**ANÁLISE DO DESEMPENHO DO TENSÍMETRO DE CÂMARA
DE AR NA AVALIAÇÃO DO POTENCIAL MÁTRICO DA ÁGUA.**

RAIMUNDO NONATO DE ASSIS JÚNIOR
Engenheiro Agrônomo

Orientador: Prof. Dr. Klaus Reichardt

**Tese apresentada à Escola Superior de Agricultura
"Luiz de Queiroz", da Universidade de São Paulo,
para obtenção do título de Doutor em Agronomia,
Área de concentração: Solos e Nutrição de Plantas.**

PIRACICABA
Estado de São Paulo - Brasil
Outubro - 1995

Dados internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)
Divisão de Biblioteca e Documentação - CAMPUS "LUIZ DE QUEIROZ"/USP

Assis Júnior, Raimundo Nonato de
Análise do desempenho do tensiômetro de câmara de ar na avaliação
do potencial mátrico da água. Piracicaba, 1995.
85p.

Tese - ESALQ
Bibliografia.

1. Água no solo 3. Tensiômetro I. Escola Superior de Agricultura Luiz
Luiz de Queiroz, Piracicaba

CDD 631.432

ANÁLISE DO DESEMPENHO DO TENSÍÔMETRO DE CÂMARA
DE AR NA AVALIAÇÃO DO POTENCIAL MÁTRICO DA ÁGUA.

RAIMUNDO NONATO DE ASSIS JÚNIOR

Aprovada em: 11.12.95

Comissão julgadora:

Prof. Dr. Klaus Reichardt

ESALQ/USP

Prof. Dr. Nilson Augusto Villa Nova

ESALQ/USP

Prof. Dr. Osny O. S. Bacchi

CENA/USP

Dr. Júlio César Martins de Oliveira

UEL/Londrina

Dr. Carlos M. P. Vaz

CNPDIA/EMBRAPA

Prof. Dr. KLAUS REICHARDT

Orientador

A Vânia, esposa e amiga, pelo incondicional
e imprescindível apoio, mormente nos
momentos mais difíceis;

A Camila, pela sua beleza e capacidade de me
fazer sorrir.

DEDICO

Ao Prof. Dr. Mardônio Aguiar Coelho (em memória)
que dedicou sua vida, com esforço e honestidade ,
ao ensino de física do solo.

OFEREÇO

AGRADECIMENTOS

Ao Professor Klaus Reichardt, pelo apoio e orientação prestados durante a realização deste trabalho, sem os quais as dificuldades do percurso não teriam sido vencidas

Ao professor Nilson Augusto Villa Nova, pelas frutíferas discussões a respeito da teoria de funcionamento do instrumento, entre outras.

Aos Professores Paulo Leonel Libardi e Sérgio Oliveira Moraes, pela colaboração sempre presente.

Aos membros da comissão examinadora, pela revisão dos originais e sugestões apresentadas.

À Universidade Federal do Ceará, pelo afastamento concedido.

Ao Programa Institucional de Capacitação de Docentes (PICD/CAPES), pelo apoio financeiro na forma de bolsa de estudo.

Aos funcionários Francisco Bernardo Dias e Luiz Fernando Novello (ESALQ/USP) e José Ademir Rodrigues (CENA/USP), pela essencial colaboração prestada nas atividades realizadas em laboratório.

A todos que, de algum modo, colaboraram para a realização deste trabalho.

SUMÁRIO

	Página
LISTA DE FIGURAS	v
LISTA DE TABELAS	vii
RESUMO	viii
SUMMARY	x
1. INTRODUÇÃO	1
2. REVISÃO DE LITERATURA	3
2.1. O tensiômetro	3
2.2. Uso do tensiômetro	5
2.3. Variabilidade e tempo de resposta do tensiômetro...	11
2.4. Medidas do potencial da água com diferentes tipos de manômetros	15
3. MATERIAL E MÉTODOS	23
3.1. Teste das cápsulas porosas	23
3.2. Confeção dos tensiômetros	24
3.2.1. Tensiômetro com manômetro de mercúrio.....	24
3.2.2. Tensiômetro de câmara de ar	25
3.2.3. Tensiômetro com duplo manômetro	25
3.3. Condução dos experimentos	26
3.3.1. Experimento de laboratório com tensiômetro de duplo manômetro	26
3.3.2. Experimento de laboratório com tensiômetros de manômetros individuais	27
3.3.3. Experimento de campo	28
3.4. Cálculo do potencial da água no solo	31
3.4.1. Tensiômetro com manômetro de mercúrio.....	31
3.4.2. Tensiômetro de câmara de ar	31

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO	36
4.1. Experimento de laboratório com tensiômetro de duplo manômetro.....	36
4.2. Experimento em laboratório com tensiômetros com manômetros individuais	41
4.3. Experimentos sob condições de campo	45
4.3.1. Período seco	46
4.3.2. Período úmido	50
4.4. Influência da temperatura sobre o comportamento do tensiômetro com manômetro de câmara de ar.....	58
4.5. Sensibilidade do tensiômetro com manômetro de câmara de ar	61
4.6. Considerações finais... ..	64
5. CONCLUSÕES	66
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	67
APÊNDICES.....	75

LISTA DE FIGURAS

	Página
Figura 1 - Croqui de um bloco no experimento de campo ...	29
Figura 2 - Modelo esquemático do tensiômetro com manômetro de mercúrio	34
Figura 3 - Modelo esquemático do tensiômetro com manômetro de câmara de ar.....	35
Figura 4 - Potencial mátrico versus tempo, tensiômetro de duplo manômetro, experimento de laboratório	39
Figura 5 - Relação entre potencial mátrico medido por tensiômetro de duplo manômetro (mercúrio e câmara de ar), no laboratório	39
Figura 6 - Potencial mátrico versus tempo no experimento realizado no laboratório com tensiômetros com manômetros individuais	44
Figura 7 - Relação entre potencial mátrico obtido por tensiômetros com manômetros de mercúrio e de câmara de ar, experimento de laboratório	44
Figura 8 - Evolução do potencial mátrico no tempo. 8a e 8b correspondem às profundidades de 35 e 150 cm, respectivamente, no bloco I. 8c corresponde à profundidade de 35 cm, bloco II.....	48
Figura 9 - Relação entre potencial mátrico obtido por tensiômetro convencional e de câmara de ar. Experimento de campo, período seco	49
Figura 10 -Evolução do potencial mátrico no tempo para o experimento de campo, primeiro período úmido.	

Bloco I (a) 15 cm; (b) 35 cm e (c) 150 cm	51
Figura 11 - Relação entre potencial mátrico obtido por tensiômetro convencional e de câmara de ar.	
Experimento de campo, primeiro período úmido	52
Figura 12 - Evolução do potencial mátrico no tempo no experimento de campo, segundo período úmido.	
(a) bloco I, 15 cm e (b) bloco II, 15 cm`	55
Figura 13 - Potencial mátrico com e sem correção da temperatura no experimento de campo, segundo período úmido. (a) bloco I, 15 cm e (b) bloco II, 15 cm	60

LISTA DE TABELAS

	Página
Tabela 1 - Valores de potencial mátrico obtidos no tensiômetro de duplo manômetro (mercúrio e e câmara de ar) no experimento de laborario.....	38
Tabela 2 - Valores médios de potencial mátrico obtidos nos tensiômetros de mercúrio e de câmara de ar, no experimento de laboratório.	43
Tabela 3 - Média, desvio padrão e coeficiente de variação dos valores de potencial mátrico obtidos por tensiômetros de mercúrio e de câmara de ar, bloco I - 15 cm de profundidade	54
Tabela 4 - Média, desvio padrão e coeficiente de variação dos valores de potencial mátrico obtidos por tensiômetros de mercúrio e de câmara de ar, bloco II - 15 cm de profundidade	57
Tabela 5 - Variação do potencial mátrico em função da variação na altura da câmara de ar.....	63

ANÁLISE DO DESEMPENHO DO TENSÍÔMETRO DE CÂMARA DE AR NA AVALIAÇÃO DO POTENCIAL MÁTRICO DA ÁGUA.

Autor: RAIMUNDO NONATO DE ASSIS JÚNIOR

Orientador: PROF. DR. KLAUS REICHARDT

RESUMO

Foram feitos testes para avaliar o desempenho de tensiômetros com manômetro de câmara de ar, pela sua comparação com os resultados apresentados pelo tensiômetro convencional de manômetro de mercúrio. Dois testes foram feitos no laboratório de física do solo do Centro de Energia Nuclear na Agricultura - CENA/USP e um em condições de campo, realizado em uma terra roxa estruturada localizada na Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz" - ESALQ/USP, ambos em Piracicaba (SP).

O primeiro teste realizado no laboratório constou de um tensiômetro de duplo manômetro (mercúrio e câmara de ar), com a cápsula exposta às condições do ar ambiente. O segundo foi feito com tensiômetros com manômetros individualizados, em vaso com solo homogêneo. No campo um experimento foi instalado, com delineamento de blocos ao acaso, com três profundidades e cinco repetições, dentro de um seringal de 8 anos. Foi avaliada a resposta do tensiômetro de câmara de ar

com relação a sua habilidade de monitorar a variação de potencial mátrico da água.

Os resultados mostraram que o tensiômetro de câmara de ar respondeu de forma semelhante ao tensiômetro com manômetro de mercúrio, embora com pequenas diferenças, as quais, porém, não invalidam o seu uso. A sensibilidade do manômetro de câmara de ar pode ser considerada como boa para uso em programas de irrigação. O efeito da temperatura sobre a resposta do tensiômetro de câmara de ar foi importante na faixa de alto potencial mátrico (solo úmido), porém não o foi para baixos potenciais (solo seco).

O uso do tensiômetro de câmara de ar pode ser recomendado para o monitoramento do potencial mátrico da água no solo nas condições normais de cultivo, apresentando as vantagens de ser mais barato, mais fácil manuseio e não conter material tóxico. Para programas de pesquisa, no entanto, aconselha-se, ainda, o uso do tensiômetro de mercúrio, do qual as respostas já são mais conhecidas.

PERFORMANCE ANALYSIS OF THE AIR-CAMBER TENSIO METER TO EVALUATE MATRIC WATER POTENTIAL.

Author: RAIMUNDO NONATO DE ASSIS JÚNIOR

Adviser: PROF. DR. KLAUS REICHARDT

SUMMARY

Tests were made to evaluate the performance of tensiometers with air chamber manometers, through the comparison with results of conventional mercury manometer tensiometers. Two tests were carried out in the soil physics laboratory of the Center for Nuclear Energy in Agriculture - CENA/USP, and a third one under field conditions, at the Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz" on a dark red latosol, locally called "terra roxa estruturada".

The first laboratory test was performed using a tensiometer with double manometers (mercury and air chamber), with the porous cup exposed to ambient air conditions. The second test was performed with tensiometers having individual manometers, installed in a pot of homogeneous soil. Under field conditions, a randomized block design was used, having three depths and five replicates, within a rubber-tree crop, eight years old.

Results indicated that the air chamber tensiometers had a similar response as compared to the mercury manometer tensiometers, although with small differences, which, however, do not invalidate their use. The sensitivity of the air chamber tensiometer can be considered good for its use in irrigation programs. The temperature effect on the response of the air chamber tensiometer was important in the high range of matric potential (wet soil), but not for the low range (dry soil).

The use of the air chamber tensiometer can be recommended in field conditions to irrigation scheduling. For research programs, however, it is expected that the traditional mercury manometer tensiometer will still show a better performance.

1. INTRODUÇÃO

O manejo adequado de um sistema de produção agrícola é uma tarefa que requer conhecimento e controle de fatores ligados ao ambiente externo (atmosfera), à planta e ao solo. A complexidade desse sistema tripartite solo-planta-atmosfera tem estimulado pesquisadores a desenvolverem esforços no sentido de buscar desvendar seus meandros, de entender melhor suas relações, a fim de manejá-lo mais racionalmente.

Dos fatores ligados ao solo, a água tem merecido grande atenção, sendo que as condições em que ela se encontra no solo e sua disponibilidade para as plantas têm sido, já há bastante tempo, objetivos de estudos por parte daqueles que lidam com a ciência agronômica, no geral, e com a ciência do solo, em particular.

Ao longo do tempo, seguindo a evolução da tecnologia, diversos instrumentos foram sendo criados com o objetivo de se detectar , de forma mais precisa e rápida, a quantidade e qualidade da água no solo em diponibilidade para as plantas. A criação desses instrumentos se deu concomitantemente com a evolução nos conhecimentos teóricos e conceituais de disponibilidade de água às plantas.

O conhecimento do “status” da água no solo reveste-se, portanto, de importância primordial, uma vez que permite-nos um manejo correto desse fator de produção agrícola em áreas irrigadas, isto é, faculta-nos a estimativa do momento e da quantidade de água que deve ser fornecida ao solo para a manutenção do cultivo sob condições hídricas adequadas, na busca da maximização da produtividade.

Dos vários instrumentos capazes de medir o estado energético da água no solo, sob condições de campo, o tensiômetro tem sido um dos mais utilizados, por motivos tais como o de fornecer uma medida direta do potencial mátrico da água no solo, por apresentar baixo custo, facilidade de leitura, entre outros. O tensiômetro convencional, de uso mais comum, utiliza o mercúrio metálico como manômetro e isto tem sido visto como um problema do instrumento, uma vez que, associado ao uso do mercúrio, tem-se danos à saúde de quem o manuseia, risco de poluição ambiental e dificuldade de manutenção.

O objetivo do presente trabalho é testar o desempenho do tensiômetro de câmara de ar em condições de laboratório e de campo, na quantificação do potencial mátrico da água no solo, pela comparação de sua resposta com relação àquela do tensiômetro convencional (manômetro de mercúrio).

2. REVISÃO DE LITERATURA

2.1. O tensiômetro

O tensiômetro foi desenvolvido em 1922 por W. Gardner e colaboradores (BLACK, 1968). É um instrumento de campo utilizado para medir o potencial mátrico da água no solo, e consiste de uma cápsula porosa, geralmente de cerâmica, conectada a um manômetro através de um tubo completamente cheio de água (REICHARDT, 1985). A dimensão dos poros da cápsula é tal que, mesmo quando submetidas à uma pressão de 1 atmosfera, esses poros não são esvaziados (REICHARDT, 1990).

O princípio de funcionamento do tensiômetro é bastante simples. O instrumento é introduzido no solo, de tal modo que a cápsula de cerâmica porosa mantenha um contato o mais perfeito possível com o solo, a fim diminuir o seu tempo de resposta. A água que se encontra no interior do instrumento, o qual deve estar hermeticamente fechado, entra em contato com a solução presente no solo através dos poros da cápsula - que são permeáveis à água e não ao ar, dentro de um certo limite de pressão - e um equilíbrio tende a ocorrer dentro de um certo tempo. Na condição inicial de fechamento do instrumento,

a água dentro do tensiômetro está submetida à pressão atmosférica (considerada como estado padrão de referência para o potencial mátrico, isto é, $\psi_m = \text{zero}$) e a água no solo não saturado sob condições subatmosféricas, provocando a saída de água do tensiômetro para o solo, até que a condição de equilíbrio seja alcançada (RICHARDS & NEAL, 1936). Essa saída de água do tensiômetro provoca uma queda de pressão em seu interior, a qual é registrada pelo manômetro. Essa pressão subatmosférica medida no interior do instrumento na forma de energia potencial é, no equilíbrio, igual à energia potencial (energia/volume) da água no solo. Daí, "qualquer mudança no conteúdo de água no solo, e conseqüentemente, em seu estado de energia, será transmitida à água no interior do instrumento, sendo indicada rapidamente pelo manômetro" (OLITTA, 1976).

A faixa de potencial mátrico da água no solo na qual se pode utilizar o tensiômetro é bastante estreita, variando de zero até aproximadamente 0,8 da pressão atmosférica local. Segundo TAMARI et al. (1993), isso é causado pelo estado metaestável da água, quando essa se encontra sob tensão, a qual torna o líquido bastante instável, sendo que qualquer choque induzirá sua rápida vaporização. Essa faixa parece pequena, visto que, teoricamente, o limite inferior de potencial mátrico da água em que essa se encontra disponível às plantas é de -1500kPa. PECK & RABBIDGE (1966), descreveram um instrumento cujo princípio de funcionamento assemelha-se ao tensiômetro, no qual polietileno glicol foi utilizado. O fluido era submetido a pressão e o potencial mátrico determinado através

de transdutor de pressão. Para CAMPBELL (1987) isto estenderia consideravelmente a faixa de uso do instrumento, porém não foi extensivamente usado, aparentemente por razões práticas. Para REICHARDT (1990), mesmo com essa limitação, o tensiômetro é um ótimo instrumento de campo para indicar quando irrigar, porque, para a maioria dos solos, maior quantidade de água é retida entre os potenciais de 0 e -100kPa do que entre -100 e -1500kPa, mormente em solos arenosos. De fato ele tem sido extensivamente usado por permitir uma medida direta do "status" de energia da água contida no solo, sendo este estado energético da água que determina o seu movimento no solo e sua disponibilidade para as plantas.

As características externas do tensiômetro mudaram muito pouco com o passar do tempo (HOOK, 1987), embora algumas modificações tenham permitido utilizá-lo numa faixa mais ampla de locais, tenham permitido a confiabilidade em suas respostas, simplificado as observações e facilitado os procedimentos de instalação e manuseio. Para esse autor, o tensiômetro permanece basicamente como concebido, uma ferramenta barata de pesquisa.

2.2. Uso do tensiômetro

Muitos pesquisadores, no Brasil e no mundo, têm utilizado o tensiômetro em seus trabalhos, com os mais variados fins para os quais o instrumento se presta, buscando calibrá-lo, melhorá-lo e/ou adequá-lo às suas necessidades.

RICHARDS e NEAL (1936) utilizaram o tensiômetro para verificar mudanças na capacidade de retenção de água pelo solo quando este foi submetido a diferentes tratamentos com matéria orgânica, observando, via leitura tensiométrica, diminuição na tensão da água nos poros capilares pela adição de quantidades cada vez maiores de matéria orgânica. Previram, já naquela época, ser o tensiômetro um instrumento bastante útil em estudos de perdas de água do solo por evaporação, de infiltração e de conservação de água no solo.

Para determinar o armazenamento da água no solo em disponibilidade às plantas, WERKHOVEN (1992) comparou os resultados de tensiômetros com os de TDR (Time Domain Reflectometry), concluindo que o tensiômetro é um instrumento plenamente adequado para tal objetivo.

Em agricultura irrigada, um dos problemas mais difíceis encontrados na prática é a decisão do momento de irrigar, bem como a quantidade de água a ser aplicada em cada irrigação. O tensiômetro tem sido utilizado na solução desse problema. TAYLOR (1965) sugeriu um procedimento no qual usa-se dois tensiômetros, um dos quais instalado na profundidade de maior atividade do sistema radicular, e o outro um pouco mais abaixo das raízes. O tempo de irrigação é determinado pelo tensiômetro mais raso, quando esse indica um aumento no potencial mátrico da água no solo para valores próximos à capacidade de campo ou maiores que esses. Se essa última condição ocorre, é indicação de que está havendo percolação profunda; portanto, menor quantidade de água deve

ser aplicada nas irrigações subseqüentes. O exato valor do potencial mátrico da água no solo, o qual determina quando irrigar, não é o mesmo para todas as culturas. Porém, definido esse valor, a leitura do tensiômetro indicará o exato momento de se iniciar a irrigação. BEZERRA (1995) aplicou diferentes tratamentos de déficit hídrico na cultura da batata inglesa e monitorou o potencial mátrico da água no solo através de tensiometria, fornecendo água ao solo sempre que o potencial mátrico atingia o valor de -20kPa. Estudos sobre o efeito do potencial mátrico da água no solo sobre a produção de quatro culturas foram feitos por TAYLOR (1952) utilizando tensiômetros na faixa de tensão da água no solo entre 0 e -70kPa.

POOLEY (1973) mostrou que, com o uso do tensiômetro, pode-se determinar com mais eficiência os intervalos de irrigação e que, em seu experimento, isto representou uma economia de 15% no custo total das operações com o cultivo, além de proporcionar maior produção e melhor qualidade dos produtos. Economia de água e de energia também foi observada por SMAJSTRLA & KOO (1986) em programa de irrigação por gotejamento em laranja, utilizando o potencial mátrico da água no solo, medido por tensiômetro, como indicador do momento de irrigar e da quantidade de água a ser aplicada em cada irrigação.

SMAJSTRLA & LOCASCIO (1990) compararam resultados da irrigação baseada em dados tensiométricos e em tanque de evaporação classe A na produção e requerimento de

irrigação em tomate irrigado por gotejamento. A aplicação de água foi reduzida quando a irrigação foi baseada nos valores de potencial mátrico, quando comparada com a irrigação baseada no tanque classe A. Nenhuma diferença significativa foi observada na produção de tomate pelos dois sistemas, porém, a economia de água e de energia sugeriu o uso do tensiômetro no controle da irrigação.

O controle do potencial mátrico da água no solo em quatro tratamentos de irrigação por gotejamento em algodão foi feito por WIERENGA et al. (1987) com tensiômetros. Também aí o instrumento mostrou-se muito eficiente no controle da irrigação e economia de água, proporcionando um manejo mais adequado da água e um aumento na produção da cultura.

HODNETT et al. (1990) compararam métodos de controle de irrigação utilizando índice tensiométrico e valores estimados de evapotranspiração potencial em cana-de-açúcar e obtiveram maior produção quando o controle foi feito baseado em índice tensiométrico, utilizando um potencial mátrico de -80kPa; além disso, concluíram, esse é um método de operação mais simples e não requer nenhuma outra coleta de dados a não ser as leituras dos tensiômetros

A necessidade de programas de irrigação, mesmo em regiões úmidas, foi apontada por LAMBERT et al. (1981), principalmente para agricultura intensiva; eles sugeriram que o controle da necessidade de irrigação deve ser feito por tensiometria e os seus resultados indicaram que o potencial mátrico da água no solo mantido acima de -20kPa nos 60cm superficiais do solo proporcionou maiores produções.

Estudos objetivando investigar a adequabilidade de se basear a irrigação no potencial mátrico da água no solo, em comparação com o método tradicional de turno de rega com tempo estabelecido, foram feitos por AUGUSTIN & SNYDER (1984). Eles investigaram, também, a influência da irrigação sobre a adubação do solo com nitrogênio e observaram que, durante o verão chuvoso, onde a necessidade de irrigação é menor, o método baseado no potencial mátrico foi mais efetivo, eliminando irrigações desnecessárias. Por um período de 3 anos - 1980 a 1982 - a quantidade de irrigação por esse procedimento foi 42% menor. No período seco o resultado foi semelhante, com um número de irrigação 47% menor. A interação entre a forma de irrigação e fonte de nitrogênio foi observada apenas no período seco. Nesse período, a irrigação por turno de rega aumentou a velocidade de liberação de nitrogênio, em relação à irrigação baseada em leituras tensiométricas. Estatisticamente, porém, o fornecimento de nitrogênio às plantas foi igual em ambos os casos. Assim, o procedimento baseado nas leituras tensiométricas mostrou-se eficiente na redução dos custos de irrigação e de nitrogênio.

O tensiômetro tem sido utilizado principalmente para aplicações agrícolas, através do monitoramento do potencial mátrico da água no solo. Uma dupla utilização do instrumento foi feita por MORRISON & SZECSODY (1987), onde o aparelho serviu como amostrador (coletor) de água e como indicador do potencial mátrico. Feitas as medidas do potencial, o fluido era retirado do tensiômetro, aplicava-se um vácuo e coletava-se uma amostra da água para monitoramento de

contaminantes. Evidentemente, modificações no instrumento foram necessárias para permitir esse duplo uso, tal como o uso de uma válvula de via dupla, a qual permite tal utilização do instrumento. Uso semelhante do instrumento foi feito por TOKUNAGA (1992).

DEXTER (1990) estudou o rearranjo das partículas do solo usando valores de potencial mátrico, medidos com tensiômetro. Amostras de solo foram destorroadas, umedecidas e colocadas em vasos hermeticamente fechados, nos quais estavam instalados os tensiômetros. A umidade foi mantida constante com o tempo e medidas tensiométricas foram feitas. As variações nos valores de potencial com o tempo foram entendidas como modificações no arranjo das partículas, principalmente das argilas. Essas observações são consistentes com a idéia de que as partículas de argila são orientadas de modo paralelo umas às outras após a moldagem e, subseqüentemente, se orientam em arranjo bordo-face ou bordo-bordo.

Outro uso bastante comum do tensiômetro é feito na verificação do fluxo de água no solo em condição de não saturação. BOOLTINK e BOUMA (1991) estudaram o fluxo de água em uma coluna de solo em laboratório, onde os potenciais em profundidade foram determinados com o uso de pequenos tensiômetros, concluindo que o fluxo de água no solo é muito mais complexo do que sugerido pela literatura corrente, que o arranjo das partículas do solo deve ser considerado quando se deseja caracterizar o fluxo, que a continuidade dos macroporos governam o fenômeno e que o uso de tensiômetros

é essencial para se expressar esses processos em termos quantitativos. Em estudos de fluxos intermitentes (não contínuo) como esse, uma atenção especial deve ser dada à interpretação dos resultados obtidos, uma vez que eles podem incorporar tanto as mudanças de pressão hidrostáticas quanto a pressão do ar enclausurado contra a parede da cápsula porosa (WATSON, 1967).

O fluxo de água de percolação é muito importante em irrigação e em estudos de lixiviação, principalmente em solos com problemas de salinidade. SINGH et al. (1988) compararam o fluxo de água no solo por medidas tensiométricas e por medidas diretas feitas com lisímetro. O resultado mostrou excelente correlação entre os dois métodos, mostrando que a percolação da água no solo pode ser prenunciada por técnica tensiométrica.

2.3. Variabilidade e tempo de resposta do tensiômetro

O tempo de resposta do instrumento, entendido como o tempo necessário para o equilíbrio de energia da água no tensiômetro com a água no solo, foi estudado por KLUTE & GARDNER (1962). Para eles, a resposta do tensiômetro às mudanças ~~de~~ de potencial mátrico da água no solo é dependente da sensibilidade do medidor (manômetro), da condutância hidráulica da cápsula porosa e da condutividade hidráulica do solo no qual o instrumento está instalado. Portanto, características relacionadas ao aparelho e relacionadas ao solo estão envolvidas no controle do tempo de

resposta do instrumento. Esses pesquisadores fizeram uma análise matemática dos aspectos envolvidos no processo e mostraram ser possível o cálculo do tempo de resposta do tensiômetro, concluindo que esse tempo é maior quando o fator limitante é a condutividade hidráulica do solo do que quando os fatores limitantes são aqueles relacionados ao instrumento. Estudos detalhados sobre esses aspectos também foram feitos por TOWNER (1980).

VILLAGRA et al. (1988) correlacionaram dados de tensiometria e variabilidade espacial do solo; investigaram a variabilidade das leituras relativas ao instrumento e, também, tempo de resposta. Os resultados para tempo de resposta do instrumento foram semelhantes aos encontrados por KLUTE & GARDNER (1962), isto é, maior é o tempo necessário para atingir o equilíbrio quanto menor for o potencial. Para VILLAGRA et al. (1988) o tempo de 8 horas foi suficiente para que o potencial mátrico da água no tensiômetro passasse de 0 (após a fluxagem) para -50kPa.

Para verificar o tempo de resposta de um sistema portátil tensiômetro/transdutor, MULLINS et al. (1986) instalaram um experimento no qual utilizaram tensiômetros com manômetro de mercúrio e com medidor de vácuo do tipo Bourdon. Os tensiômetros foram instalados em caixas de metal, no laboratório. No momento de cada leitura, tensiômetros portáteis com transdutores acoplados eram introduzidos no solo às mesmas profundidades dos tensiômetros já instalados e as leituras eram feitas. As medidas eram feitas até que os valores de potencial dos tensiômetros portáteis fossem equivalentes

àqueles dos tensiômetros previamente instalados. Os resultados mostraram que o tempo para que isso ocorresse variou de alguns minutos para potenciais maiores que -5kPa até mais de duas horas para potenciais menores que -30kPa. Do ponto de vista prático isso significa que o tensiômetro portátil apresenta leituras confiáveis apenas quando o solo se encontra bastante úmido. A inserção do tensiômetro no solo provoca, em maior ou menor magnitude, uma deformação do solo circundante da cápsula, de modo que algum tempo é necessário para que haja um equilíbrio da água dessa região com aquela da zona não perturbada do solo.

Um aumento na velocidade de resposta do tensiômetro pode ser conseguida pelo uso de transdutores de pressão (KLUTE & PETERS, 1962; RICE, 1969). Isso é essencial quando as variações na pressão da água no solo ocorrem muito rapidamente, como durante a infiltração da água no solo ou durante a evapotranspiração. Contudo, TOWNER (1982), afirma que o tempo de resposta é marcadamente influenciado pelo tensiômetro em si, ou seja, pelo tempo necessário para que a pressão no tensiômetro entre em equilíbrio com a pressão no transdutor. Para o autor, em condições de campo, a resposta não é tão rápida como a que se tem conseguido com as medidas com transdutores em água livre.

Estimativas confiáveis do potencial mátrico da água no solo usando poucos tensiômetros são difíceis de serem obtidas por causa da grande variabilidade espacial dessa propriedade do solo, de modo que muitas medidas devem ser

tomadas para se ter uma média aceitável. Por outro lado, monitorar o potencial mátrico da água em numerosos locais dentro de um campo não é factível, devido a limitações econômicas e práticas.

A variabilidade espacial do solo foi considerada como importante fator a ser considerado quanto se utiliza tensiômetro para medir o potencial da água no solo (VILLAGRA et al., 1988), uma vez que a variância total dos valores de potencial foi devida muito mais à variabilidade do solo do que do instrumento.

Resultados semelhantes foram observados por HENDRICKX e WIERENGA (1990) em experimento com pimenta sob regime de irrigação por gotejamento. Numa área de 0,15ha recebendo o mesmo volume de água eles observaram variações nos valores de potencial mátrico, as quais foram atribuídas à variabilidade espacial do solo. Eles verificaram também que a variância nas leituras do tensiômetro foi maior quando o solo estava seco.

A variabilidade nos valores de potencial mátrico medidos com tensiômetros pode estar associada também ao momento da leitura. THOMAS e PHILLIPS (1991) fizeram medidas tensiométricas antes, imediatamente após, 30 minutos após e 24 horas após uma irrigação de 50mm aplicada em 90 minutos. As leituras feitas antes e 24 horas após a irrigação apresentaram-se estáveis. As leituras feitas imediatamente após e 30 minutos após a irrigação foram variáveis. À mesma profundidade, encontrou-se valores de potencial desde negativos até positivos. Foram coletadas amostras de solo e

essas mostraram que 13,5mm de água, do total de 50mm aplicados, estavam no solo em seus 60cm iniciais logo após a irrigação e que, 24 horas após a irrigação, toda a água aplicada já havia drenado para profundidades além de 60cm.

HENDRICKX et al. (1994) avaliaram o efeito do tamanho da cápsula porosa do tensiômetro sobre a variabilidade dos valores de potencial mátrico medidos, utilizando três diferentes tamanhos de cápsula, denominadas pequenas, médias e grandes (4.8, 42.3 e 88.3cm² de área superficial externa, respectivamente). O aumento no tamanho da cápsula reduziu a variabilidade nos valores de potencial, sugerindo que a cápsula de tamanho médio, extensivamente usada na maioria dos programas de irrigação, ainda é muito pequena, causando variabilidade relativamente alta, devendo ser substituída por cápsulas de tamanhos maiores.

2.4. Medidas do potencial mátrico da água com diferentes tipos de manômetros

A facilidade de instalação e a habilidade de fornecer uma medida direta do "status" da água no solo tornaram o tensiômetro um instrumento muito útil no monitoramento da água no solo, em condições de campo (MARTHALER et al., 1983). No entanto, apesar dessas vantagens, o seu uso em programas de irrigação não tem sido tão intenso quanto o que deveria ser esperado. Uma das razões para isso é o custo dos tensiômetros equipados com medidores de pressão do tipo Bourdon, que, quando usado em grande

quantidade, é alto; além disso, esse tipo de medidor de pressão danifica-se com facilidade e requer cuidadosa manutenção. Tensiômetros equipados com manômetros de mercúrio, por outro lado, são baratos e sensíveis, mas requerem considerável manutenção em condições de campo e apresentam problemas relacionados à saúde e riscos de poluição ambiental. Isso tem conduzido os pesquisadores a tentarem formas outras de determinar o potencial mátrico da água no solo utilizando o tensiômetro associado a outros medidores de pressão e/ou tensão.

Sistemas tensiômetro/transdutor de pressão têm sido utilizados para medir a pressão da água nos poros do solo e a distribuição do gradiente hidráulico tanto em campo como em laboratório.

Um transdutor elétrico de pressão foi construído por THIEL et al. (1963) para medir pressões hidrostáticas em meio poroso. O princípio de funcionamento do transdutor foi centralizado na deflexão de um diafragma circular de aço inoxidável em função das pressões aplicadas. Uma equação foi desenvolvida para relacionar a pressão da água com as propriedades geométricas e condições de pressão do diafragma. Um transformador diferencial linearmente variável foi usado como sensor da deflexão do diafragma. Conhecendo-se a magnitude de uma unidade de deflexão e a faixa total a ser medida, um sensor elétrico é utilizado como indicador. O transdutor deve ser calibrado antes da instalação. A curva de calibração é feita plotando-se a saída elétrica (volts) versus pressão aplicada.

MARTHALER et al. (1983) construíram e utilizaram um sistema tensiômetro/transdutor, o qual consistia de um transdutor de pressão conectado ao tensiômetro através de uma agulha de seringa, tendo um registrador digital. A agulha era introduzida através de uma tampa de borracha presente na extremidade superior do tensiômetro. A pressão do ar numa pequena câmara deixada abaixo da tampa de borracha equilibrava-se com a pressão na água no tensiômetro, sendo mostrada no registrador digital. Para os autores, o uso desse tipo de transdutor permite uma manutenção mais rápida e mais fácil do instrumento do que quando se usa manômetro de mercúrio, além de diminuir a influência da temperatura e a chance de danos mecânicos.

NYHAN & DRENNON (1990) utilizaram transdutores de pressão e um sistema computadorizado de obtenção de dados acoplado ao tensiômetro para automatizar a medida do potencial mátrico aumentando, assim, a velocidade de tomadas de leituras, possibilitando se fazer medidas em intervalo de tempo mais curto com maior eficiência no manuseio e na análise dos dados.

A medida do potencial mátrico da água no solo com tensiômetros foi efetuada por LONG (1984), utilizando transdutores de vácuo nos quais as leituras de voltagem de saída relacionavam-se linearmente com a tensão da água no interior do tensiômetro. Além disso, um processador de dados, acoplado ao sistema, foi programado para esquadrinhar os transdutores a intervalos selecionados e registrar as informações em fita cassete. As informações eram,

posteriormente, transferidas para um computador para cálculo e plotagem do potencial mátrico versus tempo. Esse sistema tem a vantagem de permitir que várias leituras possam ser feitas por dia em um número grande de tensiômetros, essencial em estudos do movimento da água no solo. O sistema mostrou-se adequado para o uso sob condições de campo.

Para LONG (1982), o transdutor de pressão é capaz de fazer medidas da pressão dentro do tensiômetro com uma exatidão suficiente para tornar o manômetro de mercúrio obsoleto. O modelo de transdutor testado por ele permitiu leituras em milivolts, fornecendo assim leitura de pressão com uma precisão equivalente a 0,2cm de água. Sensibilidade semelhante já havia sido observada por KLUTE & PETERS (1962), os quais conseguiram detectar variação na pressão da água da ordem de 0,2 a 0,3cm de água. No entanto, TROTTER (1984) considera temerosa a recomendação de uso do transdutor baseada apenas na precisão de saída de voltagem do instrumento, pois essa pode variar com o tempo, temperatura, estímulo de voltagem e pela pressão aplicada.

GAUSSOIN et al. (1990) compararam o desempenho de tensiômetros com manômetros de mercúrio com sistema tensiômetro/transdutor de pressão em solo cultivado com grama, no qual os tensiômetros foram instalados superficialmente, entre 5 e 10cm de profundidade, encontrando uma relação linear entre os resultados, com coeficiente de determinação da ordem de 0,97, mostrando a adequabilidade do uso de transdutores.

Como mostrado no trabalho de MARTHALER et al. (1983) o sistema tensiômetro/transdutor de pressão tem a característica de diminuir o efeito da temperatura sobre as medidas. Os resultados obtidos por NYHAN e DRENNON (1990) também se mostraram independentes das condições de pressão atmosférica e de variação na temperatura do ambiente, enquanto que um declínio lento, porém constante, na pressão com o aumento na temperatura de 0 a 50 °C foi observado por Van Der ELSEN e BAKKER (1992).

Para LOWERY et al. (1986), o uso inicial de transdutores de pressão limitou-se a estudos de laboratório devido a problemas de temperatura, custos e materiais elétricos associados. Eles conduziram um experimento em campo para testar o efeito da temperatura sobre os valores de potencial mátrico com transdutores de pressão e observaram que pouco efeito foi evidenciado sobre os resultados com flutuações de temperatura de 10 a 30 °C, mantendo-se o potencial constante. Tensiômetros do tipo Bourdon foram utilizados para efeito de comparação dos resultados durante 29 dias e nenhuma diferença significativa foi observada entre os potenciais determinados pelo tensiômetro de Bourdon e pelo transdutor de pressão.

NYHAN et al. (1987) encontraram variações nos valores de potencial mátrico obtidos com tensiômetros acoplados a transdutores de pressão e tensiômetros convencionais, sob condições de campo, quando comparados com os resultados obtidos pelos mesmos instrumentos sob condições de temperatura controlada. As variações nos valores

de potencial acompanharam as variações diárias de temperatura, sendo que essas variações foram maiores nas profundidades de 30 e 60cm do que na profundidade de 220cm. Como se sabe, a amplitude de variação da temperatura no solo é maior em profundidades menores.

Transdutores de pressão em conjunção com tensiômetros e tensiômetros do tipo Bourdon foram testados sob pressões constantes de 0, -25, -50 e -75kPa e temperaturas de 5, 15, 25 e 48 °C em câmara controlada (AZOOZ e ARSHAD, 1994). As leituras foram tomadas em mV no sistema tensiômetro/transdutor e em kPa no tensiômetro de Bourdon. Houve declínio gradual nas leituras dos dois sistemas com o aumento da temperatura, exceto no tensiômetro de Bourdon à pressão constante de 0kPa, visto que, nesse caso, nenhum vácuo foi criado dentro do tensiômetro. Para os autores, isso significa que, para apresentarem resultados corretos, esses sistemas devem ser ajustados à temperatura sob a qual eles serão usados.

Em experimento de laboratório WATSON e JACKSON (1967) utilizaram um sistema tensiômetro/transdutor e observaram que o mesmo foi sensível às variações na temperatura ambiente, pois essas flutuações provocaram variação na pressão registrada pelo transdutor.

O uso de transdutor portátil para ser acoplado ao tensiômetro no momento da leitura foi examinado por CRESSWELL (1993). Ele observou que a conexão do transdutor ao tensiômetro via agulha de seringa introduzida na tampa de borracha do instrumento provocou mudanças na

pressão no seu interior, de tal forma que um tempo de até 120 minutos foi necessário para que o reequilíbrio com a pressão original (antes da introdução da agulha) fosse atingido. Como em resultados já anteriormente observados, esse tempo foi maior para potenciais menores. Ele observou ainda que esse tempo é menor com o aumento no tamanho da câmara de ar deixada no interior do tensiômetro. Para efeito prático, o autor sugeriu que as leituras fossem feitas no momento da conexão do transdutor e, posteriormente, se fazer a correção através de curvas padrões de reequilíbrio previamente determinadas.

Desde o advento do tensiômetro, admite-se que seu funcionamento só é perfeito se ele for mantido absolutamente cheio de água, sem a presença de ar. Por isso foi sempre recomendado o uso de água fervida nos tensiômetros. CAMARGO et al. (1982), através de observações em tensiômetros transparentes verificaram que, mesmo com o uso de água fervida, havia a formação de câmara gasosa no alto da coluna do líquido, que crescia com o aumento das tensões acusadas pelo manômetro. Quando o tensiômetro era fluxado, na tentativa de eliminar a câmara gasosa, essa se refazia em poucos dias. Essa câmara sugeriu a possibilidade de se estimar a tensão no sistema baseando-se simplesmente na altura da mesma. Nesse trabalho, CAMARGO et al. (1982) mediram o potencial da água no solo através do manômetro de mercúrio ao mesmo tempo em que liam a altura da câmara de ar que se formava, encontrando uma relação hiperbólica entre a altura da câmara de ar e o potencial mátrico, concluindo haver possibilidade de uso desse tensiômetro, dispensando-se o uso do mercúrio metálico.

Uma análise teórica do tensiômetro de câmara de ar foi feita por VILLA NOVA et al. (1989), na qual foram consideradas variáveis climáticas que influenciam a resposta do instrumento. Os autores propuseram um modelo matemático para o cálculo do potencial mátrico a partir da altura da câmara no momento da leitura, levando-se em conta a câmara inicialmente deixada no tensiômetro.

VILLA NOVA et al. (1992), fizeram estudos comparativos entre tensiômetro de câmara de ar e de manômetro de mercúrio em dois tipos diferentes de solos, no laboratório, usando câmara inicial de 3,0cm. Observaram equivalência entre os resultados dos dois tipos de tensiômetro e recomendaram o uso do tensiômetro de leitura direta para programas de irrigação, devido a sua simplicidade e baixo custo.

Testes com tensiômetros de câmara de ar foram feitos por TOKUNAGA & SALVE (1994), os quais apontaram como vantagens desse tipo de tensiômetro a possibilidade de poder fazer medidas tensiométricas a potenciais inferiores a -90kPa (valor frequentemente associado ao limite de funcionamento do tensiômetro convencional), facilidade de leitura e baixo custo.

3. MATERIAL E MÉTODOS

3.1. Teste das cápsulas porosas

As cápsulas porosas utilizadas na confecção dos tensiômetros foram testadas quanto à pressão de borbulhamento e condutância hidráulica. O primeiro teste objetivou eliminar cápsulas danificadas, nas quais o borbulhamento de ar ocorreu a pressões inferiores a 1 atmosfera, aproximadamente a pressão máxima de funcionamento do instrumento. O segundo teste teve como objetivo a uniformização das cápsulas, a fim de que o tempo de resposta dos tensiômetros fosse o mais semelhante possível.

Para o teste de pressão de borbulhamento as cápsulas foram previamente saturadas com água e, posteriormente, conectadas a um sistema de pressão. Foram então submetidas à pressão de 1 atm., sendo considerada adequadas para uso aquelas que suportaram tal pressão, ou seja, aquelas que não permitiram a passagem de ar pelos seus poros quando submetidas a essa pressão.

Na verificação da condutância hidráulica foi utilizado o método de carga decrescente, o qual consiste na determinação do tempo necessário para que uma coluna de água que atua sobre a cápsula caia de alturas previamente

determinadas, observada em tubo transparente. A condutância hidráulica é calculada pela equação:

$$\kappa = a \cdot \ln(H_1/H_2) / T_2 - T_1 \quad (3.1)$$

onde: κ = condutância hidráulica (cm^2/s)

a = área da secção transversal do tubo (cm^2)

H_1 e H_2 = Alturas da coluna de água, ou seja, potenciais totais ($\text{cm H}_2\text{O}$) nos tempos T_1 e T_2 , respectivamente.

T_1 e T_2 = intervalo de tempo que a coluna de água no tubo leva para cair de H_1 para H_2 .

3.2. Confeção dos tensiômetros

3.2.1. Tensiômetro com manômetro de mercúrio

Os tensiômetros com manômetro de mercúrio foram construídos utilizando-se tubos de PVC, com diâmetro interno de $\frac{3}{4}$ de polegada (1,905cm). Numa extremidade do tubo fez-se a colagem da cápsula, utilizando-se cola araldite. Próximo à extremidade oposta à que se colou a cápsula foi feito um furo para a introdução do “espaguete” de plástico flexível de 0,2cm de diâmetro interno, o qual interliga o sistema tubo/cápsula ao depósito de mercúrio. O “espaguete” foi colado ao tubo de PVC para evitar a entrada de ar no sistema. A extremidade oposta à cápsula foi vedada por tampa removível, com rosca e junta de borracha do tipo “o-ring”.

Para uso nos experimentos de laboratório os tensiômetros construídos apresentavam o mesmo tamanho, enquanto que para o experimento de campo os tensiômetros apresentavam tamanhos variados, em função das três profundidades de instalação (15, 35 e 150cm).

3.2.2. Tensiômetro de câmara de ar

Os tensiômetros de câmara de ar foram construídos de forma idêntica àquela do tensiômetro com manômetro de mercúrio, com duas modificações: (a) ausência do “espaguete”, e (b) na extremidade oposta à cápsula porosa foi conectado um tubo de plástico transparente com diâmetro interno de 3/8 de polegada (0,952cm), de 50cm de comprimento, no qual se pode facilmente fixar uma altura inicial da câmara de ar e se verificar as modificações na altura da câmara, causada pela saída de água do instrumento para o solo. A vedação da extremidade desse tubo transparente foi feita, como no caso anterior, com tampa removível, com rosca e junta de borracha do tipo “o-ring”.

3.2.3. Tensiômetro com duplo manômetro

Com o objetivo de se verificar a resposta dos dois tipos de manômetros a um único estímulo exercido sobre a cápsula porosa, foi construído um tensiômetro de duplo manômetro. Este foi construído juntando-se os procedimentos

de construção dos dois anteriores. O tamanho total desse tensiômetro foi de 84,3cm.

3.3. Condução dos experimentos

3.3.1. Experimento de laboratório com tensiômetro de duplo manômetro

Este experimento foi conduzido no laboratório de Física do Solo do Centro de Energia Nuclear na Agricultura da Universidade de São Paulo - CENA/USP.

O tensiômetro foi colocado sobre um balcão, fixado verticalmente por um suporte de ferro. A cápsula ficou exposta ao ar, perdendo água por evaporação, de acordo com as condições ambientais. A cubeta de mercúrio foi fixada a um suporte de ferro, a 62cm do centro da cápsula porosa. A câmara inicial utilizada tensiômetro de de câmara de ar foi de 3cm. Após a completa saturação dos poros da cápsula com água foram iniciadas as leituras.

Várias séries de leituras foram tomadas nos dois manômetros. As leituras foram feitas de hora em hora durante o dia. Utilizou-se régua com precisão de 1mm para medir tanto a altura da coluna de mercúrio quanto a altura da câmara de ar. No final de cada tarde uma série era concluída e a cápsula porosa do tensiômetro era imersa em água, retornando-se à condição inicial e, no dia seguinte, uma nova série era iniciada. Algumas vezes a série não foi concluída ao final da tarde e as leituras tomadas no dia seguinte eram consideradas na série do dia anterior.

3.3.2. Experimento de laboratório com tensiômetros de manômetros individuais

Este experimento foi conduzido no laboratório de Física do Solo do Centro de Energia Nuclear na Agricultura da Universidade de São Paulo - CENA/USP, com o objetivo de se verificar o comportamento do tensiômetro de leitura direta em comparação com aquele do tensiômetro convencional com manômetro de mercúrio, sob condições controladas de temperatura e em solo homogêneo.

Os tensiômetros de mercúrio e de câmara de ar foram instalados a 8cm de profundidade, com 5 repetições, em fila indiana, alternados e distanciados de 5cm um do outro, num total de 10 tensiômetros. O solo utilizado foi uma Terra Roxa Estruturada do campus da Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz" da Universidade de São Paulo - ESALQ/USP. A amostra de solo foi coletada, seca ao ar, destorroada e tamizada em malha de 2mm de diâmetro. O material do solo, com diâmetro menor que 2mm, foi colocado em vaso de cimento de 10cm de largura, 110cm de comprimento e 15cm de profundidade. Os tensiômetros de leitura direta tinham 84cm de comprimento. Nos tensiômetros de manômetro de mercúrio a distância entre o reservatório de mercúrio e o centro da cápsula foi de 48cm.

Após a instalação dos tensiômetros o solo foi umedecido. Os tensiômetros foram fluxados, iniciando-se as leituras. Várias séries de leituras foram feitas; em algumas

delas as leituras foram feitas a cada hora. Em outras, as leituras foram feitas diariamente. Quando o potencial mátrico do solo atingia valores próximos a -85kPa era feito o reumedecimento do solo, iniciando-se uma nova série de leituras.

3.3.3. Experimento de campo

Um experimento de campo foi conduzido no campus da Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz” da Universidade de São Paulo - ESALQ/USP, na cidade de Piracicaba, SP. Piracicaba situa-se nas coordenadas geográficas de $22^{\circ}42'$ de latitude sul e $47^{\circ}38'$ de longitude oeste e altitude de 540m. O clima da região, na classificação climática de Köppen, é do tipo Cwa, isto é, subtropical úmido, com três meses mais secos (junho, julho e agosto), chuvas de verão, seca de inverno, temperatura média do mês mais quente superior a 22°C e a do mês mais frio inferior a 18°C . Nesse experimento esperou-se testar o desempenho do tensiômetro de câmara de ar, comparando-a com aquela do tensiômetro convencional, nas condições naturais de clima e solo.

Os tensiômetros foram instalados em uma Terra Roxa Estruturada, em área coberta por seringueira de 8 anos, próximo à estação meteorológica, num total de 90 tensiômetros, dos quais 45 com manômetro de mercúrio e 45 de câmara de ar. A distribuição espacial foi em blocos casualizados, com 30 tensiômetros cada, num total de 3 blocos, distanciados de, aproximadamente, 50 metros entre si. Em cada bloco (Figura

1), os tensiômetros foram instalados em 3 profundidades (15, 35 e 150cm), com 5 repetições. As repetições distanciavam-se em 1m e os pares (mercúrio vs leitura direta) em 0,2m.

Os tensiômetros foram introduzidos no solo de forma vertical, em escavações feitas com trado de rosca e com pistão, ambos com diâmetro um pouco menor que o diâmetro do tubo de PVC dos tensiômetros. A escavação foi umedecida com água no momento da introdução dos tensiômetros, com o objetivo de facilitar essa introdução. O menor diâmetro da escavação em relação ao diâmetro do tubo dos tensiômetros propiciou um melhor contato da cápsula porosa com o solo, condição exigida para um bom funcionamento do instrumento. Na superfície do solo, o tubo do tensiômetro foi circundado com borracha, a qual evitou que qualquer fluxo preferencial ocorresse da superfície do solo até a cápsula pela parede externa do tubo.

Figura 1 - Croqui de um bloco no experimento de campo

Os tensiômetros tinham tamanhos variados, em função da profundidade de instalação. Os tensiômetros de

3.4. Cálculo do potencial da água no solo

3.4.1. Tensiômetro com manômetro de mercúrio

Para esse tipo de tensiômetro (Figura 2) o cálculo do potencial mátrico da água no solo foi realizado com o uso da equação seguinte, já consagrada:

$$\psi_m = (-12,6h + h_c + z) \cdot 0,1 \quad (3.2)$$

na qual

ψ_m = potencial mátrico (kPa)

h = Altura de equilíbrio da coluna de mercúrio (cm)

h_c = altura da superfície do mercúrio no reservatório até a superfície do solo (cm)

z = profundidade de instalação do tensiômetro (cm)

O fator 0,1 foi utilizado para transformar os valores de potencial mátrico de cm de H₂O em kPa.

3.4.2. Tensiômetro de câmara de ar.

No tensiômetro de leitura direta (figura 3) o potencial mátrico da água no solo foi calculado pela utilização da equação desenvolvida por VILLA NOVA et al. (1989), cuja dedução pode ser assim demonstrada:

Um equilíbrio de forças dever ser estabelecido entre as pressões que atuam sobre a cápsula porosa do tensiômetro nos sentidos de dentro para fora e de fora para dentro do tensiômetro.

De fora para dentro atua a pressão atmosférica local. De dentro para fora atuam as pressões devidas à interação da água com o solo (potencial matrico, ψ_m), a pressão hidrostática devida à coluna de água dentro do instrumento (dada pela diferença entre a altura total do instrumento e a altura da câmara no momento da leitura ($H - h_c$) e a pressão do gás na câmara no momento da leitura (P'). No equilíbrio tem-se:

$$P_{atm} = \psi_m + (H - h_c) + P'$$

A relação entre P' e a pressão inicial, ou seja, do momento do fechamento do tensiômetro é estabelecida pela equação geral dos gases perfeitos:

$$P.V/T_i = P'.V' / T_f$$

$$P' = P.V.T.f / V'.T_i$$

V e V' são dados, respectivamente, pelo produto das alturas das câmaras inicial e do momento da leitura pela área de secção transversal do tubo. Assim:

$$P_{atm} = \psi_m + P.h.T_f / h_c.T_i + (H - h_c)$$

A pressão inicial P é igual à pressão atmosférica local, pois ela é a pressão do momento de fechamento do tensiômetro, de tal modo que:

$$\psi_m = P_{atm} - (P_{atm} \cdot h \cdot T_f / h_c \cdot T_i) + (H - h_c)$$

e

$$\psi_m = (-P_{atm} [(1 - h/h_c) \cdot (T_f/T_i)] + (H - h_c)) \cdot 0,1 \quad (3.3)$$

onde

ψ_m = potencial mátrico (kPa)

p_{atm} = pressão atmosférica média local (cm H₂O)

h = Altura da câmara inicial (cm)

h_c = Altura da câmara de equilíbrio, por ocasião da leitura (cm)

T_i e T_f = Temperatura no momento do fechamento do tensiômetro (condição inicial) e no momento da leitura, respectivamente (K)

H = Comprimento total do tensiômetro (cm)

O fator 0,1 foi utilizado para transformar os valores de potencial mátrico de cm de H₂O em kPa.

Figura 2 - Modelo esquemático do tensiômetro convencional (manômetro de mercúrio).

Figura 3 - Modelo esquemático do tensiômetro de câmara de ar

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1. Experimento de laboratório com tensiômetro de duplo manômetro

A resposta do tensiômetro de câmara de ar foi observada inicialmente no laboratório, durante 10 dias, com tensiômetro de duplo manômetro. A variação do potencial mátrico com o tempo, durante esse período, está apresentada na Tabela 1 e na Figura 4. Os valores de potencial mátrico positivos na primeira leitura (11 de maio, 14 horas) nos dois tipos de tensiômetro são devidos ao fato de que o equilíbrio ainda não havia sido alcançado, isto é, nem a câmara nem a coluna de mercúrio haviam compensado a coluna de água dentro do tensiômetro, a qual atua exercendo uma pressão sobre a cápsula.

O tempo para que o potencial mátrico no tensiômetro com manômetro de câmara de ar seja correspondente àquele do manômetro de mercúrio foi de aproximadamente duas a três horas, como pode-se perceber dos resultados dos dias 11 e 17 de maio, quando a cápsula do tensiômetro foi reumedecida através de sua introdução em água, tendo o potencial aproximado-se de zero, e novamente exposta às condições ambientais.

Na Figura 5 é mostrada a correlação entre os potenciais mátricos obtidos pelos dois tipos de manômetro. O alto coeficiente de correlação (0.99) denota quão relacionados eles estão. No entanto, para esse caso em que os dois manômetros estão no mesmo tensiômetro, dever-se-ia esperar uma correlação de 1. Contudo, apesar de se assemelharem as respostas dos dois tipos de manômetro, suas naturezas diferentes promovem essas pequenas diferenças, o que é um fato absolutamente aceitável.

Os potenciais obtidos pelo tensiômetro com manômetro de câmara de ar são, quase que invariavelmente, ligeiramente mais negativos do que os obtidos pelo manômetro de mercúrio. TAMARI et al. (1993) sugerem que a pressão na câmara deve ser corrigida da pressão de saturação de vapor d'água, a qual é da ordem de 2kPa, a 20 °C. Existe um outro aspecto a ser considerado com bastante cuidado. Devido ao diâmetro do tubo transparente, um menisco é formado na interface água/ar dentro do tensiômetro, de modo que a leitura da altura da câmara deve ser feita com bastante cuidado, devendo-se sempre fazê-la no mesmo ponto em relação ao menisco, visto que, para altos valores de potencial mátrico, um pequeno erro na leitura da altura da câmara provoca um erro consideravelmente grande no valor do potencial; para baixos valores de potencial mátrico esse problema não é tão crucial, podendo-se considerar como desprezível o erro provocado no valor de potencial mátrico. Embora TOKUNAGA & SALVE (1994) tenham apontado como vantagem desse tipo de manômetro a facilidade de leitura, esse é um aspecto que merece atenção

Tabela 1 - Valores de Potencial mátrico obtidos nos tensiômetros de duplo manômetro (mercúrio e câmara de ar) no experimento de laboratório.

Data/hora	- Potencial Mátrico	
	Pot Hg	Pot Ar
	----- kPa -----	-----
11/5 - 14h	-1.2	-7
15h	1.3	0.6
16h	6.4	8.0
17h	10.1	12.2
19h	17.5	22.7
12/5 - 8h	45.6	54.8
9h	46.7	55.5
10h	47.9	57.1
14h	51.3	61.8
15h	51.5	62.8
13/5 - 9h	62.8	73.5
15/5 - 9h	55.5	57.5
10h	57.2	59.3
14h	58.9	62.3
15h	59.8	63.4
16h	60.6	64
17/5 10h*	2.6	-1.3
11h	7.53	3.71
13h	22.3	22.2
15h	35	36.7
16h	42.6	44.8
18/5 - 9h	65.7	69.3
14h*	4.8	1.2
19/5 - 10h	60	61.8
20/5 - 10h	72.2	76.6

* Reumedecimento da cápsula.

Figura 4. Potencial mátrico versus tempo, tensiômetro de duplo manômetro, experimento de laboratório.

Figura 5. Relação entre potencial mátrico medido por tensiômetro de duplo manômetro (mercúrio e câmara de ar), no laboratório.

redobrada ao se lidar com esse tipo de manômetro.

Considerando-se que a capacidade de campo corresponde a um potencial mátrico de -10kPa , o que é razoável dentro da imperfeição na definição do termo, e considerando-se como referência o potencial mátrico medido no manômetro de mercúrio, observa-se, às 17 horas do dia 11 de maio, uma diferença de cerca de 20% entre os potenciais lidos nos dois manômetros, -10.1kPa no tensiômetro de mercúrio e -12.2kPa no de câmara de ar. Essa diferença pode ser causada por um erro de 1mm na leitura da câmara, de 36 para 37mm, o que é plenamente possível. Para se errar os mesmos 2kPa, nessa faixa de potencial, no tensiômetro de mercúrio, ter-se-ia que errar em aproximadamente 2mm na leitura da coluna de mercúrio. Na faixa de potencial mais baixo esse possível erro na leitura da altura da câmara torna-se menos importante. Por exemplo, no dia 15 de maio, às 16 horas, a diferença entre os potenciais lidos nos dois tipos de manômetro foi de 3,6kPa (-64kPa no de câmara de ar e -60.6kPa no de mercúrio), representando, no entanto, uma diferença de 5%, bem menor do que aquela de 20% apresentada na faixa de alto potencial mátrico. Além disso, o valor de potencial de -64kPa foi obtido a partir de uma câmara de 115mm de altura. Para que esse potencial fosse igual ao obtido no manômetro de mercúrio, -60.6kPa , a altura da câmara deveria ser de 101mm, isto é, uma diferença de 14mm, um erro de leitura improvável.

Do ponto de vista prático, para efeito de controle de irrigação, essas pequenas diferenças mostradas pelo manômetro de câmara de ar, em relação ao manômetro de mercúrio, não devem significar a impossibilidade de seu uso

para tal fim. Em programas de irrigação usando tensiômetros para monitorar a umidade dos solos, vários outros aspectos estão envolvidos no processo, alguns com probabilidade de erros proporcionalmente maiores. Outrossim, na indicação do momento de irrigar, quando o potencial mátrico é baixo, a diferença entre os dois tipos de manômetro, como visto, é pequena, de modo que seu uso é factível.

4.2. Experimento em laboratório com tensiômetros com manômetros individuais.

O desempenho do tensiômetro com manômetro de câmara de ar foi observada sob condições de laboratório, em solo homogêneo colocado em vaso, durante 52 dias. Os resultados são mostrados na Tabela 2, e de forma gráfica na Figura 6. Nos dois casos, os valores apresentados de potencial mátrico representa a média das 5 repetições.

A resposta do tensiômetro com manômetro de câmara de ar nessas condições foi semelhante àquela do experimento anterior, ambos em laboratório. De um modo geral, o potencial mátrico medido com tensiômetros com esse tipo de manômetro apresentou valores ligeiramente menores do que os apresentados pelo tensiômetro com manômetro de mercúrio. Porém, em alguns dias, essa situação se inverteu, mostrando diferenças pontuais de umidade do solo, apesar da homogeneidade que se buscou alcançar. Esses resultados indicam, portanto, uma adequada resposta do tensiômetro com

manômetro de câmara de ar às mudanças no conteúdo de água no solo circundante à cápsula.

A correlação entre os valores de potencial mátrico obtidos pelos dois tipos de manômetro foi bastante alta como mostrado na Figura 7, indicada por um coeficiente de correlação da ordem de 0.98.

Pela Figura 6 percebe-se que, apesar de pequenas diferenças nos valores absolutos de potencial mátrico entre os dois tipos de manômetro, a semelhança das suas curvas denota uma igualdade de suas respostas, nessas condições em que foram testadas.

O tempo de resposta do tensiômetro de câmara de ar pode ser considerado, nessas condições experimentais, igual àquele com tensiômetro de duplo manômetro, embora as leituras tenham sido diárias - com exceção dos dias 10, 11 e 16 de maio onde foram feitas duas leituras no mesmo dia, e em algumas situações onde a leitura foi feita com até 4 dias de diferença - em contrapartida com as leituras horárias do experimento anterior. Percebe-se, no entanto, que no dia seguinte após o umedecimento do solo, os valores de potencial mátrico dos dois tipos de manômetro já se equivalem. A única exceção ocorreu no período de 14 a 25 de maio, onde a equivalência nos potenciais deu-se num lapso de tempo muito maior que um dia. Diante da regra geral de resposta, porém, não se deve atribuir esse fato a problemas relacionados ao tensiômetro em si, podendo-se, sim, conjecturar que, por algum motivo, as condições de umidade do solo na circunvizinhança das cápsulas possam ter promovido esse comportamento.

Tabela 2 - Valores médios de Potencial mátrico obtidos nos tensiômetros de manômetro de mercúrio e de câmara de ar, no experimento de laboratório (média de 5 repetições).

Data/hora	- Potencial Mátrico	
	Pot Hg	Pot Ar
	kPa	
06/mai	10.8	14.4
07/mai	16.2	19.8
08/mai	19.6	22.9
09/mai	27.6	30.9
10/mai	37.5	40.6
10/mai	40.6	44.4
11/mai	48.7	51.0
11/mai	48.5	53.8
12/mai	58.2	61.3
13/mai*	2.3	4.5
14/mai	2.6	4.5
15/mai	3.0	5.5
16/mai	3.4	3.2
16/mai	3.3	4.1
17/mai	3.6	3.2
18/mai	4.2	3.2
19/mai	4.8	2.2
20/mai	5.6	1.7
24/mai	9.1	8.4
25/mai	10.3	9.6
26/mai	11.8	11.6
29/mai	20.0	19.3
30/mai	23.7	23.8
31/mai	29.2	30.1
02/jun	44.9	47.6
05/jun	70.6	71.4
14/jun*	13.1	12.7
15/jun	19.4	20.7
16/jun	27.3	30.2
17/jun	40.4	41.6
19/jun	63.3	62.0
21/jun*	6.5	10.1
22/jun	8.1	10.8
24/jun	12.0	15.6
26/jun	20.0	23.9
27/jun	26.8	30.3
28/jun	36.3	40.2

* Reumedecimento do solo

Figura 6. Potencial mátrico versus tempo no experimento realizado no laboratório com tensiômetros com manômetros individuais (média de 5 repetições)

Figura 7. Relação entre potencial mátrico obtido por tensiômetros com manômetros de mercúrio e de câmara de ar, experimento de laboratório (média de 5 repetições).

A temperatura ambiente no laboratório permaneceu em torno de 24.5 °C durante o período de condução do experimento, de tal modo que essa componente não foi considerada na equação 3.3 para o cálculo do potencial mátrico nos tensiômetros com manômetros de câmara de ar. Assim, a equação 3.3 foi reduzida a:

$$\psi_m = (-p(1-h/h_c) + (H-h_c)) \cdot 0,1 \quad (4.1)$$

4.3. Experimentos sob condições de campo

O experimento no campo foi instalado e conduzido de acordo com as condições referidas no capítulo material e métodos. Para fins de cálculos e acompanhamento do potencial mátrico, no entanto, nem sempre foi possível a coleta de dados de todos os tensiômetros instalados, pois, em alguns momentos de leitura, um ou outro tensiômetro apresentava algum tipo de problema, tais como entrada de ar no sistema ou até mesmo a coluna de mercúrio se rompia e o tensiômetro deixava de funcionar. Na avaliação feita neste capítulo, utilizaremos-nos de alguns dados que julgamos mais consistentes, em função da menor variabilidade das repetições, e suficientes para explicar os resultados. O número de tensiômetros em funcionamento no momento da leitura é anotado. Os demais valores de potencial mátrico serão colocados em forma de apêndices, apenas para efeito de exposição do que foi observado ou para possível consulta que o leitor possa julgar necessária.

4.3.1. Período seco

Na primeira fase do experimento de campo, realizada no mês de setembro, um período de estiagem, o solo encontrava-se bastante seco. Por esse motivo, a coleta de dados tensiométricos nas profundidades de 15 e 35cm foi tomado apenas em um único dia (2 de setembro), pois os baixos teores de água no solo correspondiam a um potencial mátrico muito baixo, indo além da faixa de funcionamento do tensiômetro com manômetro de mercúrio. Seria possível continuar fazendo as medidas do potencial mátrico através do tensiômetro com manômetro de câmara de ar; isso, porém, não foi feito por causa da ausência dos dados comparativos de referência dos tensiômetros de mercúrio. A 150cm de profundidade, onde o solo permanecia úmido, o monitoramento do potencial foi feito durante 12 dias.

Na Figura 8.a observa-se o comportamento dos dois tipos de manômetros na medida do potencial mátrico da água (valores médios) no solo para o bloco I, 15cm de profundidade. Houve uma diminuição constante nos valores de potencial, igualmente medida pelos dois manômetros. O tensiômetro com manômetro de câmara de ar respondeu com rapidez equivalente ao de manômetro de mercúrio, pois na primeira leitura, uma hora após a fluxagem, eles apresentaram aproximadamente o mesmo potencial. Na leitura seguinte, duas horas após a fluxagem, o tensiômetro com manômetro de câmara de ar acusava um potencial ligeiramente mais negativo que o de manômetro de mercúrio, situação que permaneceu até o final

do dia, quando as leituras foram interrompidas devido aos baixos valores de potencial. Essa resposta é semelhante àquela encontrada sob condições de laboratório. Porém, em condições de campo, fatores ligados às propriedades hídricas do solo podem fazer com que a resposta mude pontualmente devido a variabilidade espacial do solo (VILLAGRA et al., 1988; THOMAS & PHILLIPS, 1991; HENDRICKX et al., 1994). A verdade desta afirmativa é confirmada pelos resultados observados no mesmo bloco I, à profundidade de 150cm, onde se deu o inverso, ou seja, o potencial lido com manômetro de mercúrio foi sempre menor que aquele lido com tensiômetros com manômetros de câmara de ar (Figura 8.b). Igual comportamento pode-se observar para a profundidade de 35cm no bloco II (Figura 8.c). Os coeficientes de correlação de 0.99 e 0.91 no bloco I, profundidades de 15 e 150cm, respectivamente, e de 0.99, a 35cm de profundidade no bloco II, mostrados na figura 9, revelam semelhanças entre os valores de potencial mátrico estimados pelos dois tipos de manômetros, podendo-se considerar que as pequenas diferenças verificadas entre eles são decorrentes muito mais das diferenças nas condições hídricas do solo do que de problemas inerentes aos instrumentos, não podendo, por isso, serem consideradas dentro de um nível de importância que invalidem o uso do tensiômetro com manômetro de câmara de ar no monitoramento do potencial mátrico da água no solo em situações nas quais um exagerado rigor de exatidão dessas medidas não seja necessário.

Como verifica-se na Figura 8.a e 8.c, o

Figura 8. Evolução do potencial mátrico no tempo. 8a e 8b correspondem às profundidades de 15 e 150cm, respectivamente, no bloco I. 8c corresponde à profundidade de 35cm, bloco II.

Figura 9. Relação entre potencial mátrico obtido por tensiômetro convencional e de câmara de ar. Experimento de campo, período seco.

potencial mátrico diminuiu ao longo do tempo até valores próximos a -70Kpa, sendo essas mudanças detectadas por ambos os manômetros. A 150 cm de profundidade (figura 8b), o potencial mátrico praticamente não variou ao longo dos 12 dias em que o monitoramento foi realizado. Também nesse caso o tensiômetro com manômetro de câmara de ar mostrou-se hábil

em responder a essa situação de umidade praticamente constante ao longo do tempo, de modo semelhante ao tensiômetro com manômetro de mercúrio.

4.3.2. Período úmido

A condução do experimento em condições de solo úmido foi feita em duas etapas distintas. A primeira se deu no período de 22 a 28 de novembro, logo após a ocorrência de uma chuva. A segunda foi realizada em janeiro, quando as precipitações pluviométricas foram mais freqüentes.

Da primeira fase vale ressaltar os resultados observados no bloco I, apresentados na Figura 10. A resposta dos dois tensiômetros (convencional e com manômetro de câmara de ar) foi praticamente a mesma para o período observado, nas três profundidades consideradas. Como não houve chuva durante o período de observação, o potencial mátrico diminuiu com o tempo nas profundidades de 15 e 35cm e os dois tipos de tensiômetros responderam de modo absolutamente equivalente.

Parte da água que deixava o solo nas profundidades de 15 e 35cm estava evapotranspirando e parte infiltrando para profundidades maiores do solo. Esse fato foi comprovado pelos tensiômetros instalados a 150cm de profundidade, nos quais o potencial mátrico foi aumentando nesse período, como pode ser verificado na Figura 10c, apontado pelas curvas referentes aos dois tipos de manômetro. Isto significa que o tensiômetro com manômetro de câmara de ar pode ser utilizado, assim como sugerido para o tensiômetro com manômetro de mercúrio, para

Figura 10. Evolução do potencial mátrico no tempo para o experimento de campo, primeiro período úmido. Bloco I (a) 15cm; (b) 35cm e (c) 150cm.

Figura 11. Relação entre potencial mátrico obtido por tensiômetro convencional e de câmara de ar. Experimento de campo, primeiro período úmido

estudos de fluxo de água em condições de solo não saturado (SINGH et al., 1988; BOOLTINK & BOUMA, 1991), também para armazenamento da água no solo e sua disponibilidade para as plantas (WERKHOVEN, 1992), para estudos de déficit hídrico (BEZERRA, 1995), entre outras aplicações. As equações de regressão e os coeficientes de correlação para esse período são mostrados na Figura 11.

Outra série de leituras foi feita durante o mês de janeiro quando, devido a pequenas e freqüentes chuvas, o solo permaneceu com elevado conteúdo de água. Dessa forma, pequenas variações no conteúdo de água e, conseqüentemente, nos valores de potencial mátrico, deveriam ser acusados pelos tensiômetros. Com esse objetivo foram feitas leituras horárias durante os dois primeiros dias do período.

Para esse período foram feitos os cálculos do desvio padrão e coeficiente de variação dos valores de potencial mátrico, a partir das repetições, para os três blocos e nas três profundidades. Algumas dessas situações serão aqui comentadas, outras serão colocadas na forma de apêndices.

Na Tabela 3 e Figura 12a são apresentados os resultados observados nos dois tipos de tensiômetros para o bloco I, 15cm de profundidade. Observa-se que, durante os dias 12 e 13 de janeiro, a umidade do solo decresceu lentamente, promovendo uma lenta diminuição do potencial mátrico; a partir do dia 16 o potencial decresceu de forma mais acentuada. Pela Figura 12a percebe-se que o comportamento dos dois tipos de tensiômetros foi semelhante e isto indica que, nesse caso, ambos foram adequados no monitoramento do potencial.

Tabela 3 - Média, desvio padrão e coeficiente de variação dos valores de potencial mátrico obtidos por tensiômetro de mercúrio e de câmara de ar, bloco I - 15cm de profundidade.

Data	Tensiômetro de Mercúrio				Tensiômetro de Câmara de Ar			
	N	Média	DesPad	CV	N	Média	DesPad	CV
		----- kPa -----		%		----- kPa -----		%
12/jan	5	1.5	0.13	8.8	5	1.1	0.15	13.0
12/jan	5	1.6	0.19	11.9	4	2.2	0.18	8.5
12/jan	5	1.9	0.23	11.9	4	3.1	1.31	41.9
12/jan	5	2.1	0.20	9.67	4	3.1	1.52	51.3
12/jan	5	2.3	0.23	10.0	4	3.9	0.96	24.5
12/jan	5	2.4	0.29	12.1	4	4.2	1.01	24.0
12/jan	5	2.5	0.27	11.0	4	3.3	1.08	32.7
13/jan	5	2.9	0.33	11.5	4	3.9	1.08	27.6
13/jan	5	2.9	0.32	11.2	4	3.6	0.14	3.9
13/jan	5	2.9	0.32	11.1	4	3.6	1.31	36.1
13/jan	5	3.0	0.37	12.3	4	3.9	1.24	31.5
13/jan	5	3.4	0.39	11.5	4	5.9	0.18	3.1
13/jan	5	3.5	0.42	12.0	4	5.7	1.81	31.9
13/jan	5	3.9	0.44	11.3	4	6.5	0.98	14.9
13/jan	5	4.3	0.73	16.8	4	7.5	1.13	15.0
13/jan	5	4.4	0.81	18.4	4	9.6	1.18	12.1
16/jan	5	18.3	9.27	49.1	4	16.8	3.47	16.5
17/jan	5	31.5	14.40	45.6	4	30.7	5.97	15.5
18/jan	5	41.9	16.10	38.3	4	42.4	7.82	14.7
20/jan	5	59.6	12.30	20.7	4	63.3	7.16	9.0

N - Número de tensiômetros em funcionamento no momento da leitura.

DesPad - Desvio Padrão

CV - Coeficiente de Variação

Figura 12. Evolução do potencial mátrico no tempo no experimento de campo, segundo período úmido. (a) bloco I, 15cm e (b) bloco II, 15cm.

Os coeficientes de variação apresentados na Tabela 3 estão, na sua grande maioria, dentro de uma faixa aceitável. Em alguns casos, porém, ocorreu uma variação bastante alta entre as repetições, nos dois tipos de tensiômetros. Não causam surpresa, no entanto, quando se trata da medida do potencial mátrico da água no solo, cuja variabilidade espacial é sabidamente muito alta. HENDRICKX & WIERENGA (1990) encontraram valores da ordem de 121.4% em uma área bem pequena.

Os valores de potencial mátrico obtidos a partir dos dois tipos de tensiômetros foram, algumas vezes, um tanto diferentes em termos absolutos, como é o caso verificado no bloco II, 15cm de profundidade, visto na Figura 12b. A propensão geral das curvas, como pode-se notar pela figura, é a mesma; no entanto, os valores de potencial mátrico calculados a partir do tensiômetro de câmara de ar são consideravelmente mais negativos. É possível que apenas a variabilidade espacial não explique totalmente esse comportamento, entretanto, sua contribuição certamente existe. O tensiômetro com manômetro de câmara de ar apresentou uniformidade entre as suas repetições, vistos seus baixos desvios padrão e coeficientes de variação (Tabela 4), indicando que eles estavam funcionando bem, do que se pode deduzir que seus resultados são corretos, apesar da diferença com relação ao tensiômetro convencional, com manômetro de mercúrio, que, nesse caso, apresentou coeficientes de variação bem mais altos.

Tabela 4 - Média, desvio padrão e coeficiente de variação dos valores de potencial mátrico obtidos por tensiômetro de mercúrio de câmara de ar, bloco II - 15cm de profundidade.

Data	Tensiômetro de Mercúrio				Tensiômetro de Câmara de Ar			
	N	Média	DesPad	CV	N	Média	DesPad	CV
		----- kPa -----		%		----- kPa -----		%
13/jan	4	3.2	0.4	15.1	4	6.3	1.1	17.8
13/jan	4	3.5	0.5	14.1	4	6.3	2.1	33.6
13/jan	4	3.8	0.5	15.5	4	7.7	1.2	16.5
13/jan	4	4.2	0.6	14.9	4	9.5	1.9	20.5
13/jan	4	4.4	0.6	14.4	4	10.8	1.1	10.9
13/jan	4	4.8	0.9	19.6	4	11.0	1.1	10.6
13/jan	4	5.2	1.1	21.6	4	11.5	1.1	10.1
13/jan	4	5.4	1.3	24.9	4	14.0	1.1	8.0
16/jan	5	14.3	6.0	42.1	4	22.3	1.8	8.2
16/jan	5	14.4	5.8	40.4	4	23.4	1.6	6.9
16/jan	5	14.6	5.6	38.2	4	25.2	1.6	6.4
16/jan	5	18.7	8.0	43.2	3	25.0	0.7	2.9
16/jan	5	17.0	6.1	35.8	3	26.4	0.7	2.6
16/jan	5	18.5	6.3	34.5	3	29.2	1.1	3.8
16/jan	5	20.2	6.7	33.6	3	31.7	1.6	5.0
16/jan	5	20.6	7.3	35.4	3	31.9	2.1	6.6
17/jan	5	25.2	11.2	44.7	3	32.7	2.9	9.0
18/jan	5	38.5	15.0	44.2	3	42.5	3.0	7.1
20/jan	4	49.4	20.3	41.1	3	57.0	3.5	6.2

N - Número de tensiômetros em funcionamento no momento da leitura.

DesPad - Desvio Padrão

CV - Coeficiente de Variação

4.4. Influência da temperatura sobre o comportamento do tensiômetro com manômetro de câmara de ar.

No capítulo revisão de literatura apontamos alguns resultados experimentais (MARTHALER et al., 1983; LOWERY et al., 1986; NYHAM et al., 1987; NYHAM & DRENNON, 1990; Van Der ELSEN & BAKKER, 1992) mostrando o efeito que a temperatura poderia exercer sobre a resposta de sistemas tensiômetro/transdutor de pressão. No tensiômetro com manômetro de câmara de ar, para o qual a equação de cálculo do potencial mátrico (equação 3.3) foi originada da equação geral dos gases perfeitos (VILLA NOVA et al., 1989), a temperatura exerce influência sobre a pressão na câmara, sendo, por isso, considerada na equação. Dessa forma, a temperatura foi anotada no momento do fechamento da câmara, por ocasião do fechamento dos tensiômetros, e no momento de cada leitura.

Analisemos aqui os mesmos casos considerados no item anterior, ou seja, 15cm de profundidade, blocos I e II, mostrados na Figura 13. Os resultados concernentes às profundidades de 35 e 150cm desses dois blocos e a duas profundidades do bloco III estão em forma de anexos. O objetivo é evitar repetitividade, uma vez que os resultados são comparáveis aos que serão aqui descritos.

Na Figura 13 (a e b) tem-se as curvas de potencial mátrico com e sem correção de temperatura ao longo do tempo, a temperatura inicial (fixa, pois ela é única, do momento de fechamento do tensiômetro) e a variação da temperatura lida

por ocasião de cada leitura da câmara de ar.

Consideremos algumas situações particulares. No dia 13 de janeiro às 15 horas, onde houve a maior diferença entre a temperatura de fechamento do tensiômetro (T_i) e do momento da leitura (T_f), Figura 13.a, a saber 295 e 306K, respectivamente. A diferença entre os valores de potencial mátrico com e sem correção foi bastante elevada, da ordem de 27% (-5.7 kPa contra -7.9 kPa). Deduz-se que, nessa faixa de alto potencial mátrico, a temperatura é um aspecto fundamental a ser considerado. Quando o potencial mátrico é muito baixo a influência da temperatura não foi tão marcante. Por exemplo, no dia 20 de janeiro, quando o potencial encontrava-se abaixo de -60 kPa, a diferença entre os valores corrigidos e não corrigidos foi da ordem de 0.6% para uma diferença de 4K (295K contra 299K). Mesmo se a temperatura nesse momento fosse da mesma magnitude daquela do dia 13 de janeiro, isto é, 306K, a diferença entre os potenciais seria de apenas 1.6%.

O resultado observado no bloco II (Figura 13.b) foi equivalente. A maior variação de temperatura foi de 13K, dia 16 de janeiro, promovendo diferença de 8.2% nos valores de potencial mátrico, próximo a -30 kPa. Em potencial baixo, inferior a -50 kPa, a diferença foi de 0.7% para uma variação de 4K. Caso a variação fosse a máxima, 13K, a diferença subiria para 2.3%.

Desse modo, sugere-se que, quando a temperatura variar acima de, por exemplo, 10K no período em que se monitora o potencial mátrico através de tensiômetro com manômetro de câmara de ar e o interesse reside em potenciais superiores a -10kPa, deve-se fazer a correção do potencial em

Figura 13. Potencial mátrico com e sem correção da temperatura e variação da temperatura no experimento de campo, segundo período úmido. (a) bloco I, 15cm e (b) bloco II, 15cm.

função da temperatura. Se, por outro lado, o interesse é em potenciais inferiores, pode-se plenamente dispensar o uso de termômetros, facilitando assim as operações e diminuindo-se os custos.

4.5. Sensibilidade do tensiômetro com manômetro de câmara de ar.

Em qualquer instrumento que se destine a medir alguma coisa, uma das características de fundamental importância é a sua sensibilidade. Em tensiometria, o manômetro deve ser sensível o suficiente para detectar pequenas variações no conteúdo de água no solo próximo à sua cápsula porosa. A sensibilidade do manômetro do tensiômetro é dada pela razão entre a variação na leitura manométrica e o volume de água que passa através da cápsula porosa (quer do tensiômetro para o solo quer no sentido inverso). Assim, um manômetro é tanto mais sensível quanto menor o volume de água que entra ou sai do tensiômetro capaz de promover uma modificação na escala de leitura que possa ser medida pelo operador.

Para se verificar a sensibilidade do tensiômetro com manômetro de câmara de ar utilizamos valores reais das dimensões do instrumento e dos potenciais obtidos nos experimentos de laboratório.

O tubo transparente do tensiômetro, no qual se lê a variação na altura da câmara de ar, tem um diâmetro interno de

0.952cm (ver capítulo material e métodos) e, portanto, uma secção transversal de 0.712cm^2 . Isto significa que a saída de 1cm^3 de água do tensiômetro para o solo acarreta numa variação de 14mm na altura da câmara. Considerando-se a possibilidade de se perceber a alteração de 1mm na altura da câmara, apesar das dificuldades ou possibilidades de erro já discutidas anteriormente, esta representa apenas uma variação de 0.071cm^3 de água dentro do tensiômetro. Esta seria, portanto, a menor variação no volume de água que atravessa a cápsula porosa e que poderia ser observada pelo operador.

Em termos de variação do potencial mátrico com relação à variação na altura da câmara, percebe-se pelos dados da Tabela 5 que este tipo de manômetro apresenta uma sensibilidade muito boa. Alguns valores dos dois experimentos realizados no laboratório foram utilizados para se fazer esses cálculos. A relação $\Delta\psi_m/\Delta h_c$, total, foi feita sempre partindo de um potencial mátrico de aproximadamente zero ($\psi_m \cong 0.1\text{kPa}$) até o potencial considerado em cada momento. A relação parcial foi considerada entre o potencial de um determinado momento e aquele imediatamente anterior; essa variação parcial foi feita com o objetivo de se verificar se ela diferia nas diferentes faixas de potencial, visto que a relação entre o potencial mátrico e a altura da câmara não é linear. Nota-se na Tabela 5 que a maior razão entre a variação no potencial (em kPa) por milímetro de variação na altura da câmara foi de 2.5, ou seja, aproximadamente 25cm de coluna de água para a variação de leitura possível de ser observada. Essa relação, tanto a total quanto a parcial, diminui com o aumento nos

valores de potencial. Mesmo nessa maior relação, pode-se considerar como de alta sensibilidade o manômetro de câmara de ar, visto que isso representa uma saída de água do tensiômetro para o solo de apenas 0.071cm^3 , sendo que os movimentos de água entre o tensiômetro e o solo são, via de regra, de maiores magnitudes, e porque, dentro da faixa de uso do tensiômetro nas condições práticas de campo, a percepção de uma variação de 2.5kPa no potencial já é bastante boa.

Tabela 5. Variação no potencial mátrico em função da variação na altura da câmara de ar

ψ_m kPa	h mm	$\Delta\psi_m/\Delta h_c(\text{total})$ kPa/mm	$\Delta\psi_m/\Delta h_c(\text{parcial})$ kPa/mm	Δv cm^3
experimento com tensiômetro de duplo manômetro				
0.6	33	2.50	2.50	0.014
8.0	36	2.46	2.46	0.213
12.2	38	2.32	2.10	0.142
22.7	44	2.01	1.75	0.426
54.8	85	1.04	0.78	2.915
55.5	87	1.02	0.35	0.142
57.1	91	0.98	0.40	0.284
61.8	106	0.84	0.31	1.066
62.8	110	0.81	0.25	0.284
73.5	178	0.50	0.15	4.834
experimento com tensiômetros com manômetros individuais				
14.4	39	2.26	2.26	0.040
19.8	42	2.11	1.80	0.213
22.9	44	2.01	1.55	0.142
30.9	50	1.78	1.33	0.426
40.6	60	1.48	0.97	0.710
44.4	65	1.37	0.76	0.355
51.0	76	1.17	0.60	0.781
53.8	82	1.08	0.46	0.426
61.3	103	0.87	0.35	1.491

ψ_m - potencial mátrico

h_c - altura da câmara dentro do tensiômetro

Δv - variação do volume de água dentro do tensiômetro

4.6. Considerações finais.

Os conhecimentos sobre o desempenho do tensiômetro de câmara de ar na avaliação do potencial mátrico da água ainda são bastante incipientes, devido ao fato de que esse tipo de manômetro ainda não foi suficientemente testado em condições de campo. Novos testes são necessários, sob as mais diversas condições de solo e clima, para que se possa calibrá-lo em função dos fatores que influenciam o seu comportamento.

A construção do aparelho dever ser considerada como um aspecto importante do seu desempenho. O fechamento da parte superior do instrumento, no momento inicial, mostrou-se um fator de complicação durante a execução desse nosso trabalho. Acreditamos que o uso de tampa de rosca, juntamente com anel de borracha do tipo "O-ring", por nós utilizada, tenha se caracterizado como um avanço nesse sentido. A fixação da cápsula porosa e a conexão do tubo de plástico transparente ao tubo de PVC devem ser feitas de modo que não possa haver entrada de ar no sistema, mesmo quando este se encontre sob altas pressões. A marcação da câmara inicial, no tubo transparente, deve ser feita numa espessura inferior àquela do meio de medida, no nosso caso uma régua com resolução de 1mm.

Outro aspecto importante a ser considerado em novos estudos com o tensiômetro de câmara de ar é a introdução, na sua equação de cálculo do potencial mátrico, da pressão de vapor da água dentro da câmara. Esse fator,

dependendo das condições de temperatura, afeta sobremaneira o resultado final.

A pressão atmosférica local, como se pode perceber na equação 3.3, é fundamental na estimativa do valor de potencial mátrico da água no tensiômetro de câmara de ar. Assim sendo, deve-se ter bastante cuidado com esse aspecto, utilizando-se o seu valor correto.

Esse tipo de tensiômetro, por outro lado, e considerado o exposto acima, pode tornar-se numa ferramenta muito útil na estimativa do potencial mátrico da água no solo, por apresentar vantagens sobre o tensiômetro convencional (com manômetro de mercúrio), tais como menor custo, fácil manuseio, mais fácil manutenção e, principalmente, não conter elemento tóxico como o mercúrio, evitando-se problemas de contaminação ambiental.

5. CONCLUSÕES

Diante dos resultados obtidos nos experimentos de laboratório e de campo, pode-se concluir que o tensiômetro com manômetro de ar é uma ferramenta disponível para uso no controle do potencial mátrico da água no solo em programas de irrigação. Para trabalhos de pesquisa, entretanto, a recomendação de seu uso talvez ainda não seja conveniente. Novos testes e análises detalhadas são ainda necessários. Um dos principais problemas durante o seu uso é o fechamento da câmara, que precisa ser perfeito, uma vez que pequenos vazamentos não facilmente perceptíveis podem levar a erros significantes de leitura.

A sensibilidade do manômetro de câmara de ar pode ser considerada como muito boa, não se constituindo, portanto, em um problema para o seu uso, desde que as leituras sejam feitas com bastante cuidado.

Pequenas variações na temperatura não influenciam nas respostas do tensiômetro de câmara de ar. Em regiões onde a temperatura não varia muito durante o ciclo de uma determinada cultura pode-se dispensar o uso de termômetros, diminuindo-se o trabalho do operador, bem como os custos de cultivo.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AUGUSTIN, B. J. & SNYDER, G. H. Moisture sensor-controlled irrigation for maintaining bermudgrass turf. **Agronomy Journal**, Madison, **76** (5): 848-850, 1984.
- AZOOZ, R. H. & ARSHAD, M. A. Laboratory calibration of pressure transducer-tensiometer system for hydraulic studies. **Canadian Journal Soil Science**, Ottawa, **74**: 315-319, 1994.
- BEZERRA, F. M. L. Coeficientes de cultura e efeitos de déficits hídricos nos diferentes estádios fenológicos sobre a produção da batata (*Solanum tuberosum* L.). Piracicaba, 1995. 131p. Tese (doutorado) - Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Universidade de São Paulo.
- BLACK, C. A. **Soil-Plant Relationships**. 2.ed. New york, John Wiley & Sons, 1968. 792p.
- BOOLTINK, H. W. & BOUMA, J. Physical and morfological characterization of bypass flow in a well-structured clay soil. **Soil Science Society American Journal**, Madison, **55** (5): 1249-1254, 1991.
- CAMARGO, A. P.; GROHMAN, F. & CAMARGO, M. B. P. Tensiômetro simples de leitura direta. **Pesquisa**

- Agropecuária Brasileira**, Brasília, **17** (12): 1763-1772, 1982.
- CAMPBELL, G. S. Overview: soil water potential measurement. in: INTERNATIONAL CONFERENCE ON MEASUREMENT OF SOIL AND PLANT WATER STATUS, 1, Logan, 1987. **Proceedings**. Logan, 1987, p. 115-118.
- CRESSWELL, H. P. Evaluation of the portable pressure transducer technique for measuring field tensiometers. **Australian Journal Soil Research**, Melbourne, **31**: 397-406, 1993.
- DEXTER, A. R. Changes in the matric potential of soil water with time after disturbance of soil by moulding. **Soil & Tillage Research**, Amsterdam, **16** (1-2): 35-50, 1990.
- GAUSSOIN, R. G.; MURPHY, J. A. & BRANHAM, B. E. A vertically installed, flush mounted tensiometer for turfgrass research. **HortScience**, Alexandria, **25** (8): 928-929, 1990.
- HENDRICKX, J. M. H. & WIERENGA, P. J. Variability of soil water tension in a trickle irrigated Chile pepper field. **Irrigation Science**, New York, **11** (1): 23-30, 1990.
- HENDRICKX, J. M. H.; NIEBER, J. L. & SICCAMA, P. D. Effect of tensiometer cup size on field soil water tension variability. **Soil Science Society American Journal**, Madison, **58** (2): 309-315, 1994.
- HODNET, M. G.; BELL, J. P.; AH KOON, P. D.; SOOPRAMANIEN, G. C. & BATCHELOR, C. H. The control of drip irrigation of sugarcane using "index" tensiometers: some comparisons with control by water budget method.

- Agricultural Water Manegement**, Amsterdam, **17** (1-3): 189-207, 1990.
- HOOK, J. E. Tensiometers in irrigation research. in: INTERNATIONAL CONFERENCE ON MEASUREMENT OF SOIL AND PLANT WATER STATUS, 1, Logan, 1987. **Proceedings**. Logan, 1987, p. 163-168.
- KLUTE, A. & GARDNER, W. R. Tensiometer response time. **Soil Science**, Baltimore, **93** (1): 204-207, 1962.
- KLUTE, A. & PETERS, D. B. A recording tensiometer with a short response time. **Soil science society of America Proceedings**, Madison, **26** (1): 87-88, 1962.
- LAMBERT, J. R.; DOTY, C. W. & QUISENBERRY, V. L. Irrigation scheduling in humid areas. in: PROCEEDINGS OF IRRIGATION SCHEDULING CONFERENCE, Chicago, dec, 1981. **Proceedings of the American Society of Agricultural Engineers**, St. Joseph, 1981, p. 132-143.
- LONG, F. L. A new solid-state device for reading tensiometers. **Soil Science**, Baltimore, **133** (2): 131-132, 1982.
- LONG, F. L. A field system for automatically measuring soil water potential. **Soil Science**, Baltimore, **137** (4): 227-230, 1984.
- LOWERY, B.; DATIRI, B. C. & ANDRASKI, B. J. An electrical readout system for tensiometers. **Soil Science Society American Journal**, Madison, **50** (2): 494-496, 1986.
- MARTHALER, H. P.; VOGELSANGER, W.; RICHARD, F. & WIERENGA, P. J. A pressure transducer for field tensiometers. **Soil Science Society American Journal**, Madison, **47** (4): 624-627, 1983.

- MORRISON, R. D. & SZECSODY, J. E. A tensiometer and pore water sampler for vadoze zone monitoring. **Soil Science**, Baltimore, **144** (5), 367-372, nov. 1987.
- MULLINS, C. E.; MANDIRINGANA, O. T.; NISBENT, T. R. & AITKEN, M. N. The design, limitations, and use of a portable tensiometer. **Journal of Soil Science**, Oxford, **37**: 691-700, 1986.
- NYHAN, J. W. & DRENNON, B. J. Tensiometer data acquisition system for hydrologic studies requiring high temporal resolution. **Soil Science Society American Journal**, Madison, **54** (1): 293-296, 1990.
- NYHAN, J. W.; DRENNON, B. J. & GAYLOR, R. M. Field evolution of a tensiometer data acquisition system for hydrologic studies of waste disposal site design. in: INTERNATIONAL CONFERENCE ON MEASUREMENT OF SOIL AND PLANT WATER STATUS, 1, Logan, 1987. **Proceedings**. Logan, 1987. p. 145-150.
- OLITTA, A. F. Construção de tensiômetros para controle de irrigação. **O Solo**, Piracicaba, **68** (2): 16-20, 1976.
- PECK, A. J. & RABBIDGE, R. M. Soil-water potential: direct measurement by a new technique. **Science**, Washington, **151**:1385-1386, 1966.
- POOLEY, S. G. Tensiometers in irrigated agriculture. in: WINTER MEETING OF AMERICAN SOCIETY OF AGRICULTURAL ENGINEERS, Chicago, 1973. **American Society of Agricultural Engineers**. St. Joseph, 1973. p.1-4.

- REICHARDT, K. **Processos de transferência no Sistema Solo-Planta-Atmosfera**. 4.ed. Campinas, Fundação Cargill, 1985. 445p.
- REICHARDT, K. **A Água em Sistemas Agrícolas**. 1.ed. São Paulo, Editora Manole Ltda, 1990. 188p.
- RICE, R. A fast-response, field tensiometer system. **Transactions of the American Society of Agricultural Engineers**, St. Joseph, 1969, p. 48-50.
- RICHARDS, L. A. & NEAL, O. R. Some field observations with tensiometers. **Proceedings of Soil Science Society America**, Madison, 1:71-91, 1936.
- SINGH, P. V.; PAL, D.; VARADE, S. B. & KAR, S. Determining percolation losses of packed clay soil from tensiometer data. **Agricultural Water Management**, Amsterdam, 15: 189-195, 1988.
- SMAJSTRLA, A. G. & KOO, R. C. Use of tensiometers for scheduling of citrus trickle irrigation. **Proceeding of the Florida State Horticulture Society**. Miami Beach, 99: 51-56, 1986.
- SMAJSTRLA, A. G. & LOCASCIO, S. J. Irrigation scheduling of drip-irrigated tomato using tensiometers and pan evaporation. **Proceedings of the Florida State Horticulture Society**, Miami Beach, 103: 88-91, 1990.
- TAMARI, S.; GUADU, J. C. & SIMONNEAU, T. Tensiometric measurement and metastable state of water under tension. **Soil Science**, Baltimore, 156 (3): 149-155, 1993.

- TAYLOR, S. A. Use of mean soil moisture evaluate the effect of soil moisture on crops yields. **Soil Science**, Baltimore, **74** : 217-226, 1952.
- TAYLOR, S.A. Managing irrigation water on the farm. **Transaction of the ASAE**, St. Joseph, **8**(3): 433-436, 1965.
- THIEL, T. J.; FOUSS, J. L. & LEECH, A. P. Electrical water pressure transducers for field and laboratory use. **Soil Science Society of America Proceedings**, Madison, **27** (5): 601-602, 1963.
- THOMAS, G. W. & PHILLIPS, R. E. The transient instability of tensiometer readings during infiltration. **Soil Science**, Baltimore, **152** (3); 231-235, 1991.
- TOKUNAGA, T. The pressure response of the soil water sampler and possibilities for simultaneous soil solution. **Soil Science**, Baltimore, **154** (3): 171-183, 1992.
- TOKUNAGA, T. & SALVE, R. Gauge sensivity optimization in air pocket tensiometry: implications for deep vadoze zone monitoring. **Soil Science**, Baltimore, **158** (6): 389-397, 1994.
- TOWNER, G. D. Theory of time response of tensiometers. **Journal of Soil Science**, Oxford, **31**: 607-621, 1980.
- TOWNER, G. D. A method for improving cheaply the time response of pressure-transducer tensiometer system. **Agricultural Water Management**, Amsterdam, **5**: 285-293, 1982.
- TROTTER, C. M. Errors in reading tensiometer vacua with pressure transducers. **Soil Science**, Baltimore, **138** (4): 314-316, oct. 1984.

- Van Der ELSEN, H. G. M. & BAKKER, J. W. A universal device to measure to pressure head for laboratory use or long-term stand-alone field use. **Soil Science**, Baltimore, **54**: 458-464, 1992.
- VILLA NOVA, N. A.; REICHARDT, K.; LIBARDI, P. L. & MORAES, S. O. Direct reading "air-pocket" tensiometer. **Soil Tecchnology**, Cremlingen, **2**: 403-407, 1989.
- VILLA NOVA, M. S.; VILLA NOVA, N. A.; OLIVEIRA, A. S. & REICHARDT, K. Performance and test of a direct reading "air-pocket" tensiometer. **Short Communication**, Cremlinger, **5**: 283-287, 1992.
- VILLAGRA, M. M.; MATSUMOTO, O. M.; BACCHI, O. O. S.; MORAES, S. O.; LIBARDI, P. L. & REICHARDT, K. Tensiometria e variabilidade espacial em terra roxa estruturada. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, **12**: 205-210, 1988.
- WATSON, K. K. Response behavior of a tensiometer-pressure transducer system under conditions of changing pore air pressure. **Soil Science**, Baltimore, **104** (6): 439-443, 1967.
- WATSON, K. K. & JACKSON, R. D. Temperature effects in a tensiometer-pressure transducer system. **Soil Science Society of America Proceedings**, Madison, **31**:156160, 1967
- WERKHOVEN, C. Sensors for irrigation scheduling of cultures in the field. **Acta-Horticulturae**, Wageningen, **304**: 259-264, jan, 1992.
- WIERENGA, P. J.; FOWLER, J. L. & DAVIS, D.D. Use of tensiometers for scheduling drip-irrigated cotton. IN:

INTERNATIONAL CONFERENCE ON MEASUREMENT OF
SOIL AND PLANT WATER STATUS, 1, Logan, 1987,
PROCEEDINGS. Logan, 1987. p. 157-161.

Apêndices

Apêndice 1 - Média, desvio padrão e coeficiente de variação dos valores de potencial mátrico obtidos por tensiômetro de mercúrio e de câmara de ar, bloco I - 35cm de profundidade.

Data	Tensiômetro de Mercúrio				Tensiômetro de Câmara de Ar			
	N	Média	DesPad	CV	N	Média	DesPad	CV
		----- kPa -----		%		----- kPa -----		%
12/jan	5	7.2	4.50	62.0	5	7,6	3.65	47.6
12/jan	5	8.3	6.04	72.2	5	8.1	4.15	51.2
12/jan	5	10.1	9.03	88.9	5	11.7	4.48	38.2
12/jan	5	10.7	9.95	92.9	5	12.0	5.14	42.7
12/jan	5	11.7	11.26	95.9	5	13.5	6.18	45.4
12/jan	5	12.6	12.40	98.4	5	13.4	6.26	46.5
12/jan	5	12.8	12.78	99.8	5	13.9	6.81	48.8
13/jan	5	13.2	12.60	95.4	5	10.9	5.11	46.6
13/jan	5	12.9	12.39	95.6	5	12.3	4.95	39.9
13/jan	5	12.8	12.41	96.3	5	12.0	5.50	45.5
13/jan	5	13.2	12.73	96.3	5	13.3	5.60	42.0
13/jan	5	13.3	12.69	95.2	5	15.3	6.20	40.4
13/jan	5	13.4	12.65	94.0	5	15.3	6.75	44.0
13/jan	5	13.8	12.65	91.6	5	16.7	7.58	45.3
13/jan	5	14.1	12.65	89.3	5	17.4	7.99	45.9
13/jan	5	14.3	12.66	88.4	5	20.4	8.26	40.3
16/jan	5	27.6	24.13	87.2	5	25.4	14.06	55.1
17/jan	3	19.3	17.37	89.8	3	22.9	14.32	62.2
18/jan	3	23.2	19.90	85.6	3	26.7	17.57	65.6
20/jan	3	32.0	24.66	76.9	3	35.7	20.76	58.0
25/jan	4	47.0	32.06	68.1	4	55.2	28.91	52.2

N - Número de tensiômetros em funcionamento no momento da leitura.

DesPad - Desvio Padrão

CV - Coeficiente de Variação

Apêndice 2 - Potencial mátrico versus tempo no experimento de campo, bloco I, 35cm de profundidade. (a) tensiômetro convencional x tensiômetro de câmara de ar; (b) tensiômetro de câmara de ar com e sem correção de temperatura.

Apêndice 3 - Relação entre potencial mátrico obtido por tensiômetro convencional e de câmara de ar, experimento de campo, bloco I, 35cm, segundo período úmido.

Apêndice 4 - Média, desvio padrão e coeficiente de variação dos valores de potencial mátrico obtidos por tensiômetro de mercúrio e de câmara de ar, bloco I - 150cm de profundidade.

Data	N	Tensiômetro de Mercúrio			N	Tensiômetro de Câmara de Ar		
		Média	DesPad	CV		Média	DesPad	CV
		----- kPa -----		%		----- kPa -----		%
12/jan	5	16.3	9.2	56.5	5	13.4	5.6	42.5
12/jan	5	17.7	9.8	55.4	5	15.4	6.2	40.2
12/jan	5	19.1	11	57.8	5	17.5	7.0	40.3
12/jan	5	17.7	11.2	57.2	5	19.9	8.4	53.3
12/jan	5	21.1	11.4	54.4	5	20.7	9.1	43.8
12/jan	5	22.2	11.8	53.2	5	22.0	10.2	46.7
12/jan	5	22.2	12.2	55.0	5	22.8	11.2	49.1
13/jan	5	23.4	13.2	56.7	5	23.9	15.6	65.3
13/jan	5	22.8	13.4	58.8	5	24.9	15.8	63.6
13/jan	5	22.7	13.5	59.8	5	24.8	16.3	66.0
13/jan	5	22.7	13.5	59.8	5	25.0	16.2	64.9
13/jan	5	22.3	13.8	61.9	5	25.1	16.7	66.3
13/jan	5	22.3	13.7	61.5	5	25.7	16.5	64.3
13/jan	5	23.4	13.4	57.6	5	26.4	16.8	63.5
13/jan	5	23.7	13.3	56.3	5	27.1	17.0	62.8
13/jan	5	23.6	13.4	56.9	5	29.0	17.3	59.5
16/jan	5	24.9	15.5	62.5	5	28.3	23.4	82.9
17/jan	5	19.0	9.2	48.7	5	18.7	6.9	36.9
18/jan	5	19.1	8.9	46.5	5	19.2	6.9	36.2
20/jan	5	19.7	8.2	41.7	5	18.8	9.1	48.5
25/jan	5	25.6	12.8	50.2	5	28.3	23.6	83.2

N - Número de tensiômetros em funcionamento no momento da leitura.

DesPad - Desvio Padrão

CV - Coeficiente de Variação

Apêndice 5 - Potencial mátrico versus tempo, experimento de campo, bloco I, 150cm de profundidade. (a) tensiômetro convencion x tensiômetro de câmara de ar; (b) tensiômetro de câmara de ar com e sem correção da temperatura, segundo período úmido.

Apêndice 6 - Relação entre potencial mátrico obtido por tensiômetro convencional e de câmara de ar, experimento de campo, bloco I, 150cm, segundo período úmido.

Apêndice 7 - Média, desvio padrão e coeficiente de variação dos valores de potencial mátrico obtidos por tensiômetro de mercúrio e de câmara de ar, bloco II - 35cm de profundidade.

Data	N	Tensiômetro de Mercúrio			N	Tensiômetro de Câmara de Ar		
		Média	DesPad	CV		Média	DesPad	CV
		----- kPa -----		%		----- kPa -----		%
13/jan	4	2.9	0.7	23.5	5	3.3	1.9	57.0
13/jan	4	3.4	0.7	22.9	5	4.5	1.6	36.7
13/jan	4	3.5	0.9	26.7	5	5.6	1.6	30.2
13/jan	4	4.0	1.1	28.1	5	6.5	1.2	18.7
13/jan	4	4.2	1.2	28.9	5	7.8	2.7	34.6
13/jan	4	4.5	1.5	34.5	5	8.5	2.1	25.4
13/jan	4	4.8	1.8	39.0	5	9.0	2.1	23.8
13/jan	4	5.0	1.9	38.9	5	8.9	5.0	56.2
16/jan	4	8.3	3.1	37.9	5	9.8	3.3	33.8
16/jan	4	8.2	2.8	34.8	5	10.7	2.6	24.6
16/jan	4	8.1	2.6	31.8	5	12.0	3.2	27.3
16/jan	4	8.7	3.1	36.2	5	12.5	2.9	23.3
16/jan	4	8.9	3.0	34.4	5	14.6	4.5	31.4
16/jan	4	9.4	3.4	37.0	5	14.5	4.0	27.8
16/jan	4	10.3	4.1	39.9	5	15.6	4.8	31.2
16/jan	4	10.0	3.8	38.2	5	15.2	4.9	32.3
17/jan	4	11.4	4.9	43.6	5	12.5	3.6	28.9
18/jan	4	13.8	6.2	45.0	5	14.4	4.7	33.1
20/jan	4	20.4	10.2	49.9	4	16.7	5.2	31.5

N - Número de tensiômetros em funcionamento no momento da leitura.

DesPad - Desvio Padrão

CV - Coeficiente de Variação

Apêndice 8 - Potencial mátrico versus tempo, experimento de campo, bloco II, 35cm de profundidade. (a) tensiômetro convencional x tensiômetro de câmara de ar; (b) tensiômetro de câmara de ar com e sem correção de temperatura, segundo período úmido.

Apêndice 9 - Relação entre potencial mátrico obtido por tensiômetro convencional e de câmara de ar, experimento de campo, bloco II, 35cm, segundo período úmido.

Apêndice 10 - Média, desvio padrão e coeficiente de variação dos valores de potencial mátrico obtidos por tensiômetro de mercúrio e de câmara de ar, bloco II - 150cm de profundidade.

Data	N	Tensiômetro de Mercúrio			N	Tensiômetro de Câmara de Ar		
		Média	DesPad	CV		Média	DesPad	CV
		----- kPa -----		%		----- kPa -----		%
13/jan	5	10.7	2.3	20.7	5	12.8	1.2	10.1
13/jan	5	12.2	0.7	6.3	5	14.2	2.1	15.4
13/jan	5	12.9	1.7	13.4	5	14.7	2.7	18.4
13/jan	5	13.4	3.0	22.4	5	16.4	2.5	15.5
13/jan	5	13.8	2.9	21.6	5	16.8	2.7	16.3
13/jan	5	14.1	3.2	23.0	5	17.4	3.0	17.4
13/jan	5	14.4	3.5	24.4	5	17.6	3.0	17.6
16/jan	5	14.5	3.6	24.9	5	19.6	2.9	14.8
16/jan	5	14.4	2.8	19.8	5	14.4	2.4	16.7
16/jan	5	14.4	2.7	19.3	5	14.0	2.7	19.6
16/jan	5	14.3	2.6	18.3	5	15.4	2.6	17.1
16/jan	5	14.4	2.5	17.5	5	16.8	2.8	17.0
16/jan	5	14.6	2.3	16.3	5	17.5	2.3	13.5
16/jan	5	14.6	2.2	15.6	5	17.1	2.3	13.9
16/jan	5	15.3	2.5	16.9	5	18.4	2.6	14.6
16/jan	5	14.9	2.6	17.4	5	17.9	1.9	11.0
17/jan	5	14.6	2.5	17.5	5	16.2	2.4	17.0
18/jan	5	15.0	2.4	16.2	5	15.2	2.5	19.0
20/jan	5	15.5	2.2	14.3	5	15.1	2.7	21.3

N - Número de tensiômetros em funcionamento no momento da leitura.

DesPad - Desvio Padrão

CV - Coeficiente de Variação

Apêndice 11 - Potencial mátrico versus tempo, experimento de campo, bloco II, 150cm de profundidade. (a) tensiômetro convencional x tensiômetro de câmara de ar; (b) tensiômetro de câmara de ar com e sem correção de temperatura, segundo período úmido.

Apêndice 12 - Relação entre potencial mátrico obtido por tensiômetros convencional e de câmara de ar, experimento de campo, bloco II, 150cm, segundo período úmido

Apêndice 13 - Média, desvio padrão e coeficiente de variação dos valores de potencial mátrico obtidos por tensiômetro de mercúrio e de câmara de ar, bloco III - 15cm de profundidade.

Data	N	Tensiômetro de Mercúrio			N	Tensiômetro de Câmara de Ar		
		Média	DesPad	CV		Média	DesPad	CV
		----- kPa -----		%		----- kPa -----		%
16/jan	5	6.1	2.4	39.4	5	10.1	1.4	13.8
16/jan	5	7.3	2.0	28.6	5	9.8	0.8	8.6
16/jan	5	10.8	7.7	71.9	5	13.1	1.5	12.0
16/jan	5	8.8	3.0	34.7	5	16.5	2.3	14.3
16/jan	5	10.2	3.6	35.1	5	19.1	3.4	17.8
16/jan	5	10.2	3.7	36.5	4	17.0	2.9	17.1
16/jan	5	11.4	4.4	39.1	4	19.3	3.0	15.8
16/jan	5	11.2	4.3	38.6	4	18.7	3.0	16.5
17/jan	5	14.1	5.2	37.4	4	17.2	2.8	16.8
17/jan	5	14.4	5.5	38.4	4	17.9	2.8	16.0
17/jan	5	14.9	5.5	37.1	4	18.9	3.4	18.1
17/jan	5	17.5	5.4	30.8	4	21.3	3.2	15.0
17/jan	5	17.6	6.4	36.6	4	19.6	3.5	18.2
17/jan	5	16.4	8.4	51.7	4	20.1	3.5	17.7
17/jan	5	18.0	6.7	37.4	4	20.7	4.0	19.5
18/jan	5	18.7	8.1	43.6	4	20.5	3.9	19.1
20/jan	5	32.3	13.7	42.6	4	28.7	9.2	32.2

N - Número de tensiômetros em funcionamento no momento da leitura.

DesPad - Desvio Padrão

CV - Coeficiente de Variação

Apêndice 14 - Potencial mátrico versus tempo, experimento de campo, bloco III, 15cm de profundidade. (a) tensiômetro convencional x tensiômetro de câmara de ar; (b) tensiômetro de câmara de ar com e sem correção da temperatura, segundo período úmido.

Apêndice 15 - Relação entre potencial mátrico obtido por tensiômetros convencional e de câmara de ar, experimento de campo, bloco III, 15cm, segundo período úmido.