



**UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ
CENTRO DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS
DEPARTAMENTO DE CIÊNCIAS DO SOLO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIA DO SOLO**

ALCIONE GUIMARÃES FREIRE

**ESTIMATIVA DE PARÂMETROS HIDRÁULICOS DO SOLO UTILIZANDO
TENSIOMETRIA COM ALGUNS SISTEMAS DE LEITURA**

FORTALEZA

2016

ALCIONE GUIMARÃES FREIRE

ESTIMATIVA DE PARÂMETROS HIDRÁULICOS DO SOLO UTILIZANDO
TENSIOMETRIA COM ALGUNS SISTEMAS DE LEITURA

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial à obtenção do título de Doutor em Ciência do Solo. Área de concentração: Manejo do Solo e da Água.

Orientador: Prof. Dr. Jaedson Cláudio Anunciato Mota.

FORTALEZA

2016

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação
Universidade Federal do Ceará
Biblioteca Universitária
Gerada automaticamente pelo módulo Catalog, mediante os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

F933e Freire, Alcione Guimarães.
Estimativa de parâmetros hidráulicos do solo utilizando tensiometria com alguns sistemas de leitura /
Alcione Guimarães Freire. – 2016.
26 f. : il. color.

Tese (doutorado) – Universidade Federal do Ceará, Centro de Ciências Agrárias, Programa de Pós-
Graduação em Agronomia (Solos e Nutrição de Plantas), Fortaleza, 2016.
Orientação: Prof. Dr. Jaedson Cláudio Anunciato Mota.

1. Perfil instantâneo. 2. Modelagem inversa. 3. Instrumentação. I. Título.

CDD 631.4

ALCIONE GUIMARÃES FREIRE

ESTIMATIVA DE PARÂMETROS HIDRÁULICOS DO SOLO UTILIZANDO
TENSIOMETRIA COM ALGUNS SISTEMAS DE LEITURA

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial à obtenção do título de Doutor em Ciência do Solo. Área de concentração: Manejo do Solo e da Água.

Aprovada em: 15/07/2016.

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Jaedson Cláudio Anunciato Mota (Orientador)
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Prof. Dr. Francisco Marcus Lima Bezerra
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Prof. Dr. Raimundo Nonato de Assis Júnior
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Prof. Dr. Raimundo Nonato Távora Costa
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Prof. Dr. Quirijn de Jong van Lier
Universidade de São Paulo (USP)

*Dedico a realização desse trabalho a Deus e à
minha família.*

AGRADECIMENTOS

A Deus, por me guiar sempre em caminhos de retidão.

À minha família: Maria Vanda (mãe), Alcilene Guimarães (irmã), Faustino Rodrigues (avô), Maria Petronila (avó), Cleide Guimarães (tia), Deuzimar Guimarães (tio), Francisco Jucier (tio), José Faustino (tio), Giovani Guimarães (primo) e aos demais familiares por sonharem comigo para que eu conseguisse realizar esse sonho.

À minha namorada, Eliane de Freitas Gadelha, pelo amor, carinho e compreensão em todos os momentos dessa etapa.

À Universidade Federal do Ceará, pela oportunidade de pós-graduação.

À CAPES, pelo apoio financeiro com a manutenção da bolsa de auxílio.

Ao Prof. Dr. Jaedson Cláudio Anunciato Mota, pela excelente orientação, amizade e presteza ao longo desses anos.

Ao Prof. Dr. Quirijn de Jong van Lier, pela orientação no período em que estive sob sua tutela em Piracicaba-SP.

Ao Prof. Dr. Raimundo Nonato de Assis Júnior, pelas valiosas sugestões ao trabalho, como também aos ensinamentos durante o curso.

Ao Professor Francisco Marcus Lima Bezerra, por ter cedido a área experimental.

Aos professores do Departamento de Ciências do Solo, pelos ensinamentos transmitidos em suas disciplinas.

Aos colegas do Departamento de Ciências do Solo, em especial a Arilene Franklin, Carlos Levi, Gleiciane Silva, Ícaro Vasconcelos e Josimar de Azevedo pela instalação e auxílio durante o experimento; a Thiago Leite por ter me ajudado, sempre que necessário, na realização da tese; e ao Carlos Vítor pela ajuda na confecção dos instrumentos. Os agradecimentos também se estendem a Ademir Menezes, Alexandre dos Santos, Alessa Milena, Mirla Almeida, Márcio Godofredo, Carlos Eduardo e Cillas Policarto.

Aos colegas do Laboratório de Física do Solo do CENA (Centro de Energia Nuclear na Agricultura), Ana Luíza, Everton Alves, Lívia Previatello, Robson Arthur, Thaís Rodrigues, Thalita Oliveira e Vítor Meriguetti, pelo acolhimento durante a minha estada em Piracicaba-SP.

“Compreender que há outros pontos de vista é
o início da sabedoria.” Thomas Campbell

RESUMO

O monitoramento da drenagem da solução no solo é realizado por meio de instrumentos capazes de medir a energia potencial da solução devida às forças de aderência à matriz do solo. Para tanto, o tensiômetro tem se apresentado como um excelente instrumento, por medir essa energia da água no solo diretamente e possibilitar medições *in situ*. O objetivo desta pesquisa foi determinar o tempo de equilíbrio após a inserção da agulha quando do uso do tensiômetro com tensímetro digital; aferir dois sistemas alternativos ao manômetro de mercúrio para a quantificação do potencial matricial da água no solo e verificar suas implicações nas estimativas da umidade do solo, da densidade de fluxo de água no solo e da condutividade hidráulica em função da umidade. Além disso, objetivou-se comparar os parâmetros hidráulicos do solo, obtidos por modelagem inversa utilizando o modelo Hydrus-1D, a partir dos potenciais matriciais por cada sistema de leitura. O experimento foi realizado nos moldes para a determinação da condutividade hidráulica pelo método do perfil hidráulico instantâneo. Foram instalados tensiômetros nas profundidades de 0,20; 0,35 e 0,50 m para cada sistema de leitura, com seis repetições. Os dados foram analisados por meio de testes de coeficientes de retas e índices estatísticos, considerando-se o manômetro de Hg como método padrão. Conclui-se que a leitura do tensiômetro com tensímetro digital deve ser realizada em 30 segundos após a inserção da agulha na câmara de ar; o vacuômetro de Bourdon pode substituir o manômetro de Hg na medida do potencial matricial da água no solo na faixa de umidade desde a saturação até a capacidade de campo; os sistemas alternativos levam à subestimativa da densidade de fluxo e da condutividade hidráulica em função da umidade e superestimativa do gradiente hidráulico, sendo, portanto, não indicados para a estimativa desses parâmetros hidráulicos; os sistemas de leitura do tensiômetro convergem na estimativa de parâmetros hidráulicos por modelagem inversa.

Palavras-chave: Perfil instantâneo. Modelagem inversa. Instrumentação.

ABSTRACT

Soil solution drainage is monitored by means of instruments able to measure the potential energy of the solution due to the forces of the soil matrix adhesion. Therefore, the tensiometer has emerged as an excellent tool for directly measuring the water energy in the soil and allowing in situ measurements. The objective of this research was to determine the equilibrium time after needle insertion when using the tensiometer with digital tensimeter, measure two systems alternative to the mercury manometer for the measurement of soil water matric potential and check its implications on the estimates of soil moisture, soil water flux density and hydraulic conductivity as a function of moisture. Moreover, the objective was to compare the soil hydraulic parameters obtained by inverse modeling using the Hydrus-1D model, from the matrix potentials for each reading system. The experiment was conducted in the same arrangement to determine the hydraulic conductivity through the instantaneous hydraulic profile method. Tensiometers were installed at depths of 0.20, 0.35 and 0.50 m for each reading system, with six replicates. Data were analyzed using tests of coefficients of the line and statistical indices, considering the Hg manometer as the standard method. It follows that the reading of the tensiometer with digital tensimeter must be performed within 30 seconds after needle insertion in the tube; the Bourdon gauge can replace the Hg manometer in the measurement of the soil water matric potential in the moisture range from saturation to field capacity; alternative systems lead to underestimation of the flux density and hydraulic conductivity as a function of moisture and overestimation of the hydraulic gradient; therefore, they are not suitable for the estimation of these hydraulic parameters; the tensiometer reading systems converge in the estimation of hydraulic parameters by inverse modeling.

Keywords: Instantaneous profile. Inverse modeling. Instrumentation.

LISTA DE FIGURAS

- Figura 1 - Diagrama esquemático do tensiômetro construído com os três sistemas de leitura 25
- Figura 2 - Vista da área e disposição dos tensiômetros na parcela experimental..... 26

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 - Taxa de variação da umidade do solo no tempo, na profundidade de 0,35 m.	27
Gráfico 2 - Relação entre os tempos de equilíbrio do tensímetro digital na profundidade de 0,2 m.	34
Gráfico 3 - Relação entre os tempos de equilíbrio do tensímetro digital na profundidade de 0,35 m.	34
Gráfico 4 - Relação entre os tempos de equilíbrio do tensímetro digital na profundidade de 0,5 m.	34
Gráfico 5 - Relação entre sistemas de leitura do tensiômetro para as medidas do potencial matricial medido na profundidade de 0,35 m.	37
Gráfico 6 - Relação entre sistemas de leitura do tensiômetro para as medidas da umidade volumétrica, na profundidade de 0,35 m.	38
Gráfico 7 - Relação entre sistemas de leitura do tensiômetro para as medidas de gradiente hidráulico, na profundidade de 0,35 m.	39
Gráfico 8 - Relação entre sistemas de leitura do tensiômetro para as medidas de densidade de fluxo, na profundidade de 0,35 m.	40
Gráfico 9 - Relação entre sistemas de leitura do tensiômetro para as medidas de condutividade hidráulica, na profundidade de 0,35 m.	41
Gráfico 10 - Potencial matricial médio em função do tempo, medido e ajustado pelo Hydrus 1D, para o tensiômetro com manômetro de Hg, em profundidade.	43
Gráfico 11 - Potencial matricial médio em função do tempo, medido e ajustado pelo Hydrus 1D, para o tensiômetro com vacuômetro de Bourdon, em profundidade.	43
Gráfico 12 - Potencial matricial médio em função do tempo, medido e ajustado pelo Hydrus 1D, para o tensiômetro com tensímetro, em profundidade.	43

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Distribuição de tamanho de partículas e classificação textural das camadas do solo.....	24
Tabela 2 - Teste estatístico dos coeficientes angulares e lineares da relação linear entre os tempos de leitura do tensímetro no período experimental.....	35
Tabela 3 - Teste estatístico dos coeficientes angulares e lineares da relação linear entre os valores de potencial matricial obtidos pelos sistemas de leitura do tensiômetro no período experimental.	37
Tabela 4 - Teste estatístico dos coeficientes angulares e lineares da relação linear entre os valores de umidade do solo obtidos pelos sistemas de leitura do tensiômetro no período experimental.	38
Tabela 5 - Teste estatístico dos coeficientes angulares e lineares da relação linear entre os valores de gradiente hidráulico obtidos pelos sistemas de leitura do tensiômetro no período experimental.	39
Tabela 6 - Teste estatístico dos coeficientes angulares e lineares da relação linear entre os valores de densidade de fluxo obtidos pelos sistemas de leitura do tensiômetro no período experimental.	40
Tabela 7 - Teste estatístico dos coeficientes angulares e lineares da relação linear entre os valores de condutividade hidráulica obtidos pelos sistemas de leitura do tensiômetro no período experimental.	42
Tabela 8 – Índices estatísticos para comparação dos sistemas de leitura alternativos, vacuômetro de Bourdon e tensímetro digital, com relação ao manômetro de Hg para alguns parâmetros hidráulicos do solo obtidos por modelagem inversa.....	44
Tabela 9 - Parâmetros hidráulicos obtidos por modelagem inversa, por meio do modelo Hydrus-1D a partir de valores médios de potencial matricial para cada sistema, com respectivos coeficientes de determinação e raiz quadrada do erro médio.	45

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	14
2 REVISÃO DE LITERATURA	16
2.1 Potencial matricial da água no solo	16
2.2 O tensiômetro	16
2.3 Sistemas de leitura do potencial matricial	17
2.4 Importância agroambiental do tensiômetro e fatores limitantes ao uso	19
2.5 Método do perfil instantâneo	21
2.6 Modelagem inversa a partir do modelo HYDRUS	22
3 MATERIAL E MÉTODOS	24
3.1 Caracterização da área experimental	24
3.2 Análises físicas	24
3.3 Confeção dos tensiômetros	24
3.4 Instalação em campo	26
3.5 Processamento das leituras	27
3.5.1 <i>Manômetro de mercúrio</i>	27
3.5.2 <i>Vacuômetro de Bourdon</i>	27
3.5.3 <i>Tensímetro digital</i>	28
3.6 Outros cálculos de água no solo	28
3.7 Modelagem Inversa	29
3.8 Análise dos dados	30
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO	33
4.1 Análise do tempo até o equilíbrio	33
4.2 Sistemas de leitura do tensiômetro	35
4.3 Modelagem inversa	42
5 CONCLUSÕES	46
REFERÊNCIAS	47

1 INTRODUÇÃO

Com o crescimento constante da população mundial aumenta-se a demanda por alimentos, o que faz com que a agricultura tenha um grande desafio que é o de aumentar a produtividade de maneira sustentável, tanto do ponto de vista econômico quanto ambiental. Nesse contexto, tem-se observado uma demanda maior por insumos, por exemplo água, fertilizantes, herbicidas, pesticidas, corretivos etc. Em contraponto, órgãos ambientais têm se preocupado com o destino dos produtos químicos aportados ao solo.

Os produtos químicos uma vez presentes no solo, podem ser carreados na superfície, ou infiltrar via solução, aderindo à matriz ou permanecendo na solução do solo. O perigo torna-se maior quando esses produtos se mantêm na solução do solo, pois podem ser lixiviados para o lençol freático.

O volume drenado é dependente do conteúdo de água presente no solo, sendo mais expressivo em condições entre a capacidade de campo e a umidade de saturação, quando atinge a drenagem máxima. Assim, o monitoramento da solução, principalmente nessa faixa de alta umidade, torna-se essencial para o estudo da poluição das fontes de água.

O monitoramento da drenagem da solução no solo é realizado por meio de instrumentos capazes de medir a energia potencial da solução devida às forças de aderência à matriz do solo. Para tanto, o tensiômetro tem se apresentado como um excelente instrumento, por medir essa energia da água no solo diretamente e possibilitar medições *in situ*, com sensibilidade e exatidão dos resultados dependentes do tipo de manômetro utilizado.

Tendo em vista que a condutividade hidráulica tem seus maiores valores quando o solo se encontra em condições mais úmidas, e, por consequência, é nessa faixa em que ocorrem os maiores fluxos por drenagem interna, um bom sistema de leitura do tensiômetro deve ser sensível o bastante para registrar o potencial matricial com exatidão. Evidentemente, os erros inerentes a cada sistema de leitura são propagados em maior ou menor intensidade nas estimativas de outras variáveis no solo que dependam do conhecimento do potencial matricial.

Os tensiômetros mais simples utilizam o manômetro de mercúrio para a obtenção das leituras para a medida do potencial matricial da água no solo. É o sistema considerado mais sensível e exato, além de proporcionar uma leitura direta, o que faz com que seja tomado como padrão para aferição de outros modelos, no entanto, há a desvantagem de o mercúrio ser tóxico ao homem e apresentar risco de contaminação do ambiente.

Há expectativa de que o uso do mercúrio seja abolido em vários países, incluindo

o Brasil, que está entre os países signatários da Convenção de Minamata, ocorrida no Japão em 2013. Essa convenção marcou o tratado global para proteger a saúde humana e o ambiente dos efeitos adversos do mercúrio. Algumas das diretrizes estabelecidas no encontro foram o controle de fontes e comércio de mercúrio, incluindo o banimento da mineração primária da substância, e eliminação ou redução do uso do mercúrio em determinados produtos e processos industriais.

Com isso, têm surgido outros sistemas de leitura com a finalidade de aferir o potencial matricial de forma mais fácil, rápida e exata, como também com capacidade de medição em ampla faixa de potenciais da água no solo. Porém, cada um desses sistemas alternativos apresenta desvantagens que, a depender das condições, reduzem sua eficiência de uso.

O vacuômetro de Bourdon tem sido tradicionalmente utilizado como uma alternativa ao manômetro de Hg. Esse sistema tipicamente fornece leitura com uma precisão de aproximadamente 1 kPa, o que limita o uso dele em aplicações de baixa precisão. Nos últimos anos transdutores de pressão têm se tornado sistema de leitura preferido para o monitoramento de tensiômetros. Eles são disponíveis a custos razoáveis, têm capacidade de serem automatizados, boa durabilidade, porém, ainda há poucos estudos relatando a sua exatidão sob condições de campo.

Nesse contexto, foram consideradas as hipóteses de que: 1) no tensiômetro em que se utiliza o tensímetro com transdutor de pressão é necessário um decurso de tempo, após a introdução da agulha no tensiômetro, para que seja estabelecido o equilíbrio entre as tensões da água no interior do tensiômetro e da água no solo e 2) os sistemas de leitura por vacuômetro de Bourdon e tensímetro com transdutor de pressão para a medida do potencial matricial da água no solo, em decorrência do mecanismo de funcionamento que cada um apresenta, diferem em relação ao sistema com manômetro de mercúrio com efeito adverso em cálculos e modelagem de água no solo.

Portanto, objetivou-se com esta pesquisa determinar o tempo de equilíbrio após a inserção da agulha quando do uso do tensiômetro com tensímetro digital; aferir dois sistemas alternativos ao manômetro de mercúrio para a quantificação do potencial matricial da água no solo e verificar suas implicações nas estimativas da umidade do solo, da densidade de fluxo de água no solo e da condutividade hidráulica em função da umidade. Além disso, objetivou-se comparar os parâmetros hidráulicos do solo, obtidos por modelagem inversa utilizando o modelo Hydrus-1D, a partir dos potenciais matriciais por cada sistema de leitura.

2 REVISÃO DE LITERATURA

2.1 Potencial matricial da água no solo

O conceito de “potencial” foi primeiramente aplicado à água do solo por Buckingham (1907) em seu artigo clássico de potencial capilar. Posteriormente, Gardner (1920) mostrou a dependência desse potencial ao conteúdo de água. Mais de duas décadas depois, Richards disseminou o uso do tensiômetro para medida direta do potencial matricial da água no solo (RICHARDS, 1931).

O termo matricial representa os efeitos da matriz do solo, isto é, a porção sólida do solo sobre o potencial da solução e descreve a contribuição das forças de retenção da solução no solo associadas com suas interfaces líquido-ar e sólido-líquido.

O potencial matricial da água no solo é uma variável ambiental importante em processos tais como crescimento de plantas, produção das culturas, recarga de aquíferos e eliminação de resíduos no solo (YOUNG e SISSON, 2002). Do ponto de vista agrícola, o conhecimento do “status” da água no solo é de importância primordial, uma vez que permite um manejo correto desse fator de produção em áreas irrigadas, isto é, propicia 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 (MORAES et al., 2006).

Em condições de solo não saturado, que é a forma predominante em cultivos agrícolas, o potencial matricial somado ao potencial gravitacional e o osmótico compõem o potencial total da água no solo. Como a concentração salina da solução do solo sofre pouca variação, o potencial osmótico pode muitas vezes ser desconsiderado. Na definição do potencial total, nesse caso, calcula-se facilmente o potencial gravitacional a partir de uma referência estabelecida, normalmente a superfície do solo. Já o potencial matricial é medido por meio de instrumentos sendo o tensiômetro o mais utilizado (REICHARDT e TIMM, 2012).

2.2 O tensiômetro

O tensiômetro consiste de um tubo oco preenchido com água, hermeticamente fechado com uma cápsula cerâmica permeável ligada ao tubo. O instrumento é inserido no solo, e um medidor de vácuo é ligado a extremidade superior. A cápsula de cerâmica porosa é

conectada ao manômetro e instalada na profundidade do solo onde se deseja medir o potencial matricial da água (DOBRIYAL et al., 2012).

O uso do tensiômetro para medida do potencial matricial da água no solo foi proposto primeiramente por Livingston em 1908, chamando-o naquele momento de atmômetro de cápsula porosa (OR, 2001). Ele é frequentemente preferido em relação a outros tipos de sensores de umidade do solo por causa do seu baixo custo, simplicidade de uso, alta precisão de medida e a possibilidade de aquisição eletrônica de dados por meio de transdutores de pressão diferencial, além de ser uma técnica não-destrutiva (ZAZUETA e XIN, 1994) com possibilidade de fornecer medidas contínuas de umidade sem causar alteração no solo (WALLHAN, 1939). Nesse sentido, a utilização de tensiômetros para determinar o momento exato de iniciar a irrigação, sem desperdício de água e energia, apresenta-se como uma ferramenta em sistemas de produção com adoção de alta tecnologia, máxima produção com menores custos e preservação dos recursos hídricos (KLEIN, 2001).

O princípio de funcionamento baseia-se no estabelecimento do equilíbrio entre a solução que está no solo e a água contida no interior do aparelho. O equilíbrio se dá quando a cápsula porosa entra em contato com o solo e, conseqüentemente, a água do tensiômetro entra em contato com a água do solo. Se a água no solo estiver sob tensão, naturalmente há o deslocamento da água do instrumento para o solo fazendo com que a pressão interna diminua. A água interna fica sob a mesma tensão e a leitura correspondente a essa tensão será igual ao potencial matricial da água no solo.

2.3 Sistemas de leitura do potencial matricial

As características dos tensiômetros praticamente não mudaram ao longo do tempo, embora algumas modificações tenham permitido ampliar sua faixa de trabalho e a confiabilidade em suas respostas (VAN DER PLOEG et al., 2010; BAKKER et al., 2007; DURIGON e JONG VAN LIER, 2011). Melhorias foram realizadas muito mais para facilitar sua instalação e seu manuseio. Em linhas gerais, o tensiômetro, para medida do potencial matricial na faixa de 0 a -0,085 MPa, mantém as suas características originais, sendo um instrumento simples e, principalmente, com um custo relativamente baixo, quando comparado a instrumentos de medição indireta do potencial matricial, como sondas capacitivas, TDRs, sonda de nêutrons (MORAES et al., 2006).

O tensiômetro mais simples, com manômetro de mercúrio, está entre os dispositivos mais precisos para medidas do potencial matricial da água no solo, assim como

para estimativas do fluxo de água no solo e do gradiente de potencial total (KANDELOUS et al., 2015). Uma das limitações apontada para o uso desses tensiômetros está relacionada com sua faixa de funcionalidade que se restringe a potenciais matriciais acima de aproximadamente $-0,085$ Mpa (VAN DER PLOEG et al., 2010; BAKKER et al., 2007). Apesar disto, Reichardt e Timm (2012) relatam que esse intervalo de potencial limitado, mensurável pelo tensiômetro, não é tão limitado como parece. Ele é uma parte pequena do intervalo total de potenciais, mas, no campo, cobre o principal intervalo de umidade do solo de importância em práticas agrícolas. Ou seja, para a maioria dos solos, maior quantidade de água é retida entre os potenciais de 0 e $-0,1$ MPa do que entre $-0,1$ e $-1,5$ MPa.

Um outro sistema de medida, o vacuômetro, tem sua aplicação em tensiômetros mais recentemente, embora tenha sido patenteado na França, no século XIX, pelo engenheiro Eugene Bourdon (ÇENGEL e BOLES, 2006). É um dispositivo mecânico que, a partir da deformação de uma espiral, proporcional a uma dada tensão, transmite o sinal analógico a um eixo com um ponteiro em sua extremidade, indicando o valor da tensão em um visor.

Uma das alternativas ao uso do mercúrio foi a introdução de outros sensores que, acoplados ao tensiômetro, se prestam à medição do potencial matricial. O tensímetro digital utiliza um transdutor de pressão (MARTHALER et al., 1983) como elemento sensível para transmitir um sinal correspondente à tensão no interior do tensiômetro quando do momento da leitura. Esse sinal é mostrado, também, digitalmente no visor do instrumento.

Algumas considerações devem ser feitas com relação ao tensímetro digital. Por exemplo, Marthaler et al. (1983) afirmam que a introdução da agulha do tensímetro na câmara do tensiômetro, que possui um volume de ar, provoca uma redução na tensão e, portanto, um novo equilíbrio há que se estabelecer. Sob esta ótica, esse é um dos fatores que levam à menor leitura observada com o uso do tensímetro com transdutor de pressão. Ainda, os mesmos autores destacam que a inserção da agulha causa pequena deflexão da rolha para baixo e, possivelmente, uma saída de água do tensiômetro. Em suma, essas perturbações podem retardar o equilíbrio da tensão da água no interior do tensiômetro com a tensão da água no solo fazendo com que o reequilíbrio só ocorra em um tempo que varia de dois a dez minutos.

O tempo de resposta do tensiômetro é definido pela variação de pressão por unidade de volume de fluido transferido para o tensiômetro (REICHARDT e TIMM, 2012). Em outras palavras, corresponde ao tempo necessário para que haja equilíbrio de energia da água no tensiômetro com a água no solo. De acordo com Klute e Gardner (1962), o tempo de resposta está sujeito à sensibilidade do medidor de vácuo, à condutância da cápsula e à condutividade hidráulica do solo no qual o instrumento está instalado, sendo que a variação

no tempo de resposta sofre maior efeito do fator condutividade hidráulica do solo do que das características do equipamento, ou seja, quanto menor for o potencial de água no solo maior será o tempo para o equipamento atingir o equilíbrio.

Brito et al. (2009) avaliaram tensiômetros com três sistemas de leitura (manômetro de mercúrio, vacuômetro de Bourdon e tensímetro digital com transdutor de pressão) e concluíram que o vacuômetro de Bourdon é mais exato e eficiente que o tensímetro digital e, na ausência do manômetro de mercúrio, com base nestes aspectos, deve ser preferido para a medida do potencial matricial da água no solo. Em seu experimento, verificaram que o tensímetro digital superestimou os valores de potencial matricial em comparação aos valores obtidos pelo manômetro de mercúrio e vacuômetro de Bourdon.

Novas tecnologias de desenvolvimento do tensiômetro têm surgido com o intuito de ampliar sua faixa de funcionamento. Como exemplos, podem ser citados o tensiômetro de polímeros (antes chamado de tensiômetro osmótico), de diédrio, inteligente etc. (BAKKER et al., 2007; VAZ et al., 2012; DURNER e OR, 2005). No entanto, esses tensiômetros são de difícil construção e as versões comerciais são caras. Eles possuem tecnologias relativamente complexas, incluindo a compensação de temperatura, componentes eletromecânicos, utilizam materiais cerâmicos com alto valor de entrada de ar e fortemente hidrofílico. Estes tensiômetros avançados são tecnologias relativamente novas, não são amplamente testados e, por estas razões, ainda restritos a algumas aplicações especiais (VAZ et al., 2013).

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

2.4 Importância agroambiental do tensiômetro e fatores limitantes ao uso

Embora apresente algumas limitações como qualquer outro instrumento, o tensiômetro tem sido utilizado de modo satisfatório na determinação da energia com que a água se encontra aderida à matriz do solo. Para Reichardt e Timm (2012), uma das limitações é que quando a tensão atinge valores altos, próximos a 0,1 MPa, aparecem bolhas de ar que interferem no equilíbrio, provocando a ruptura da coluna de água. No entanto, um novo tipo de tensiômetro – o de polímeros – foi desenvolvido recentemente por Bakker et al., (2007) e

possibilita a medição da tensão da água no solo desde a saturação até -2,0 MPa. No Brasil este tipo de tensiômetro foi testado recentemente por Durigon e Jong van Lier (2011), em experimentos de evaporação com colunas de solo. Os autores concluíram que esse tensiômetro permite medir diretamente potenciais matriciais da água no solo até valores próximos ao do ponto de murcha permanente, -1,5 MPa.

Considerando que o intervalo do potencial matricial agronomicamente importante varia de 0 a -1,5 MPa, o tensiômetro com cápsula convencional poderia ser considerado um instrumento muito limitado. No entanto, para a atividade agrícola comercial a faixa de interesse é de 0 a -0,1 Mpa. Nesse contexto, portanto, o tensiômetro é um excelente instrumento de campo para o monitoramento da água no solo durante o ciclo de uma cultura agrícola, visando ao controle da irrigação ou à realização do balanço de água no solo. Portanto, em suma, o tensiômetro, segundo Paramasivam et al. (2000), é um equipamento que se presta muito bem para o monitoramento da água no solo, possibilitando otimizar a irrigação em cultivos que dependem dessa prática.

Além do uso do tensiômetro para manejo da irrigação, outra possibilidade de aplicação é no monitoramento de ambientes, particularmente para a determinação da taxa de drenagem de água e solutos no interior do solo. Vários estudos têm sido desenvolvidos com esse intuito, utilizando-se de tensiômetros na medição do potencial matricial e consequente cálculo do gradiente de potencial total, para, então, se obter a densidade de fluxo de solução no solo.

Ghiberto et al. (2011), em estudo para quantificar a lixiviação de íons de nitrogênio em um Latossolo Vermelho Amarelo cultivado com cana-de-açúcar, utilizou o tensiômetro para determinar a densidade de fluxo da solução do solo. De igual modo, Morari et al. (2012) analisaram a concentração de nitrato nas águas subterrâneas em planície da Itália utilizando tensiômetros equipados com vacuômetro de Bourdon em diferentes profundidades no solo. Com o objetivo de avaliar a drenagem interna e a lixiviação de nitrato à profundidade de 0,80 m com o tempo em uma sucessão de culturas, utilizando-se sulfato de amônio marcado com ^{15}N , Fernandes et al. (2006) empregaram tensiômetros com manômetro de mercúrio para determinação do potencial matricial em cálculos de gradiente de potencial total e densidade de fluxo.

2.5 Método do perfil instantâneo

Dentre os métodos de campo para determinação da condutividade hidráulica em função da umidade ou do potencial matricial, o método do perfil instantâneo provavelmente é o mais utilizado. Ele requer medidas simultâneas e frequentes da umidade e do potencial matricial do solo durante o processo de drenagem em um volume delimitado de solo. Neste método procura-se uma solução para a equação de Richards que é a combinação da equação da continuidade com a equação de Darcy-Buckingham, na direção vertical, durante o processo de redistribuição da água, após a saturação de um perfil de solo e prevenção do fluxo de água através de sua superfície (GONÇALVES e LIBARDI, 2013).

A maior vantagem do método do perfil instantâneo está no fato de basear-se em medições diretas no campo, sem necessidade de aguardar o estabelecimento de um equilíbrio dinâmico (“steady-state”) e permitindo a análise de uma ampla faixa de umidades (JONG VAN LIER, 2002), além de sua simplicidade experimental e matemática (COSTA e LIBARDI, 1999). O alto investimento requerido em tempo e mão-de-obra (LIBARDI e MELO FILHO, 2006), além de aspectos como presença de perfil heterogêneo, camadas menos permeáveis, lençol freático próximo à superfície, podem influenciar os resultados, sendo, então, limitações do método (GONÇALVES e LIBARDI, 2013).

Segundo Prevedello e Armindo (2015), Richards e Weeks (1953) foram, provavelmente, os primeiros a utilizarem a técnica do perfil instantâneo em experimentos de colunas de solo. Richards et al. (1956) trabalharam em experimentos de campo para obterem a condutividade hidráulica em função da umidade. Ogata e Richards (1957) simplificaram o método, eliminando-se a densidade de fluxo na superfície, com a adição de uma cobertura na superfície do solo.

Watson (1966), em experimento com colunas de areia, determinou a condutividade hidráulica em função da umidade em condições de “steady-state”. O autor lançou mão da técnica de atenuação de radiação gama e de tensiômetros com transdutores de pressão para a medição da umidade e do potencial matricial, respectivamente.

Hillel et al., (1972) apresentaram um roteiro contendo uma série de passos com artifícios gráficos e matemáticos para calcular a condutividade hidráulica em função da umidade do solo a partir de dados coletados durante o processo de drenagem interna no solo. A construção de gráficos de regressão da umidade versus tempo, de potencial matricial versus tempo, e cálculos de densidade de fluxo e gradiente de potencial total, são exemplos de procedimentos utilizados nesse roteiro.

Uma simplificação do método foi realizada ao assumir o gradiente hidráulico como unitário. Esse assunto foi abordado, primeiramente, na literatura, nos trabalhos de Davidson et al. (1969), Chong et al. (1981), Libardi et al. (1980) e Sisson et al. (1980).

Saunders et al. (1978) afirmam que a determinação da condutividade hidráulica em campo aproxima-se das condições reais, ao contrário do laboratório, que utiliza amostras de solo, podendo ocasionar erros devidos às alterações das condições naturais. Contudo, os autores explicam que a determinação da condutividade em campo pode gerar grande variabilidade, com destaque para a grande variação dos gradientes de potenciais, em função principalmente do surgimento de bolhas de ar e vazamentos nos tensiômetros. Nesse estudo foram encontrados coeficientes de variação de 31 a 36 %, de 11 a 15 % e de 38 % para o gradiente de potencial total, densidade de fluxo e condutividade hidráulica, respectivamente.

2.6 Modelagem inversa a partir do modelo HYDRUS

A determinação das propriedades hidráulicas do solo por estimativa de parâmetros permite considerável liberdade na escolha das condições de contorno experimentais, além de possibilitar a utilização das medidas obtidas no experimento como dados de entrada (KOOL et al., 1985).

Um método alternativo de obtenção dos parâmetros hidráulicos do solo é a modelagem inversa. Neste caso, os parâmetros hidráulicos são preditos indiretamente de variáveis facilmente medidas, como a umidade do solo e o potencial matricial a partir da otimização e estimação dos parâmetros do modelo (DIKINYA, 2005).

A solução de um problema inverso consiste em determinar causas baseadas nas observações dos seus efeitos, enquanto que nos problemas diretos a solução envolve encontrar efeitos na base de uma descrição de suas causas (CAMPOS VELHO, 2001).

O uso da técnica de modelagem inversa é relativamente nova em estudos de fluxo de água em solo não saturado, porém tem aumentado consideravelmente durante os últimos anos. Avanços em modelagem numérica e aumento da potência dos computadores possibilitaram inversões numéricas de problemas de fluxo saturado e não saturado em um computador comum (DURNER et al., 1999).

Os primeiros estudos envolvendo a otimização de parâmetros tiveram seu foco no transporte de solutos, sendo que ultimamente tem aumentado o uso desse método também para estimação das funções hidráulicas do solo não saturado (ŠIMŮNEK e VAN GENUCHTEN,

1996). Embora tenha sido aplicado inicialmente em experimentos de laboratório, o método inverso pode ser igualmente aplicável a dados de campo (KOOL e PARKER, 1988).

Em laboratório, a técnica de modelagem inversa foi utilizada em experimentos de escoamento, em um-passo por Van Dam et al. (1992), e vários-passos por Van Dam et al. (1994), Eching e Hopmans (1993) e Zurmuhl e Durner (1998) com o objetivo de determinar os parâmetros hidráulicos dos solos em estudo. Outra possibilidade de uso dessa técnica tem sido relatada em experimentos de evaporação (ŠIMŮNEK et al., 1998) e (ROMANO e SANTINI, 1999).

A primeira aplicação da modelagem inversa em dados de campo foi reportada por Dane e Hruska (1983), que otimizaram os parâmetros da equação de van Genuchten a partir de dados de drenagem. Mais tarde essa mesma técnica foi utilizada por Kool et al. (1987) em estudo de fluxo de água em lisímetro e, posteriormente, por Romano (1993) na tentativa de quantificar a variabilidade espacial dos parâmetros hidráulicos do solo.

Outros autores passaram a utilizar a modelagem inversa a partir de dados coletados em experimentos in situ, precisamente em lisímetros (INES e DROOGERS, 2002) e (DIKINYA, 2005) e em campo (ŠIMŮNEK et al., 1998), (RITTER et al., 2003) e (ADHANOM et al., 2012).

O HYDRUS-1D (ŠIMŮNEK et al., 2013b) é um dos modelos mais utilizados para simular o movimento de água, calor e soluto em escala unidimensional e com conteúdo de água variável. O mesmo é constituído do programa computacional HYDRUS e de uma interface gráfica que interage com o usuário, HYDRUS1D. Para quantificar o fluxo de água no solo saturado ou não saturado, o HYDRUS resolve a equação de Richards numericamente.

A popularidade do modelo se dá, em parte, por possuir grande número de processos nos códigos, além de sua flexibilidade em permitir a aplicação em problemas agrícolas, industriais e ambientais, com a possibilidade de estimar parâmetros de forma inversa e facilidade de uso (ŠIMŮNEK et al., 2013a).

Adicionalmente, o HYDRUS-1D inclui uma técnica de otimização de parâmetros baseada no método iterativo de Levenberg-Marquardt (MARQUARDT, 1963) para estimação inversa dos parâmetros hidráulicos do solo. Essa técnica tornou-se bastante utilizada no meio científico, sendo aplicada tanto em experimentos de laboratório quanto em experimentos de campo.

3 MATERIAL E MÉTODOS

3.1 Caracterização da área experimental

O ensaio foi realizado em um Argissolo Amarelo localizado no campus do Pici Professor Prisco Bezerra, na Universidade Federal do Ceará, em Fortaleza, Ceará. Os tensiômetros foram instalados em uma parcela experimental circular cujo diâmetro foi de 3 m e profundidade considerada de 0,6 m, nos moldes para a determinação da condutividade hidráulica pelo método do perfil instantâneo. O volume de solo foi delimitado nas faces laterais por lona plástica, para evitar fluxos laterais subsuperficiais. Assim, para atender às condições de contorno do método, garantiu-se que o fluxo de água no centro da parcela ocorresse somente na direção vertical (HILLEL et al., 1972).

3.2 Análises físicas

Na parcela em que o experimento foi conduzido foram coletadas amostras de solo com estrutura preservada e não preservada para descrição física do solo. As amostras com estrutura não preservada foram utilizadas para a realização das análises granulométrica (GEE e BAUDER, 1986) e de densidade de partículas (BLAKE e HARTGE, 1986a). Já as amostras com estrutura preservada foram utilizadas para a construção da curva de retenção de água no solo (KLUTE, 1986) e determinação da densidade do solo (BLAKE e HARTGE, 1986b). Na Tabela 1 encontram-se informações referentes à granulometria do solo.

Tabela 1 - Distribuição de tamanho de partículas e classificação textural das camadas do solo.

Camadas (m)	Areia	Silte	Argila	Classe textural
	----- g kg ⁻¹ -----			
0,00 – 0,275	873	40	87	Areia
0,275 – 0,425	843	75	82	Areia Franca
0,425 – 0,600	585	75	340	Franco-argilo-arenosa

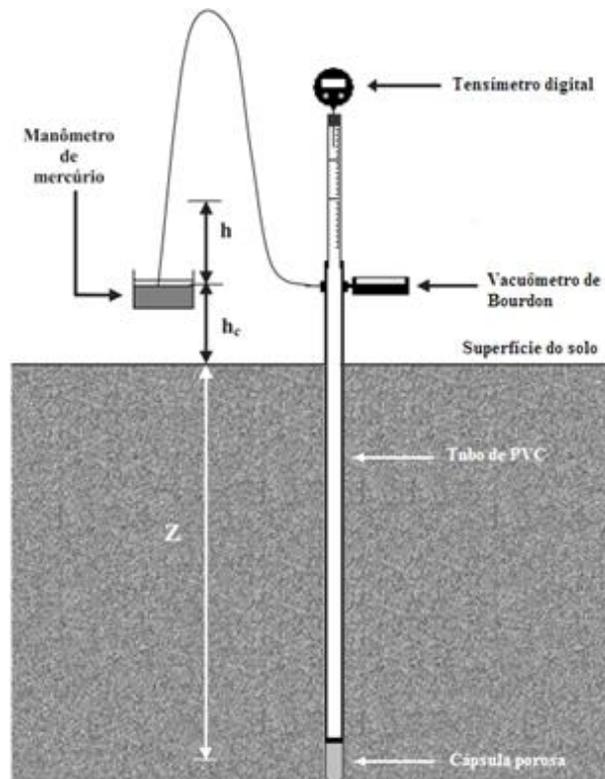
3.3 Confeção dos tensiômetros

Os tensiômetros foram construídos de modo a permitir que o manômetro de mercúrio, o vacuômetro de Bourdon e o tensímetro digital com transdutor de pressão funcionassem em um mesmo instrumento, fazendo com que cada sistema de leitura ficasse

sujeito às mesmas condições naquele aparelho. Os tensiômetros foram confeccionados com tubos de PVC rígido, com diâmetros externo e interno de 0,021 e 0,016 m, respectivamente, e comprimento correspondente à profundidade de instalação mais 0,55 m acima da superfície do solo (sendo 0,20 m de PVC e 0,35 m de tubo de acrílico transparente).

O aparato destinado ao funcionamento do manômetro de mercúrio foi composto por uma mangueira de “nylon”, com diâmetro interno de 0,002 m, colada ao tubo de PVC, conectando o tensiômetro à uma cuba com mercúrio (Figura 1). Para o tensiômetro de Bourdon, utilizou-se um vacuômetro com fundo de escala de 760 mmHg, com divisões de 20 mmHg. Para a medição com o tensímetro digital com transdutor de pressão, os tubos de acrílico foram vedados com rolha de silicone própria para essa finalidade. O tubo de acrílico foi coberto por tubo de PVC (diâmetro de 0,0254 m) para evitar a insolação direta, que levaria à dilatação diferencial e, conseqüentemente, a vazamentos pela interface rolha-tubo de acrílico.

Figura 1 - Diagrama esquemático do tensiômetro construído com os três sistemas de leitura.



Fonte: Adaptada de Brito et al., 2009.

3.4 Instalação em campo

Após averiguação do perfeito funcionamento em laboratório, os tensiômetros contendo os sistemas de leitura foram instalados no campo nas profundidades de 0,20; 0,35 e 0,50 m do perfil de solo, com seis repetições, totalizando 18 aparelhos (Figura 2). Após a operação de umedecimento até a saturação, a parcela foi coberta com lona plástica para evitar qualquer fluxo de água pela superfície, seja por evaporação ou infiltração, também para atender as condições de contorno do método do perfil hidráulico instantâneo (LIBARDI et al., 1980). Feitos os procedimentos descritos anteriormente, foram realizadas leituras diárias nos sistemas às 7 horas.

Figura 2 - Vista da área e disposição dos tensiômetros na parcela experimental.

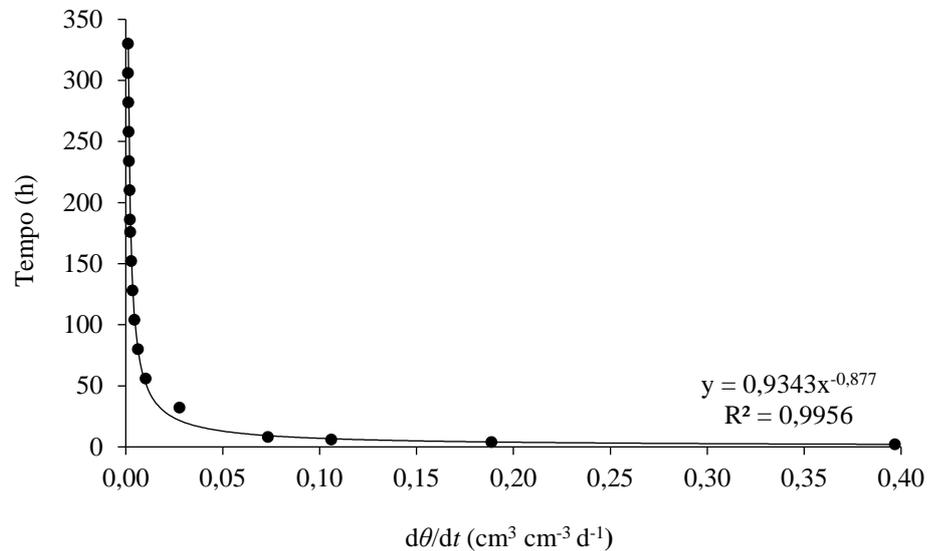


Fonte: O autor.

Para evitar modificações no equilíbrio estabelecido entre a câmara de ar, localizada na porção superior do tensiômetro, a água do tensiômetro e a água no solo, procedeu-se inicialmente a leitura no manômetro de mercúrio, vacuômetro de Bourdon, nessa ordem, para, em seguida, proceder a leitura com o tensiômetro digital contendo o transdutor de pressão (neste último se fez a introdução da agulha com a leitura sendo feita em 30, 60, 90, 120, 150 e 180 segundos após). Depois de considerada desprezível a drenagem, ou seja, quando o solo atingiu a capacidade de campo o experimento foi encerrado. Assumiu-se essa

condição quando a taxa de variação da umidade no tempo, $d\theta/dt$, foi igual a $0,001 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3} \text{ d}^{-1}$ (Gráfico 1).

Gráfico 1 - Taxa de variação da umidade do solo no tempo, na profundidade de 0,35 m.



3.5 Processamento das leituras

3.5.1 Manômetro de mercúrio

Os dados dos tensiômetros com manômetro de mercúrio foram obtidos medindo-se a elevação da coluna de mercúrio na mangueira de “nylon”. As leituras foram convertidas em potencial matricial (ϕ_m , m) pela equação

$$\phi_m = -1,26h_{Hg} + h_c + z, \quad (1)$$

em que h_{Hg} é a altura da coluna de Hg, m; h_c a altura do nível de Hg na cubeta em relação à superfície do solo, m; z a profundidade de instalação do centro da cápsula porosa do tensiômetro, m.

3.5.2 Vacuômetro de Bourdon

Com o vacuômetro de Bourdon as leituras foram feitas diretamente no visor do instrumento, sendo as leituras convertidas em potencial matricial por

$$\phi_m = -(0,0136L) - h + h_c + z, \quad (2)$$

em que L é a leitura no visor analógico, mm; h a altura da coluna de água acima do ponto de inserção do manômetro, m; h_c a altura de inserção do manômetro de Bourdon no tubo de PVC em relação à superfície do solo, m; e z (m) a distância entre o centro da cápsula e a superfície do solo.

3.5.3 Tensímetro digital

Para o tensímetro digital com transdutor de pressão, os dados foram obtidos conectando-se o sensor com a câmara de ar por meio de uma agulha para a transferência de tensão para o instrumento medidor. A equação utilizada para a conversão das leituras em potencial matricial foi

$$\phi_m = -(0,0136L_d) + h_e + z, \quad (3)$$

em que L_d é a leitura no visor digital, mm; $h_e = h_c + h$, m.

3.6 Outros cálculos de água no solo

Conhecidos os potenciais matriciais obtidos por cada tipo de manômetro foi possível conhecer também os respectivos conteúdos de água à base de volume a partir da curva característica de água no solo. A curva característica de água no solo foi a média das curvas de seis amostras obtidas em área externa e próxima à parcela experimental, coletadas com amostrador tipo Uhland para manter a estrutura preservada, em cilindros com altura e diâmetro ambos medindo 0,05 m. O conteúdo de água na saturação foi considerado igual à porosidade total do solo (calculada com os valores de densidade do solo e de partículas), equação 4,

$$\alpha = \left(1 - \frac{\rho_s}{\rho_p}\right), \quad (4)$$

sendo α a porosidade ($\text{m}^3 \text{ m}^{-3}$), ρ_p e ρ_s a densidade de partículas e do solo (kg m^{-3}), respectivamente. Para os pontos de baixas tensões (0,002; 0,004; 0,006; 0,008 e 0,01 MPa) o conteúdo de água foi determinado mediante o uso do funil de Haines; os demais pontos (0,033; 0,1; 0,7; e 1,5 MPa) em extrator de placa porosa de Richards (KLUTE, 1986). O ajuste da curva foi feito pelo modelo estatístico proposto por (VAN GENUCHTEN, 1980):

$$S_e(\phi_m) = \frac{(\theta - \theta_r)}{\theta_s - \theta_r} = \frac{1}{\left(1 + |\alpha\phi_m|^n\right)^m}, \quad (5)$$

em que θ_r e θ_s denotam o conteúdo de água volumétrico residual e saturado ($\text{m}^3 \text{m}^{-3}$), S_e é a saturação efetiva, ϕ_m o potencial matricial da água no solo (m), α (m^{-1} , escalonador do ϕ_m), m e n (relacionados à porosidade). Os parâmetros da equação para cada camada de solo foram obtidos com o software RETC (VAN GENUCHTEN et al., 1991), com dependência do parâmetro m com o n ($m = 1 - 1/n$).

Assim, seguindo metodologia descrita em (LIBARDI, 2012), por meio das medidas simultâneas do conteúdo de água e do potencial total da água no solo ($\phi_m + \phi_g$) no perfil de solo estabelecido, durante o período de redistribuição da água, foram determinados para cada tempo o gradiente, a densidade de fluxo e, posteriormente, a condutividade hidráulica em função do conteúdo volumétrico de água $K(\theta)$, todos em 0,35 m, pela equação

$$K(\theta)|_z = \frac{-\int_0^z \frac{\partial \theta}{\partial t} dZ}{\frac{\partial \phi_t}{\partial z}|_z}, \quad (6)$$

em que o numerador é a densidade de fluxo e o denominador o gradiente de potencial total na profundidade de solo z .

3.7 Modelagem Inversa

Para a obtenção do parâmetro condutividade hidráulica do solo saturado (K_θ), foi utilizado o modelo Hydrus-1D (ŠIMŮNEK et al., 2013b) usando um processo de estimação de parâmetro inverso (HOPMANS et al., 2002). O Hydrus-1D resolve a equação de Richards, equação 7, para o fluxo vertical de água no solo. Dentre os vários modelos disponíveis para descrever as propriedades hidráulicas do solo, utilizou-se o modelo de (VAN GENUCHTEN, 1980) para descrição da curva de retenção de água no solo, além da combinação com o modelo estatístico de distribuição de tamanho de poros de (MUALEM, 1976), equação 8, para predição por meio da função de condutividade hidráulica do solo não saturado em termos dos parâmetros de retenção de água no solo:

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left[K(\phi_m) \left(\frac{\partial \phi_m}{\partial z} \right) + K(\phi_m) \right], \quad (7)$$

$$K(\phi_m) = K_0 S_e^l \left[1 - \left(1 - S_e^{1/m} \right) \right]^2, \quad (8)$$

em que θ é o conteúdo volumétrico de água ($\text{m}^3 \text{m}^{-3}$), ϕ_m é o potencial matricial da água no solo (m), K é a condutividade hidráulica do solo não saturado (m h^{-1}), z é a coordenada vertical (m), t é o tempo (h), K_0 é a condutividade hidráulica do solo saturado (m h^{-1}) e l é o coeficiente de conectividade de poros.

No cenário do modelo Hydrus, o perfil do solo foi dividido em três camadas (0-0,275 m; 0,275-0,425 m e 0,425-0,6 m), com 13 nós e três pontos de observações: 0,20 m; 0,35 m e 0,50 m correspondendo às profundidades de instalação dos tensiômetros. Como valores iniciais para os parâmetros hidráulicos foram atribuídos $\theta_r = 0,1$; $\theta_s = 0,35$; $\alpha = 1$; $n = 1,5$; $K_0 = 0,001$ e $l = 0,5$ em todas as profundidades. Para a profundidade de 0,35 m foram otimizados os parâmetros θ_r , θ_s , α , n e K_0 .

Como condição de contorno considerou-se fluxo nulo na superfície do solo (limite superior) e drenagem livre em 0,6 m (limite inferior). A condição inicial de cada profundidade foi configurada com um potencial matricial de 0,01 m, ou seja, condição de solo praticamente saturado. Valores de potenciais matriciais medidos in situ foram inseridos para um período de 330 horas na função objetiva para procedimento de simulação.

Os parâmetros hidráulicos foram obtidos pela minimização da função objetiva, definido como a soma dos quadrados dos desvios entre valores observados e simulados (HOPMANS et al., 2002). A função objetiva foi minimizada utilizando o método de Levenberg-Marquardt (MARQUARDT, 1963). É importante destacar que uma função objetiva contendo os resíduos entre os dados ajustados e medidos é minimizada e os parâmetros resultantes não necessariamente têm significado físico (ŠIMŮNEK e VAN GENUCHTEN, 1996).

3.8 Análise dos dados

Para a determinação do tempo em que se estabeleceu o equilíbrio entre as tensões da água no interior do tensiômetro e a da água no solo, realizaram-se leituras em 30, 60, 90, 120, 150 e 180 segundos após a introdução da agulha no tensiômetro. Foram testados, por meio do teste t de Student ao nível de 10% de significância, os coeficientes angulares e lineares das equações das retas que relacionam os valores de potencial matricial em cada tempo de leitura no decorrer do experimento.

Além dos coeficientes, foi realizado o teste de paralelismo para identificar a dependência do potencial matricial em função do tempo, como também o teste do coeficiente de correlação linear. Este coeficiente quantifica o grau de associação entre duas variáveis,

podendo variar entre -1 (máxima correlação linear negativa) e 1 (máxima correlação linear positiva). Quanto mais próximo de zero, menor a correlação. O coeficiente de correlação foi estimado por

$$r = \frac{\sum_{i=1}^n (E_i - \bar{E})(O_i - \bar{O})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (E_i - \bar{E})^2 \sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})^2}}, \quad (9)$$

em que E_i e O_i referem-se aos valores obtidos com os sistemas alternativos e padrão, respectivamente, \bar{E} e \bar{O} são as médias dos valores obtidos com os sistemas alternativos e padrão, respectivamente.

Após a definição do tempo de equilíbrio para o tensímetro digital, comparou-se o potencial matricial, umidade volumétrica, densidade de fluxo e condutividade hidráulica entre os três sistemas de leitura do tensiômetro (manômetro de Hg, vacuômetro de Bourdon e tensímetro digital). Os sistemas de leitura alternativos foram relacionados graficamente com o sistema padrão, com os coeficientes angulares e lineares da equação da reta que os relaciona avaliados pelo teste t de Student ao nível de significância de 10 %. Da mesma forma como foi feito para o tensímetro, aplicaram-se os testes de paralelismo de retas e do coeficiente de correlação linear.

Adicionalmente, para avaliar a performance dos sistemas de leitura alternativos no procedimento de obtenção dos parâmetros hidráulicos do solo foram utilizados os seguintes índices estatísticos: erro absoluto médio – EAM, raiz do erro quadrático médio – RMSE, erro máximo - E_{\max} , coeficiente de determinação – CD, coeficiente de massa residual – CMR e raiz quadrada do erro médio normalizado – RQEM.

$$EAM = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |O_i - P_i|, \quad (10)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (O_i - P_i)^2}{n-1}}, \quad (11)$$

$$E_{\max} = \max(|O_i - P_i|)_{i=1}^n, \quad (12)$$

$$CD = \frac{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})^2}{\sum_{i=1}^n (P_i - \bar{O})^2}, \quad (13)$$

$$CMR = \frac{\left[\sum_{i=1}^n O_i - \sum_{i=1}^n P_i \right]}{\sum_{i=1}^n O_i}, \quad (14)$$

em que P_i corresponde aos dados de potencial matricial obtidos para o instrumento-padrão (manômetro de mercúrio) e O_i aos dados de potencial matricial obtidos para o instrumento objeto de comparação; n é o número de observações e \bar{O} a média dos valores obtidos para o instrumento objeto de comparação. Uma ótima concordância entre os sistemas de leitura do tensiômetro é obtido com $CD = 1$ e $E_{\max} = EAM = CMR = 0$.

Os coeficientes RMSE, EAM e Emax são comumente utilizados para expressar a acurácia dos resultados numéricos com a vantagem de esses índices apresentarem valores do erro na mesma unidade da medida da variável analisada. Pelo CD determina-se a relação entre a dispersão dos valores simulados e o valor médio das medidas. O CMR e o RQEM exibem o quanto os sistemas alternativos subestimam ou superestimam a medida em relação ao valor obtido pelo manômetro de Hg. Valores positivos de CMR indicam que os sistemas alternativos subestimam os valores do manômetro de Hg, enquanto valores negativos indicam superestimativa.

A compilação de estatísticas foi recomendada por Legates e McCabe Jr. (1999). Segundo os autores, deve-se incluir pelo menos uma estatística adimensional, um índice estatístico de erro absoluto com informações adicionais, como o desvio padrão dos dados medidos, e técnica gráfica.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Análise do tempo até o equilíbrio

Analisando os tempos de leitura após a inserção da agulha do tensímetro no tensiômetro, em profundidade (Gráficos 2, 3 e 4), observa-se que os potenciais matriciais obtidos nos tempos de 30, 60, 90, 120 e 150 segundos apresentaram alto coeficiente de correlação linear com o potencial matricial obtido em 180 segundos após a inserção da agulha, acima de 0,95.

Observa-se também que não houve diferença significativa entre os valores dos potenciais matriciais obtidos com os tratamentos aplicados. Isso indica que a leitura do tensímetro pode ser feita em qualquer um dos tempos analisados, 30, 60, 90, 120, 150 ou 180 segundos, que não acarretará diferença de tensão da água no solo. Ao contrário do que foi reportado por (MARTHALER et al., 1983), em que o reequilíbrio da tensão da água no solo com a água contida no tensiômetro varia de 2 a 10 minutos, no presente trabalho esse equilíbrio foi atingido em não mais que 30 segundos.

Apesar de após a inserção da agulha ter sido possível a observação de variação das leituras no visor do instrumento, esta variação não foi suficiente para causar diferença nos cálculos de potencial matricial, fato constatado por testes de intercepto e inclinação (Tabela 2). As retas que relacionam o potencial matricial nos tempos de 30, 60, 90, 120 e 150 segundos com o tempo de 180 segundos apresentaram mesmo intercepto e inclinação em todas as profundidades, o que as classifica como paralelas, sendo, portanto, indicado o uso de qualquer uma das equações a elas associadas para representar a regressão entre as variáveis.

Gráfico 2 - Relação entre os tempos de equilíbrio do tensímetro digital na profundidade de 0,2 m.

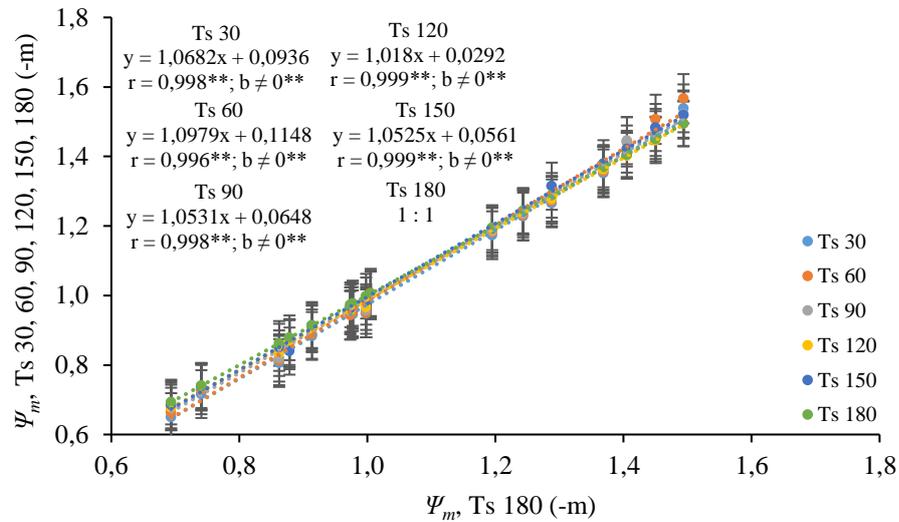


Gráfico 3 - Relação entre os tempos de equilíbrio do tensímetro digital na profundidade de 0,35 m.

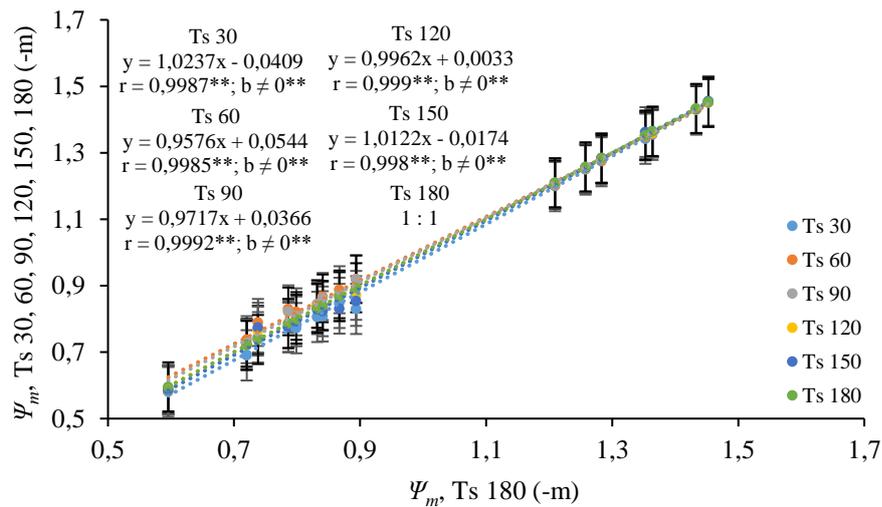


Gráfico 4 - Relação entre os tempos de equilíbrio do tensímetro digital na profundidade de 0,5 m.

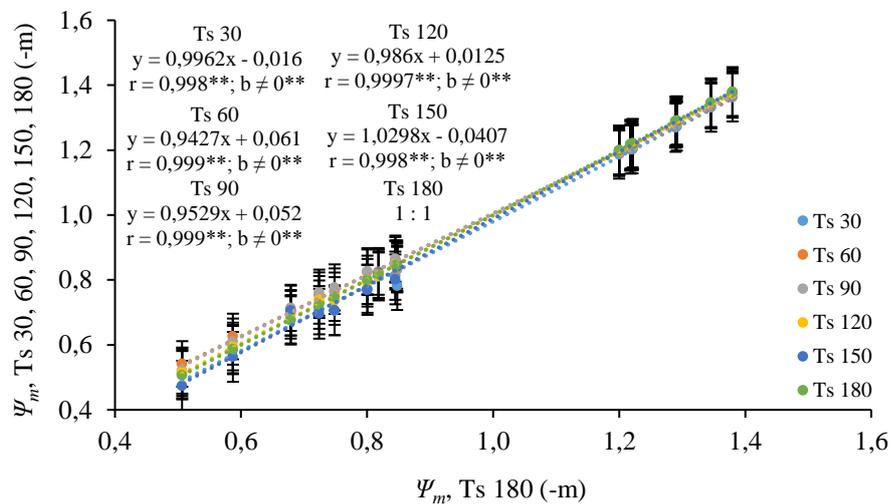


Tabela 2 - Teste estatístico dos coeficientes angulares e lineares da relação linear entre os tempos de leitura do tensímetro no período experimental.

Tratamentos (Tempos)	Intercepto		Tratamentos (Tempos)	Inclinação	
	t obs.	t tab. (10%)		t obs.	t tab. (10%)
0,20 m					
Ts 30 - Ts 180	-0,570	1,696	Ts 30 - Ts 180	0,025	1,696
Ts 60 - Ts 180	-0,556	1,696	Ts 60 - Ts 180	0,036	1,696
Ts 90 - Ts 180	-0,588	1,696	Ts 90 - Ts 180	0,019	1,696
Ts 120 - Ts 180	-0,610	1,696	Ts 120 - Ts 180	0,007	1,696
Ts 150 - Ts 180	-0,593	1,696	Ts 150 - Ts 180	0,019	1,696
0,35 m					
Ts 30 - Ts 180	-0,790	1,696	Ts 30 - Ts 180	0,011	1,696
Ts 60 - Ts 180	-0,718	1,696	Ts 60 - Ts 180	-0,019	1,696
Ts 90 - Ts 180	-0,731	1,696	Ts 90 - Ts 180	-0,013	1,696
Ts 120 - Ts 180	-0,756	1,696	Ts 120 - Ts 180	-0,002	1,696
Ts 150 - Ts 180	-0,772	1,696	Ts 150 - Ts 180	0,005	1,696
0,50 m					
Ts 30 - Ts 180	-0,820	1,696	Ts 30 - Ts 180	-0,002	1,696
Ts 60 - Ts 180	-0,757	1,696	Ts 60 - Ts 180	-0,027	1,696
Ts 90 - Ts 180	-0,764	1,696	Ts 90 - Ts 180	-0,023	1,696
Ts 120 - Ts 180	-0,797	1,696	Ts 120 - Ts 180	-0,007	1,696
Ts 150 - Ts 180	-0,840	1,696	Ts 150 - Ts 180	0,015	1,696

4.2 Sistemas de leitura do tensiômetro

No Gráfico 5 é mostrada a correlação entre os potenciais matriciais obtidos pelos sistemas de leitura, vacuômetro de Bourdon e tensímetro com o manômetro de mercúrio. O alto coeficiente de correlação (0,956 para o vacuômetro de Bourdon e 0,986 para o tensímetro digital) denota quão relacionados eles estão.

O manômetro de Hg registrou potencial matricial máximo em 0,006 MPa enquanto que o vacuômetro de Bourdon alcançou valores próximos a 0,010 MPa e o tensímetro digital aproximadamente 0,015 MPa. Lembrando-se que o experimento cobriu uma faixa de potencial matricial entre a saturação do solo e a capacidade de campo, determinado pela redução do fluxo até chegar a uma taxa de 0,1 mm.d⁻¹.

Com base no teste t, os interceptos das retas são iguais para os três sistemas (Tabela 3). Este cenário evidencia a similaridade das leituras no início do experimento quando o solo ainda estava próximo a saturação. Com relação a inclinação das retas verifica-se que o vacuômetro de Bourdon se equipara ao manômetro de Hg, com mesma inclinação de acordo com o teste t ao nível de significância de 10%.

De modo diferente, a reta do tensímetro apresentou inclinação distinta dos demais sistemas de leitura. Os estudos relacionados ao desempenho do tensímetro focam nos erros desse sistema em função da variação da temperatura do ar. De acordo com Hoelscher et al., (1993), os componentes eletrônicos do tensímetro contribuem com mais erros do que é frequentemente presumido; os autores ainda sugerem que experimentos adicionais sejam realizados com o intuito de separar os erros entre os principais grupos de componentes que constituem o sistema. Com base nisso, a diferença nas leituras obtidas pelo tensímetro com relação aos demais sistemas é atribuída à sensibilidade dos componentes eletrônicos que o constituem, ressaltando que especificações e detalhes técnicos não são, na maioria das vezes, repassados pelos fabricantes aos que fazem uso do instrumento.

Como se pode notar, as leituras com o vacuômetro de Bourdon se mantêm próximas às do manômetro de Hg na quase totalidade da faixa de potencial matricial lida, enquanto que o tensímetro se distancia dos demais sistemas com o aumento do potencial matricial. Assim, é importante destacar que quanto maior o potencial matricial mais o tensímetro superestima o sistema tido como referência. De igual modo, Beraldo et al. (2012) comparando tensiômetro com manômetro de mercúrio e com tensímetro digital de punção instalados a uma profundidade de 0,2 m em um Latossolo encontraram coeficientes de determinação muito próximos aos encontrados neste estudo. Esses autores também ressaltaram o fato de o tensímetro ter se distanciado do manômetro de Hg quando o solo se tornou mais seco.

A reta que relaciona o vacuômetro de Bourdon e o manômetro de Hg apesar de possuírem mesmo intercepto e inclinação, seus valores não são próximos. Aqui cabe uma análise em relação ao funcionamento do vacuômetro de Bourdon. No interior do instrumento, o elemento estático ao receber a tensão a ser medida sofre deformação acionando um mecanismo com um ponteiro para indicação da respectiva tensão no visor do instrumento. As partes móveis que constituem a engrenagem do medidor sofrem resistência ao movimento devido ao princípio de inércia.

Vale ressaltar também que o modelo do vacuômetro de Bourdon pode assumir várias configurações, sendo que nesta pesquisa a configuração utilizada é constituída por um tubo em formato de C. Nesse aspecto, Young e Sisson (2002) relatam que os modelos com tubo em espiral ou em hélice, por serem mais sensíveis, são os mais adequados para baixas tensões. Face ao exposto, é pertinente recomendar a utilização de vacuômetros com sensor em espiral, particularmente quando o objetivo for mensurar o potencial matricial da água no solo na condição de umidade desde próxima à saturação até a capacidade de campo.

Gráfico 5 - Relação entre sistemas de leitura do tensiômetro para as medidas do potencial matricial medido na profundidade de 0,35 m.

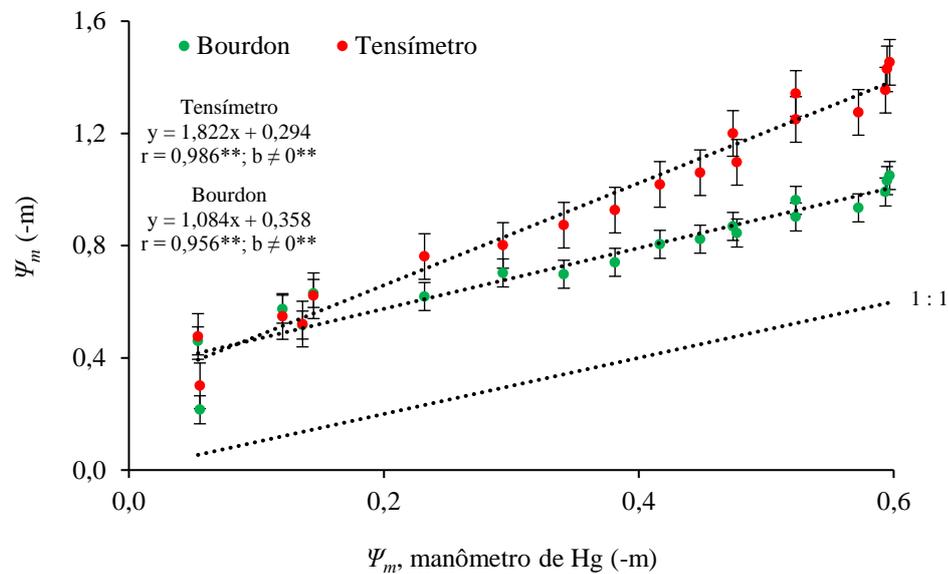


Tabela 3 - Teste estatístico dos coeficientes angulares e lineares da relação linear entre os valores de potencial matricial obtidos pelos sistemas de leitura do tensiômetro no período experimental.

Tratamentos (Sistemas de leitura)	Intercepto		Tratamentos (tempos de leitura)	Inclinação	
	t obs	t tab (10%)		t obs	t tab (10%)
Man. Hg - Bourdon	-0,500	1,687	Man. Hg - Bourdon	-1,033	1,687
Man. Hg - Tensímetro	-0,411	1,687	Man. Hg - Tensímetro	-11,137	1,687
Bourdon - Tensímetro	0,089	1,687	Bourdon - Tensímetro	-6,719	1,687

No Gráfico 6 é mostrada a relação entre os valores de umidade obtidos pelos sistemas de leitura do tensiômetro. Tendo em vista que a determinação da umidade é de fundamental importância para a obtenção da função $K(\theta)$, para cálculos de drenagem interna, necessita-se que as umidades obtidas por sistemas que possivelmente venham a substituir o sistema padrão sejam tão similares ao ponto de não provocarem diferenças em seus coeficientes. Desta feita, observa-se alta relação linear entre os sistemas, sendo o tensímetro melhor correlacionado ao manômetro de Hg ($r = 0,969$) do que o vacuômetro de Bourdon ($r = 0,894$).

O teste de interceptos evidencia igualdade entre todos os sistemas, ao passo que o teste do coeficiente de inclinação diferencia os sistemas alternativos do padrão, mas semelhantes entre si (Tabela 3). De acordo com os valores dos coeficientes angulares, para cada unidade de umidade obtida pelo manômetro de Hg equivale a 0,51 no tensímetro digital

e 0,43 no vacuômetro de Bourdon, ou seja, há subestimativa dos valores de umidade por parte dos sistemas alternativos.

Gráfico 6 - Relação entre sistemas de leitura do tensiômetro para as medidas da umidade volumétrica, na profundidade de 0,35 m.

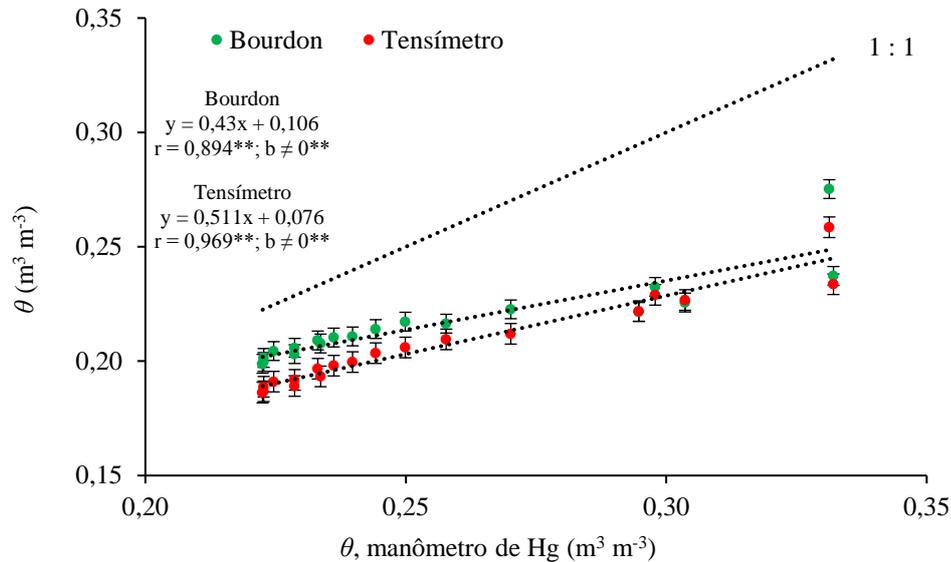


Tabela 4 - Teste estatístico dos coeficientes angulares e lineares da relação linear entre os valores de umidade do solo obtidos pelos sistemas de leitura do tensiômetro no período experimental.

Tratamentos (Sistemas de leitura)	Intercepto		Tratamentos (tempos de leitura)	Inclinação	
	t obs	t tab (10%)		t obs	t tab (10%)
Man. Hg - Bourdon	-0,046	1,687	Man. Hg - Bourdon	10,879	1,687
Man. Hg - Tensímetro	-0,033	1,687	Man. Hg - Tensímetro	15,327	1,687
Bourdon - Tensímetro	0,013	1,687	Bourdon - Tensímetro	-1,320	1,687

Percebe-se pelo Gráfico 7 que os gradientes hidráulicos medidos pelos sistemas alternativos se diferenciaram do gradiente medido pelo manômetro de Hg, apesar de terem o mesmo intercepto (Tabela 5). Verificou-se que as inclinações apresentadas pelos sistemas alternativos foram distintas da inclinação do manômetro de Hg, porém semelhantes entre si.

O manômetro de Hg apresentou valores de gradiente mais próximos a unidade do que os demais sistemas, o que evidencia pouca influência da matriz do solo no gradiente hidráulico. De maneira diferente, os sistemas alternativos apresentaram quase que o dobro do valor observado pelo manômetro de Hg. Como uma consequência desses elevados valores de gradiente, a condutividade hidráulica será subestimada nesses sistemas em relação ao manômetro de Hg, o que pode ser confirmado no Gráfico 9, em que a condutividade hidráulica foi superior para esse sistema comparado àqueles.

Gráfico 7 - Relação entre sistemas de leitura do tensiômetro para as medidas de gradiente hidráulico, na profundidade de 0,35 m.

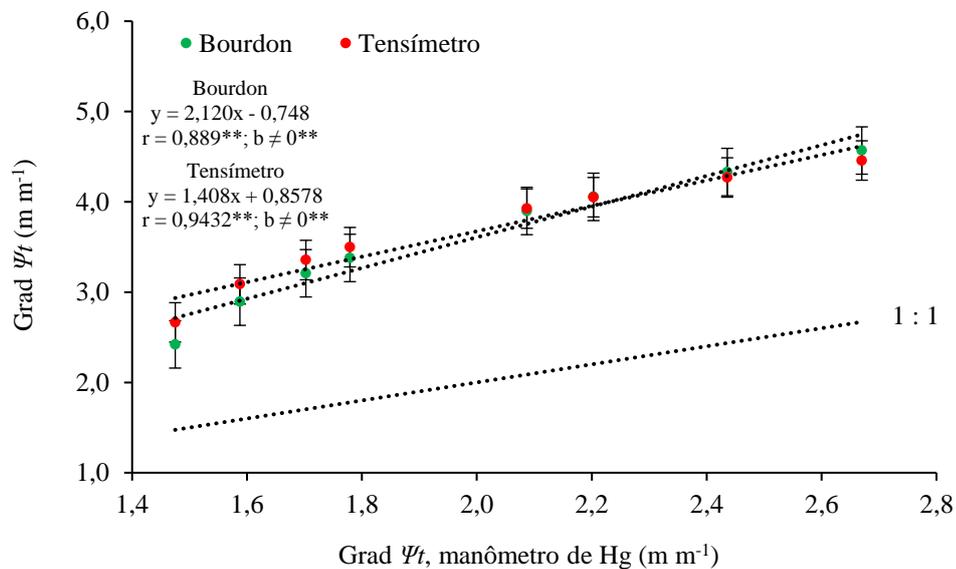


Tabela 5 - Teste estatístico dos coeficientes angulares e lineares da relação linear entre os valores de gradiente hidráulico obtidos pelos sistemas de leitura do tensiômetro no período experimental.

Tratamentos (Sistemas de leitura)	Intercepto		Tratamentos (tempos de leitura)	Inclinação	
	t obs	t tab (10%)		t obs	t tab (10%)
Man. Hg - Bourdon	-0,293	1,753	Man. Hg - Bourdon	-0,783	1,753
Man. Hg - Tensímetro	-0,336	1,753	Man. Hg - Tensímetro	-2,893	1,753
Bourdon - Tensímetro	-0,043	1,753	Bourdon - Tensímetro	0,495	1,753

No Gráfico 8 são apresentados os valores de densidade de fluxo e as equações de regressão obtidas para cada sistema de leitura do tensiômetro. Percebe-se alta correlação linear entre os sistemas alternativos com o manômetro de Hg, sendo $r = 1$ para o vacuômetro de Bourdon e $r = 0,99$ para o tensímetro.

Pelo teste de intercepto (Tabela 6) verifica-se que ambos os sistemas interceptam o eixo das ordenadas em um valor estatisticamente igual. Desta forma, observa-se que nas últimas leituras do experimento não houve diferença no fluxo obtido por cada sistema. É importante destacar que em se tratando de cultivos irrigados, espera-se que o solo esteja a maior parte do tempo próximo da umidade de capacidade de campo e que neste ponto os tensiômetros equipados com os distintos sistemas de leitura não produzem diferenças nos cálculos do fluxo de água no solo.

Em relação ao coeficiente angular, de acordo com o teste t de Student todos os sistemas são diferentes. Analisando a primeira leitura, momento em que o solo se encontra

saturado, observa-se que enquanto o manômetro de Hg registra um valor de densidade de fluxo em torno de 277 mm d^{-1} , o vacuômetro de Bourdon marca 125 mm d^{-1} e o tensímetro 84 mm d^{-1} . Em termos práticos, com o objetivo de quantificar a lixiviação de um determinado componente químico com poder de contaminação do lençol freático presente na solução do solo, a quantificação tomando como base o vacuômetro de Bourdon e o tensímetro resulta em apenas 45% e 30%, respectivamente, do que foi obtido pelo manômetro de Hg. Por esta análise, o uso desses sistemas de leitura quando o objetivo for a densidade de fluxo da solução do solo fica comprometido, tendo em vista a discrepância dos valores observados.

Gráfico 8 - Relação entre sistemas de leitura do tensiômetro para as medidas de densidade de fluxo, na profundidade de 0,35 m.

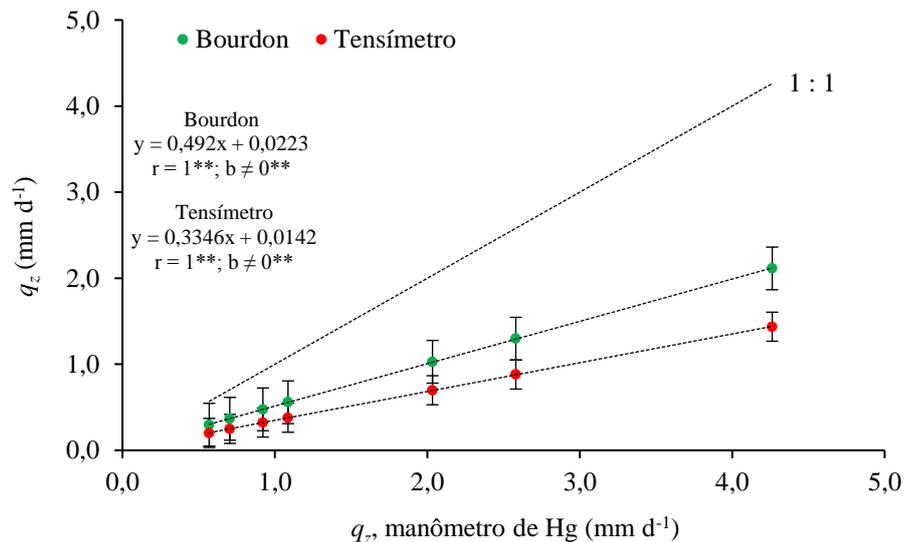


Tabela 6 - Teste estatístico dos coeficientes angulares e lineares da relação linear entre os valores de densidade de fluxo obtidos pelos sistemas de leitura do tensiômetro no período experimental.

Tratamentos (Sistemas de leitura)	Intercepto		Tratamentos (tempos de leitura)	Inclinação	
	t obs	t tab (10%)		t obs	t tab (10%)
Man. Hg - Bourdon	-0,024	1,771	Man. Hg - Bourdon	420,90	1,771
Man. Hg - Tensímetro	-0,015	1,771	Man. Hg - Tensímetro	88,04	1,771
Bourdon - Tensímetro	0,009	1,771	Bourdon - Tensímetro	20,57	1,771

Da mesma forma que a densidade de fluxo, a correlação linear dos valores de condutividade hidráulica entre os sistemas de leitura alternativos e o manômetro de Hg foi alta (Gráfico 9), com valores de $r = 0,99$ para ambos. A magnitude dos valores de condutividade hidráulica foi semelhante à da densidade de fluxo.

O teste t para intercepto e inclinação, Tabela 7, demonstra que os sistemas possuem mesmos interceptos, porém, inclinações diferentes. Evidencia-se que a medida que o solo se aproxima da unidade de capacidade de campo os sistemas tendem a se igualar.

Na primeira medida, solo saturado, o manômetro de Hg registrou uma condutividade hidráulica de 197 mm d^{-1} enquanto que o vacuômetro de Bourdon registrou 77 mm d^{-1} e o tensímetro 46 mm d^{-1} . Conforme observado, uma elevada discrepância foi encontrada entre os sistemas de medida. Apesar de o vacuômetro de Bourdon e o manômetro de Hg se assemelharem quanto ao intercepto e inclinação para as leituras de potencial matricial, os desvios nas leituras de cada sistema, ao se propagarem, contribuíram para as diferenças entre as medidas de condutividade hidráulica do solo, haja vista que esse parâmetro varia exponencialmente com a umidade do solo.

Aqui cabe uma análise para o fato de que o vacuômetro de Bourdon apresenta um fundo de escala com baixa resolução (20 mmHg). Ocorre que na faixa de umidade entre a saturação e a capacidade de campo, notadamente nas primeiras leituras, as variações do potencial matricial ocorrem de maneira mais rápida devido a elevada condutividade hidráulica e conseqüentemente um maior número de leituras são necessárias. Desta forma, pequenas variações ocorrem no potencial matricial necessitando de um maior detalhamento, o que é restringido pela escala do vacuômetro.

Gráfico 9 - Relação entre sistemas de leitura do tensiômetro para as medidas de condutividade hidráulica, na profundidade de $0,35 \text{ m}$.

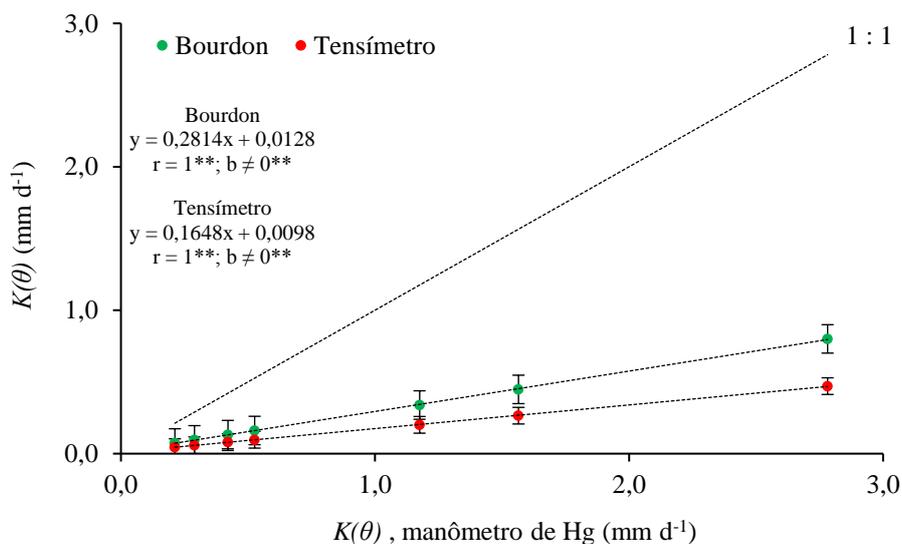


Tabela 7 - Teste estatístico dos coeficientes angulares e lineares da relação linear entre os valores de condutividade hidráulica obtidos pelos sistemas de leitura do tensiômetro no período experimental.

Tratamentos (Sistemas de leitura)	Intercepto		Tratamentos (tempos de leitura)	Inclinação	
	t obs	t tab (10%)		t obs	t tab (10%)
Man. Hg - Bourdon	-0,016	1,771	Man. Hg - Bourdon	410,32	1,771
Man. Hg - Tensímetro	-0,012	1,771	Man. Hg - Tensímetro	81,85	1,771
Bourdon - Tensímetro	0,004	1,771	Bourdon - Tensímetro	11,26	1,771

De acordo com Brito et al. (2009), na determinação da condutividade hidráulica pelo método do perfil instantâneo, a experiência tem evidenciado que o vacuômetro de Bourdon, com mesmo fundo de escala utilizado neste estudo, não permite estudo detalhado da variação do potencial matricial ao longo do tempo, notadamente nas primeiras horas de redistribuição, que correspondem às condições de maior conteúdo de água no solo.

4.3 Modelagem inversa

Um dos modos de obtenção de parâmetros hidráulicos do solo é por meio da modelagem inversa, a partir de dados de potencial matricial ou umidade no tempo. Considerando a possibilidade de uso dessa técnica em estudos hidrológicos, fez-se necessária a comparação de parâmetros hidráulicos do modelo de van Genuchten (1980), de cada sistema, obtidos pelo modelo Hydrus-1D utilizando a técnica de modelagem inversa.

Os Gráficos 10, 11 e 12 contém os valores de potencial matricial médio, observados e ajustados pelo modelo, nas profundidades de 0,20; 0,35 e 0,50 m, durante o período experimental, para o manômetro de Hg, vacuômetro de Bourdon e tensímetro digital, respectivamente. Os valores de RMSE para o ajuste foi de 0,0258 para o manômetro de Hg, 0,0734 no vacuômetro de Bourdon e 0,0544 o tensímetro digital. Pode-se inferir que de modo geral a simulação forneceu um bom ajuste, fato constatado pelos baixos da raiz do erro quadrático médio.

Gráfico 10 - Potencial matricial médio em função do tempo, medido e ajustado pelo Hydrus 1D, para o tensiômetro com manômetro de Hg, em profundidade.

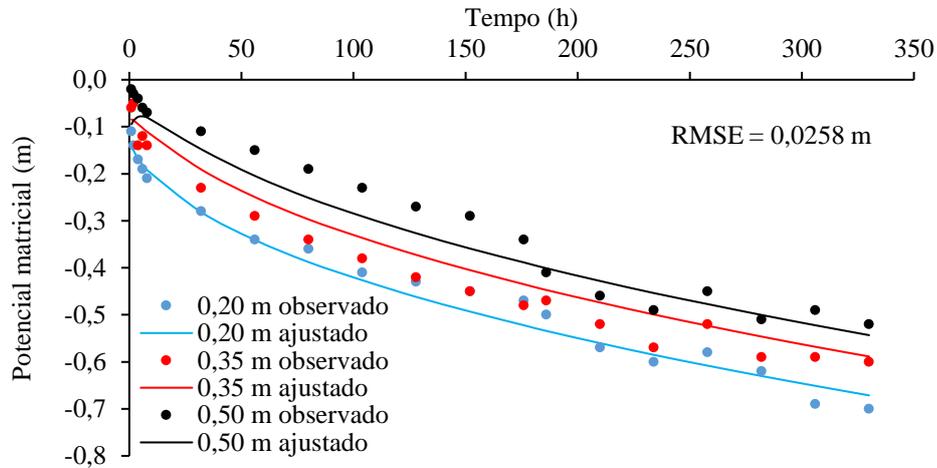


Gráfico 11 - Potencial matricial médio em função do tempo, medido e ajustado pelo Hydrus 1D, para o tensiômetro com vacuômetro de Bourdon, em profundidade.

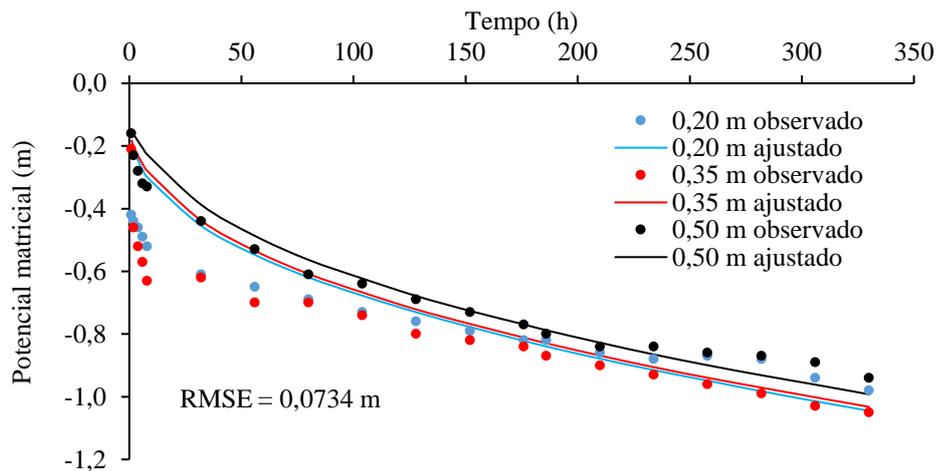
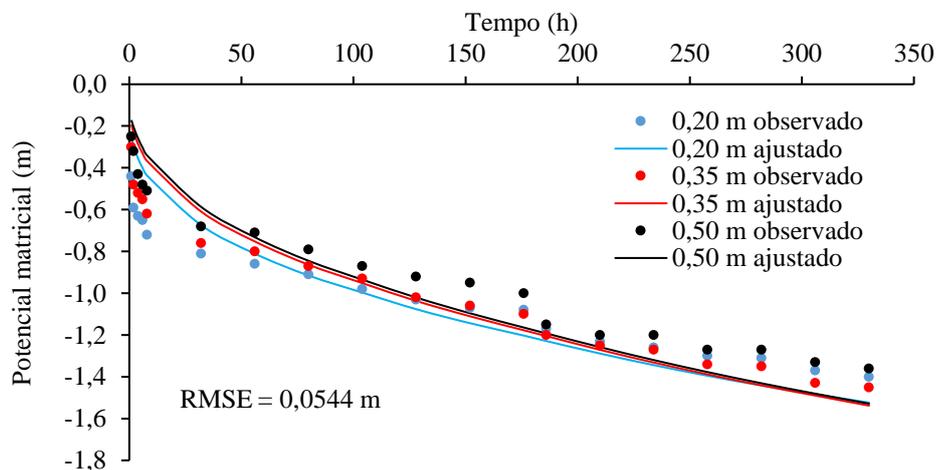


Gráfico 12 - Potencial matricial médio em função do tempo, medido e ajustado pelo Hydrus 1D, para o tensiômetro com tensímetro, em profundidade.



A análise dos parâmetros θ_r e θ_s por meio dos índices estatísticos (Tabela 8) indica boa concordância dos sistemas alternativos ao manômetro de Hg, com erros levemente superior por parte do tensímetro digital (coeficientes EAM, RMSE e E_{\max}). Por esses índices, os sistemas mostram boa concordância com o manômetro de Hg, contrariando algumas observações, particularmente a respeito do desempenho do tensímetro com transdutor de pressão.

Os índices EAM e RMSE fornecem avaliação na mesma unidade de medida da variável que está sendo analisada. Assim posto, observam-se valores muito próximos da neutralidade, com exceção do parâmetro α , que atinge um erro de cinco unidades. Com base no coeficiente CD, que indica o quanto os valores simulados pelos sistemas alternativos estão dispersos da média dos valores do manômetro de Hg, os parâmetros θ_r e n se sobressaem em relação aos demais parâmetros indicando proximidade das estimativas. O parâmetro α foi o que obteve menor CD, porém muito próximo em ambos os sistemas alternativos. Fazendo um comparativo entre os sistemas alternativos, percebe-se facilmente, com base nos índices estatísticos, que não há grandes variações entre eles.

Tabela 8 – Índices estatísticos para comparação dos sistemas de leitura alternativos, vacuômetro de Bourdon e tensímetro digital, com relação ao manômetro de Hg para alguns parâmetros hidráulicos do solo obtidos por modelagem inversa.

Sistemas	Índices				
	EAM	RMSE	E_{\max}	CD	CMR
		θ_r			
Bourdon	0.07	0.11	0.15	0.83	-0.09
Tensímetro	0.10	0.13	0.19	0.69	-0.23
		θ_s			
Bourdon	0.07	0.10	0.15	0.54	0.01
Tensímetro	0.07	0.11	0.20	0.43	-0.01
		α			
Bourdon	4.79	5.66	6.79	0.16	0.82
Tensímetro	4.75	5.58	7.75	0.15	0.82
		n			
Bourdon	0.36	0.55	0.87	0.87	0.01
Tensímetro	0.43	0.57	0.84	1.01	-0.13
		K_s			
Bourdon	0.05	0.06	0.09	0.36	0.97
Tensímetro	0.05	0.06	0.09	0.39	0.66

θ_r : umidade volumétrica residual; θ_s : umidade volumétrica saturada; α e n : parâmetros empíricos do modelo de van Genuchten (1980); K_s : condutividade hidráulica do solo saturado; EAM: erro absoluto médio; RMSE: raiz quadrada do erro médio; E_{\max} : erro máximo; CD: coeficiente de determinação; CMR: coeficiente de massa residual.

Tendo em vista que os parâmetros hidráulicos do solo são utilizados em estudos de modelagem da dinâmica de água e solutos, é importante que os parâmetros estimados pelos sistemas alternativos apresentem o mínimo de erros possíveis para que os modelos quantifiquem os referidos processos com exatidão.

Na Tabela 9 estão presentes os parâmetros ajustados pelo modelo HYDRUS e obtidos pelos valores médios de potencial matricial em cada sistema de leitura do tensiômetro. Os valores apresentados de R^2 evidenciam bons ajustes por parte do modelo Hydrus. Observa-se superioridade do parâmetro K_s obtido pelo manômetro de Hg em relação aos sistemas alternativos, sendo os valores iguais a 0,0019, 0,0011 e 0,0015 $m\ h^{-1}$ para o manômetro de Hg, vacuômetro de Bourdon e tensímetro digital, respectivamente. Desta forma, tem-se que o vacuômetro de Bourdon e o tensímetro digital registraram 58 e 79 % do valor estimado pelo manômetro de Hg, respectivamente.

Ramos et al. (2006), comparando parâmetros hidráulicos de solos de Portugal, obtiveram valores de K_s , por modelagem inversa, que subestimaram as medidas em laboratório em 32,4 % como também obtiveram valores que superestimaram em 259,7 %. Scarpare et al. (2008) em estudo visando otimizar os parâmetros hidráulicos de Latossolos, de dois experimentos conduzidos com cana-de-açúcar no Estado de São Paulo, compararam parâmetros em diferentes camadas de solo obtidos por modelagem inversa, utilizando o algoritmo de Levenberg-Marquardt embutido no software “PEST” - *Parameter ESTimation* (DOHERTY, 2002) e em laboratório. Os autores encontraram valores de K_s obtidos por modelagem inversa representando 5 e 23 % da K_s medida em laboratório. Os valores de K_s obtidos por cada sistema pelo método de Hillel foi de 0,0119 $m\ h^{-1}$, 0,0038 $m\ h^{-1}$ e 0,0041 $m\ h^{-1}$ para o manômetro de Hg, vacuômetro de Bourdon e tensímetro, respectivamente.

Tabela 9 - Parâmetros hidráulicos obtidos por modelagem inversa, por meio do modelo Hydrus-1D a partir de valores médios de potencial matricial para cada sistema, com respectivos coeficientes de determinação e raiz quadrada do erro médio.

Sistemas	Parâmetros					
	θ_s	θ_r	α	n	$K_s\ (m\ h^{-1})$	R^2
Manômetro de Hg	0,3000	0,2000	1,8743	1,3183	0,0019	0,9650
Vacuômetro de Bourdon	0,3000	0,2000	0,7713	1,2129	0,0011	0,9100
Tensímetro digital	0,4500	0,0500	0,9971	2,0000	0,0015	0,9674

5 CONCLUSÕES

A leitura do tensiômetro com tensímetro digital deve ser realizada em 30 segundos após a inserção da agulha na câmara de ar.

O vacuômetro de Bourdon pode substituir o manômetro de Hg na medida do potencial matricial da água no solo na faixa de umidade desde a saturação até a capacidade de campo.

Os sistemas alternativos levam à subestimativa da densidade de fluxo e da condutividade hidráulica em função da umidade e superestimativa do gradiente hidráulico, sendo, portanto, não indicados para a estimativa desses parâmetros hidráulicos.

Os sistemas de leitura do tensiômetro convergem na estimativa de parâmetros hidráulicos por modelagem inversa.

REFERÊNCIAS

- ADHANOM, G. T. *et al.* Comparison of methods for determining unsaturated hydraulic conductivity in the wet range to evaluate the sensitivity of wetting front detectors. **Water SA**, v. 38, n. 1, p. 67–74, 2012.
- BAKKER, G. *et al.* New polymer tensiometers: measuring matric pressures down to the wilting point. **Vadose Zone Journal**, v. 6, n. 1, p. 196, 2007.
- BERALDO, J. M. G.; CORA, J. E.; FERNANDES, E. J. Measurement systems of soil water matric potential and evaluation of soil moisture under different irrigation depths. **Engenharia Agrícola**, v. 32, n. 3, p. 467–478, 2012.
- BLAKE, G. R.; HARTGE, K. H. Particle density. In: KLUTE, A. (Ed.). **Methods of Soil Analysis, Part 1. Physical and Mineralogical Methods - Agronomy Monograph no. 9**. 2. ed. Madison: American Society of Agronomy, Soil Science Society of America, 1986a. p. 377–382.
- BLAKE, G. R.; HARTGE, K. H. Bulk density. In: KLUTE, A. (Ed.). **Methods of Soil Analysis, Part 1. Physical and Mineralogical Methods - Agronomy Monograph no. 9**. 2. ed. Madison: American Society of Agronomy, Soil Science Society of America, 1986b. p. 363–375.
- BRITO, A. DOS S. *et al.* Desempenho do tensiômetro com diferentes sistemas de leitura. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 33, n. 1, p. 17–24, 2009.
- BUCKINGAM, E. Studies on the movement of soil moisture. **U.S. Dept. of Agr. Bur. of Soils**, Bulletin 3, 1907.
- CAMPOS VELHO, H. F. **Problemas inversos: conceitos básicos e aplicações**. Encontro de modelagem computacional. **Anais...Nova Friburgo: Anais São Carlos: SBMAC**, 2001.
- ÇENGEL, Y. A.; BOLES, M. A. **Termodinâmica**. 5. ed. São Paulo: McGraw-Hill, 2006.
- CHONG, S.-K.; GREEN, R. E.; AHUJA, L. R. Simple in situ determination of hydraulic conductivity by power function descriptions of drainage. **Water Resources Research**, v. 17, n. 4, p. 1109–1114, 1981.
- COSTA, A. C. S.; LIBARDI, P. L. Caracterização físico-hídrica de um perfil de terra roxa estruturada latossólica pelo método do perfil instantâneo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 23, n. 1, p. 669–677, 1999.
- DANE, J. H.; HRUSKA, S. In-Situ Determination of Soil Hydraulic Properties during Drainage. **Soil Science Society of America Journal**, v. 47, n. 4, p. 619, 1983.
- DAVIDSON, J. M. *et al.* Field Measurement and Use of Soil-Water Properties. **Water Resources Research**, v. 5, n. 6, p. 1312–1321, 1969.

DIKINYA, O. Comparison of the Instantaneous Profile Method and inverse modelling for the prediction of effective soil hydraulic properties. **Australian Journal of Soil Research**, v. 43, n. 5, p. 599 – 606, 2005.

DOBRIYAL, P. *et al.* A review of the methods available for estimating soil moisture and its implications for water resource management. **Journal of Hydrology**, v. 458-459, p. 110–117, 2012.

DOHERTY, J. **PEST - Model Independent Parameter Estimation**. Corinda Watermark Computing, 2002.

DURIGON, A.; JONG VAN LIER, Q. Determinação das propriedades hidráulicas do solo utilizando tensiômetros de polímeros em experimentos de evaporação. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 35, n. 4, p. 1271–1276, 2011.

DURNER, W.; OR, D. Soil Water Potential Measurement. **Encyclopedia of Hydrological Sciences**, p. 1089–1102, 2005.

DURNER, W.; SCHULTZE, B.; ZURMÜHL, T. State-of-the-art in inverse modeling of inflow/outflow experiments. **Proc. Int. Workshop on Characterization and Measurement of the Hydraulic Properties of Unsaturated Porous Media, October 22-24, 1997, University of California, Riverside, CA., 1999.**, p. 661–681, 1999.

ECHING, S. O.; HOPMANS, J. W. **Optimization of Hydraulic Functions from Transient Outflow and Soil Water Pressure Data** *Soil Science Society of America Journal*, 1993.

FERNANDES, F. C. S.; LIBARDI, P. L.; CARVALHO, L. A. Internal drainage and nitrate leaching in a corn-black oat-corn succession with two split nitrogen applications. **Scientia Agricola**, v. 63, n. 5, p. 483–492, 2006.

GARDNER, W. R. The capillary potential and its relation to soil moisture constants. **Soil Science**, v. 10, p. 357–359, 1920.

GEE, G. W.; BAUDER, J. W. Particle-size analysis. In: KLUTE, A. (Ed.). **Methods of Soil Analysis, Part 1. Physical and Mineralogical Methods - Agronomy Monograph no. 9**. 2. ed. Madison: American Society of Agronomy, Soil Science Society of America, p. 383–411, 1986.

GHIBERTO, P. J. *et al.* Nitrogen fertilizer leaching in an Oxisol cultivated with sugarcane. **Scientia Agricola**, v. 68, n. 1, p. 86–93, 2011.

GONÇALVES, A. D. M. DE A.; LIBARDI, P. L. Análise da determinação da condutividade hidráulica do solo pelo método do perfil instantâneo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 37, n. 5, p. 1174–1184, 2013.

HILLEL, D.; KRENTOS, V. D.; STYLIANOU, Y. Procedure and test of an internal drainage method for measuring soil hydraulic characteristics in situ. **Soil Science**, v. 114, n. 5, p. 395–400, 1972.

HOELSCHER, J. R.; NUTTLE, W. K.; HARVEY, J. W. The calibration and use of pressure transducers in tensiometer systems. **Hydrological Processes**, v. 7, n. 2, p. 205–211, 1993.

HOPMANS, J. W. *et al.* 3.6.2. Inverse modeling of transient water flow. In: DANE, J. H.; TOPP, G. C. (Eds.). **Methods of Soil Analysis, Part 1, Physical Methods**. Third ed. Madison: SSSA, p. 963–1008, 2002.

INES, A. V. M.; DROOGERS, P. Inverse modelling in estimating soil hydraulic functions: a Genetic Algorithm approach. **Hydrology and Earth System Sciences**, v. 6, n. 1, p. 49–66, 2002.

JONG VAN LIER, Q. Análise de sensibilidade no processamento de dados de experimentos de perfil instantâneo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, n. 1, p. 869–883, 2002.

KANDELOUS, M. M.; MORADI, B. A.; HOPMANS, J. W. An Alternative Tensiometer Design for Deep Vadose Zone Monitoring. **Soil Science Society of America Journal**, v. 79, n. 5, p. 1293, 2015.

KLEIN, V. A. Uma proposta de irrigação automática controlado por tensiômetros. **Revista Brasileira de Agrociência**, v. 7, n. 3, p. 231–234, 2001.

KLUTE, A. Water retention. In: KLUTE, A. (Ed.). **Methods of Soil Analysis, Part 1. Physical and Mineralogical Methods - Agronomy Monograph no. 9**. 2. ed. Madison: American Society of Agronomy, Soil Science Society of America, 1986. p. 635–662.

KLUTE, A.; GARDNER, W. R. Tensiometer response time. **Soil Science**, v. 93, n. 1, p. 204–207, 1962.

KOOL, J. B.; PARKER, J. C. Analysis of the inverse problem for transient unsaturated flow. **Water Resources Research**, v. 24, n. 6, p. 817–830, 1988.

KOOL, J. B.; PARKER, J. C.; VAN GENUCHTEN, M. T. Determining Soil Hydraulic Properties from One-step Outflow Experiments by Parameter Estimation: I. Theory and Numerical Studies1. **Soil Science Society of American Journal**, v. 49, n. 6, p. 1348–1354, 1985.

KOOL, J. B.; PARKER, J. C.; VAN GENUCHTEN, M. T. Parameter estimation for unsaturated flow and transport models - A review. **Journal of Hydrology**, v. 91, n. 3-4, p. 255–293, 1987.

LEGATES, D. R.; MCCABE JR., G. J. Evaluating the use of “goodness-of-fit” measures in hydrologic and hydroclimatic model validation. **Water Resources Research**, v. 35, n. 1, p. 233–241, 1999.

LIBARDI, P. L. *et al.* Simple field methods for estimating soil hydraulic conductivity. **Soil Science Society of America Journal**, v. 44, n. 1, p. 3, 1980.

LIBARDI, P. L. **Dinâmica da água no solo**. 2. ed. São Paulo: Edusp, 2012.

LIBARDI, P. L.; MELO FILHO, J. F. DE. Análise exploratória e variabilidade dos parâmetros da equação da condutividade hidráulica, em um experimento de perfil instantâneo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 30, n. 2, p. 197–206, 2006.

MACHADO, R. E.; VETORAZZI, C. A.; XAVIER, A. C. Simulação de cenários alternativos de uso da terra em uma microbacia utilizando técnicas de modelagem e geoprocessamento. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 27, n. 4, p. 727–733, 2003.

MARQUARDT, D. W. **An Algorithm for Least-Squares Estimation of Nonlinear Parameters** *Journal of the Society for Industrial and Applied Mathematics*, 1963.

MARTHALER, H. P. *et al.* A pressure transducer for field tensiometers. **Soil Science Society of America Journal**, v. 47, n. 4, p. 624, 1983.

MORAES, N. B. *et al.* Avaliação de cápsulas de cerâmica e instrumentos de medida de tensão usados em tensiômetros. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 10, n. 1, p. 58–63, 2006.

MORARI, F. *et al.* Nitrate concentrations in groundwater under contrasting agricultural management practices in the low plains of Italy. **Agriculture, Ecosystems and Environment**, v. 147, n. 1, p. 47–56, 2012.

MUALEM, Y. A new model for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated porous media. **Water Resources Research**, v. 12, n. 3, p. 513–522, jun. 1976.

OGATA, G.; RICHARDS, L. A. Water Content Changes Following Irrigation of Bare-Field Soil That is Protected from Evaporation1. **Soil Science Society of America Journal**, v. 21, n. 4, p. 355, 1957.

OR, D. Who invented the tensiometer? **Soil Science Society of America Journal**, v. 65, n. 1, p. 1–3, 2001.

PARAMASIVAM, S.; ALVA, A. K.; FARES, A. An evaluation of soil water status using tensiometers in a sandy soil profile under citrus production. **Soil Science**, v. 165, n. 4, p. 343–353, 2000.

PREVEDELLO, C. L.; ARMINDO, R. A. **Física do solo com problemas resolvidos**. 2^a. ed. Curitiba. 2015.

RAMOS, T. B. *et al.* Estimation of Soil Hydraulic Properties from Numerical Inversion of Tension Disk Infiltration Data. **Vadose Zone Journal**, v. 5, n. 2, p. 684, 2006.

REICHARDT, K.; TIMM, L. C. **Solo, planta e atmosfera: conceitos, processos e aplicações**. 2. ed. Barueri: Manole, 2012.

RICHARDS, L. A. Capillary conduction of liquids in porous mediums. **Physics**, v. 1, p. 318–333, 1931.

RICHARDS, L. A.; GARDNER, W. R.; OGATA, G. Physical Processes Determining Water Loss from Soil. **Soil Science Society of America Journal**, v. 20, n. 3, p. 310, 1956.

RICHARDS, S. J.; WEEKS, L. V. Capillary Conductivity Values from Moisture Yield and Tension Measurements on Soil Columns. **Soil Science Society of America Journal**, v. 17, n. 3, p. 206, 1953.

RITTER, A. *et al.* Using inverse methods for estimating soil hydraulic properties from field data as an alternative to direct methods. **Agricultural Water Management**, v. 59, n. 2, p. 77–96, 2003.

ROMANO, N. Use of an inverse method and geostatistics to estimate soil hydraulic conductivity for spatial variability analysis. **Geoderma**, v. 60, n. 1-4, p. 169–186, 1993.

ROMANO, N.; SANTINI, A. Determining soil hydraulic functions from evaporation experiments by a parameter estimation Approach: Experimental verifications and numerical studies. **Water Resources Research**, v. 35, n. 11, p. 3343–3359, 1999.

SAUNDERS, L. C. U.; LIBARDI, P. L.; REICHARDT, K. Condutividade hidráulica da Terra Roxa Estruturada em condições de campo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 2, p. 164–167, 1978.

SCARPARE, F. V. *et al.* Otimização dos parâmetros hidráulicos do solo por meio de modelagem inversa utilizando o programa pest. **XXXIII CONGRESSO BRASILEIRO DE CIÊNCIA DO SOLO**, n. 1, p. 1–4, 2008.

SENTELHAS, P. C. *et al.* Análise comparativa de dados meteorológicos obtidos por estações convencional e automática. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, v. 5, p. 215–221, 1997.

ŠIMŮNEK, J. *et al.* Using an inverse method to estimate the hydraulic properties of crusted soils from tension-disc infiltrometer data. **Geoderma**, v. 86, n. 1-2, p. 61–81, 1998.

ŠIMŮNEK, J. *et al.* Numerical modeling of contaminant transport using HYDRUS and its specialized modules. **Journal of the Indian Institute of Science**, v. 93, n. 2, p. 265–284, 2013a.

ŠIMŮNEK, J. *et al.* The HYDRUS-1D Software Package for Simulating the Movement of Water, Heat, and Multiple Solutes in Variably Saturated Media, Version 4.17, **HYDRUS Software Series 3**, p. 343, 2013b.

ŠIMŮNEK, J.; VAN GENUCHTEN, M. T. Estimating Unsaturated Soil Hydraulic Properties from Tension Disc Infiltration Data by Numerical Inversion. **Water Resources Research**, v. 32, n. 9, p. 2683–2696, 1996.

ŠIMŮNEK, J.; WENDROTH, O.; VAN GENUCHTEN, M. T. Parameter Estimation Analysis of the Evaporation Method for Determining Soil Hydraulic Properties. **Soil Science Society of America Journal**, v. 62, n. 4, p. 894, 1998.

SISSON, J. B.; FERGUSON, A. H.; VANGENUCHTEN, M. T. Simple Method for Predicting Drainage from Field Plots. **Soil Science Society of America Journal**, v. 44, n. 6, p. 1147–1152, 1980.

VAN DAM, J. C. VAN; STRICKER, J. N. M.; DROOGERS, P. Inverse Method to Determine Soil Hydraulic Functions from Multistep Outflow Experiments. **Soil Science Society of America Journal**, v. 58, p. 647–652, 1994.

VAN DAM, J. C.; STRICKER, J. N. M.; DROOGERS, P. Inverse Method for Determining Soil Hydraulic Functions from One-Step Outflow Experiments. **Soil Science Society of America Journal**, v. 56, n. 4, p. 1042, 1992.

VAN DER PLOEG, M. J. et al. Polymer tensiometers with ceramic cones: direct observations of matric pressures in drying soils. **Hydrology and Earth System Sciences**, v. 14, n. 10, p. 1787–1799, 2010.

VAN GENUCHTEN, M. T. A Closed-form Equation for Predicting the Hydraulic Conductivity of Unsaturated Soils. **Soil Science Society of America Journal**, v. 44, n. 5, p. 892, 1980.

VAN GENUCHTEN, M. T.; LEIJ, F. J.; YATES, S. R. **The RETC code for quantifying the hydraulic functions of unsaturated soils** Riverside U.S. Salinity Laboratory, USDA, ARS, 1991.

VAZ, C. M. P. et al. Principles and Applications of a New Class of Soil Water Matric Potential Sensors: The Dihedral Tensiometer. **Procedia Environmental Sciences**, v. 19, p. 484–493, 2013.

VAZ, C. M. P.; CALBO, A. G.; PORTO, L. H. F. Evaluation of a portable dihedral tensiometer designed to measure water tension in substrates. **ASA, CSSA and SSSA Annual Meetings**, 2012.

WALLHAN, E. F. Use of tensiometers for soil moisture measurement in ecological research. **Ecology**, v. 20, n. 3, p. 403–412, 1 jul. 1939.

WATSON, K. K. An instantaneous profile method for determining the hydraulic conductivity of unsaturated porous materials. **Water Resources Research**, v. 2, p. 709–715, 1966.

YOUNG, M. H.; SISSON, J. B. Tensiometry. In: DANE, J. H.; TOPP, C. G. (Eds.). **Methods of Soil Analysis: Part 4 Physical Methods**. Madison: Soil Science Society of America, 2002. p. 575–678.

ZAZUETA, S. J.; XIN, J. Soil moisture sensors. **Florida Cooperative Extension Science, Institute of Food and Agricultural Sciences, University of Florida**, v. 292, 1994.

ZURMÜHL, T.; DURNER, W. Determination of Parameters for Bimodal Hydraulic Functions by Inverse Modeling. **Soil Science Society of America Journal**, v. 62, n. 4, p. 874, 1998.