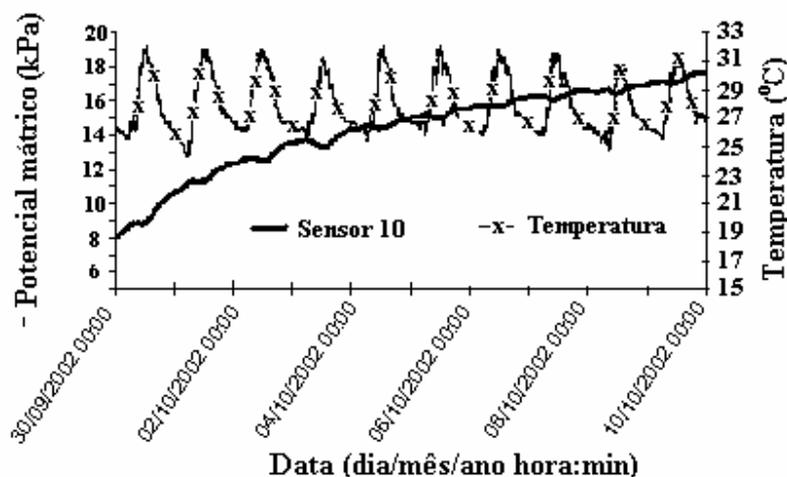


FIGURA 4. Potencial matricial e temperatura para o tensiômetro eletrônico 10, tomados de 30-9 a 10-10.

Testes de tempo de resposta

Os tempos de resposta foram obtidos para os tensiômetros eletrônicos pertencentes à caixa-teste B (sensores 2; 6 e 10), assim como para o tensiômetro de mercúrio pertencente a essa mesma caixa-teste. Tais resultados podem ser observados na Tabela 1 e Figura 7, juntamente com os valores de potenciais em kPa observados no início e final do teste, assim como os valores de condutância das respectivas cápsulas. Os dados permitem identificar o valor de 8,89 h para o tensiômetro eletrônico retornar à leitura anterior à fluxagem.

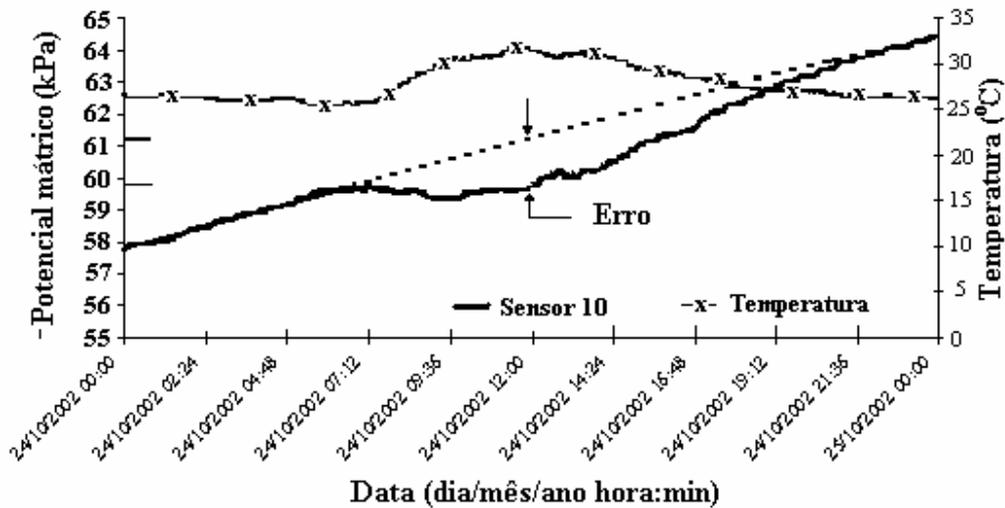


FIGURA 5. Potencial matricial e temperatura para o tensiômetro eletrônico 10, tomados de 24-10 a 25-10.

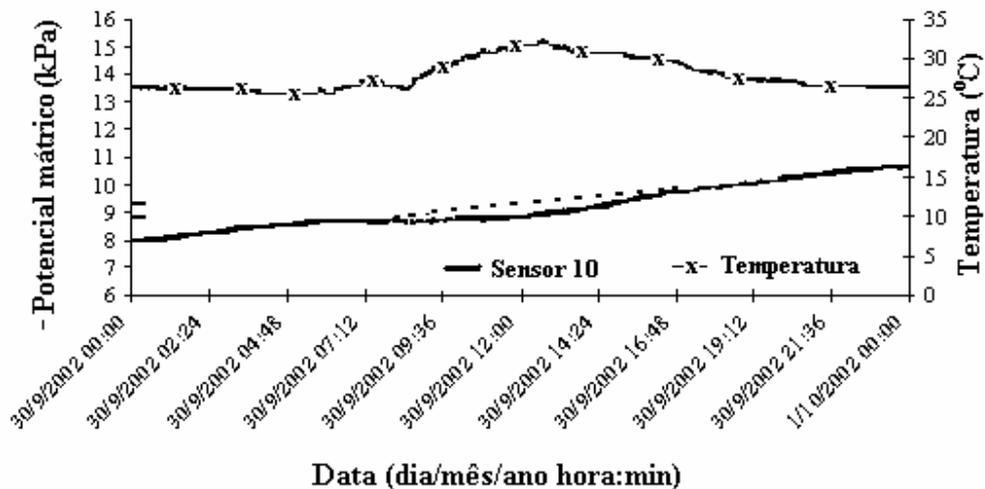


FIGURA 6. Potencial matricial e temperatura para o tensiômetro eletrônico 10, tomados de 30-9 a 1º-10.

As diferenças observadas na Figura 7 devem-se à variabilidade espacial das características físicas do solo e de sua umidade, e sobretudo às diferenças quanto à condutância da cápsula específica. Havendo relação inversamente proporcional entre tempo de resposta e condutância da cápsula, ocorre resposta mais rápida do tensiômetro de mercúrio, seguida pelo tensiômetro eletrônico 2. Diferenças quanto ao tempo de resposta do sensor de pressão em si, o MPX5100, são desprezíveis segundo ALDRET et al. (2002), que encontraram tempo de resposta à aplicação de 100 kPa na ordem de 5,68 ms.

TABELA 1. Dados referentes ao teste de tempo de resposta para os tensiômetros pertencentes à caixa-teste B.

Tensiômetro	Tensão Inicial (kPa)	Tensão Final (kPa)	Porcentagem de Retorno	Tempo de Resposta (h)	Condutância da Cápsula ($\text{cm}^2 \text{s}^{-1}$), 1 atm
2	85,90	85,22	99,2	8,89	0,002527
6	86,30	84,35	97,7	8,89	0,002111
10	86,36	81,39	94,2	8,89	0,002238
Mercúrio	81,46	82,08	100,8	7,92	0,002889

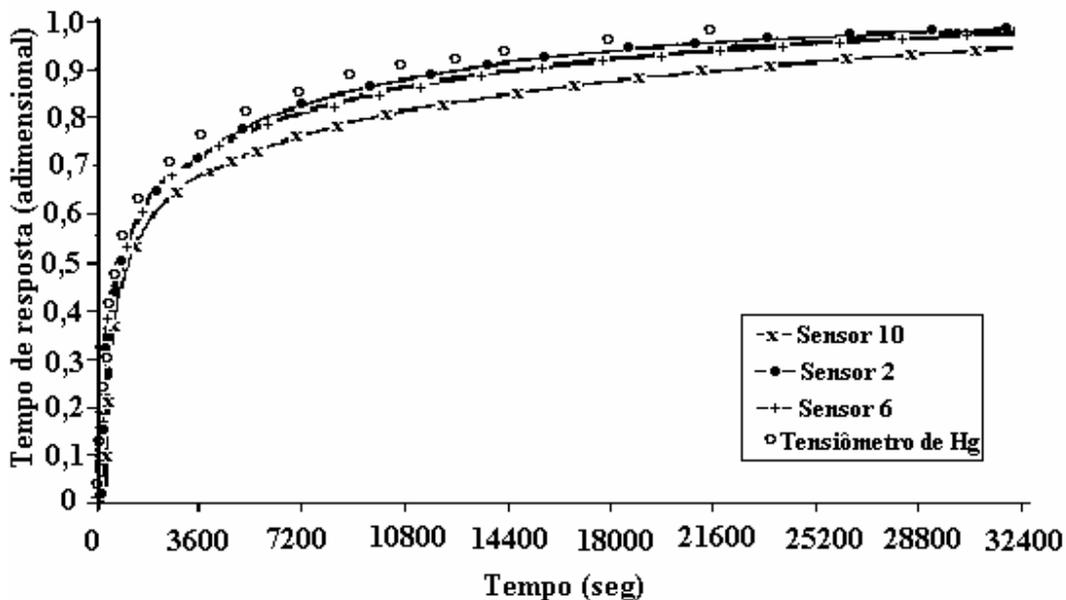


FIGURA 7. Resposta do tensiômetro eletrônico e tensiômetro de Hg após a fluxagem.

O teste da resposta dinâmica, aplicado ao tensiômetro eletrônico 10, quando esse se encontrava sob potencial de -22 kPa, indicou uma resposta de aproximadamente 1,5 h a uma quebra no selo de vácuo de 30 segundos. Na Figura 8, é possível observar que o tempo para o retorno ao potencial matricial inicial cresce a taxas decrescentes, podendo ser observado, por meio da ampliação na Figura 8, o momento em que o equipamento esteve sob pressão atmosférica e a rápida resposta após o fechamento da válvula-teste.

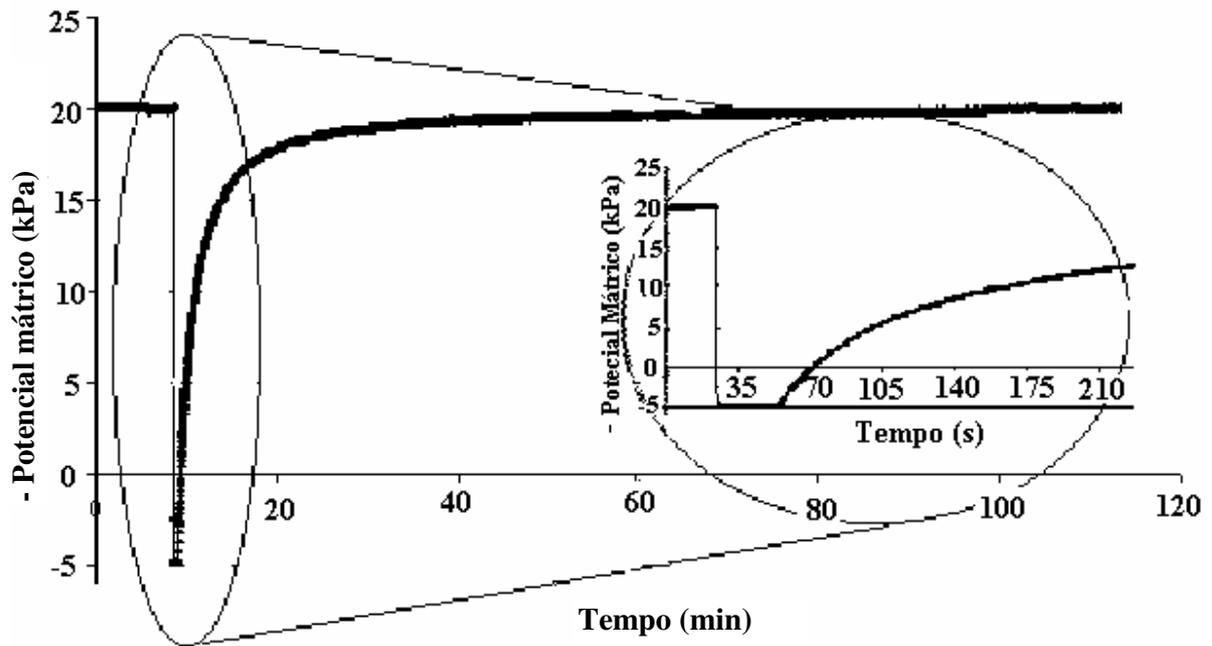


FIGURA 8. Resposta do sensor 10 com ampliação mostrando o momento da quebra do vácuo.

Teste de sensibilidade

Na Tabela 2, são apresentados os valores de sensibilidade para os tensiômetros 2; 6 e 10, em que se observa a pequena variação entre valores de sensibilidade nos três tensiômetros eletrônicos para intervalos de potenciais. LONG (1981), utilizando um transdutor acoplado ao tensiômetro, o LX1804GBZ fabricado pela National Semiconductor Corporation, obteve sensibilidade de $4,89 \text{ mV} \cdot (\text{cm c H}_2\text{O})^{-1}$, ou seja, aproximadamente $50 \text{ mV} \cdot (\text{kPa})^{-1}$. Observa-se, portanto, que os valores médios obtidos pelos tensiômetros eletrônicos 2; 6 e 10 de 42,182; 42,481 e 43,787 $\text{mV} \cdot (\text{kPa})^{-1}$, respectivamente, estão bem próximos dos valores citados por LONG (1981), sendo possível chegar-se a valores de precisão do equipamento de 0,02338 (0,2385); 0,02348 (0,2394) e 0,02317 (0,2362) kPa (cm c H₂O), respectivamente para os tensiômetros eletrônicos 2; 6 e 10.

TABELA 2. Sensibilidade em $\text{mV} \cdot (\text{kPa})^{-1}$ para o tensiômetro eletrônico.

Intervalo entre Potenciais (kPa)	Tensiômetro Eletrônico		
	2	6	10
-0,142 a -10	38,227	40,156	40,647
-10 a -20	42,756	42,544	42,937
-20 a -30	45,701	46,414	45,559
-30 a -40	43,259	42,905	44,340
-40 a -50	40,858	40,347	41,852
-50 a -60	42,005	40,717	42,246
-60 a -70	41,640	41,247	41,060
-70 a -82,546	43,010	42,801	43,653
Média	42,182	42,141	42,787

CONCLUSÕES

O desenvolvimento de um dispositivo de leitura automática tornou possível a obtenção de valores de potenciais em alta frequência, permitindo a evolução detalhada do comportamento do processo de secamento do solo, bem como a avaliação do efeito de flutuações diurnas de temperatura na leitura do potencial matricial.

Erros nas leituras, decorrentes das flutuações diurnas de temperatura, tendem a ser mais evidentes à medida que o potencial matricial diminui, isto é, que o solo seca. Assim, sensores de temperatura em transdutores de pressão são de fundamental importância para evitar erros, principalmente para leituras coletadas em horário de maiores temperaturas.

O tempo de resposta do equipamento tende a aumentar à medida que o potencial matricial diminui. Quanto à sensibilidade dos tensiômetros eletrônicos, pôde-se concluir que não houve tendência de aumento ou diminuição com o decréscimo do potencial e que os dispositivos apresentaram sensibilidades em média de $42,833 \text{ mV (kPa)}^{-1}$ e precisão de $0,02334 \text{ kPa}$ ou $0,2380 \text{ cm c H}_2\text{O}$.

REFERÊNCIAS

- ALDRET, H.E.; SANDOVAL, F.; SANTANA, J. Medidor de presión digital (3 ½). In: CONGRESO NACIONAL DE INSTRUMENTACION, Disponível em: <<http://www.cucei.udg.mx/eventos/somi/memorias/electron/Ele-0-1.pdf>>. Acesso em: 1^o nov. 2002.
- AZOOZ, R.H.; ARSHAD, M.A. Laboratory calibration of pressure transducer-tensiometer system for hydraulic studies. *Canadian Journal Soil Science*, Ottawa, v.74, n.3, p.315-19, 1994.
- HUBBELL, J.M.; SISSON, J.B. Advanced tensiometer for shallow or deep soil water potential measurements. *Soil Science*, Baltimore, v.163, n.4, p.271-7, 1998.
- KLUTE, A.; GARDNER, W.R. Tensiometer response time. *Soil Science*, Baltimore, v.93, n.1, p.204-7, 1962.
- KLUTE, A.; PETERS, D.B. A recording tensiometer with a short response time. *Soil Science Society of American Proceedings*, Madison, v.26, n.1, p.87-8, 1962.
- LONG, F.L.A. New solid-state device for reading tensiometers. *Soil Science*, Baltimore, v.133, n.2, p.131-2, 1981.
- MARTHALER, H.P.; VOGERSANGER, W.; RICHARD, F.; WIERENGA, P.J. A pressure transducer for field tensiometers. *Soil Science Society of American Journal*, Madison, v.47, n.4, p.624-7, 1983.
- RICHARDS, L.A.; NEAL, O.R. Some field observations with tensiometers. *Soil Science Society of American Proceedings*, Madison, v.1, p.71-91, 1936.
- TEIXEIRA, A.S.; COELHO S.L. Desenvolvimento e calibração de um tensiômetro eletrônico de leitura automática. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA AGRÍCOLA, 32., 2003, Goiânia. *Anais...* Jaboticabal: Sociedade Brasileira de Engenharia Agrícola, 2003. 1 CD ROM.
- THIEL, T.J. Electrical water pressure transducers for field and laboratory use. *Soil Science Society of American Journal*, Madison, v.27, n.5, p.601-2, 1963.
- TOWNER, G.D. A method for improving cheaply the time response of a pressure-transducer tensiometer system. *Agricultural Water Management*, Amsterdam, v.5, n.4, p.285-93, 1982.
- WATSON, K.K.; JACKSON, R.D. Temperature effects in a tensiometer-pressure transducer system. *Soil Science Society of American Proceedings*, Madison, v.31, p.156-60, 1967.