

## DETERMINAÇÃO DA TENSÃO DE ÁGUA EM SOLO AGRÍCOLA USANDO UM SENSOR DE DISSIPACÃO DE CALOR<sup>1</sup>

CARLOS ALBERTO DA SILVA OLIVEIRA<sup>2</sup>

**RESUMO** - Um estudo foi realizado sob condições de laboratório e de campo objetivando avaliar um sensor de solo utilizado para determinação da temperatura e da tensão da água no solo. Devido à solubilidade do gesso, material poroso utilizado na fabricação dos sensores, houve redução em área da seção transversal e volume, e aumento da porosidade efetiva desses sensores, em relação aos valores observados antes do início dos testes. Os valores médios da temperatura observados com os sensores foram praticamente iguais aos observados com um termômetro de referência com precisão de 0,1°C. Quando sensores saturados foram instalados a 5 cm de profundidade em um solo franco-argilo-siltoso secado ao ar, em relação a valores de Delta T, o tempo de resposta do sensor à secagem foi um pouco superior a 24 horas. Valores de Delta T observados, tanto no laboratório quanto no campo, apresentaram maior variabilidade na faixa representativa de solo seco, em comparação com o solo úmido. Sob condições de campo, não houve diferença estatística (teste F; 5%) entre as médias de Delta T obtidas com os sensores de dissipação de calor instalados a 10 cm de profundidade e as médias de tensão obtidas com tensiômetros e transformadas para Delta T.

Termos para indexação: umidade do solo, potencial matricial, temperatura do solo.

### SOIL WATER EVALUATION IN AGRICULTURAL SOIL USING A HEAT DISSIPATION SENSOR

**ABSTRACT** - A study was carried out under laboratory and field conditions to evaluate a type of soil sensor used to measure temperature and soil water matric potential. Due to gypsum solubility, porous media used to make the sensor, there was cross sectional area and volume decrease and sensor effective porosity increase in comparison with values obtained prior to the tests. Temperature average values obtained with the sensor were similar to the ones obtained with a reference thermometer having 0.1°C accuracy. Regarding to Delta T values, sensor response time was a little higher than 24 hours when saturated sensors were installed 5 cm deep inside an air dry silty clay loam. Under lab and field conditions observed, Delta T values had increased variability for the dry soil region in comparison with the wet soil region. There was no statistical difference (test F; 5%) between Delta T averages, obtained under field conditions with the heat dissipation sensor installed at 10 cm of depth, and soil water tension averages provided by the tensiometer and transformed to Delta T.

Index terms: soil water content, matric potential, soil temperature.

### INTRODUÇÃO

A determinação do potencial matricial da água ou tensão da água no solo proporciona um meio de indicar quando irrigar e quanto de água aplicar ao solo (Cary & Fisher, 1983) e para determinar o fluxo

de água no solo e a sua disponibilidade para as plantas (Reece, 1996). Blocos que medem a resistência à passagem da corrente elétrica entre dois eletrodos imersos em gesso estão entre os tipos de sensores utilizados para esta medida indireta da umidade do solo. Entretanto, problemas de salinidade do solo, que afetam a condutividade elétrica, e o fato de o gesso se dissolver formando uma matriz instável para o sensor, foram considerados como desvantagens desse tipo de medição (Phene et al., 1971). DeJager

<sup>1</sup> Aceito para publicação em 27 de novembro de 1998.

<sup>2</sup> Eng. Agr., Ph.D., Embrapa-Centro Nacional de Pesquisa de Hortaliças (CNPB), Caixa Postal 218, CEP 70359-970 Brasília, DF. E-mail: caso@cnpb.embrapa.br

& Charles-Edward (1969) demonstraram que o princípio de dissipação ou transporte de calor em um meio poroso pode ser usado como um índice da quantidade de água presente no solo. Assim, quando o teor de água é estimado pelo suprimento de um pulso de calor centrado dentro de um bloco de material poroso e pelo correspondente aumento de temperatura ( $\Delta T = \text{temperatura final} - \text{temperatura inicial}$ ) naquele ponto, as desvantagens do bloco de gesso convencional são reduzidas (Phene et al., 1971). Forçando-se o pulso de calor a ficar inteiramente confinado ao meio poroso do sensor, e observando-se o tempo necessário para equilíbrio entre o potencial matricial da água do sensor e do solo, tal potencial poderá ser avaliado independentemente do tipo de solo. Para fins de automação e manejo adequado da irrigação Phene et al. (1973) empregaram um sensor de temperatura (diodo) e um circuito fonte de calor para estabelecer curvas de calibração entre o potencial matricial e a diferença de voltagem. Rawlins (1976) indicou que os sensores podem ser semelhantes aos tensiômetros em termos de precisão.

O potencial matricial da água em um corpo poroso é dependente da temperatura e da textura do material (Phene et al., 1971) e diminui aproximadamente de 0,8 kPa por °C de aumento na temperatura, para tensões entre 0 e 50 kPa e temperaturas entre 0 e 50°C (Gardner, 1955). Entretanto, tais erros podem ser contornados efetuando-se as medições em horários onde a temperatura do solo sofre menor variação e/ou utilizando um meio poroso com textura menos suscetível a esta variação. Por outro lado, é importante ter em mente que a precisão de valores médios de umidade em solos agrícolas é fortemente influenciada por fatores tais como: variabilidade espacial do solo e a uniformidade de irrigação ou chuvas, que afetam essas médias e exigem cautela e bom-senso quando interpretados.

O método que leva em conta a dissipação do calor num meio poroso, além de seu uso em pesquisa, apresenta o potencial para aplicações em campo (Skaggs, 1981). Entre as principais vantagens desse método pode-se citar: construção relativamente fácil e custo moderado; portabilidade; leitura adicional da temperatura do solo; leitura independente do teor de sais na solução; e o fato de os sensores poderem ser usados por longo período de tempo sem

necessidades de recalibração ou manutenção periódica, como acontece com os tensiômetros. Um breve histórico sobre sensores de dissipação de calor pode ser encontrado em Fredlund (1992).

Um sensor de dissipação de calor para medida do potencial matricial da água do solo foi estudado por Reece (1996) e difere do proposto por Phene et al. (1971). O sensor, imerso em um bloco de gesso de 28 mm de comprimento e 14 mm de diâmetro, permite passar uma corrente elétrica por um fio de aquecimento (fonte linear de calor com resistência de 32 W) e o aumento de temperatura com o tempo (10 a 60 s) é medido com um par termoeletrico, possibilitando estimar o potencial matricial com o auxílio de uma curva de calibração.

Curvas de calibração de sensores que usam o princípio de dissipação em um meio poroso têm, tradicionalmente, sido feitas com o auxílio de uma relação entre o aumento de temperatura do sensor ( $\Delta T$ ) e a tensão de água no solo (Phene et al., 1971; Fredlund, 1992). Curvas de calibração entre o inverso da condutividade térmica e o potencial matricial foram estabelecidas levando-se em consideração que calibrações baseadas no aumento da temperatura são dependentes da intensidade e duração da corrente elétrica utilizada (Reece, 1996), como também do tipo de material usado na fabricação do sensor (Phene et al., 1971). Reece (1996) verificou que o aumento de temperatura do sensor foi proporcional ao inverso da sua condutividade térmica e que, usando-se esta relação por ele proposta, uma única curva de calibração é necessária para representar os diversos efeitos de diferentes intensidade e duração de correntes elétricas utilizadas por um determinado sensor.

Um sensor de dissipação de calor, de formato cilíndrico, denominado Solumid, modelo SG-10, com pedido de privilégio de invenção depositado no INPI, e está em fase final de desenvolvimento em vias de ser produzido e comercializado pela firma Higtotec (Brasília, DF). O sensor é constituído de uma fonte pontual de fluxo uniforme de calor e de um sensor de temperatura inseridos em um meio uniforme e isotrópico de gesso com o formato de um cilindro. A dissipação do calor ocorre a partir da fonte pontual, segundo um volume de formato esférico. Quando em contato com o solo, o cilindro de gesso do sensor

entra em equilíbrio com o potencial da água do solo. Assim, fazendo passar uma corrente elétrica constante através da fonte de calor (durante 50 s), a taxa de dissipação de calor no bloco de gesso dependerá do teor de água do mesmo e causará um aumento de temperatura (Delta T) no meio poroso de gesso.

Várias fontes de erro resultam da utilização de equipamentos para estimar a umidade ou o potencial matricial da água do solo. Tais fontes são normalmente atribuídas a erros de calibração, a erros do instrumento, a erros decorrentes da variabilidade espacial do solo e da água nele contida, e a erros de leitura. Esses tipos de erro são, em geral, expressos em termos de variância e desvio-padrão. Erros ocasionados por curvas de calibração feitas em laboratório ou em campo introduzem um viés mediante os respectivos coeficientes de regressão ajustados. Erros do instrumento utilizado são determinados sob condições controladas de laboratório. Erros ocasionados por variabilidade espacial do solo, sob condições de campo, são minimizados pelo uso de métodos estatísticos convencionais. Erros relacionados ao teor de água no solo podem ser minimizados ao se usar um mesmo tratamento de irrigação que fornece uma mesma lâmina média de água aplicada. Erros de leitura são inerentes ao observador, e podem ser reduzidos por meio de avaliações sistemáticas das medidas efetuadas. Dados sob a contribuição isolada ou em conjunto de cada uma dessas fontes de erro, quando são utilizados sensores de difusão de calor, ainda não foram estudados para o modelo SG-10.

O objetivo deste trabalho foi testar o desempenho do sensor SG-10 quanto às medidas de temperatura e de Delta T, observadas sob condições de laboratório, e comparar as medidas estimadas com esse sensor com as tensões obtidas com tensiômetros de mercúrio instalados sob condições de campo.

## MATERIAL E MÉTODOS

Uma amostra de 24 sensores Solumid SG-10 fornecidos pelo fabricante foi testada em condições de laboratório e de campo, nas instalações da Embrapa-Centro Nacional de Pesquisa de Hortaliças, Brasília, DF. Um conjunto completo do equipamento incluiu um medidor de mostrador digital de LED, uma bateria selada recarregável de 12 volts, um carregador de bateria, uma bolsa para trans-

porte e 12 sensores SG-10. Quando no solo, os sensores foram instalados na posição vertical, segundo recomendações contidas no manual de operação fornecido pelo fabricante. As medidas de temperatura sempre foram efetuadas antes da medida indireta da tensão da água no solo.

O diâmetro médio e a altura dos sensores foram avaliados com o auxílio de um paquímetro. A massa secada ao ar e a massa saturada, após imersão lenta dos sensores em água destilada por mais de dez minutos (a temperatura ambiente) foram medidas com uma balança de precisão de 0,1 mg. Por diferença, a massa de água que ocupa os espaços porosos foi calculada, permitindo estimar a porosidade efetiva média dos sensores, mediante o quociente entre o volume máximo de água (a partir de sensores secos ao ar) e o volume do bloco de gesso. A densidade da água destilada foi considerada igual a 1 g/cm<sup>3</sup> à temperatura ambiente.

Para se observar a variabilidade entre sensores e a amplitude de variação das leituras, valores de temperatura e Delta T foram observados em condições de saturação e em condições de baixa umidade do sensor SG-10 (seco ao ar). Valores de temperatura observados foram comparados com um termômetro de mercúrio com precisão de 0,1°C.

Para se ter uma informação quanto ao desgaste ocasionado pelo uso e solubilidade dos sensores de gesso foram feitas observações em três épocas: sensores novos; após os testes de laboratório (antes de instalar no campo) e após instalação no campo, por cerca de 60 dias.

Uma curva de resposta de secagem do sensor, sob condições de solo seco e a partir do sensor saturado, foi estabelecida colocando-se os sensores saturados em um Latossolo Vermelho, secado ao ar, com umidade média de 11% e textura franco-argilo-siltosa (mesmo solo utilizado no campo), a uma profundidade de 5 cm. Para o ajuste desta e de outras equações incluídas neste trabalho foi utilizado o programa "TableCurve", da Jandel Scientific, San Rafael, Califórnia.

Em condições de campo, os sensores SG-10 foram instalados a 10 cm de profundidade no solo, em parcelas de um experimento de irrigação de mandioquinha-salsa (*Arracacia xanthorrhiza*). Todas as leituras foram efetuadas na parte da manhã, entre as 8h30 e as 10h30.

Até os 15 dias após o transplante das mudas, efetuado em 5/6/96, foi feita irrigação uniforme de todos os tratamentos, permitindo que todas as parcelas se encontrassem em condições semelhantes de umidade. Só então foram iniciados os tratamentos de irrigação.

Seis tratamentos de irrigação possibilitaram avaliar o desempenho dos sensores, no intervalo de funcionamento dos tensiômetros de mercúrio, e constaram de uma combinação de turno de rega e fator de evaporação do tanque classe A, ou seja: T6= 2 dias/ 1,1; T8= 2 dias/ 0,7;

T10= 2 dias/ 0,3; T16= 4 dias/ 1,1; T18= 4 dias/ 0,9; T20= 4 dias/ 0,3. Após o dia 1/8/96, os turnos de regas foram alterados de 2 para 4 e de 4 para 8 dias, respectivamente. A irrigação de cada parcela foi feita com microaspersores colocados no espaçamento de 2,0 x 2,0 m, com seis aspersores por parcela.

Na falta de uma curva de calibração, independente e válida para o intervalo a ser estudado, foi ajustada uma curva de calibração entre valores de Delta T e tensões do tensiômetro, obtida apenas com os dados dos tratamentos que proporcionaram maior amplitude de umidade do solo (T16, T18 e T20). Os demais tratamentos não foram considerados nesta análise, por apresentarem um turno de rega de dois dias que poderiam favorecer eventuais fontes de erro ocasionados por histerese. Uma vez que o potencial matricial é a variável independente nesta calibração, a tensão foi assim considerada.

O delineamento experimental utilizado foi o de blocos ao acaso com parcelas subdivididas e quatro repetições. As subparcelas constaram de medições com o sensor SG-10 e com o tensiômetro, respectivamente. Ambos os equipamentos foram instalados na mesma linha de plantio, no intervalo entre duas plantas e em posição equidistantes dos microaspersores. Os valores de Tensão dos tensiômetros foram transformados em respectivos valores de Delta T, usando a curva de calibração estabelecida sob condições de campo.

## RESULTADOS E DISCUSSÃO

Em relação ao valor médio das principais dimensões dos sensores SG-10, observado antes do início dos testes, houve redução em área e volume e aumento da porosidade efetiva dos sensores com a realização dos testes (Tabela 1).

Conforme pôde ser observado pela redução da área da seção transversal do sensor, a solubilidade do gesso foi maior sob condições de laboratório do que sob condições de campo, provavelmente

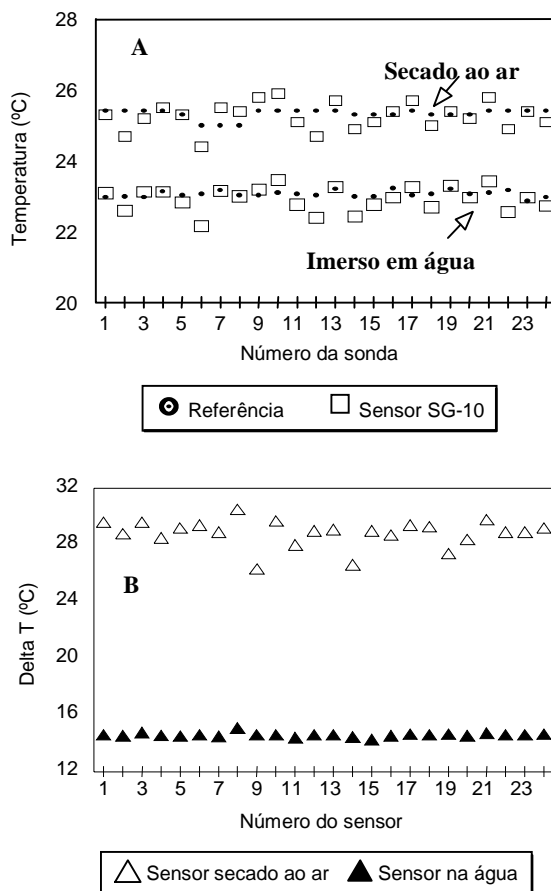
devido à imersão direta dos sensores em água destilada visando submetê-los a condições de umidade do solo próximas da saturação. Os valores finais observados no tocante ao diâmetro do sensor estão acima do diâmetro mínimo teórico do sensor passível de ser utilizado (24 cm), para um intervalo de tempo de intensidade de corrente elétrica de 90 s (Phene et al., 1971), e sugerem que as medidas não foram afetadas pelo desgaste dos sensores.

O fato de ter havido uma pequena redução na altura média dos sensores, durante o período de permanência no campo, sugere que pode estar havendo retenção de água, com conseqüente maior solubilidade, na parte superior da sonda, uma vez que foi inserida na posição vertical. Para se contornar o problema de redução da altura da sonda, uma alternativa é a de posicioná-las na direção horizontal. A outra seria a de fornecer as sondas inseridas na extremidade de um tubo de PVC, à semelhança de um tensiômetro. Esta última condição, além de permitir passar o fio que conecta o sensor ao aparelho medidor, por dentro do tubo de PVC, pode facilitar a retirada das sondas do solo. Convém salientar que condições de umidade do solo próximas da saturação podem ocorrer por ocasião de chuvas ou irrigações freqüentes ou em solos com lençol freático próximo à superfície. Portanto, do maior ou menor número de eventos de aplicação de água, que favorecem tais condições de umidade elevada, poderá resultar maior ou menor desgaste dos sensores utilizados.

As médias e desvio-padrão das leituras de temperatura observadas com o termômetro de referência e os sensores foram: no ar,  $25,3 \pm 0,13^{\circ}\text{C}$  e  $25,3 \pm 0,38^{\circ}\text{C}$ ; e na água,  $22,8 \pm 0,07^{\circ}\text{C}$  e  $23,2 \pm 0,11^{\circ}\text{C}$ , respectivamente, e são um indicativo da qualidade dos dados obtidos com os sensores SG-10 (Fig.1).

**TABELA 1. Dimensões e porosidade efetiva, médias e desvios-padrão, de 24 sensores SG-10, observadas antes e após os testes de laboratório e após permanência no campo por cerca de dois meses. Brasília, CNPH, 1996.**

Época	Altura (mm)		Diâmetro (mm)		Área (cm <sup>2</sup> )	Volume (cm <sup>3</sup> )	Porosidade efetiva (%)	
	Média	Desvio	Média	Desvio			Média	Desvio
Início	47,7	0,7	30,0	0,2	7,07	33,74	48,3	4,5
Após laboratório	46,8	0,7	29,2	0,2	6,71	32,02	-	-
Após campo	46,4	0,7	29,2	0,2	6,68	30,98	49,6	0,6



**FIG. 1.** A) Valores da temperatura de referência (termômetro de mercúrio com precisão de 0,1 graus) e de cada sensor SG-10; B) valores de Delta T (temp. final - temp. inicial), sob condições de sensor secado ao ar (20/05/96), e sensor imerso em água, após saturação por mais de 10 minutos (21/05/96).

A temperatura de cada sensor repetiu sistematicamente a mesma tendência de estar abaixo ou acima da temperatura de referência, independentemente do meio onde foi feita a leitura.

Sob condições de sensores secados ao ar, podemos observar a faixa de valores máximos possíveis de serem observados para Delta T, ou seja, 26,3 a 30,5°C (Fig. 1) a partir de uma temperatura inicial média do sensor de  $25,3 \pm 0,4^\circ\text{C}$  e média de umidade relativa do ar de 52%. Valores de Delta T obtidos

com sensores secados em estufa a cerca de  $105^\circ\text{C}$  podem ser um pouco mais elevados do que os observados, mas, na prática, o limite inferior de umidade do solo é o encontrado próximo à superfície de um solo seco ao ar. Convém salientar que no manejo adequado da irrigação de cultivos agrícolas tal nível de estresse hídrico, na região do sistema radicular, não deverá acontecer, considerando-se que queremos evitar possíveis reduções na produção em decorrência de baixas umidades.

Sob condições de sensores imersos em água, a partir de uma temperatura inicial média do sensor de  $22,7 \pm 0,4^\circ\text{C}$ , podemos observar a faixa de variação de valores mínimos possíveis de serem obtidos para Delta T, ou seja, 14,3 a  $15,1^\circ\text{C}$ . Este teste foi repetido três vezes sob essas condições, e os valores observados foram praticamente idênticos, o que sugere um grau de precisão razoável entre e dentro de cada sensor. A dissipação multidirecional do calor no sensor é feita por condução, através de partículas sólidas de gesso, através da água presente nos poros ou adsorvida nas partículas sólidas, através da solução de gesso (matriz instável) e através dos espaços preenchidos por ar, ou feita por convecção, decorrente do movimento de água ou fluxo de massa causado por gradientes de temperatura que levam moléculas de água ou vapor de um local de temperatura mais quente para outro de temperatura mais fria. Quando os sensores estão bem umedecidos ou próximos da saturação, o calor é transportado, em maior proporção, por condução através das partículas sólidas ou solução de gesso e através da água adsorvida ou presente nos poros e, em menor proporção, por fluxo de massa, através do ar presente nos poucos espaços vazios. Assim, quando a medida de Delta T é realizada sob elevada condição de umidade, o sensor deve dispor de um meio mais uniforme e favorável à dissipação do calor por condução e menos favorável à dissipação do calor por convecção. Isso proporciona, para o intervalo de tempo de 50 s da medição, um menor raio da esfera ou bulbo de dissipação de energia formada a partir da fonte pontual de calor, e reduz o espaço ou o comprimento a ser percorrido pelo fluxo de massa, que pode ser aumentado consideravelmente quando os sensores estão mais secos, devido à tortuosidade dos poros cheios de ar.



Assim, podemos concluir que é possível esperar uma menor variação nos valores de Delta T em relação aos teores de água do solo próximos à saturação, em comparação com os valores de Delta T relativos a umidades de solo mais baixas (Fig. 1), como aqueles passíveis de serem observados antes de um evento de irrigação. Alguns tipos de sensores de dissipação de calor exibem uma diminuição na capacidade de resposta entre 200 e 300 kPa de tensão (Phene et al., 1971; Fredlund, 1992). Entretanto, estes valores de tensão podem ser mais baixos, levando em consideração que o ponto que afeta esta capacidade de resposta dependerá da curva característica de retenção de água do meio poroso utilizado no sensor (Reece, 1996). Para aumentar ainda mais esta variabilidade que pode ocorrer antes da irrigação, independentemente do tipo de sensor a ser utilizado, poderão contribuir a variabilidade espacial do solo e a uniformidade de aplicação da água.

Para que qualquer sensor de umidade possa ser utilizado em condições de campo no manejo da irrigação, é necessário que ele apresente um tempo de resposta à secagem do solo relativamente rápido para se determinar, em tempo hábil, quando a nova irrigação deverá ser feita. O tempo de resposta dos sensores, sob condições de solo secado ao ar, e a curva que representa satisfatoriamente esse processo de secagem pode ser visto na Fig. 2. Os sensores SG-10 levaram pouco mais de 24 horas para sair de

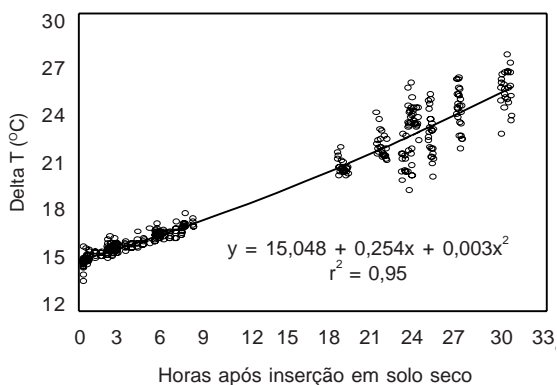


FIG. 2. Tempo médio de secagem de 24 sensores SG-10 após saturação em água destilada e inserção, a 5 cm de profundidade, em um solo franco-argilo-siltoso, secado ao ar com 11% de umidade em volume.

uma condição de saturação (Delta T próximo a 14°C) até atingirem o limite inferior de umidade do solo (Delta T próximo de 30°C). Condições drásticas de secagem, em um intervalo de tempo menor que 24 horas, somente são observadas próximo a superfície do solo (0 a 3 cm de profundidade) e sugerem que esses sensores só devem ser colocados à profundidade maior que 5 cm, quando forem usados para a determinação da umidade do solo. Devido à maior dispersão de dados para valores mais elevados de Delta T, este teste também evidenciou a ocorrência de maior variabilidade das sondas para valores de Delta T na faixa de umidade de solo seco, em comparação à faixa de umidade de solo úmido.

A relação entre Delta T e a tensão obtida com o tensiômetro, relativos aos tratamentos de irrigação T16, T18 e T20, permitiram ajustar uma curva de calibração que está apresentada na Fig. 3. Ficou evidenciada a maior variabilidade das medições feitas com os instrumentos utilizados, na faixa de umidades do solo mais baixas, possibilitando inferir que a fonte de erro, proveniente do tipo de sensor utilizado e observada em condições de laboratório, exerceu papel importante, se não o mais importante.

A curva de calibração ajustada é específica em relação à intensidade e a duração da corrente elétrica

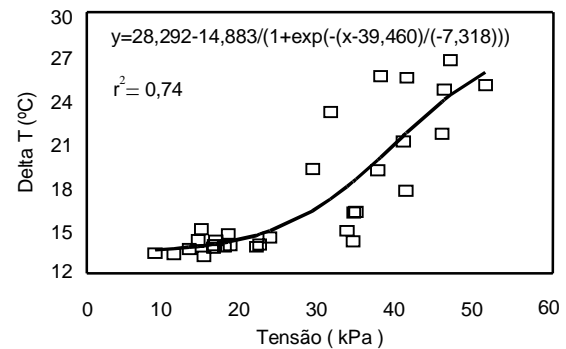


FIG. 3. Valores médios (4 repetições) de tensão com tensiômetro de mercúrio e de Delta T obtidos com sensores SG-10, antes da irrigação, ambos colocados a 10 cm de profundidade do solo, sob condições de campo, em tratamentos de irrigação com turnos de rega de 4 e 8 dias e fatores de evaporação de 1,1, 0,7, e 0,3.

fornecida pelo sensor leva em conta o fato de se estar utilizando uma matriz instável (gesso); está condicionada às limitações introduzidas pelo tensiômetro e sua estreita faixa de operação e, portanto, é válida para os equipamentos e local utilizados e para fins de comparação entre as medidas do sensor e do tensiômetro. No estudo feito por Reece (1996), considerando sensores com fonte de calor linear e a solução teórica proposta por Shiozawa & Campbell (1990), foi observado que, quando esta calibração é feita considerando como variável dependente a condutividade térmica do sensor, em vez de Delta T, a curva obtida independerá da intensidade e duração da corrente elétrica fornecida pelo sensor, e permite uma aplicação mais universal.

Sob condições de campo, é necessário conhecer os valores de tensão da água no solo ( $y$ , em kPa), em função do Delta T observado ( $x$ , em °C). Para esta finalidade foi ajustada a equação:  $y = 2459,5998 - 42942,951/(x)^{0,5} + 47937,262 \cdot \ln x / x$ , com  $r^2 = 0,79$ , e que apresentou o menor erro-padrão dos valores preditos ( $s_{yx}$ ). Entretanto, é importante lembrar o fato de tanto esta curva de calibração como a apresentada na Fig. 3, além de incluírem a variabilidade entre sondas, também incluem o efeito da variabilidade espacial do solo (propriedades físicas, densidade de raiz e outras); da variabilidade quanto à aplicação de água (uniformidade e eficiência de aplicação); e da variabilidade ocasionada pelo valores máximos possíveis de serem obtidos com tensiômetros, 70 a 80 kPa, os quais podem afetar principalmente a parte final desta curva de calibração.

Na análise estatística do experimento realizado em campo, não houve interação entre tratamentos de irrigação e método para estimar a umidade do solo. As médias de Delta T, observadas em 15/7 (40 dias após o transplante das mudas e 25 dias após irrigação uniforme), 23/7 e 1/8, para cada um dos tratamentos de irrigação estudados, são apresentadas na Tabela 2. Na fase mais inicial da cultura (15/7) não ocorreu diferença significativa entre os tratamentos de irrigação, mesmo nos tratamentos mais secos, o que sugere que qualquer viés que possa ter sido introduzido pela curva de calibração utilizada, não afetou as observações realizadas. Uma vez que até o dia 20/6 todos os tratamentos receberam a mesma lâmina de irrigação, parece não ter havido tempo

suficiente para que as irrigações diferenciadas proporcionassem diferenças significativas entre potenciais matriciais dos tratamentos, na profundidade estudada. Diferenças entre os tratamentos de irrigação somente foram observadas em 23/7 e em 1/8. Tal resultado mostra o papel crescente do aumento da transpiração das plantas, com o seu crescimento vegetativo, fazendo com que as raízes atuem como um “dreno” da umidade do solo e evidencia que os tratamentos menos irrigados apresentam maior déficit hídrico.

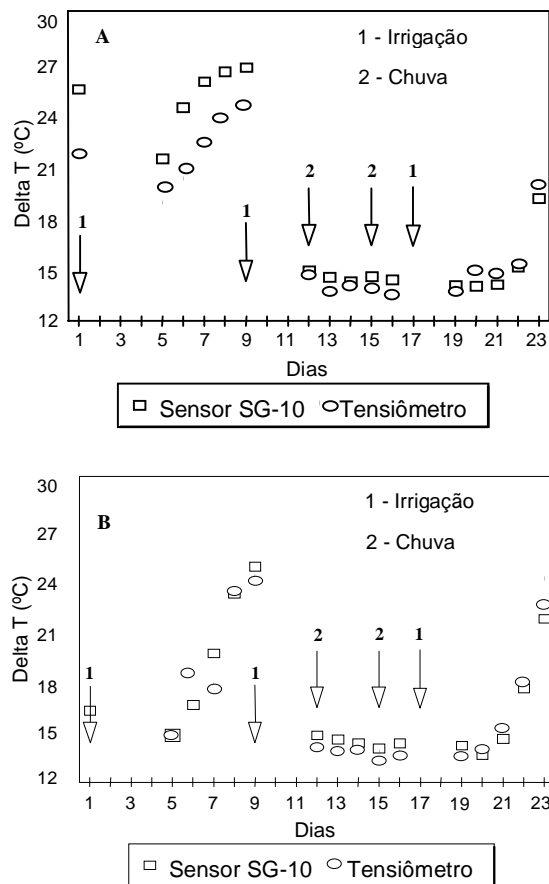
No período de 1 a 23 agosto são apresentadas as médias observadas e transformadas de Delta T, relativos a sensores SG-10 e tensiômetros, respectivamente, instalados a 10 cm de profundidade nos trata-

**TABELA 2. Valores médios de Delta T (temperatura final - temperatura inicial), em três épocas, usando sensores SG-10 e tensiômetros (subparcela) instalados a 10 cm de profundidade, em parcelas cultivadas com mandioquinha-salsa e submetidas a seis tratamentos de irrigação que constaram de uma combinação de turno de rega e fator de evaporação do tanque classe A. Brasília, CNPH, 1996<sup>1</sup>.**

Tratamento	Subparcela	15/7	23/7	01/8
T6= 2 dias / 1,1	SG-16	13,1	13,5	14,3
	Tensiômetro	14,3	13,5	13,5
	Média	13,7	13,5c	15,0ab
T8= 2 dias / 0,7	SG-16	13,8	14,8	15,4
	Tensiômetro	14,7	14,4	14,6
	Média	14,2	14,6c	13,9a
T10= 2 dias / 0,3	SG-16	16,4	24,3	26,2
	Tensiômetro	17,7	23,3	24,3
	Média	17,0	23,8a	25,3bc
T16= 4 dias / 1,1	SG-16	14,5	13,9	16,2
	Tensiômetro	15,7	14,4	18,6
	Média	15,1	14,1c	17,4c
T18= 4 dias / 0,9	SG-16	14,2	16,3	17,6
	Tensiômetro	18,4	18,7	21,4
	Média	16,3	17,5bc	19,5c
T20= 4 dias / 0,3	SG-16	19,2	25,6	25,5
	Tensiômetro	19,0	20,0	20,4
	Média	19,1	22,8ab	22,9c
CV (%)		15,9	14,8	18,7

<sup>1</sup> Valores do teste F não foram significativos para os fatores da subparcela, nas três épocas; médias seguidas de letras distintas, nas mesmas colunas, diferem entre si a 5% de probabilidade, pelo teste de Tukey.

mentos de irrigação T20 (Fig. 4A) e T16 (Fig. 4B). Os dois eventos de chuva mantiveram os valores de umidade do solo mais elevados. Os valores médios de Delta T, observados com os dois tipos de instrumentos nesse período, foram semelhantes. O viés introduzido pela curva de calibração parece não ter afetado sistematicamente os dados observados, uma vez que se mantiveram ora acima, ora abaixo, ora co-



**FIG. 4.** Médias de tensão obtidas com tensiômetro de mercúrio, transformadas para Delta T (usando a equação da Fig. 3) e médias de Delta T obtidas com o sensor SG-10, ambos instalados a 10 cm de profundidade, em parcelas experimentais de mandioquinha-salsa submetidas aos tratamentos de irrigação: A) turno de rega de 4 a 8 dias e fator de evaporação, em relação ao tanque classe A, igual a 0,3; B) turno de rega de 4 a 8 dias e fator de evaporação igual a 1,1.

identes, com exceção do tratamento T20 que parece ter subestimado esses valores no período do dia 5 ao dia 9. O fato de o tratamento T20 ser mais seco favorece a obtenção de tensões mais elevadas, conforme observado, faz com que o limite de operação do tensiômetro seja atingido mais freqüentemente e pode ajudar a explicar os valores médios de tensão subestimados.

A determinação da tensão da água do solo com sensores de dissipação de calor pode ser considerada como mais uma alternativa viável, além das já existentes. Para tal, deverá ser utilizada uma curva de calibração adequada ao tipo de material poroso utilizado no sensor (fonte de calor linear ou pontual) e à intensidade e duração da corrente elétrica utilizada na fonte (pontual) de calor.

Os resultados obtidos neste trabalho sugerem que sejam feitas mudanças quanto ao tipo de material poroso do sensor utilizado, visando obter uma matriz estável.

## CONCLUSÕES

1. Ocorre redução em área, em volume e na porosidade dos sensores estudados, quando imersos em água destilada por tempo prolongado.
2. Medidas de Delta T realizadas sob condições de baixa umidade apresentam maior variabilidade em comparação a medidas feitas sob condições de alta umidade.
3. Em relação a valores de Delta T, o tempo de resposta do sensor à secagem é um pouco superior a 24 horas, quando sensores saturados são instalados a 5 cm de profundidade em um solo franco-argiloso seco ao ar.
4. Sob condições de campo com a cultura de mandioquinha-salsa, não há diferenças entre as médias das leituras de Delta T feitas com os sensores estudados e transformadas em Delta T a partir das tensões observadas com tensiômetros de mercúrio, com o auxílio de uma curva de calibração feita em campo.

## AGRADECIMENTOS

Ao Dr. Henoque Ribeiro da Silva, pela concessão da área experimental com mandioquinha-salsa utilizada neste experimento.



## REFERÊNCIAS

- CARY, J.W.; FISHER, H.D. Irrigation decisions simplified with electronics and soil water sensors. **Soil Science Society of America. Journal**, Madison, v.47, p.1219-1223, 1983.
- DeJAGER, J.M.; CHARLES-EDWARD, J. Thermal conductivity probe for soil-moisture determinations. **Journal of Experimental Botany**, v.20, p.46-51, 1969.
- FREDLUND, D.G. Background, theory, and research related to the use of thermal conductivity sensors for matric suction measurement. In: TOPP, G.C. (Ed.). **Advances in measurements of soil physical properties: bringing theory into practice**. Madison: Soil Science Society of America, 1992. p.249-261. (SSSA. Special Publication, 30).
- GARDNER, R. Relation of temperature to moisture tension of soil. **Soil Science**, v.79, p.257-265, 1955.
- PHENE, C.J.; HOFFMAN, G.J.; RAWLINS, S.L. Controlling automated irrigation with a soil matric potential sensor. **Transactions of the ASAE**, v.16, n.4, p.773-776, 1973.
- PHENE, C.J.; HOFFMAN, G.J.; RAWLINS, S.L. Measuring soil matric potential *in situ* by sensing heat dissipation within a porous body: I. Theory and sensor construction. **Soil Science Society of America. Proceedings**, v.35, p.27-33, 1971.
- RAWLINS, S.L. Measurement of water content and the state of water in soil. In: KOSLOWSKI, T.T. (Ed.). **Water deficits and plant growth**. New York: Academic, 1976. v.4, p.1-55.
- REECE, C.F. Evaluation of a line heat dissipation sensor for measuring soil matric potential. **Soil Science Society of America. Journal**, Madison, v.60, p.1022-1028, 1996.
- SHIOZAWA, S.; CAMPBELL, G.S. Soil thermal conductivity. **Remote Sensing Reviews**, v.5, n.1, p.301-310, 1990.
- SKAGGS, R.W. Soil water. Part I. Properties. In: JENSEN, M.E. (Ed.). **Design and operation of farm irrigation systems**. St. Joseph: The American Society of Agricultural Engineers, 1981. p.77-142.