UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO

CENTRO DE ENERGIA NUCLEAR NA AGRICULTURA

THAÍS TOKASHIKI TAVARES RODRIGUES

Avaliação funcional de instrumentos de medição do potencial matricial da água no solo seco

Piracicaba

2017

THAÍS TOKASHIKI TAVARES RODRIGUES

Avaliação funcional de instrumentos de medição do potencial matricial da água do solo seco

Versão Corrigida

(Versão original encontra-se na unidade que aloja o Programa de Pós-graduação)

Dissertação apresentada ao Centro de Energia Nuclear na Agricultura da Universidade de São Paulo para obtenção do título de Mestre em Ciências

Área de Concentração: Energia Nuclear na Agricultura e no Ambiente

Orientador: Prof. Dr. Quirijn de Jong van Lier

Piracicaba

2017

AUTORIZO A DIVULGAÇÃO TOTAL OU PARCIAL DESTE TRABALHO, POR QUALQUER MEIO CONVENCIONAL OU ELETRÔNICO, PARA FINS DE ESTUDO E PESQUISA, DESDE QUE CITADA A FONTE.

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)

Técnica de Biblioteca - CENA/USP

Rodrigues, Thaís Tokashiki Tavares

Avaliação funcional de instrumentos de medição do potencial matricial da água no solo seco, município de Piracicaba, São Paulo / Thaís Tokashiki Tavares Rodrigues; orientador Quirijn de Jong van Lier. - - Piracicaba, 2017.
74 p.: il.

Dissertação (Mestrado – Programa de Pós-Graduação em Ciências. Área de Concentração: Energia Nuclear na Agricultura e no Ambiente) – Centro de Energia Nuclear na Agricultura da Universidade de São Paulo.

1. Água do solo 2. Física do solo 3. Instrumentação (Física) 4. Tensiômetro 5. Umidade do solo

CDU 53.083 : 631.432.2

Em memória de Marcos Yuri.

AGRADECIMENTOS

Aos meu pais Marco Antônio e Silvana, por seu amor e apoio;

À minha irmã Natália, pelo apoio e estimulo para que eu alcançasse meus objetivos;

Aos amigos que fiz em Piracicaba, estes se tornaram minha segunda família.

Aos meus amigos, pela amizade, companhia e pelas palavras de ânimo.

Ao meu orientador Prof. Dr. Quirijn de Jong Van Lier, pela orientação, por todos os ensinamentos e pelo auxílio durante o desenvolvimento deste trabalho e as demais atividades do mestrado.

À Universidade de São Paulo e ao Programa de Pós-Graduação do Centro de Energia Nuclear na Agricultura (CENA/USP), pela oportunidade concedida para a realização do mestrado.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pela concessão da bolsa.

Aos colegas do laboratório, por todo o auxílio em amostragem do material de solo, ao auxílio durante o experimento pelo Leonardo Inforsato e auxílio em algumas dúvidas por André Herman Bezerra, Victor Meriguetti Pinto, Yeleine Almoza e Everton Pinheiro.

RESUMO

RODRIGUES, T. T. T. **Avaliação funcional de instrumentos de medição do potencial matricial da água do solo seco**. 2017. 67 f. Dissertação (Mestrado) – Centro de Energia Nuclear na Agricultura, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2017.

Estudos sobre a dinâmica da água no solo não-saturado passam pela medição, estimativa e/ou previsão do potencial matricial ou do teor de água. Diante disso, o objetivo da presente proposta foi realizar testes e avaliações de três instrumentos com características distintas, capazes de medir o potencial matricial da água no solo seco, sendo eles: um medidor baseado no ponto de orvalho (WP4), um instrumento baseado na pressão (tensiômetro de polímero-PoT) e um instrumento baseado na capacitância elétrica (FDR EC-5). A análise foi realizada em três partes: 1. Avaliação do WP4 com amostras com potencial equilibrado na câmara de Richards ou secas ao ar; 2. Avaliação dos PoT e 3. Experimento comparativo entre instrumentos em colunas de solo. Nesses experimentos foram utilizados materiais de solos com texturas diferentes (um de textura argilosa, um de textura média e um de textura arenosa). Os experimentos foram conduzidos no Laboratório de Física de Solo do CENA/USP em Piracicaba-SP. Os resultados mostram que o FDR EC-5 apresentou bons resultados em relação ao método que foi definido como padrão (método gravimétrico), por mais que possua erros associados à curva de retenção. O WP4, que possui uma ampla faixa de leitura de 0 a -30000 m, não se apresentou muito preciso para solos úmidos (h > -70 m) devido ao seu procedimento de leitura. Para solos muito secos, no entanto, ele se apresenta como uma boa opção. O tensiômetro de polímero mede a pressão diretamente na faixa entre 0 a -150 m. Esse instrumento requer cuidados com o coeficiente de calibração, a verificação do limite individual de funcionamento e o contato entre a cápsula porosa do tensiômetro e o solo.

Palavras-chave: Potencial Matricial. Instrumentação. Tensiometria.

ABSTRACT

RODRIGUES, T. T. T. **Functional evaluation of instruments for measuring the water status of dry soil**. 2017. 67 f. Dissertação (Mestrado) – Centro de Energia Nuclear na Agricultura, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2017.

Studies about unsaturated soil water dynamics involve the measurement or prediction of matric potential and/or soil water content. In this study, the objective was to test and evaluate three measurement devices able to measure matric potential in dry soil: a dew point based instrument (WP4), a pressure based instrument (polymer tensiometer – PoT) and an electromagnetic capacitance based instrument (FDR EC-5). The analysis was performed in three steps: 1. Evaluation of WP4 using soil samples in equilibrium with a pressure chamber or with surrounding air; 2. Evaluation of PoT and 3. Experiments to compare devices in soil columns. In these experiments three soil textures were used (clay texture, silt texture and sand texture). The experiments were conducted in the soil physics lab at CENA/Universidade de São Paulo, Piracicaba, Brazil. Results show that the FDR EC-5 performed well when compared to the (standard) gravimetric method, even though it includes errors associated with the retention curve. The WP4 device has a wide reading range of 0 to -30000 m, but is not accurate for saturated or moist soils (h > -70 m) due to its working principle. For very dry soils, however, it is a good option. The polymer tensiometers measure pressure directly and perform in a range between 0 to -150 m. This equipment showed to require special care regarding its calibration coefficient, verification of individual reading limit and the porous cap-soil contact.

Keywords: Matric potential. Instrumentation. Tensiometry.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Pressão de vapor versus temperatura, mostrando o caminho da saturação isopsícrica até que a pressão parcial de vapor (e) seja igual à pressão parcial de saturação (e_s). 22
Figura 2 - Relação entre a umidade relativa do ar no solo e o potencial matricial da água. 24
Figura 3 - Os três instrumentos de medição avaliados. (A) Tensiômetro de Polímero, (B) FDR Decagon Echo Probe EC-5 e (C) Medidor psicrométrico de potencial de água da Decagon WP4, no modelo C. 27
Figura 4 - Tensiômetro de Polímero com cone cerâmico contendo: (1) camada de suporte α-Al_2O_3 com uma membrana γ-Al_2O_3, (2) câmara de polímero, (3) anel de borracha, (4) anel de aço inoxidável, (5) anel de montagem de aço inoxidável e (6) transdutor de pressão. 28
Figura 5 - O WP4 C sem a tampa (esquerda) e bloco (direita). 31
Figura 6 – Posição dos três materiais de solo utilizados no triângulo textural de Atterberg. 34
Figura 7– Foto do experimento em andamento (à esquerda) e ilustração das configurações testadas (à direita): (1) Tensiômetros separados (2) Tensiômetros juntos. 36
Figura 8 - Anel experimental (esquerda) e a imagem do experimento em andamento (direita). 37
Figura 9 - Curva de retenção da água no solo para os três solos. 40
Figura 10 - Potencial matricial observado no modo rápido no WP4 em relação ao potencial aplicado na Câmara de Richards. 41
Figura 11 - Comparação entre o potencial observado no WP4 (modo preciso) e o potencial aplicado na câmara de Richards. 42
Figura 12 - Comparação entre as leituras obtidas pelo WP4 ao decorrer do experimento no modo de leitura rápido em relação ao modo preciso. 44
Figura 13 - Potencial matricial observado pelo WP4 nas amostras de solo com diferentes texturas secas ao ar. 45
Figura 14 - Gráfico Bland-Altman para o potencial obtido pelo WP4 e o potencial de vapor de água calculado para as três texturas. 46
Figura 15 - Potencial matricial ao longo do tempo medido por 3 PoTs distanciados na mesma altura. 47
Figura 16 - Potencial matricial ao longo do tempo medido por 3 PoTs com distância mínima (“juntos”), na mesma altura. 48
Figura 17 - Potencial matricial ao longo do tempo medido por 3 PoTs distanciados na mesma altura, após otimização dos fatores de correção. 49
Figura 18 - Potencial matricial ao longo do tempo medido por 3 PoTs com distância mínima (“juntos”), na mesma altura, após otimização dos fatores de correção. 49
Figura 19 - Umidades obtidas pelos métodos de reflectometria em relação ao gravimétrico para os diferentes solos, com 3 colunas por solo. 51

Figura 20 - Gráfico de dispersão considerando todas as leituras de umidade pelo método de reflectometria em relação ao gravimétrico para calibração do equipamento por solo. 52
Figura 21 - Potencial calculado pelo método FDR em relação ao calculado obtido pelo método gravimétrico por solo. 54
Figura 22 - Potenciais obtidos pelo PoT em relação ao potencial calculado pelo método gravimétrico. 56
Figura 23- Potenciais obtidos pelo WP4 em relação ao potencial obtido pelo método gravimétrico por solo. 58
Figura 24 - Diagrama Bland-Altman para os potenciais obtidos em relação ao potencial gravimétrico para todos os solos. 59

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Parâmetros de correção (a e b): 29
Tabela 2 - Informações dos tensiômetros de polímeros utilizados nesse trabalho. .. 30
Tabela 3 - Algumas propriedades do material testado 39
Tabela 4 - Parâmetros obtidos pelo RETC para os solos arenoso, argiloso e textura média. 40
Tabela 5 - Coeficiente de correlação de Pearson e o RMSE para os potenciais obtidos pelo WP4 (h_{WP4}) em relação ao método gravimétrico (h_{grav}) e e pelo PoT (h_{PoT}) em relação ao método gravimétrico, para os três materiais de solo. 60
Tabela 6 - Coeficiente de correlação de Pearson e o RMSE para os valores filtrados de potenciais obtidos pelo WP4 (hWP4) e pelo PoT (hPoT) com relação ao método gravimétrico, para os três solos..... 61

SUMÁRIO

RESUMO 7

ABSTRACT 9

LISTA DE FIGURAS 11

LISTA DE TABELAS 13

1. INTRODUÇÃO 17

2. REVISÃO DA LITERATURA 20

2.1. Água no solo: teor de água, potencial matricial e curva de retenção 20

2.2. Tensiômetro de Polímeros (PoT) 21

2.3. Psicrômetro WP4C 22

2.4. Reflectômetro no Domínio da Frequência (FDR) 25

3. Materiais e Métodos 27

3.1. Local e instrumentação experimental 27

3.1.1. Tensiômetro de polímero 27

3.1.2. Medidor psicrométrico de potencial de água WP4 C 30

3.1.3. Reflectômetro no domínio da frequência 32

3.2. Material de solo 33

3.3. Avaliação do WP4 35

3.3.1. Medição do potencial em amostras submetidas a uma pressão na Câmara de Richards 35

3.3.2. Medição do potencial em amostras secas ao ar 35

3.4. Avaliação do PoT 36

3.5. Experimento comparativo entre instrumentos em colunas de solo 37

3.6. Análise dos resultados 38

4. Resultados e Discussão 39

4.1. Caracterização hidráulica do solo 39

4.2. Avaliação do WP4 40

4.2.1. Medição do potencial em amostras submetidas a uma pressão na Câmara de Richards 40

4.2.2. Medição do potencial em amostras secas ao ar 44

4.3. Avaliação do PoT 47
4.4. Experimento comparativos entre instrumentos em colunas de solo..... 50
4.4.1. Umidade medida pelos métodos FDR e gravimétrico 50
4.4.2. Potenciais Medidos pelos Diferentes métodos..... 55
5. CONCLUSÕES..... 62
REFERÊNCIAS..... 63
ANEXO 67
Anexo A – Tela de teste dos PoT na água. 69
Anexo B – Quadro de resumo sobre as metodologias. 74

1. INTRODUÇÃO

A distribuição de água na Terra é de aproximadamente 97% de água salgada e 3% de água doce. Sendo que da água doce a grande parte se localiza nas calotas polares (77% aproximadamente), águas subterrâneas (22% aproximadamente), lagos e pântanos (0,35%), rios (0,04%) e atmosfera (0,01%). De acordo com o relatório da UNESCO de 2015, até 2030 o planeta enfrentará um déficit de água de 40% a não ser que seja melhorado a gestão desse recurso.

O movimento da água do solo é regido pela sua condutividade hidráulica em combinação com o gradiente do potencial total da água. Visto isso, a caracterização das propriedades hidráulicas do solo é essencial para vários propósitos, tais como o manejo da agricultura, a irrigação, o controle da erosão, entre outros. Atualmente muitas metodologias são utilizadas para avaliar e acompanhar as propriedades e as características da física do solo. Em solos não-saturados, o componente do potencial total que normalmente predomina é o potencial matricial. Assim, para determinar a dinâmica da água em solos não saturados a medição do potencial matricial (h) é uma necessidade.

Dentre as metodologias que determinam o potencial matricial, o método do psicrômetro é uma das possibilidades para solos em condições muito secas, o que corresponde a valores de h muito negativos. O WP4 (*Dewpoint Potential Meter*) da Decagon Devices é um instrumento que utiliza esta metodologia para medir o potencial matricial da água entre 0 e -3000 m (exatidão de ±5 m), pela determinação do ponto de orvalho em amostras deformadas. Embora o WP4 permita medições rápidas do potencial matricial em toda a faixa de interesse, o instrumento depende de amostragens destrutivas de solo, tanto no campo quanto no laboratório.

Em contrapartida, a medição de h por método não destrutivo pode ser preferida. Nesses casos, o tensiômetro pode ser uma opção. O tensiômetro convencional preenchido com água permite medições na faixa de potenciais mais úmidas, entre 0 e -8 m. Essa faixa interessa à agricultura irrigada, mas é de reduzido interesse para estudos agronômicos, hidrológicos ou ecológicos sobre o estresse hídrico de plantas no solo mais seco. O rompimento do contínuo de água presente nesses tensiômetros limita seu funcionamento a uma faixa restrita devido ao fenômeno de cavitação (CAUPIN; HERBET, 2006). Para contornar esse problema, desenvolveram-se

tensiômetros com polímeros ou géis. Biesheuvel et al. (2000) descreveram o desenvolvimento e o teste de um protótipo de um tensiômetro que se baseia na presença de um gel de polímero. O primeiro modelo produzido em escala um pouco maior foi denominado de “tensiômetro de polímero” (PoT) e é descrito em alguns trabalhos (BAKKER et al., 2007; ROOIJ et al., 2009; VAN DER PLOEG et al., 2008). O PoT permite medições de h na faixa entre 0 e -160 m (precisão de 0,2 m), com a vantagem adicional de permitir medições não destrutivas.

Alternativamente, o potencial matricial pode também ser determinado através de medições da umidade do solo, transformando-a no potencial pela sua relação com o teor de água no solo, a curva de retenção. Entre os métodos para determinar o teor de água do solo tem-se o método gravimétrico bem como métodos que se utilizam de instrumentos específicos como o *Frequency Domain Reflectometer* (FDR), que se baseia na capacitância. A determinação de h dessa forma indireta introduz erros de várias origens associados à determinação da curva de retenção, ao efeito de histerese na curva de retenção e a calibração do próprio instrumento de medição do teor de água.

Dentre as metodologias citadas acima, o tensiômetro de polímero foi utilizado com sucesso, inclusive no Brasil em experimentos tanto de evaporação em laboratório pelo método de Wind (DURIGON; GOOREN, 2011; DURIGON; VAN LIER, 2011) como em experimentos de campo (DURIGON et al., 2012). Entretanto, sua aplicabilidade pode ser questionada, pois suas medidas nunca foram sistematicamente comparadas às medidas ou estimativas feitas por outros instrumentos e metodologias.

Para preencher essa lacuna, o presente trabalho visa realizar um estudo comparativo entre três diferentes metodologias de determinação do potencial matricial: o FDR, o PoT e o WP4, verificando qual dessas metodologias é mais confiável e para qual faixa de umidade se recomendaria utilizar qual método.

Como hipótese de trabalho tem-se que, como o princípio de funcionamento dos três instrumentos testados para a medição do potencial matricial é diferente, suas leituras, quando passam por diferentes transformações para determinar o potencial matricial, afetam seu desempenho. Mais especificamente, o tensiômetro de polímero mede a pressão de um polímero confinado isovolumétricamente; o equipamento WP4

se baseia no equilíbrio termodinâmico entre as fases de vapor e líquida da água no solo; e medidores de teor de água do tipo FDR tem sua leitura interpretada passando por transformação dupla através da curva de retenção.

2.REVISÃO DA LITERATURA

2.1.Água no solo: teor de água, potencial matricial e curva de retenção

A água, em qualquer estado físico, pode ser caracterizada por um estado de energia. Como consequência das relações sistema-meio, a água assume um estado de energia que pode ser descrito pela função termodinâmica energia livre de Gibbs e outros trabalhos conservativos, que no sistema solo-planta-atmosfera recebe o nome particular de “potencial total da água” (REICHARDT; TIMM, 2012).

O potencial total da água no solo é a somatória de cinco componentes: térmico, pressão, gravitacional, osmótico e matricial. O potencial total pode ser medido somente de forma indireta. A medida do potencial total necessita de medidas de outros parâmetros tais como o teor de água e a umidade relativa (AGUS; SCHANZ, 2005). A precisão dos métodos indiretos depende do equilíbrio isotérmico entre o sensor, o solo e o vapor no espaço do sistema fechado onde a medida é conduzida.

O potencial de pressão é considerado apenas quando a pressão que atua sobre a água é diferente e maior do que a pressão atmosférica, correspondente à condições de solo saturado. O potencial gravitacional decorre da presença do campo gravitacional terrestre. O potencial matricial é a somatória de todos os trabalhos que envolvem a interação entre a matriz do solo e a água, como a força capilar (nos poros do solo) e de adsorção (nas superfícies dos sólidos do solo). O potencial osmótico é a diferença de pressão necessária para o equilíbrio através de uma membrana permeável à água, mas não ao soluto (RICHARDS; OGATA, 1961).

A curva de retenção de água no solo descreve a relação entre a umidade volumétrica θ (m^3m^{-3}) e o potencial matricial (m). Pequenas mudanças na curva de retenção podem levar a grandes alterações na função condutividade hidráulica (DURNER, 1994). Através da curva de retenção pode se conhecer a distribuição dos diâmetros dos poros que é determinada pela textura e pela estrutura.

A textura do solo, principalmente o teor de argila, define em boa parte a distribuição do diâmetro dos poros do solo, determinando assim a área de contato entre as partículas sólidas e a água, sendo por isso responsável pela força de retenção principalmente em baixos potenciais, como aquele de ponto de murcha permanente (REICHARDT, 1987). Para a determinação em laboratórios utilizam-se as câmaras de

Richards, eventualmente junto com outros instrumentos como o psicrômetro WP4 (KLEIN et al., 2010).

2.2.Tensiômetro de Polímeros (PoT)

Tensiômetros são amplamente usados para medir o potencial matricial da água no solo sobre condições de campo e laboratório. O tensiômetro é usado para medir o estado de energia da água no solo, no qual em solos insaturados é dominado pela componente matricial do potencial, que é o resultado da combinação do efeito da capilaridade e das forças adsorção exercidas pela matriz do solo (DURNER; OR, 2005).

Tensiômetros comuns consistem de três elementos: uma cerâmica saturada com água que está em contato com o solo, um reservatório de água que está em equilíbrio com a água do solo e um dispositivo que mede a pressão no reservatório. Os reservatórios de água dos tensiômetros convencionais impõem um limite da aplicabilidade que se estende até em torno de -8 m (VAN DER PLOEG et al., 2010).

Para aumentar a faixa de operação dos tensiômetros para valores mais negativos, algumas estratégias foram utilizadas, como: 1) uso de membranas porosas, com tamanho de poros menores; 2) uso de soluções osmóticas dentro do volume interno dos tensiômetros para estender o limite de medição (PAGAY, et al., 2014).

Tensiômetros que são preenchidos com uma solução de polímero no lugar do reservatório de água são capazes de medir uma maior faixa de potenciais matriciais. O princípio é baseado no potencial osmótico de uma solução altamente concentrada de um polímero hidrofílico, que causa um acumulo de pressão quando exposto à água livre. Essa solução é retida dentro do tensiômetro por uma membrana de cerâmica que é permeável à solução do solo e impermeável aos polímeros. O instrumento utiliza a queda subsequente no potencial osmótico como uma medida para o potencial matricial do solo.

O potencial osmótico de uma solução de polímeros reduz fortemente o potencial total da água dentro do tensiômetro de polímero (HILLEL, 1998). Van der Ploeg et al. (2010) estudaram um modo de minimizar o volume da solução do polímero

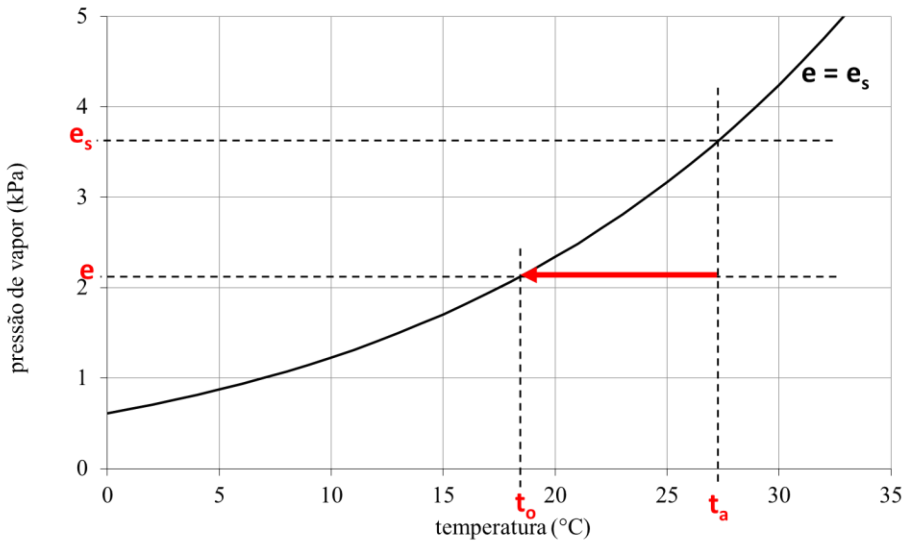
enquanto maximizaram a área de cerâmica em contato com a solução de polímero para fornecer uma solução para o problema de contato entre a cerâmica e o solo.

O potencial osmótico da solução de polímero é dependente da temperatura e requer calibração antes da instalação. Um problema do tensiômetro osmótico é o sal transferido através do filtro resultando em uma mudança do potencial osmótico do polímero (BIESHEUVEL et al., 1999).

2.3.Psicrômetro WP4C

O WP4 *Dew Point Potential Meter* da Decagon Devices modelo C (2013) utiliza o princípio de funcionamento de um psicrômetro pela determinação da temperatura do ponto de orvalho para estimar o potencial. A temperatura de ponto de orvalho é a temperatura à qual o ar deve ser resfriado isopsicricamente até que o vapor de água no ar se condense.

Figura 1 - Pressão de vapor versus temperatura, mostrando o caminho da saturação isopsícrica até que a pressão parcial de vapor (e) seja igual à pressão parcial de saturação (e_s).



A umidade relativa (R_H) é definida como a razão entre a pressão parcial (*e*) do vapor da água em um ar úmido e a pressão parcial de saturação (e_s) do vapor de água na mesma temperatura do ar.

$$\boldsymbol{R_H = \frac{e}{e_s}.100} \qquad \text{Equação 1}$$

A pressão parcial do vapor saturado de água é afetada somente pela presença ou ausência de ar. O potencial da água no solo pode ser o determinado diretamente pela umidade relativa do ar em equilíbrio com a amostra do solo dentro de uma câmara usando a equação de Kelvin:

$$\boldsymbol{\Psi = \frac{RT}{V_w}\ln(R_H)} \qquad \text{Equação 2}$$

Onde Ψ é o potencial da água (Pa), R é a constante universal dos gases (8,314 J $mol^{-1}K^{-1}$), T é temperatura (K) e V_W é o volume molar de água ($1{,}8 \cdot 10^{-5}$ m^3 mol^{-1}). O potencial determinado por psicrometria é o potencial total da água no solo, igual à soma do potencial osmótico Ψ_o e o potencial matricial Ψ_m.

O potencial osmótico Ψ_o (Pa) pode ser calculado a partir do conceito de pressão osmótica (P_{os}), resultado da ação conjunta de todos os solutos sobre a própria componente osmótica, segundo a equação de Van't Hoff:

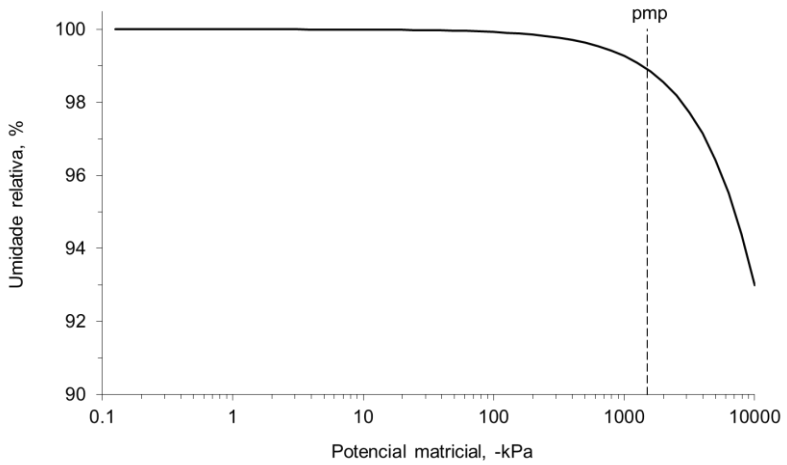
$$\boldsymbol{\Psi_o = -RTC} \qquad \text{Equação 3}$$

Onde R é a constante universal dos gases (8,314 $J \cdot K^{-1} \cdot mol^{-1}$), T é a temperatura absoluta (K) e C (mol m^{-3}) a concentração da solução.

O funcionamento do WP4 se dá utilizando a Equação 2. Para que isso seja possível, o WP4 possui uma câmara hermeticamente fechada que contém um pequeno espelho cuja temperatura é precisamente controlada por um refrigerador termoelétrico (Peltier). Ao se inserir a amostra do solo na gaveta, a temperatura da amostra será determinada e depois ocorrerá a redução da temperatura da câmara até que a saturação do ar com vapor seja detectada pela condensação de água no espelho. Essa detecção é feita por um feixe de luz direcionado para o espelho e refletido para uma célula fotodetectora que detecta a alteração na refletância quando ocorre condensação. O WP4 é equipado com uma ventoinha interna que circula o ar dentro da câmara de amostra para reduzir o tempo de equilíbrio, além de possuir um controlador de temperatura da amostra.

A faixa de medição do WP4 vai de 0 até -300 MPa. Entre 0 e -5 MPa, a precisão é de ± 0,05 MPa; Entre -5 e -300 MPa ela é de 1% da medida (DECAGON DEVICES, 2013). Devido à relação logarítmica entre a umidade e o potencial, o erro se torna mais substancial quando o potencial da água se aproxima de 0 MPa. Agravando este problema, toda a gama de aplicações agronômicas abrange uma faixa extremamente pequena de umidades relativas, 100% (0 MPa) a 98,88% (-1,5 MPa) (LEONG; TRIPATHY; RAHARDJO, 2003, Figura 2). Alguns autores afirmam que o WP4 tem baixa precisão em tensões de aproximadamente 0,1 MPa, porém, se verifica que o equipamento pode apresentar erros na estimativa do conteúdo de água para potenciais acima de -0,7 MPa.

Figura 2 - Relação entre a umidade relativa do ar no solo e o potencial matricial da água.



Fonte: de Jong van Lier, 2010.

A técnica do espelho esfriado para determinar o ponto de orvalho é considerada o método mais preciso para o fim (LEONG; TRIPATHY; RAHARDJO, 2003). A definição de um valor limiar superior do potencial hídrico para o WP4 pode evitar erros na determinação da relação potencial de água no solo quando o solo estiver muito molhado. Klein et al. (2010) relatou alta variabilidade de potenciais de água maiores do que -1 MPa quando medidos com um WP4. O psicrômetro é conhecido por ter muitas variáveis que podem afetar os resultados da medição como flutuações nas leituras da umidade relativa devido à temperatura não constante do ar, o controle da

temperatura do ambiente e também pela habilidade do operador (CARDOSO; ROMERO; LIMA; FERRARI, 2007).

2.4.Reflectômetro no Domínio da Frequência (FDR)

O método da reflectometria no domínio da frequência (FDR) usa a radiofrequência e a capacitância elétrica do capacitor para medir a permissividade dielétrica do solo e pode ser usada para inferir a fração do volume da água presente na amostra do solo. Os métodos dielétricos vêm se destacando, pois proporcionam uma boa precisão de leitura, segurança ao operador, e rapidez na obtenção da estimativa do teor de água. Como todo método indireto, o FDR necessita de uma calibração específica.

O FDR apresenta uma boa precisão, tendo como vantagem sua rápida resposta à medida. Ao contrário de algumas técnicas nucleares, não apresenta risco à saúde do operador, tem grande capacidade de armazenamento de dados e permite a obtenção de um registro contínuo de dados ao longo de todo o perfil do solo (PALTINEANU; STARR, 1992). O método utiliza o solo como parte de um condensador, de tal forma que medindo sua capacitância se obtém a constante dielétrica do solo, correlacionada com o teor de água. Quando a área dos eletrodos e a distância entre eles são fixos, a capacitância aumenta consideravelmente com o aumento no número de moléculas de água livres e com os dipolos respondendo ao campo elétrico criado pelo capacitor.

A sondas são constituídas de um par de eletrodos que se comportam como um capacitor eletrônico, conectado a um circuito indutor-capacitor, resultando em valores de frequência que dependem da capacitância do solo. Ao ligar a sonda, gera-se um campo elétrico entre os dois eletrodos estendendo-se para fora e atingindo a matriz do solo, polarizando as moléculas de água.

Apesar de se basear na constante dielétrica aparente do solo, este equipamento não determina o valor da constante, mas sim a frequência relativa. Altos teores de salinidade afetam a resposta dos sensores dielétricos. Normalmente a interpretação de medidas eletromagnéticas em condições salinas é complicada.

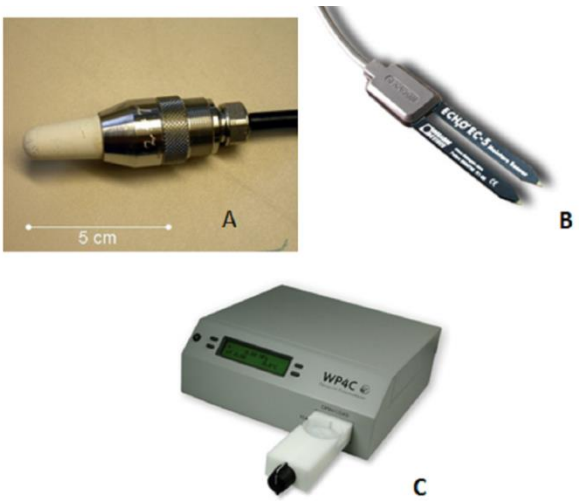
Esse método possui algumas vantagens, como: flexibilidade no design de sondas, baixo custo em relação a outros métodos, baixo consumo de energia, não necessita utilizar radiação, e facilidade para automatização das leituras. Contudo apresenta no geral desvantagens como: sensibilidade à variação da temperatura, e a necessidade de uma calibração específica para cada tipo de solo.

3. Materiais e Métodos

3.1.Local e instrumentação experimental

Um experimento foi realizado no laboratório de física do solo da Divisão de Funcionamento de Ecossistemas Tropicais, no Centro de Energia Nuclear na Agricultura/Universidade de São Paulo, campus Piracicaba – SP, conforme especificado a seguir. O objetivo do experimento foi a avaliação instrumental de: 1) um instrumento de medição do potencial de água no solo baseado em princípios psicrométricos, o WP4 modelo C da Decagon; 2) um instrumento de medição da tensão da água no solo, o tensiômetros de polímero (PoT); e 3) um conjunto de instrumentos simultaneamente, incluindo o WP4, o PoT, além de um instrumento de medição do teor de água baseado na propriedade dielétrica, o FDR EC-5 da Decagon (Figura 3).

Figura 3 - Os três instrumentos de medição avaliados. (A) Tensiômetro de Polímero, (B) FDR Decagon Echo Probe EC-5 e (C) Medidor psicrométrico de potencial de água da Decagon WP4, no modelo C.



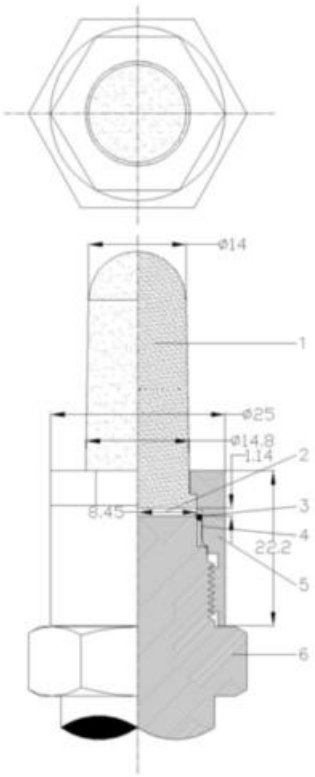
3.1.1.Tensiômetro de polímero

O tensiômetro de polímero (PoT) mede a tensão da água no solo em contato com a capsula porosa na faixa de medição de 0 a -160 m. O tensiômetro de polímero utilizado (Figura 4) consiste de uma capsula porosa de cerâmica solida no formato de

cone, e uma câmara de polímero de dimensão (2,2 cm³) que está localizada entre o transdutor de pressão e a placa. Cada tensiômetro de polímero utilizados possui um datalogger acoplado ao equipamento.

O formato cônico da cerâmica tem função de transferir o potencial matricial da água do solo para a solução de polímero, com o mínimo deslocamento da água. O transdutor de pressão registra a pressão relativa na faixa de -0,175 até 2,201 MPa com uma precisão de $2{,}38 \cdot 10^{-3}$ MPa. Como a pressão da solução do polímero é dependente da temperatura, um sensor térmico mede a temperatura na base do reservatório de polímero com o intervalo entre 0 até 40ºC (precisão de 0,01ºC) para posterior correção da tensão observada.

Figura 4 - Tensiômetro de Polímero com cone cerâmico contendo: (1) camada de suporte α-Al_2O_3 com uma membrana γ-Al_2O_3, (2) câmara de polímero, (3) anel de borracha, (4) anel de aço inoxidável, (5) anel de montagem de aço inoxidável e (6) transdutor de pressão.



Fonte: Van der Ploeg e Gooren, 2010.

Para calibrar a leitura com o tensiômetro de polímero recomenda-se deixá-lo submerso em água por pelo menos 24 h antes de instalar no solo, repetindo o processo após o término do experimento.

Cada tensiômetro de polímero possui um coeficiente de calibração (c, bar ºC^{-1}), fornecido pelo fabricante. Para efetuar a sua calibração, seguem-se os seguintes passos:

1. Realiza-se a média dos dados lidos pelo tensiômetros (Data, Temperatura e Pressão), enquanto esses se encontram submersos em água. Sendo a média da primeira 24h denominadas iniciais (Data $_{inicial}$, Temperatura $_{inicial}$ e Pressão $_{inicial}$) e da última 24h como finais (Data $_{final}$, Temperatura $_{final}$ e Pressão $_{final}$).

2. Calculam-se as diferenças.

$$\Delta\mathbf{T} = \mathbf{Temperatura_{final}} - \mathbf{Temperatura_{inicial}} \qquad \text{Equação 4}$$

$$\Delta\mathbf{P} = \mathbf{Pressão_{final}} - \mathbf{Pressão_{inicial}} \qquad \text{Equação 5}$$

3. São feitos os seguintes cálculos para os parâmetros de correção:

Tabela 1 – Parâmetros de correção (a e b):

	a	b
1	$Temperatura_{inicial} - b_1 Data_{inicial}$	$\frac{\Delta T}{(Data_{final} - Data_{inicial})}$
2	$Pressão_{inicial} - b_2 Data_{inicial}$	$\frac{\Delta P}{(Data_{final} - Data_{inicial})}$

4. Calcula-se a pressão de referência, em unidades de bar.

$$\mathbf{P_{ref}} = \mathbf{a_2} + \mathbf{b_2}.\mathbf{data_{momentânea}} \qquad \text{Equação 6}$$

5. Calcula-se a temperatura de referência em ºC.

$$\mathbf{T_{ref} = a_1 + b_2 . data_{momentânea}}$$ Equação 7

6. Calcula-se a pressão corrigida pela temperatura em bar.

$$\boldsymbol{Pressão_{\ momentânea} - (Temperatura_{momentânea} - Temperatura_{referência}) . c}$$

Equação 8

7. Determina-se o potencial matricial para cada instante, em unidade de bar:

$$\boldsymbol{Pressão_{\ corrigida\ pela\ temperatura} - Pressão_{refência}}$$ Equação 9

Cada tensiômetro de polímero possui uma numeração específica, fornecida pelo próprio fabricante para identificação do mesmo. Os dados do tensiômetros são apresentados na Tabela 2.

Tabela 2 - Informações dos tensiômetros de polímeros utilizados nesse trabalho.

Identificação do PoT	Limite de Leitura (m)	Coeficiente de calibração (bar/ºC)
6170	160,0	0,2159767
6172	150,0	0,1982433
6174	160,0	0,2198760
6175	120,0	0,1685344
6176	140,0	0,1994670
6177	170,8	0,2296998
6180	168,5	0,2140039
6181	140,0	0,1653601
6182	100,0	0,2159767

Os nove tensiômetros acima citados foram postos na água por 24h para análise destes enquanto saturados. As telas de medições são apresentadas no Anexo A.

3.1.2. Medidor psicrométrico de potencial de água WP4 C

O medidor psicrométrico de potencial da água WP4, modelo C da Decagon estima o potencial da água (matricial + osmótico) através da pressão vapor do ar em equilíbrio com a amostra em uma câmara hermeticamente selada. Segundo dados do fabricante, o WP4 possui exatidão de ± 0,05 MPa entre 0 e -5 MPa, e de 1% entre -5

e -300 MPa. O controle de temperatura no WP4C é rigoroso em função da sua metodologia, sendo o intervalo de medida entre -15 e 40 ºC, com incerteza de ± 0,2 ºC.

Antes de realizar qualquer leitura com o instrumento é necessário verificar a calibração do equipamento. Para verificar a calibração basta usar qualquer solução que possui o potencial da água conhecido. O fabricante recomenda utilizar uma solução de 0,5 mol/kg de KCl como verificação padrão, com potencial de -2,22 MPa.

A capacidade do volume do recipiente que é fornecido pelo fabricante para colocar o material a ser analisado é de 15 mL, porém, é recomendado não ultrapassar 7 mL do volume do recipiente (metade do copo) com o preenchimento com o material da amostra para que não haja a contaminação do equipamento, pois a limpeza do equipamento pode afetar a calibração.

O equipamento WP4 possui um display LCD, quatro botões de funções, uma luz LED indicadora, e uma gaveta que conduz a amostra do solo, para dentro da câmara hermeticamente fechada. Dentro da câmara, possui um bloco, no qual se encontram o sensor óptico, o espelho, pilha termoelétrica e o ventilador (Figura 5).

Figura 5 - O WP4 C sem a tampa (esquerda) e bloco (direita).

É importante manter a temperatura do laboratório controlada com o auxílio de um equipamento de ar-condicionado, pois se tiver uma grande diferença entre a temperatura da amostra e temperatura interna do bloco, o tempo para completar uma leitura pode aumentar. Quando a temperatura da amostra é maior do que a temperatura interna da câmara, é necessário aguardar que a temperatura da amostra diminua para iniciar a leitura. Para isso o WP4 C possui um menu para o controle da

temperatura, que permite conferir tanto a temperatura do bloco (T_{bl}) quanto a diferença da temperatura da amostra (T_{am}). Se essa T_{bl}-T_{am} for negativa, é possível realizar a leitura. Se a diferença for positiva, ou seja, se a temperatura da amostra for maior do que a do bloco pode ocorrer condensação de água no interior da câmara, resultando em leitura errônea.

O WP4C possui 3 modos de leitura, denominados: preciso, continuo e rápido:

- O modo *preciso* repete as medições da amostra até leituras sucessivas concordarem com uma tolerância predefinida (0,03 MPa para ψ > -40MPa). Esse modo é recomendado para melhores resultados e para a maioria da umidade dos solos.
- O modo *contínuo* pode ser usado para monitoramento de amostras que demoram um longo tempo para atingir o equilíbrio do vapor, assim como amostras de plantas e de amostras de solos úmidos com um potencial da água >-0,5 MPa.
- O modo *rápido* mede apenas uma vez, as leituras são menos precisas particularmente na faixa úmida. Esse modo é recomendado para amostras de solo mais secos com o potencial menor que -40 MPa.

3.1.3.Reflectômetro no domínio da frequência

O reflectômetro no domínio da frequência (FDR) EchoProbe EC-5 da Decagon Devices (2016) determina o teor de água pela medição da constante dielétrica do meio usando capacitância e a tecnologia do domínio de frequência com acurácia de 0,03 m^3m^{-3}. Sua resolução é de 0,001 m^3m^{-3}. O Tempo de medida é de 10 ms.

A frequência de 70 MHz minimiza os efeitos texturais e da salinidade, o que faz o sensor ser mais preciso em quase todos os solos. O design de duas hastes e maior frequência de medição permite que o EC-5 possa medir teor de água de 0 a 100% e permite medições exatas de todos os solos com uma ampla faixa de salinidade.

O EC-5 foi projetado para fácil instalação no solo. Ele pode ser orientado em qualquer direção, porém recomenda-se orientar o lado plano perpendicular à superfície do solo para minimizar os efeitos sobre o movimento da água descendente. O solo adjacente à superfície do sensor tem uma influência forte na leitura do sensor,

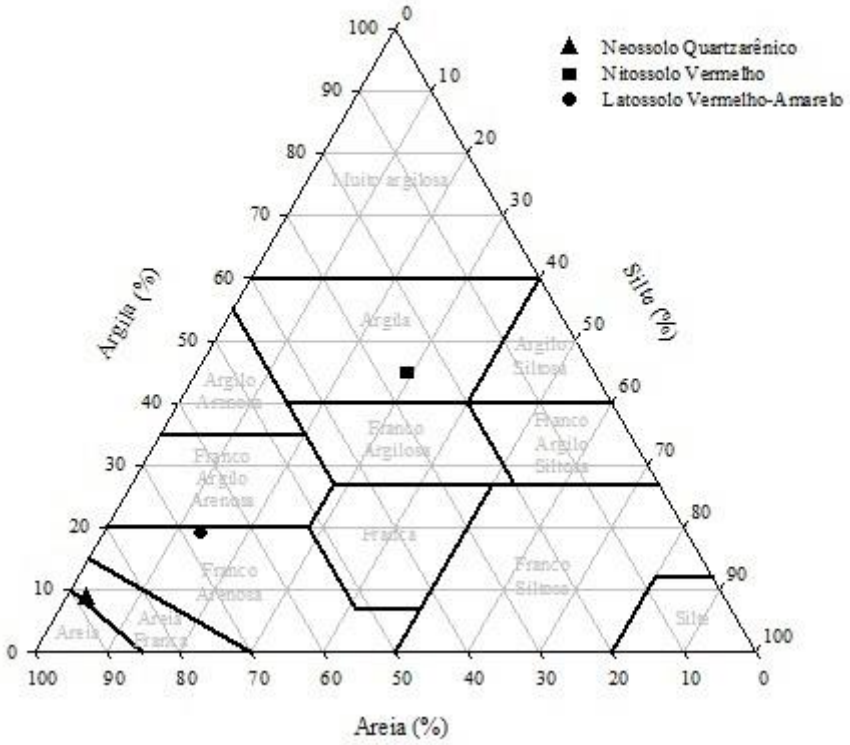
portanto qualquer lacuna de ar ou compactação excessiva do solo ao redor do sensor pode influenciar as leituras.

O sensor possui uma calibração de fábrica que é aplicada automaticamente, mas pode ser substituída por uma calibração específica por solo. Para verificar os valores medidos pelo FDR foi utilizada a medição gravimétrica da umidade (padrão) nos pontos avaliados pelo FDR.

3.2.Material de solo

A avaliação instrumental foi realizada utilizando material coletado em três solos amostrados no município de Piracicaba, SP. A classificação, segundo o sistema proposto pela Embrapa (2006) é: (1) Latossolo Vermelho Amarelo de textura média (coordenadas do local: 22°42'27"S 47°37'27"W); (2) Nitossolo Vermelho de textura argilosa (coordenadas do local: 22°42'19"S 47°37'33"W) e (3) Neossolo Quartzarênico de textura arenosa (coordenadas do local:22°43'56"S 47°45'59"W) (Figura 6).

Figura 6 – Posição dos três materiais de solo utilizados no triângulo textural de Atterberg.



As amostragens foram realizadas nas profundidades de 0 a 20 cm. O material de solo foi seco ao ar, destorroado e peneirado através de uma malha de 2 mm para se obter a terra fina seca ao ar (TSFA). Em seguida, foi submetido à análise granulométrica pelo método do densímetro (DONAGEMA et al., 2011).

A caracterização hidráulica dos materiais consistiu na confecção das respectivas curvas de retenção. Utilizaram-se anéis metálicos com diâmetro de 3,7 cm e altura de 2 cm. Os materiais de solo foram amostrados das colunas de solo após o término do experimento em coluna de solo (seção 3.5). Para a curva de retenção amostraram-se 3 anéis (repetições) para cada solo. As tensões aplicadas foram: -0,10 m, -0,20 m, -0,40 m e -0,60 m na mesa de tensão e -1 m, -3,3 m, -5 m, -10 m, -30 m, -70 m e -150 m na câmara de Richards. Para o ajuste dos parâmetros da curva de retenção se utilizou o programa RETC.

3.3.Avaliação do WP4

3.3.1.Medição do potencial em amostras submetidas a uma pressão na Câmara de Richards

Material dos três solos foi colocado diretamente numa mesma placa porosa, separadamente. Não se utilizou nenhuma membrana entre o material do solo e a placa porosa. O material de solo foi saturado por 24 horas na própria placa e, em seguida, a placa foi colocada na câmara de Richards. Aplicou-se uma tensão na câmara de Richards (uma das seguintes tensões: -10, -30, -70, -100 e -150 m). As amostras ficaram por uma semana dentro da câmara e, não saindo mais água da câmara, considerou-se que o equilíbrio foi atingido. Em seguida, as amostras foram retiradas da câmara e colocadas em recipientes metálicos devidamente identificadas com tampas para manter a umidade da amostra.

Imediatamente as amostras foram analisadas no WP4 em dois modos de leitura: o modo preciso e o modo rápido. Foram realizadas 6 repetições por tipo de leitura para cada solo.

3.3.2.Medição do potencial em amostras secas ao ar

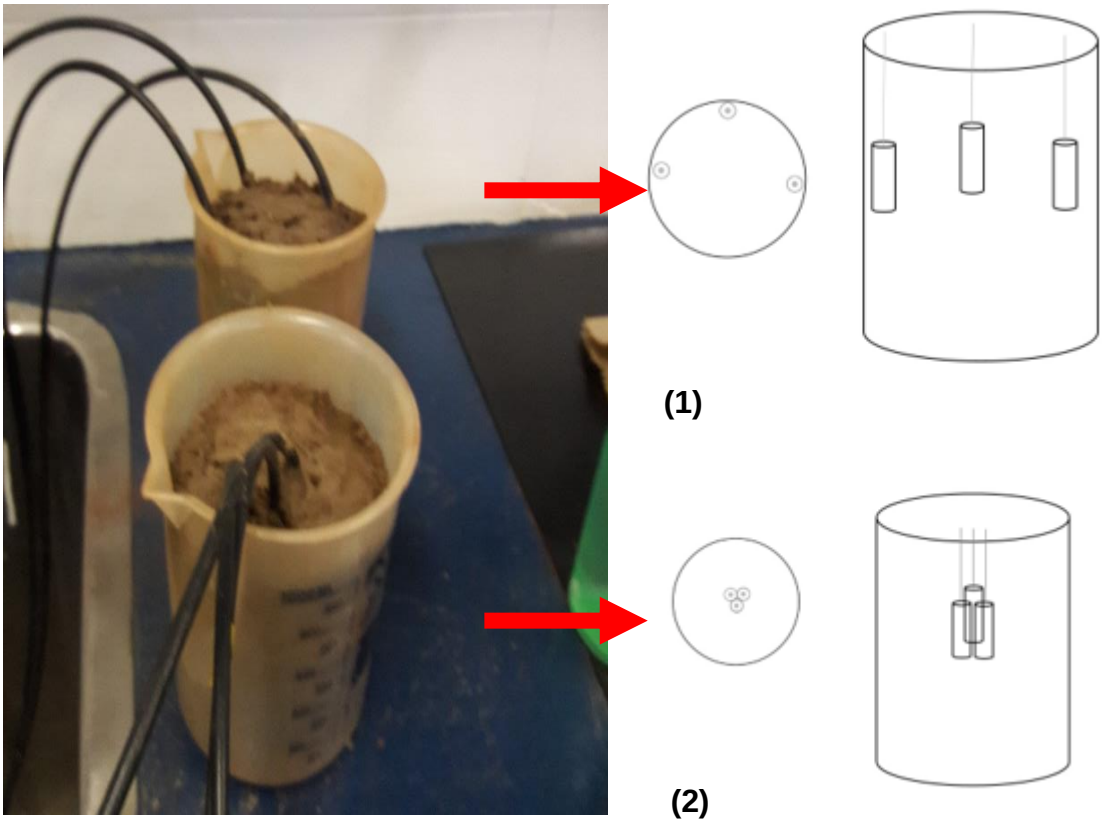
Estando a água em amostras secas ao ar em equilíbrio com o vapor de água no ar, pode-se avaliar o desempenho do WP4 na faixa de potenciais muito negativos. O potencial de vapor de água, em Pa, é dado pela equação de Kelvin (Equação 2). Tanto a umidade relativa do ar quanto a temperatura foram medidas pela sonda de temperatura e umidade relativa CS215 da Campbell Scientific (2015).

As medições foram realizadas do seguinte modo: colocou-se aproximadamente 30 g de material de solo em um recipiente metálico com altura 3,8 cm e diâmetro 8,1 cm, deixando-o exposto ao ar por alguns dias. Depois disso, por algumas vezes amostrou-se um pouco do material de solo para realizar leitura no WP4. No mesmo momento foram registrados a temperatura e a umidade relativa no laboratório para calcular o potencial pela Equação 2.

3.4.Avaliação do PoT

Para avaliar o desempenho dos tensiômetros de polímero foi realizado um experimento. Um béquer de plástico foi preenchido com solo úmido até a metade de sua altura. Foram instalados, verticalmente três tensiômetros por béquer. Foram utilizados 6 tensiômetros ao todo nesse experimento, sendo eles: PoT 6176, PoT 6182, PoT 6174, PoT 6175, PoT 6181 e PoT 6180. A seguir, os equipamentos foram cobertos com o solo úmido até a borda do béquer. Foram testadas duas configurações: (1) os tensiômetros na mesma altura e distantes entre si (aproximadamente 7 cm), e (2) os tensiômetros na mesma altura e próximos (Figura 7). Durante todo o processo de secagem do solo, os valores de tensões foram medidos continuamente pelos tensiômetros de polímero e armazenados pelo datalogger.

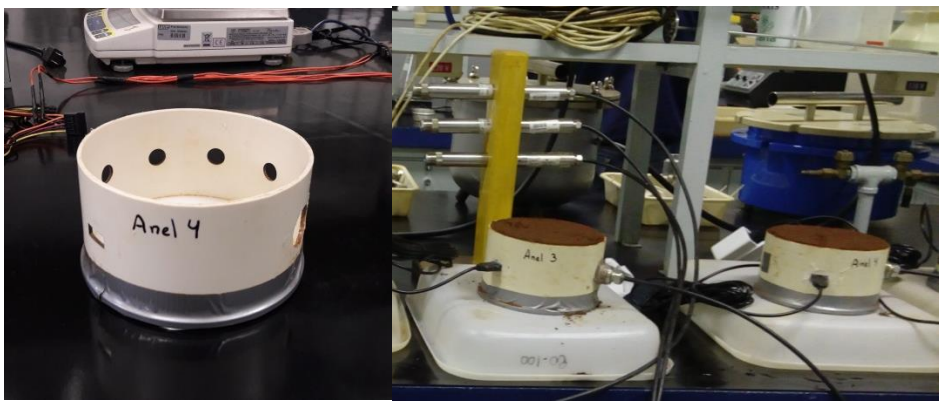
Figura 7– Foto do experimento em andamento (à esquerda) e ilustração das configurações testadas (à direita): (1) Tensiômetros separados (2) Tensiômetros juntos.



3.5.Experimento comparativo entre instrumentos em colunas de solo

Para comparar leituras do PoT, WP4 e EC-5, o material de solo foi acomodado em cilindros de PVC com altura de 0,08 m, diâmetro de 0,15 m (volume aproximado: 1,5 litros), cada cilindro com seis orifícios laterais distribuídos do seguinte modo: um para a inserção do tensiômetro de polímero, outro para a inserção do EC-5, e mais quatro para a amostragem do material do solo para leituras no WP4, que ficaram vedados com fita adesiva durante todo o período do experimento, exceto quando da amostragem do material (Figura 8).

Figura 8 - Anel experimental (esquerda) e a imagem do experimento em andamento (direita).



O preenchimento dessas colunas com o solo foi feito de forma uniforme e homogênea na coluna, utilizando-se um recipiente de alumínio de altura 3,8 cm e diâmetro 8,1 cm como medidor para preencher a coluna com solo, a cada 3 latas de solo este foi acomodado na coluna e repetiu-se esse procedimento até o preenchimento completo da coluna. Após a acomodação do solo nos cilindros, saturou-se cada coluna por capilaridade por 24h. As colunas de solo foram retiradas da água para que se saia o excesso de água. Passados um ou dois dias, equipou-se cada uma das colunas com um tensiômetro de polímero e um sensor EC-5. Os tensiômetros utilizados nesse experimento são: PoT 6170, PoT 6172, PoT 6174, PoT 6175, PoT 6176, PoT 6177, PoT 6181, PoT 6182 e PoT 6180.

Os solos foram postos para secagem por evaporação natural, e periodicamente foram realizadas medidas simultâneas do PoT, EC-5 e WP4. Para fazer as leituras do

WP4 retirou-se a fita sobre o orifício e utilizou-se uma pequena espátula para transferir o material de solo para o recipiente de leitura do WP4, preenchendo seu fundo . Anotou-se o tempo de leitura para posterior comparação com o a leitura realizada com o PoT. As amostras de solo analisadas no WP4 foram utilizadas para também determinar o teor de água gravimétrica. O experimento foi realizado com três colunas para cada solo, sendo utilizados 3 solos com texturas diferentes. Quando necessário realizar repetições, as colunas foram ressaturadas.

3.6.Análise dos resultados

As análises dos resultados foram divididas em etapas, sendo elas: caracterização física hídrico do solo, leitura do WP4 com relação a tensões aplicadas na Câmara de Richards, medições dos valores dos potenciais dos solos secos ao ar em relação ao potencial vapor de água, avaliação de tensiômetros de polímero e comparação entre os instrumentos WP4, PoT e EC-5.

Verificou-se a correlação linear entre as medidas realizadas entre os diferentes métodos, além de utilizar o *Root Mean Square Error (*RMSE) e o método Bland-Altman. O método Bland-Altman verifica a concordância entre dois métodos que deveriam medir a mesma coisa (HIRAKATA, 2009).

4.Resultados e Discussão

4.1. Caracterização hidráulica do solo

Optou-se por referenciar os solos pela sua classe textural: Latossolo Vermelho Amarelo (Textura Média), Nitossolo vermelho (Argiloso) e Neossolo Quartzarênico (Arenoso). Algumas propriedades do material utilizado no experimento estão descritas na Tabela 3.

Tabela 3 - Algumas propriedades do material testado

Solo	Referência	Areia ($kg.kg^{-1}$)	Argila ($kg.kg^{-1}$)	Silte ($kg.kg^{-1}$)	Densidade do solo (kg/cm^3)
Nitossolo Vermelho	Argiloso	0,26	0,45	0,29	1240
Neossolo Quartzarênico	Arenoso	0,88	0,09	0,03	1430
Latossolo Vermelho Amarelo	Textura Média	0,67	0,19	0,14	1360

Os parâmetros obtidos pelo RETC para o ajuste da curva de retenção pela equação de van Genuchten (1980) com os respectivos erros para cada solo, são apresentados na Tabela 4. A equação de van Genutchen (1980), é apresentada na equação 10, no qual θ_r é a umidade residual, θ_s é a umidade de saturação e α, m e n são parâmetros empíricos:

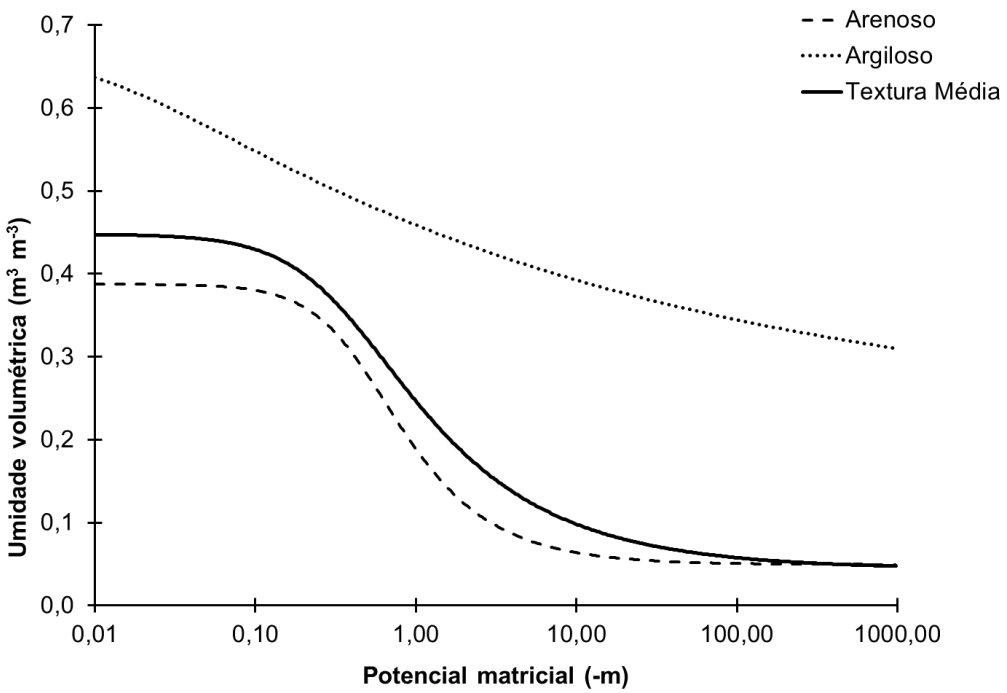
$$\boldsymbol{\theta = \theta_r + \frac{(\theta_s - \theta_r)}{[1+(\alpha \cdot \Psi_m)^n]^b}} \qquad \text{Equação 10}$$

Tabela 4 - Parâmetros obtidos pelo RETC para os solos arenoso, argiloso e textura média.

	Arenoso		Argiloso		Textura Média	
Variável	Valor	Erro padrão	Valor	Erro padrão	Valor	Erro padrão
θ	0,0493	0,00706	0,22000	0,03300	0,04400	0,06600
θ	0,3838	0,01188	0,67000	0,28812	0,4479	0,01160
α (1/cm)	0,0216	0,00314	0,8718	2,9544	0,0284	0,00412
n	2,0237	0,17259	1,1416	0,00716	1,6002	0,04320

A curva de retenção da água no solo foi obtida para cada um dos solos e representada no mesmo gráfico (Figura 9).

Figura 9 - Curva de retenção da água no solo para os três solos.



4.2.Avaliação do WP4

4.2.1. Medição do potencial em amostras submetidas a uma pressão na Câmara de Richards

Resultados foram obtidos pelos modos de leitura rápido (Figura 10) e preciso (Figura 11) em amostras submetidas a potenciais de -70, -100 e -150 m, na câmara de Richards. Os valores obtidos em material relativamente úmido (h>-70m)

apresentaram muita dispersão e o WP4 não se mostrou um instrumento adequado nessa faixa.

Figura 10 - Potencial matricial observado no modo rápido no WP4 em relação ao potencial aplicado na Câmara de Richards.

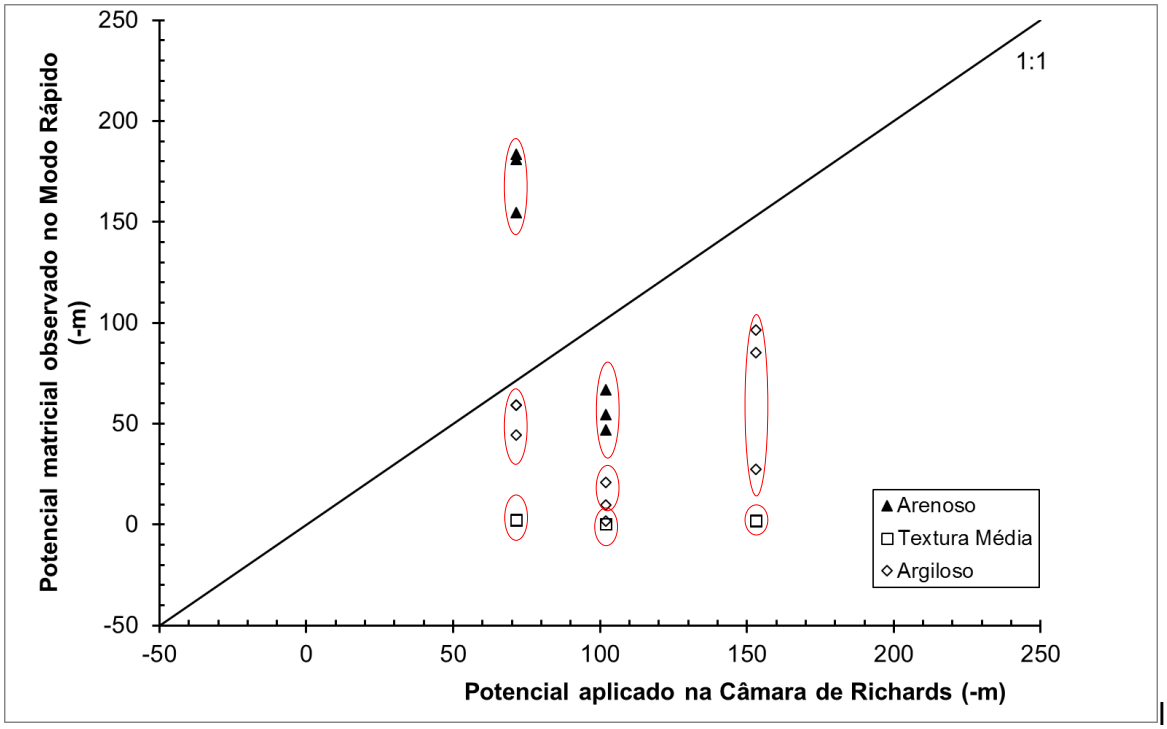
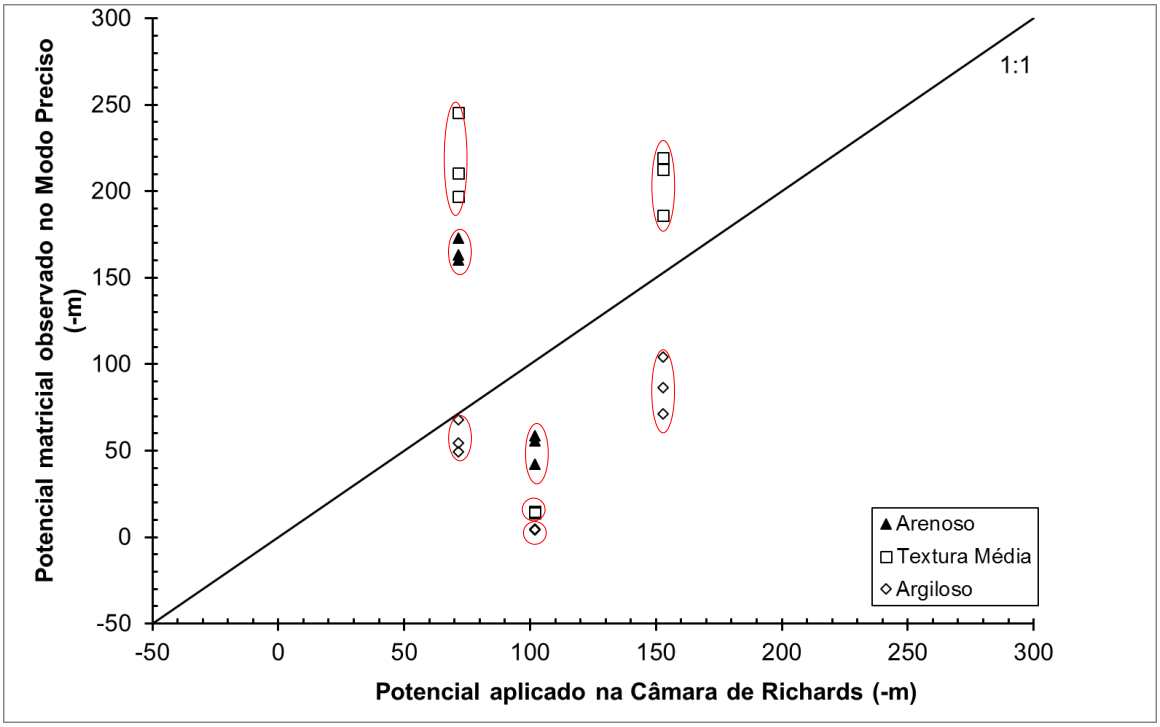


Figura 11 - Comparação entre o potencial observado no WP4 (modo preciso) e o potencial aplicado na câmara de Richards.



Nas Figura 10 e Figura 11, as medidas que foram realizadas no mesmo dia e no mesmo potencial foram circuladas, observa-se que o potencial medido foi maior do que o aplicado na câmara de Richards, no modo preciso para o solo de textura média. Em contrapartida, o solo arenoso apresentou leituras mais negativas do que o potencial observado nos pontos de -70 m, para ambos os modos de leitura. Porém é possível observar que há uma consistência nas leituras obtidas para o WP4 para cada potencial que foi aplicado na câmara de Richards. O ponto de -150 m não foi realizado para o solo arenoso.

Problemas com a utilização da câmara de Richards foram reportados por diversos autores como Gubiani et al. (2012); Klein et al. (2010); Madsen, Jensen e Boysen (1986). O estabelecimento do equilíbrio na câmara pode ser afetado pela estrutura e pela textura do solo.

No que diz respeito a essa medição, alguns autores atribuíram o fato da diferença entre o potencial aplicado na câmara de Richards e o medido pelo método psicrométrico ao fato de o equilíbrio não ter sido verdadeiramente alcançado pelo solo na placa porosa. Uma das razões que provavelmente influenciam é a falta de contato

entre a placa e as amostras causado pelo encolhimento da amostra durante a secagem (SCHELLE, 2013).

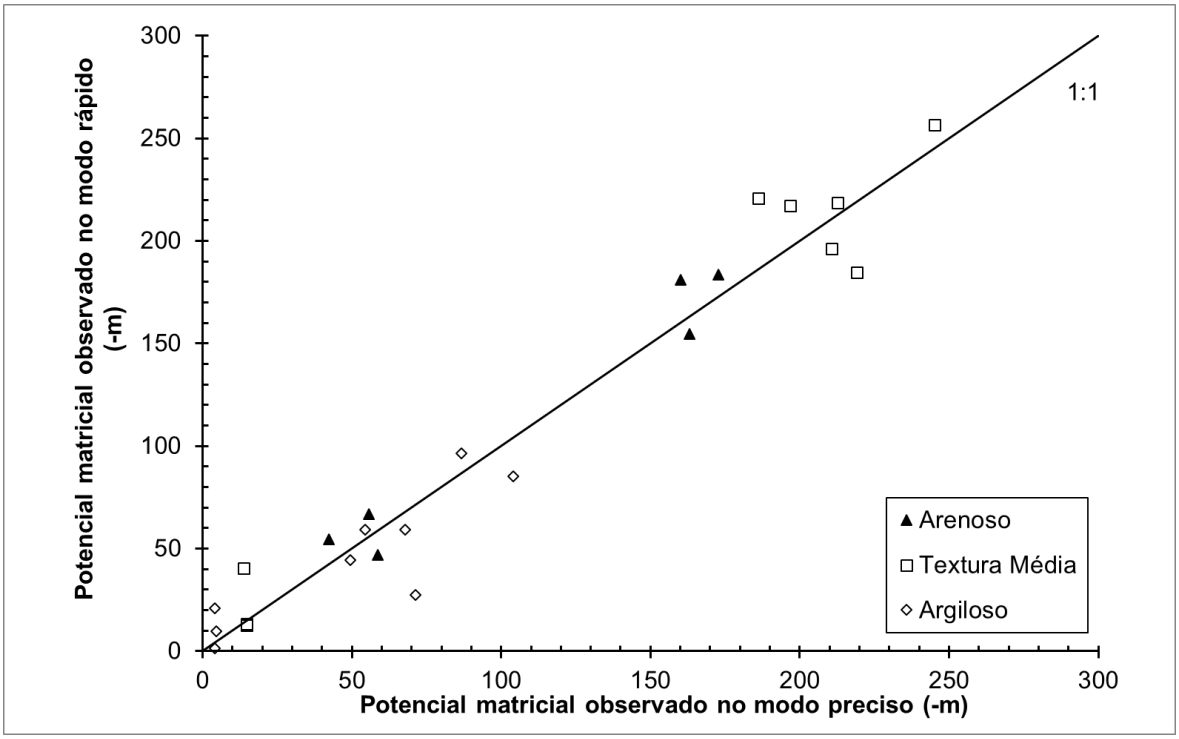
A macroporosidade deve ter uma influência importante no equilíbrio entre a amostra do solo e a placa porosa, pois quando os macroporos estão em contato com a placa e estes secam, podem reduzir a condutividade hidráulica, dando a impressão que a água na amostra já está em equilíbrio com a da placa (MADSEN; JENSEN; BOYSEN, 1986).

As diferenças entre o potencial matricial aplicado em relação ao observado também podem ser explicados devido ao princípio de funcionamento do equipamento que é a somatória entre o potencial osmótico e mátrico. No qual o potencial osmótico pode estar exercendo influência no resultado obtido.

Outra possível explicação para o fato de os pontos de elevado potencial matricial de água determinados no WP4 serem dispersos é o efeito da temperatura. A precisão da medição do potencial matricial de água é dependente principalmente de uma medição correta da diferença de temperatura da amostra de solo com a câmara de bloco.

Realizou-se uma comparação entre as leituras obtidas pelo WP4 nos diferentes modos de leituras das mesmas amostras nas diferentes tensões momentâneas (Figura 12). O modo preciso repete as medições da amostra até as leituras sucessivas concordarem. Assim, este modo é recomendado para a maioria das umidades do solo. O modo rápido mede apenas uma vez, e este método é recomendado para solos mais secos. Porém quando se realizaram as medidas, observou-se que a relação das leituras nos diferentes modos de leituras possui um comportamento linear próximo da linha 1:1.

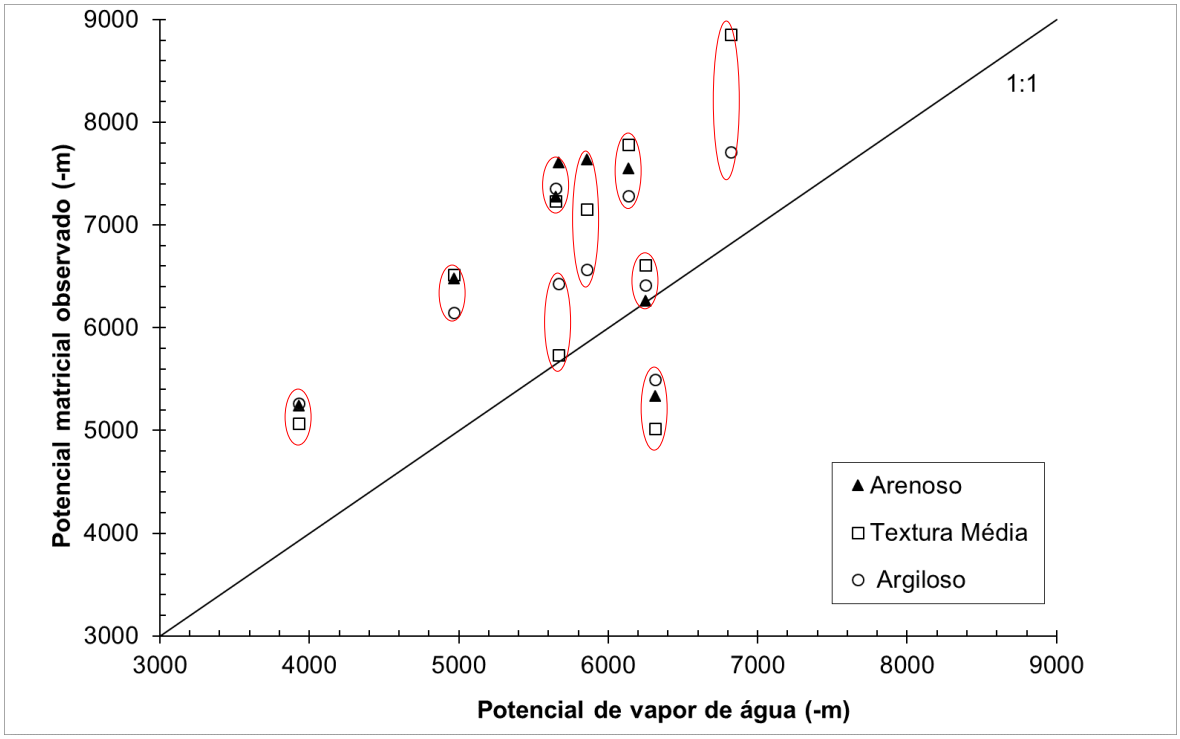
Figura 12 - Comparação entre as leituras obtidas pelo WP4 ao decorrer do experimento no modo de leitura rápido em relação ao modo preciso.



4.2.2.Medição do potencial em amostras secas ao ar

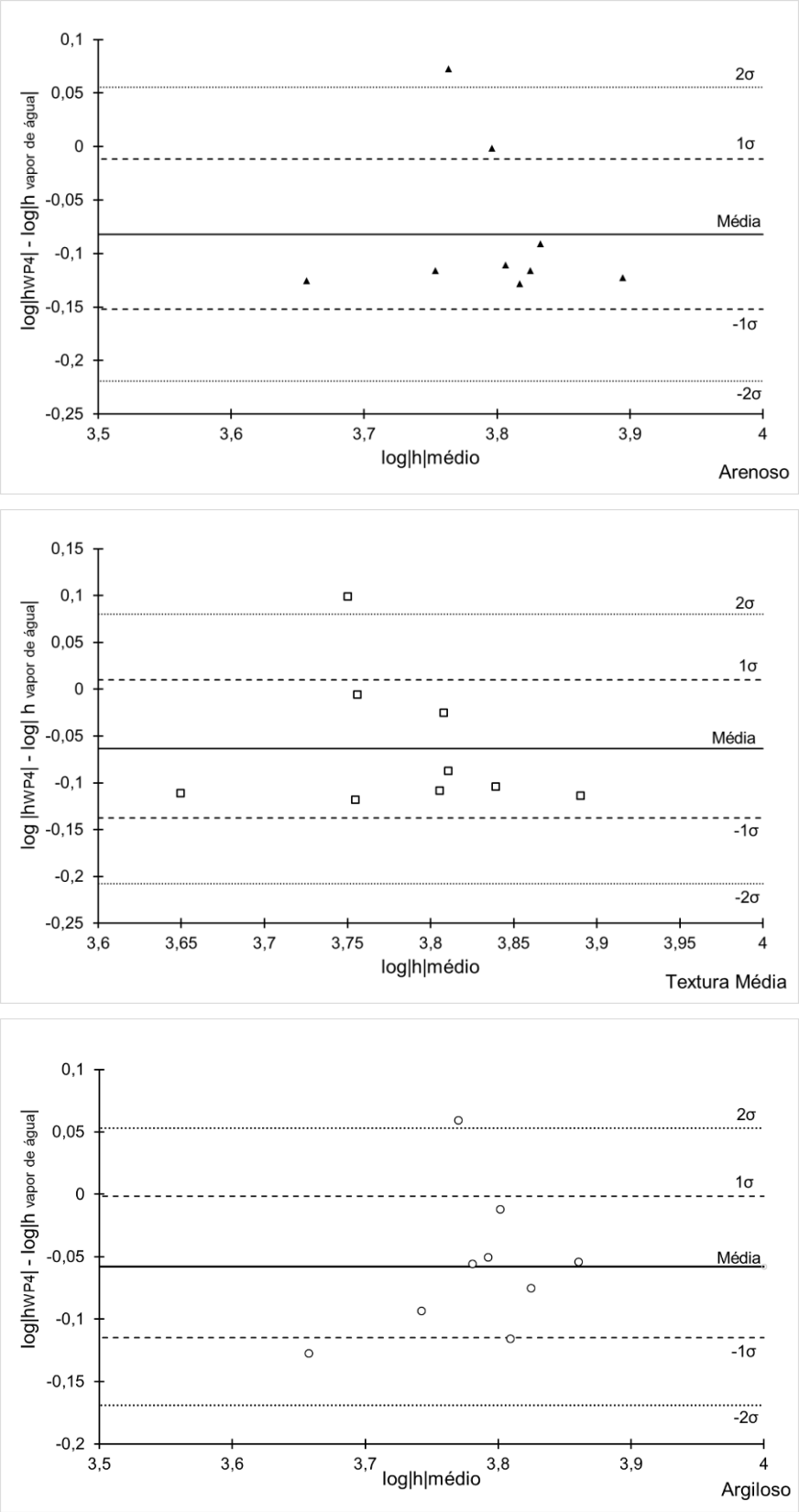
Pelos resultados obtidos para o potencial matricial medido pelo WP4 em amostras de solo de diferentes texturas (arenoso, textura média e argiloso) secas ao ar (Figura 13) observa-se que, no geral, o potencial matricial medido subestima os valores calculados pela equação de Kelvin, embora a ordem de grandeza seja a mesma. Os valores dos potenciais medidos do solo no mesmo dia sob a mesma condição de umidade relativa do ar, estão circulados na Figura 13, é possível notar que houve uma concordância entre os valores medidos, porém é possível que o potencial osmótico esteja influenciando na leitura dos potenciais.

Figura 13 - Potencial matricial observado pelo WP4 nas amostras de solo com diferentes texturas secas ao ar.



Através do gráfico Bland-Altman (Figura 14) observa-se que os valores obtidos pelo WP4 para potenciais muito secos estão dentro da faixa de ±1σ (68,3% de confiança), ou seja, os valores podem ser aceitos, a média das diferenças obtida para cada solo foi aproximadamente de - 800 m para o solo argiloso, - 940 m para o solo Textura Média e - 1200 m para o solo arenoso. Os dados obtidos para o solo arenoso se apresentaram exatos e precisos, para o solo de textura média menos precisos, mas mais exatos e para o solo argiloso não tão precisos e nem tanto exatos.

Figura 14 - Gráfico Bland-Altman para o potencial obtido pelo WP4 e o potencial de vapor de água calculado para as três texturas.



4.3.Avaliação do PoT

Para essa avaliação foram feitas duas variações de montagem do experimento, tensiômetros distanciados (Figura 15) e tensiômetros juntos (Figura 16) na mesma altura.

Figura 15 - Potencial matricial ao longo do tempo medido por 3 PoTs distanciados na mesma altura.

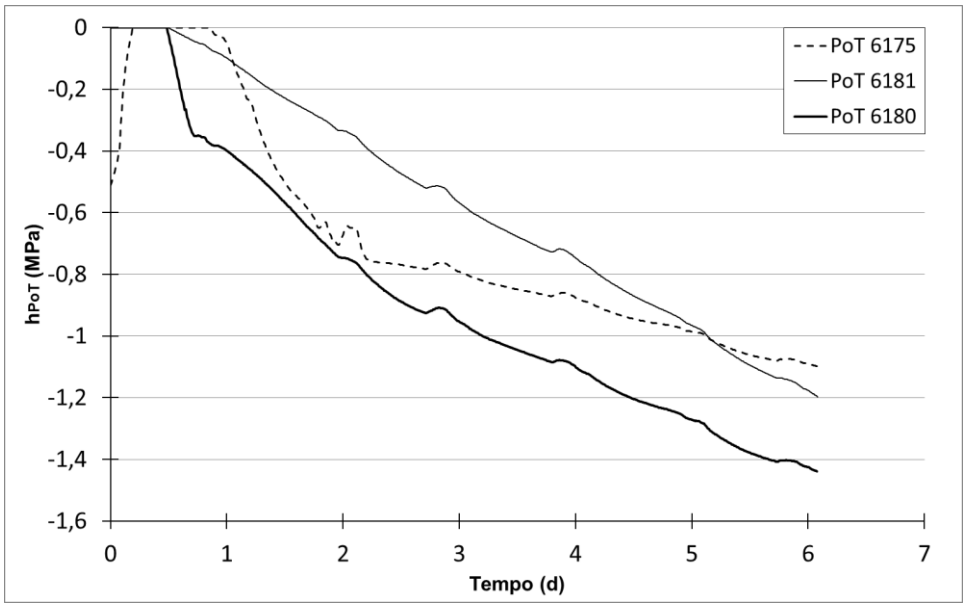
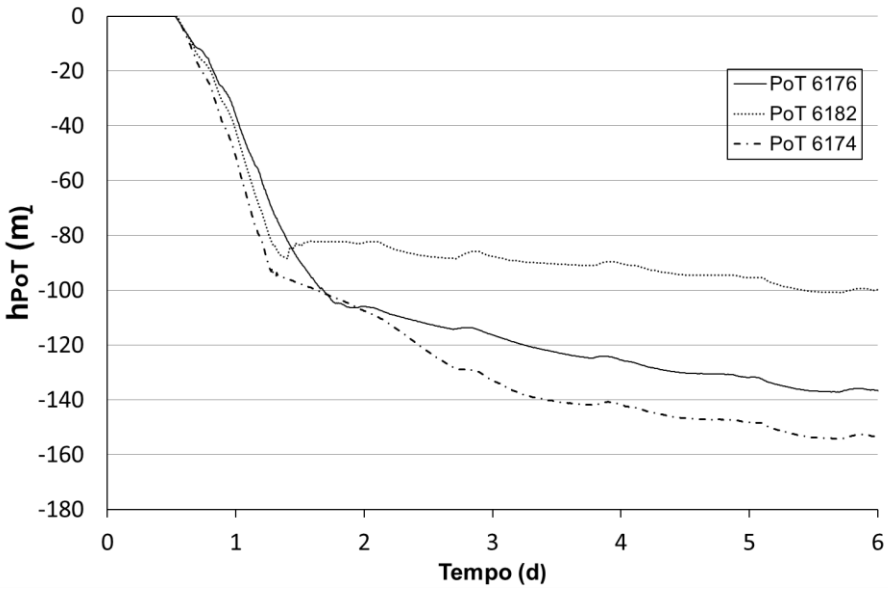


Figura 16 - Potencial matricial ao longo do tempo medido por 3 PoTs com distância mínima (“juntos”), na mesma altura.



Observou-se que os tensiômetros tanto juntos como distanciados, possuíam um comportamento similar, porém com tensões diferentes. Uma das possíveis explicações para as diferenças entre os valores obtidos dos tensiômetros pode ser pelo limite de leitura de cada tensiômetro, pois ao se aproximar do limite, sua leitura se torna constante e sem significado. As saídas do software que gerencia as medições dos tensiômetros (“telas”) enquanto saturados estão exibidas no Anexo A. Observa-se quais tensiômetros apresentam uma leitura relativamente estável, ou seja, sem muitas variações de leitura enquanto estes permanecem em água, para a verificação de funcionamento dos mesmos.

Outra possível razão para as diferenças é o desgaste do polímero, o que faz com que o fator de correção de calibração do polímero que foi fornecido pelo fabricante talvez não seja mais o correto e uma correção dos fatores de calibração antes de cada medida seria necessária. Os novos fatores de correção foram obtidos se relacionando as leituras dos tensiômetros da seguinte forma: PoT 6176/PoT 6182, PoT 6176/PoT 6174 e PoT 6182/PoT 6174. Essas razões deveriam ser próximas de um. Utilizou-se o aplicativo “solver” do MS-Excel para otimizar esses valores. Os resultados após a correção dos valores estão nas Figura 17 e 18.

Figura 17 - Potencial matricial ao longo do tempo medido por 3 PoTs distanciados na mesma altura, após otimização dos fatores de correção.

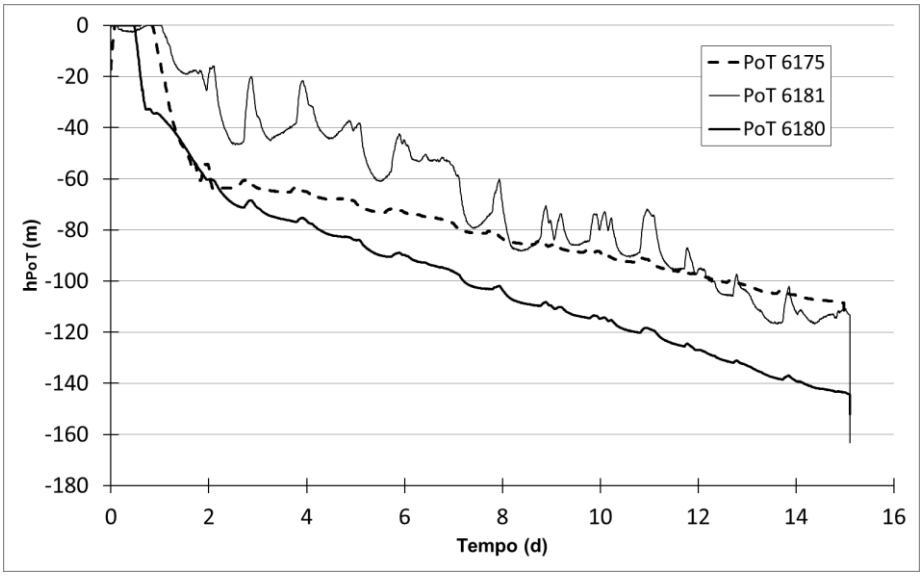
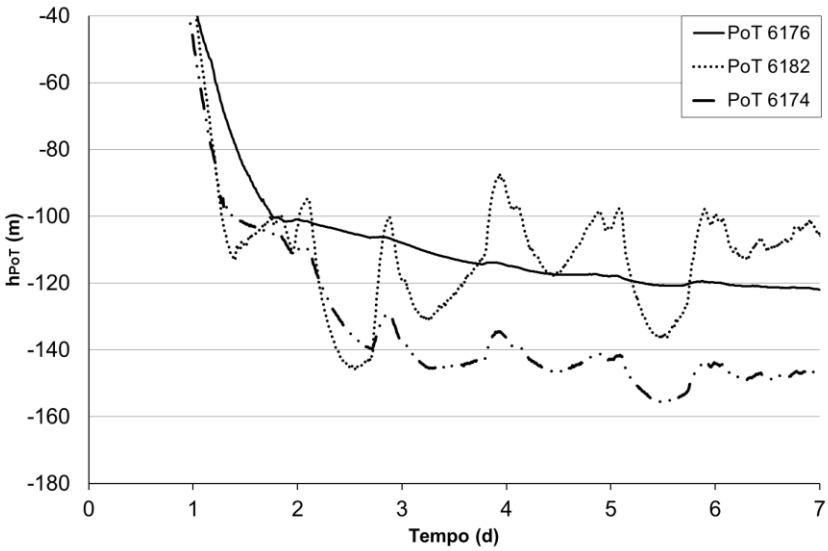


Figura 18 - Potencial matricial ao longo do tempo medido por 3 PoTs com distância mínima ("juntos"), na mesma altura, após otimização dos fatores de correção.



Na Figura 17, mesmo com a otimização do fator de calibração, os tensiômetros possuem diferentes limites de leitura apresentados na Tabela 2. Isso explica que por mais que os novos valores dos potenciais matriciais obtidos fiquem um pouco mais próximos, ainda se apresentem diferentes. Dentre os tensiômetros utilizados na

configuração do experimento que estes estão separados somente o POT 6175 apresentou leituras estáveis enquanto estavam imersos na água (Anexo A).

No caso dos tensiômetros utilizados com distância mínima (“juntos”) (PoT 6176, PoT 6182 e PoT 6174) todos não apresentaram flutuações nos valores de leitura enquanto estavam na água (Anexo A). Na Figura 18, depois do uso dos fatores de correções aprimorados, os valores novos potenciais obtidos coincidem (são iguais) em alguns momentos, porém não apresentam mais o mesmo comportamento ao longo do tempo.

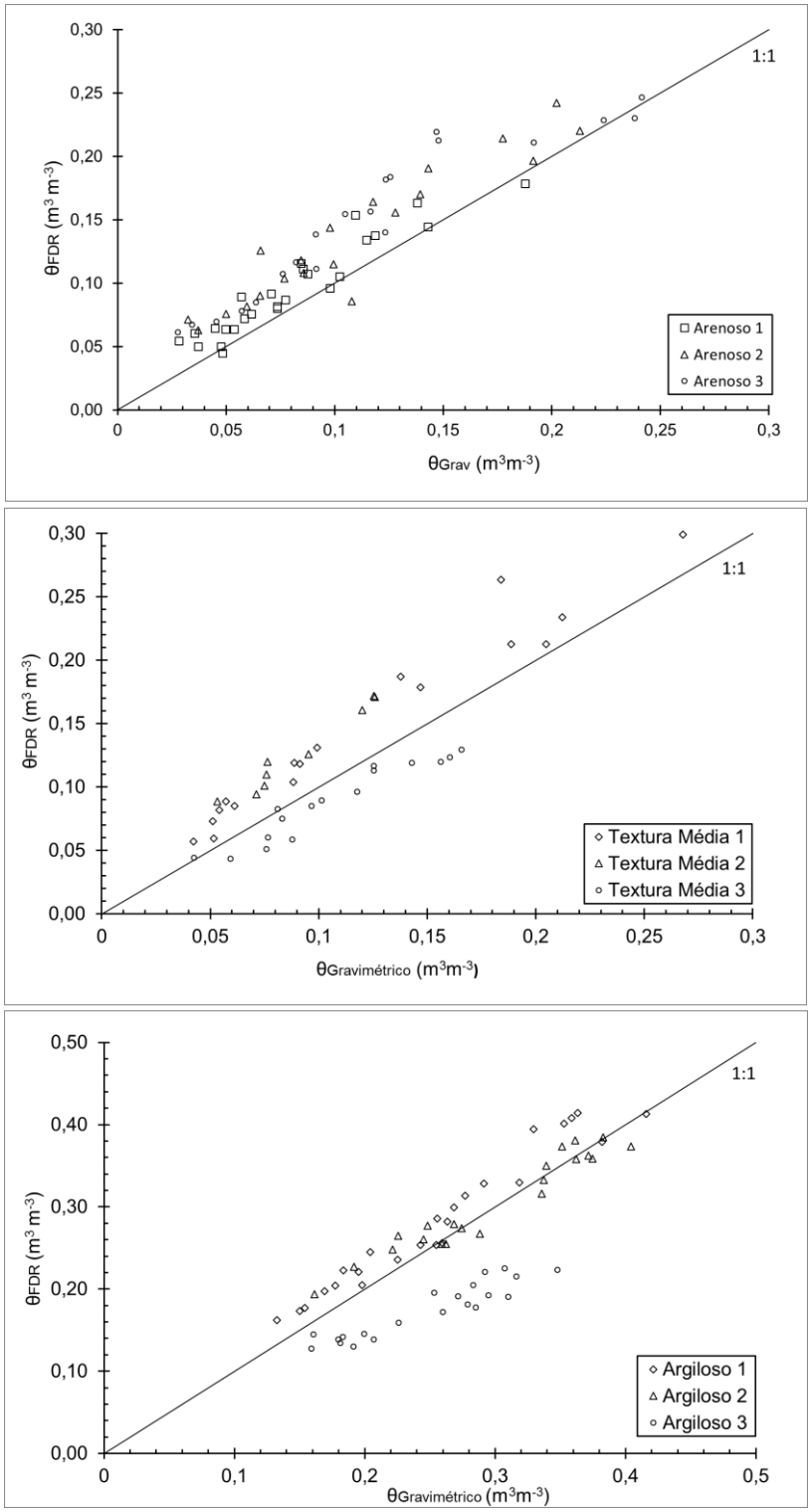
4.4. Experimento comparativos entre instrumentos em colunas de solo

As análises desse experimento foram realizadas por etapas: comparação entre as umidades obtidas pelo método do FDR e gravimétrico e a comparação entre os potenciais obtidos (WP4 e PoT) em relação ao potencial gravimétrico.

4.4.1. Umidade medida pelos métodos FDR e gravimétrico

Na Figura 19 são apresentados os valores de umidade obtidos pelos métodos FDR e gravimétrico, para os 3 solos, três repetições por solo. As correlações de Pearson entre as umidades obtidas pelo método gravimétrico e o método FDR foram aproximadamente de: 0,73 para o solo arenoso, 0,94 para o solo de textura de média e 0,82 para o solo argiloso. Esses valores foram obtidos com a calibração padrão do instrumento. A frequência de oscilação dos sensores de capacitância é afetada também pelo conteúdo de minerais de argila e pela temperatura, o que pode explicar a baixa correlação, para o solo argiloso. O que demonstra que é sempre necessária uma calibração local do instrumento.

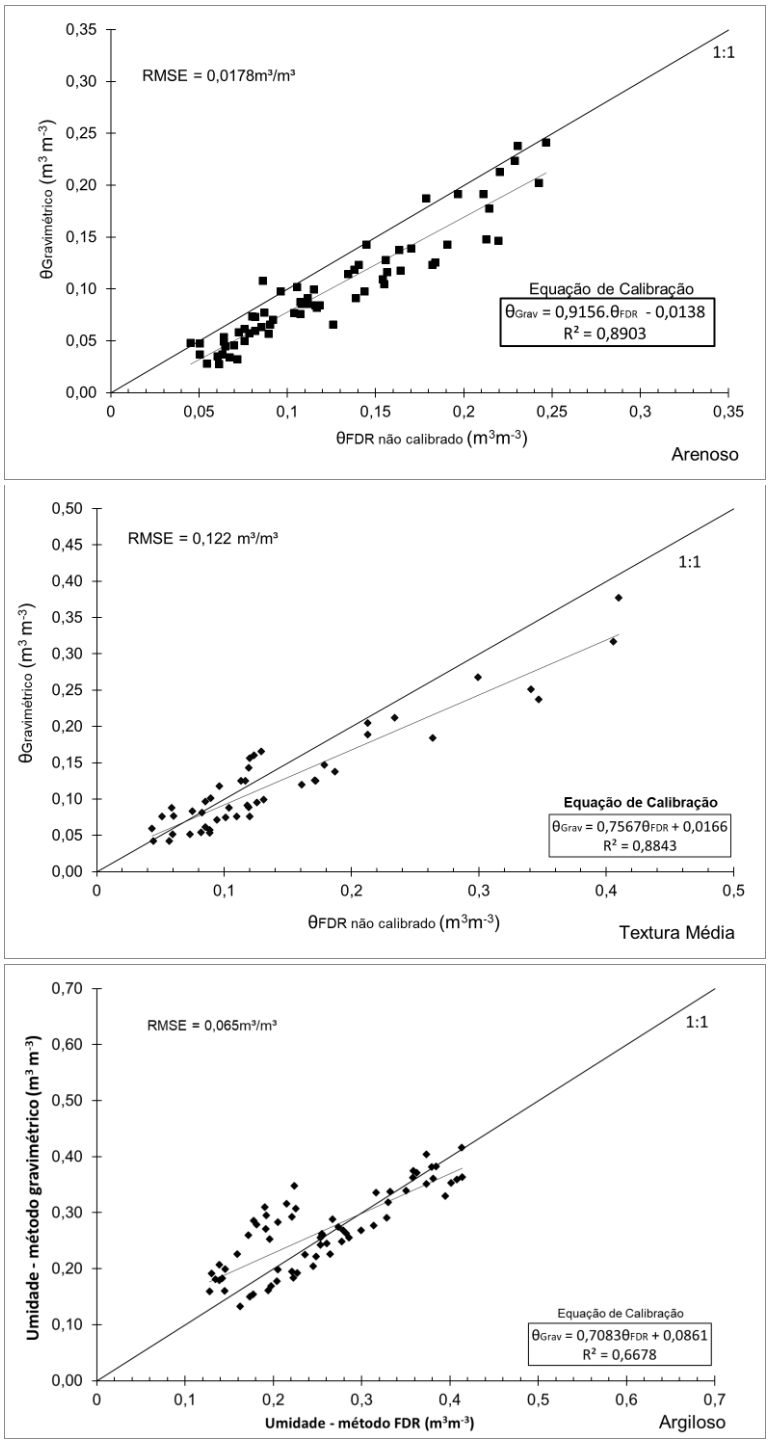
Figura 19 - Umidades obtidas pelos métodos de reflectometria em relação ao gravimétrico para os diferentes solos, com 3 colunas por solo.



Para fazer a calibração específica do FDR para os solos, consideraram-se todos os pontos obtidos de todas as colunas do mesmo solo (Figura 20). A equação

da reta obtida nesses gráficos foram utilizadas posteriormente para a correção dos valores obtidos pelo FDR.

Figura 20 - Gráfico de dispersão considerando todas as leituras de umidade pelo método de reflectometria em relação ao gravimétrico para calibração do equipamento por solo.



Após a calibração do FDR, calcularam-se os potenciais correspondentes à umidade que foi determinada pelo método FDR e gravimétrico através da equação de van Genutchen. Utilizaram-se os parâmetros obtidos através da curva de retenção do solo arenoso, para determinar o potencial.

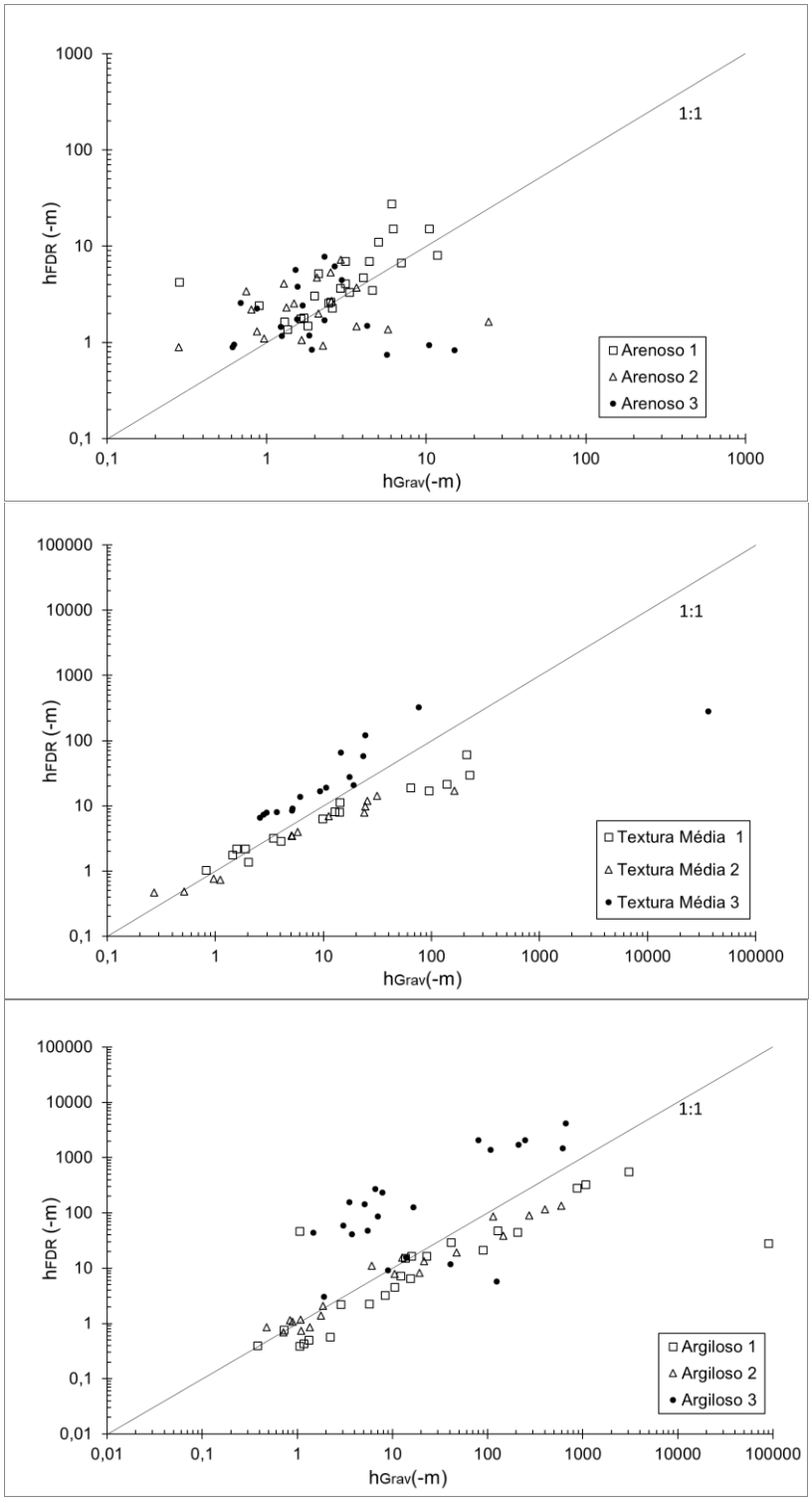
$$\Psi = \frac{\left(\Theta^{-\frac{1}{m}-1}\right)^{\frac{1}{n}}}{\alpha} \qquad \text{Equação 11}$$

sendo Θ a saturação relativa do solo dada por:

$$\boldsymbol{\Theta} = \frac{(\boldsymbol{\theta}-\boldsymbol{\theta}_{\mathbf{r}})}{(\boldsymbol{\theta}_{\mathbf{s}}-\boldsymbol{\theta}_{\mathbf{r}})} \qquad \text{Equação 12}$$

Na Figura 21 observa-se que o h_{FDR} obtido pelo solo arenoso se apresentou mais concentrado entre a região de -1 m até aproximadamente -10 m. Para os solos de textura média e argiloso o h_{FDR} apresentaram uma boa correlação em relação ao h_{Grav} de aproximadamente 1:1 (de -0,1 até aproximadamente -100 m).

Figura 21 - Potencial calculado pelo método FDR em relação ao calculado obtido pelo método gravimétrico por solo.



4.4.2. Potenciais Medidos pelos Diferentes métodos

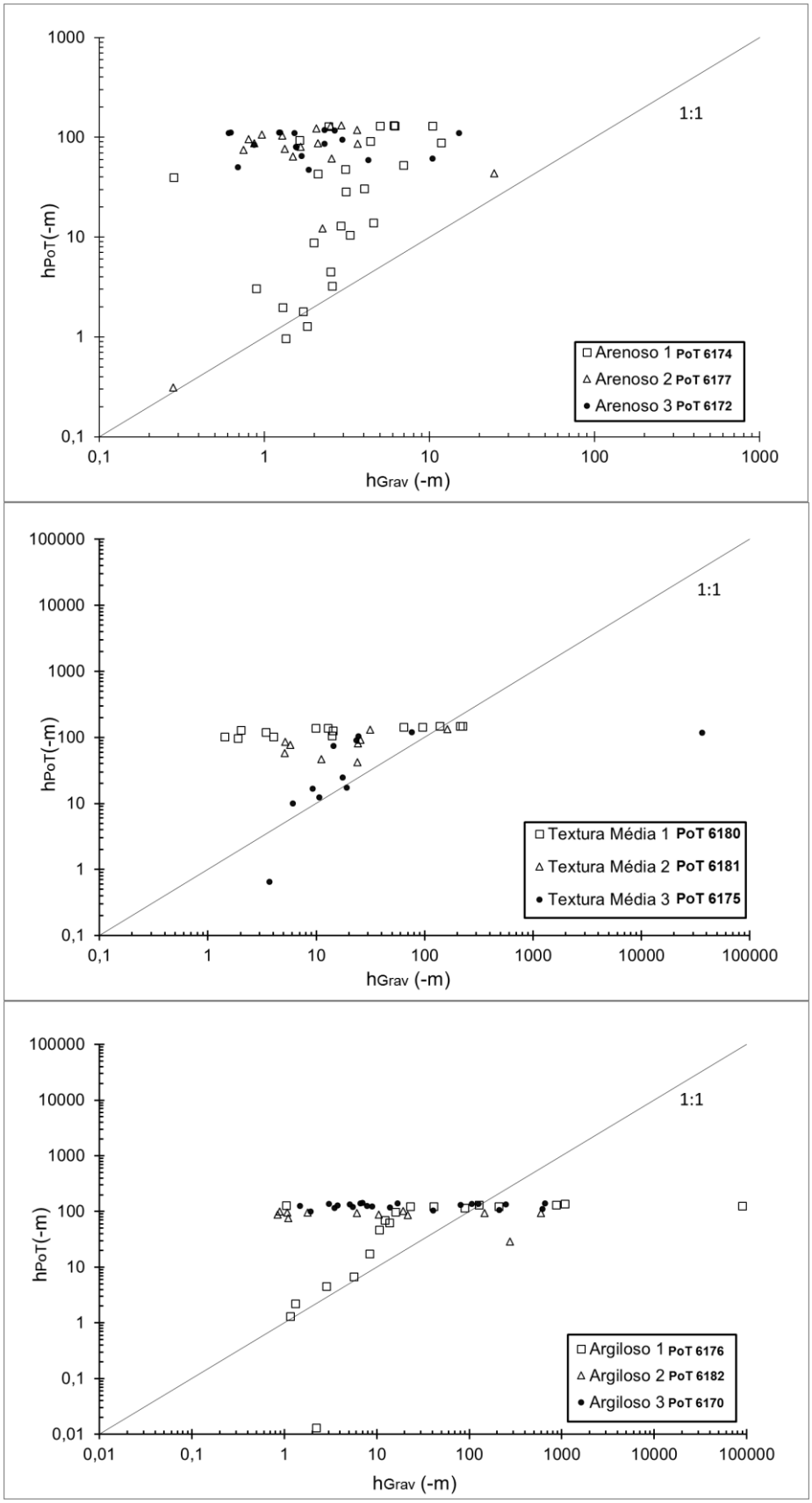
Para comparar os instrumentos elaboraram-se dois gráficos comparativos entre as medições do PoT e do WP4 em relação ao potencial matricial obtido pelo método gravimétrico em combinação com a curva de retenção determinada. Na Figura 22 apresenta-se a comparação entre os potenciais do PoT em relação ao potencial obtido pelo calculado método gravimétrico por solo arenoso.

Na Figura 22, para o solo arenoso se observa que as medições do PoT 6174 possui uma boa correlação com o h_{Grav}, estando próximos à linha 1:1 até aproximadamente -10 m. No solo de textura média, somente um PoT, pareceu funcionar durante o experimento, sendo este, o PoT 6175 o único que teve uma correlação boa próxima a linha 1:1 até -100 m. Assim como nos outros solos, o solo argiloso somente um PoT obteve uma boa correlação com valores próximos da linha 1:1, o PoT 6176, com limite de leitura de -160 m.

As tendências dos potenciais obtidos pelos tensiômetros de polímero apresentaram características semelhantes para os três solos, no qual dois tensiômetros por solo apresentaram leituras constantes durante todo o experimento. A partir desses resultados obtidos pelos tensiômetros durante o experimento em colunas para os diferentes solos, as seguintes hipóteses foram levantadas:

1. Os tensiômetros estavam com defeito, possivelmente devido ao desgaste do polímero, embora tenham reagido normalmente;
2. O local de medição do tensiômetro estava mais seco do que o amostrado para a medição do potencial do WP4 e da umidade gravimétrica, possivelmente devido ou ao mau contato entre o tensiômetro de polímero e o solo, ou devido a contração do solo durante a secagem ter possibilitado um maior contato entre o equipamento com o ar atmosférico;
3. O tensiômetro devido, ao seu tamanho muito grande para o volume do cilindro, pode ter ficado mais próximos da superfície, que estava mais seco do que na altura dos outros equipamentos.

Figura 22 - Potenciais obtidos pelo PoT em relação ao potencial calculado pelo método gravimétrico.



A Figura 23 apresenta os potenciais medidos pelo WP4, os potenciais obtidos pelo WP4 para o solo arenoso mostram os valores do h_{Grav} superestimados. Os potenciais obtidos para o solo de textura média apresentaram uma melhor correlação bem próxima a linha 1:1. As medições do WP4 se apresentaram bem dispersas na faixa de -1 à -1000 m para o solo argiloso, apesar de estarem dispersos os dados se encontram próximos a linha 1:1.

O WP4 mede o potencial total da água na amostra do solo, sendo esse a soma do potencial mátrico e osmótico. De acordo com Klein et al. (2010), em função do princípio de funcionamento de acordo com a equação de Kelvin, no qual é dependente da pressão e de vapor do líquido, a utilização deste equipamento para elevados potenciais pode ser afetada pela estrutura e pela textura de solo. Assim como na Figura 2, que demonstra a relação entre o R_H do ar no solo e o potencial matricial, a umidade relativa está em 100%, o que faz com que solos que estejam muito úmidos (aproximadamente, h > -100m), apresentem resultados muito pouco precisos.

Figura 23- Potenciais obtidos pelo WP4 em relação ao potencial obtido pelo método gravimétrico por solo.

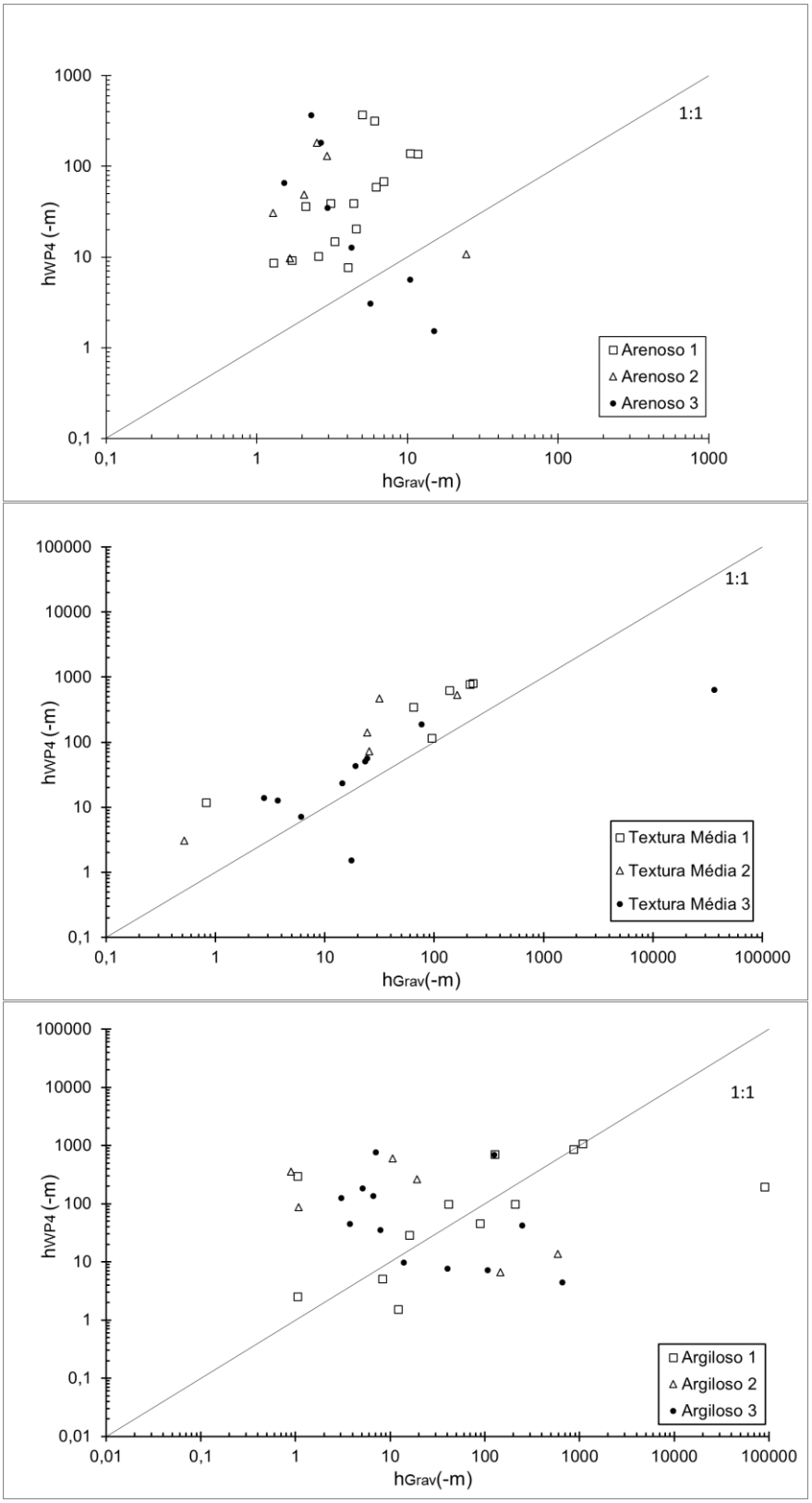
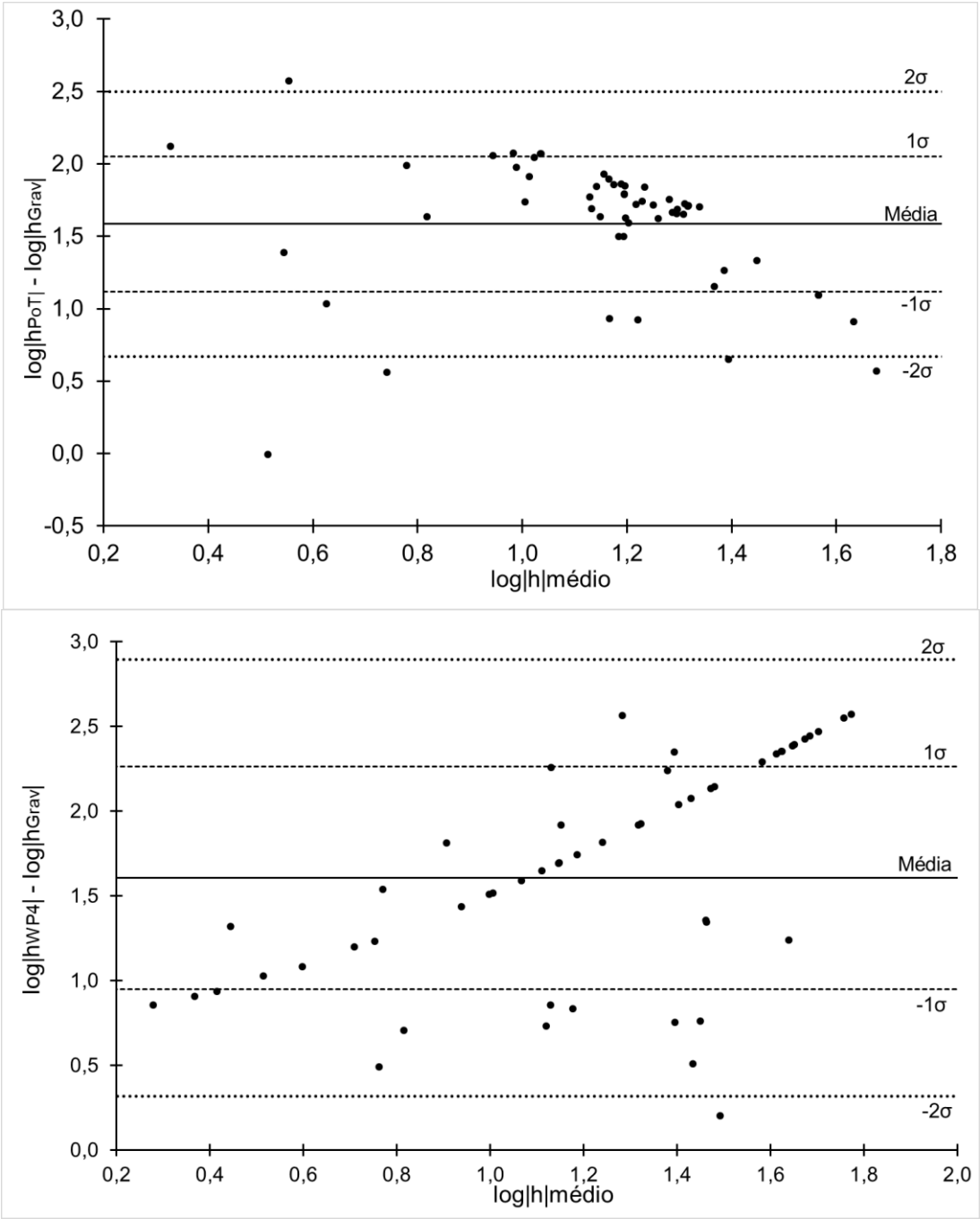


Figura 24 - Diagrama Bland-Altman para os potenciais obtidos em relação ao potencial gravimétrico para todos os solos.



Diagramas Bland-Altman, como na Figura 24, permitem analisar a concordância de dois métodos que deveriam medir a mesma propriedade. Na figura24, observa-se que as leituras obtidas pelo WP4 para todos os solos apresentam uma característica linear: conforme aumenta o h_{Grav} o h_{WP4} diminui, porém, é possível notar que a maioria dos dados estão localizados dentro da faixa de 1σ (68,27% de

confiança), poucos dados se localizam fora da faixa se 2σ. Ao se avaliar o WP4 no diagrama de Bland-Altman, os dados se apresentam dispersos dentro da faixa de 1σ até 2.0 do $\log|h|_{médio}$, depois disso apresenta uma tendência no qual conforme aumenta o h_{Grav}, o h_{WP4} diminui.

A partir do diagrama de Bland-Altman dos equipamentos para todos os solos é possível analisar que o PoT teve uma precisão melhor do que o WP4, porém tanto o WP4 como o PoT não tiveram uma boa exatidão.

Tabela 5 - Coeficiente de correlação de Pearson e o RMSE para os potenciais obtidos pelo WP4 (h_{WP4}) em relação ao método gravimétrico (h_{grav}) e pelo PoT (h_{PoT}) em relação ao método gravimétrico, para os três materiais de solo.

	$\log(h_{PoT})$ vs $\log(h_{Gravimétrico})$		**$\log(h_{WP4})$ vs $\log(h_{Gravimétrico})$**	
	RMSE	**R**	**RMSE**	**r**
Arenoso	1,318	0,126	3,544	-0,233
Textura Média	3,112	0,273	3,775	-0,381
Argiloso	0,77	0,167	0,6853	-0,062

Na Tabela 5 são considerados todos os dados obtidos pelos diferentes métodos. Observa-se que tanto o WP4 quanto o PoT não possuem uma boa correlação em relação ao método gravimétrico. No caso do PoT isso pode ter ocorrido devido ao mau contato entre o equipamento e solo. Já no caso do WP4 pode ter ocorrido, devido o WP4 não se apresentar confiável para h > -70 m (solos úmidos), visto isso os valores que são lidos até esse intervalo, podem ter prejudicado na associação entre os dados. Visando isso se fez uma nova tabela com os valores do WP4 e do PoT com os dados filtrados, considerando apenas os tensiômetros que apresentaram um bom funcionamento e no caso do WP4 considerando apenas os valores de potenciais h>-50 m, esses dados são apresentados na Tabela 6.

Tabela 6 - Coeficiente de correlação de Pearson e o RMSE para os valores filtrados de potenciais obtidos pelo WP4 (hWP4) e pelo PoT (hPoT) com relação ao método gravimétrico, para os três solos.

	$log(h_{PoT})$ vs $log(h_{Gravimétrico})$		**$log(h_{WP4})$ vs $log(h_{Gravimétrico})$**	
	RMSE	**R**	**RMSE**	**r**
Arenoso	1,045	0,515	-	-
Textura Média	0,862	0,553	0,799	0,389
Argiloso	1,075	0,543	1,277	0,204

Após os valores filtrados o PoT e o WP4 apresentaram correlações maiores, já no caso do RMSE do PoT todos os solos com exceção do solo Argiloso apresentaram RMSE menores e o WP4 apresentou RMSE menor para o solo de Textura média, porém para o solo Argiloso apresentou RMSE maior.

5. CONCLUSÕES

A partir dos resultados é possível afirmar que a hipótese proposta nesse trabalho está coerente, pois o princípio de funcionamento mostrou afetar o desempenho dos equipamentos.

O WP4 não apresentou leituras confiáveis para h > -70 m, devido ao seu processo de funcionamento. Não houve diferenças significativas entre seus modos de leitura, somente em relação ao tempo. O uso do WP4 não parece muito interessante para muitas aplicações agronômicas. Pelo seu princípio de funcionamento ele começa a ser mais confiável para h < -100 m (próximo ao ponto de murcha permanente). Ao se utilizar o WP4 recomenda-se avaliar o potencial osmótico de cada solo para um estudo melhor da influência desse no potencial avaliado.

O tensiômetro de polímero (PoT) se utiliza de um método direto, que relaciona a pressão de um polímero que está em equilíbrio com a água no solo. Suas medições são automatizáveis e é recomendado para a utilização em campo, pois não necessita de um ambiente controlado e não necessita de amostras deformadas. Ele apresentou uma maior consistência nos dados. O PoT necessita de um acompanhamento da calibração do polímero devido aos desgastes desse com o tempo. O contato com o material de solo pode também ser interessante. O PoT se demonstrou ser a melhor opção de medição direta, permitindo leituras mais confiáveis desde a faixa mais úmida até o ponto de murcha permanente.

O FDR utiliza de método indireto para determinação do potencial, este relaciona a frequência relativa do solo com a umidade do solo, que através da curva de retenção determina o potencial matricial. Essa determinação apresenta uma maior propagação de erros devido às incertezas associadas a curva de retenção e devido à histerese. Mesmo assim o equipamento demonstrou um desempenho satisfatório, com boa correlação com o método padrão. Esse método pode ser utilizado no campo assim como no laboratório, é automatizável e não necessita de amostras deformadas. Recomenda-se a utilização deste equipamento somente até -150 m (ao ponto de murcha permanente).

REFERÊNCIAS

AGUS, S.S.; SCHANZ, T. Comparison of Four Methods for Measuring Total Suction. **Vadose Zone Journal**, Madison, v. 4, n. 4, p. 1087-1095, 2005.

BAKKER, G.; VAN der PLOEG, M.J.; DE ROOIJ, G.H.; HOOGENDAM, C.W.; GOOREN, H.P.A.; HUISKES, C.; KOOPAL, L.K.; KRUIDHOF, H. New polymer tensiometers: Measuring matric pressures down to the wilting point. **Vadose Zone Journal**, Madison, v. 6, p. 196-202, 2007.

BIESHEUVEL, P.M.; RAANGS, R.; VERWEIJ, H. Response of the Osmotic Tensiometer to varying Temperatures: Modeling and Experimental Validation. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 63, p. 1571-1579, 1999.

BIESHEUVEL, P.M.; VAN LOON, A.P.; RAANGS, R.; VERWEIJ, H.; DIRKSEN, C.A. A prototype osmotic tensiometer with polymeric gel grains. **European Journal of Soil Science**, Oxford, v. 51, p. 355-364, 2000.

CARDOSO, R.; ROMERO, E.; LIMA, A.; FERRARI, A. A comparative study of soil suction measurement using two different high-range psychrometers. In: SCHANZ, T. (Ed.). **Experimental unsaturated soil mechanics**. Berlin: Springer, 2007. p. 79- 93. (Proceedings in Physics, 112).

CAMPBELL SCIENTIFIC, Inc. **Instruction Manual CS215 Temperature and Relative Humidity Probe**. São Paulo, 2015. 44 p.

CAUPIN, F.; HERBERT, E. Cavitation in water: a review. **C.R. Physique**, Paris, v. 7, p. 1000-1017, 2006.

DE JONG VAN LIER, Q. **Física do solo**. Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2010. v. 1., 298 p.

DECAGON DEVICES, Inc. **Operator's manual EC – 5 Soil Moisture Sensor**. Pulmann, 2016. 22 p.

DECAGON DEVICES, Inc. **Operator's manual WP4C Dewpoint PotentiaMeter**. Pulmann, 2013. 58 p.

DONAGEMA, G.K.; CAMPOS, D.V.B. de; CALDERANO, S.B.; TEIXEIRA, W.G.; VIANA, J.H.M. **Manual de métodos de análise de solos**. Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 2011. 230 p. Disponível em: <https://www.embrapa.br/busca-de-publicacoes/-/publicacao/990374/manual-de-metodos-de-analise-de-solo>. Acesso em: 15 maio 2017.

DURIGON, A.; GOOREN, H.P.A. Measuring hydraulic conductivity to willting point using polymer tensiometers in an evaporation on experiment. **Vadose Zone Journal**, Madison, v. 10, n. 2, p. 741-746, 2011.

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

DURIGON, A.; SANTOS, M.A. dos; VAN LIER, Q.D.J.; METSELAAR, K. Pressure heads and simulated water uptake patterns for a severely stressed bean crop. **Vadose Zone Journal**, Madison, v. 11, n. 3, p. 1539-1663, 2012.

DURNER, W. Hydraulic conductivity estimation for soils with heterogeneous pore structure. **Water Resources Research**, Washington, DC, v. 30, n. 2, p. 211-223, 1994.

DURNER, W.; OR, D. Soil water potential measurement. **Encyclopedia of Hydraulogical Sciences**, Hoboken, v. 6, p. 1089-1102, 2005.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA. **Sistema Brasileiro de Classificação de Solos.** 2. Ed. Rio de Janeiro, Centro Nacional de Pesquisa em solos, 306 p. 2006.

GUBIANI, P.I.; REICHERT, J.M.; CAMPBELL, C.; REINERT, D.J.; GELAIN, N.S. Assessing errors and accuracy in dew point potentiometer and pressure plate extractor measurements. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 77, n. 1, p. 19-24, 2012.

HILLEL, D. **Environmental soil physics**. San Diego: Academic Press, 1998.

HIRAKATA, V.N.; CAMEY, S.A. Análise de concordância entre métodos de Bland-Altman. **Revista HCPA**, Porto Alegre, v. 29, n. 3, p. 261-268, 2009.

KLEIN, V.A.; BASEGGIO, M.; MADALOSSO, T.; MARCOLIN, C.D. Textura do solo e a estimativa do teor de água no ponto de murcha permanente com psicrômetro. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 40, n. 7, p. 1550-1556, 2010.

LEONG, E.C.; TRIPATHY, S.; RAHARDJO, H. Total suction measurement of unsaturated soils with a device using the chilled – mirror dewpoint techinique. **Géotechinique**, London, v. 53, n. 2, p. 173-182, 2003.

MADSEN, H.B.; JENSEN, C.R.; BOYSEN, T. A comparision of the thermocouple psychormoter and the pressure plate methods for determination of soil water characteristic curves. **European Journal of Soil Science**, Oxford, v. 37, p. 357-362, 1986.

PAGAY, V.; SANTIAGO, M.; SESSOMS, D.A.; HUBER, E.J.; VICENT, O.; PHARKYA, A.; CORSO, T.N.; LAKSO, A.N.; STROOCK, A.D. A microtensiometer capable of measuring water potentials below – 10 Mpa. **Lab Chip**, Cambridge, v. 14, p. 2806-2817, 2014.

PALTINEANU, I.C.; Starr, J.L. Real time Soil Water Dynamics Using Multisensor Capacitance Probes: Laboratory Calibration. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 61, p. 1576-1585, 1997.

REICHARDT, K. **A água em sistemas agrícolas**. São Paulo: Manole, 1987. 188 p.

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

RICHARDS, L.A.; OGATA, G. Psychrometric measurement of soil samples equilibrated on pressure membranes. **Soil Science Society of America Proceedings**, Madison, v. 20, p. 456-459, 1961.

ROOIJ, G.H.D.; VAN der PLOEG, M.J.; GOOREN, H.P.A.; BAKKER, G.; HOOGENDAM, C.W.; HUISKES, C.; KOOPAL, L.K. Measuring very negative water potentials with polymer tensiometers: principles, performance and applications. **Biologia**, Heidelberg, v. 64, n. 3, p. 438-442, 2009.

SCHELLE, H.; HEISE, L.; JANICKE, K.; Water retention characteristics of soils over the whole moisture range: a comparison of laboratory methods. **European Journal of Soil Science**, v. 64, p. 814 – 821, 2013.

UNESCO. **The United Nations World Water Development Report 2015**: Water for a Sustainable World, Place de Fontenoy, Paris, 7, p. 1-139, 2015.

VAN der PLOEG, M.J.; GOOREN, H.P.A.; BAKKER, G.P.; DE ROOIJ, G.H. Matric potential measurementes by polymer tensiometers in cropped lysimeters under water stressed conditions. **Vadose Zone Journal**, Madison, v. 7, n. 3, p. 1048-1054, 2008.

VAN der PLOEG, M.J.; GOOREN, H.P.A.; BAKKER, G.P.; HOOGENDAM, C.W.; HUISKES, C.; KOOPAL, L.K.; DE ROOIJ, G.H. Polymer tensiometers with ceramic cones: Direct observations of matric pressures in drying soils. **Hydrology and Earth System Sciences**, Göttingen, Germany, v. 14, n. 10, p. 1787-1799, 2010.

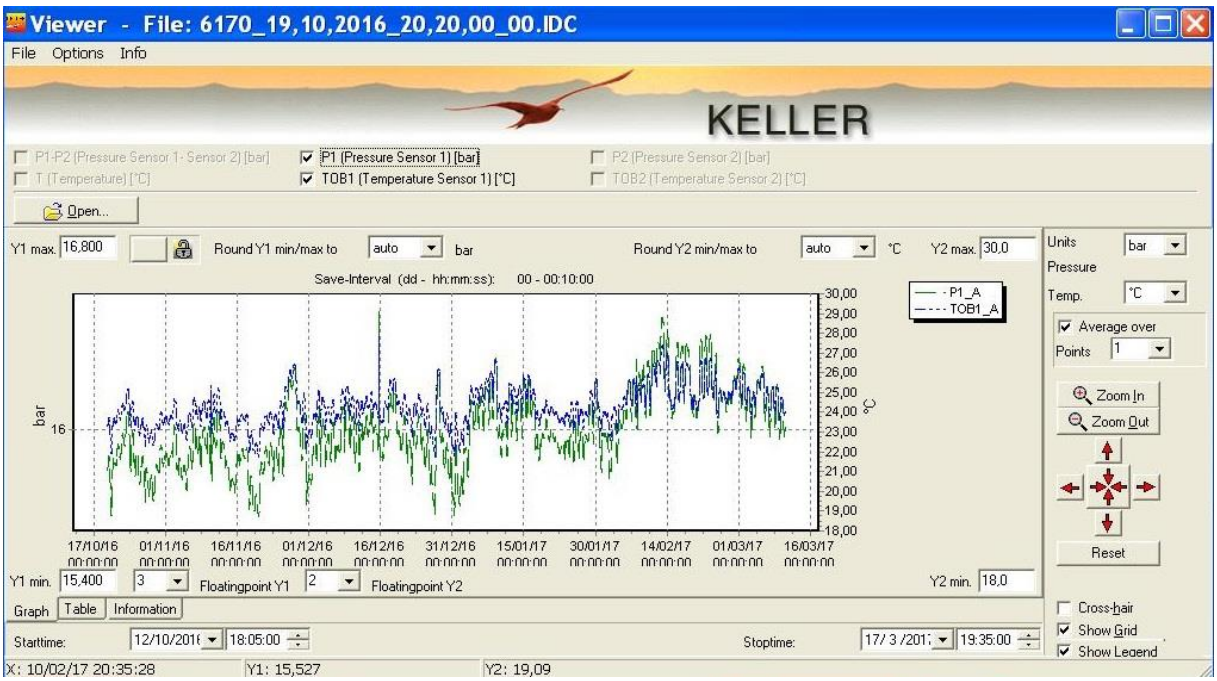
VAN GENUCHTEN, M.T. A closed form Equation for Predicting the Hydraulic Conductivity of Unsaturated Soils. **Soil Science Society ,l of American Journal**, v; 44, p. 892 – 898, 1980.

ANEXO

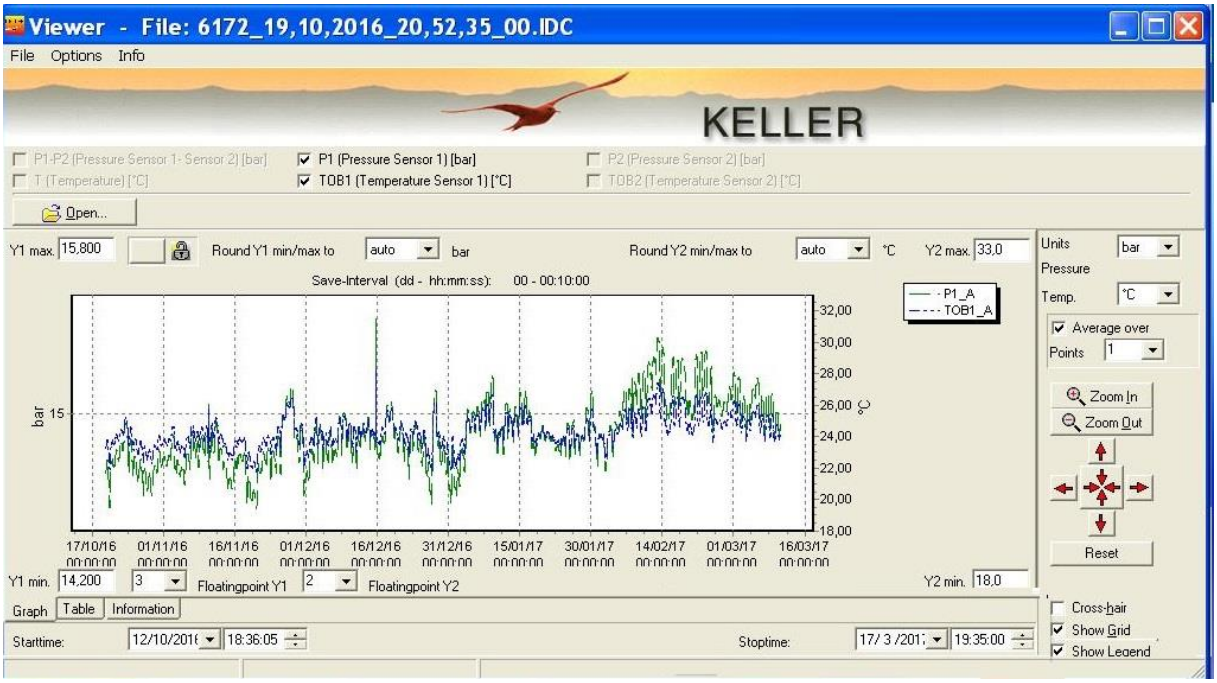
Anexo A – Tela de teste dos PoT na água.

Leituras do tensiômetros de polímero enquanto estão na água.

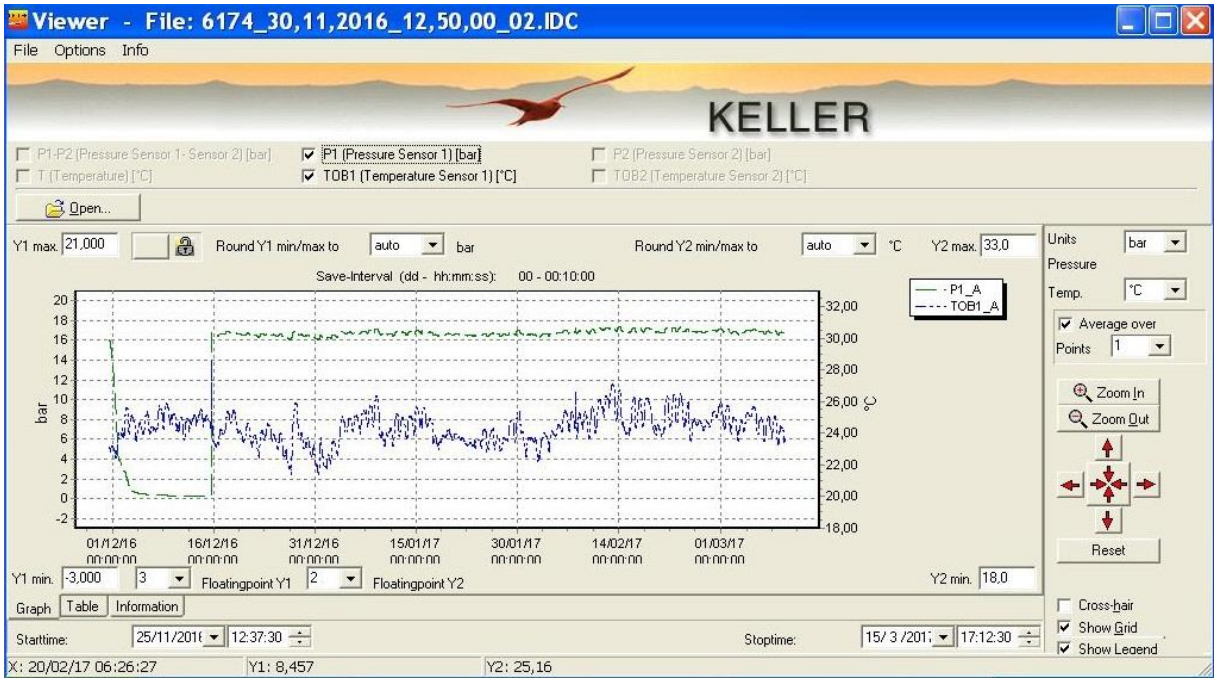
- PoT 6170



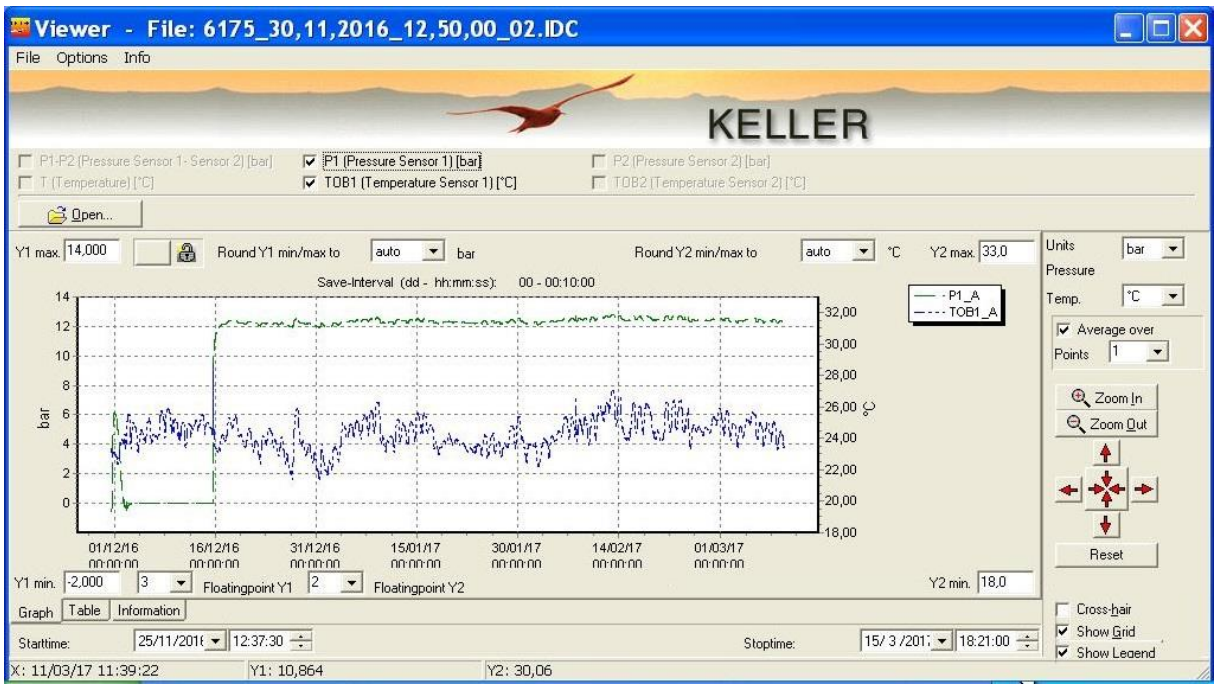
- PoT 6172



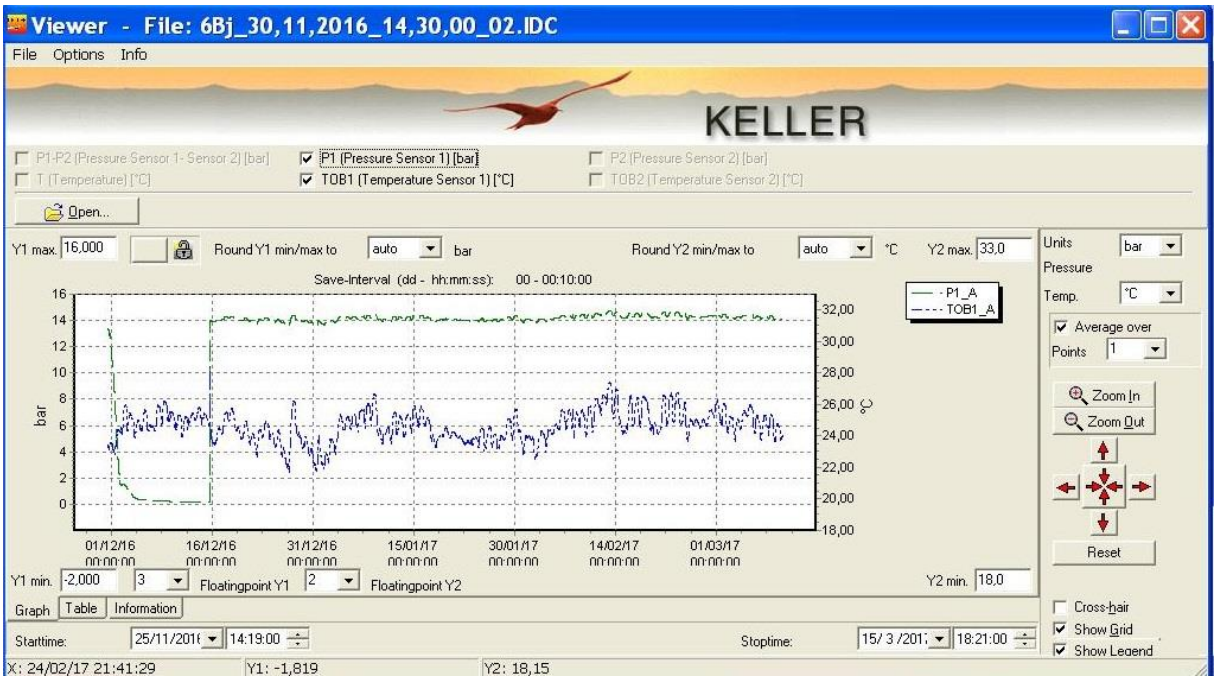
- PoT 6174



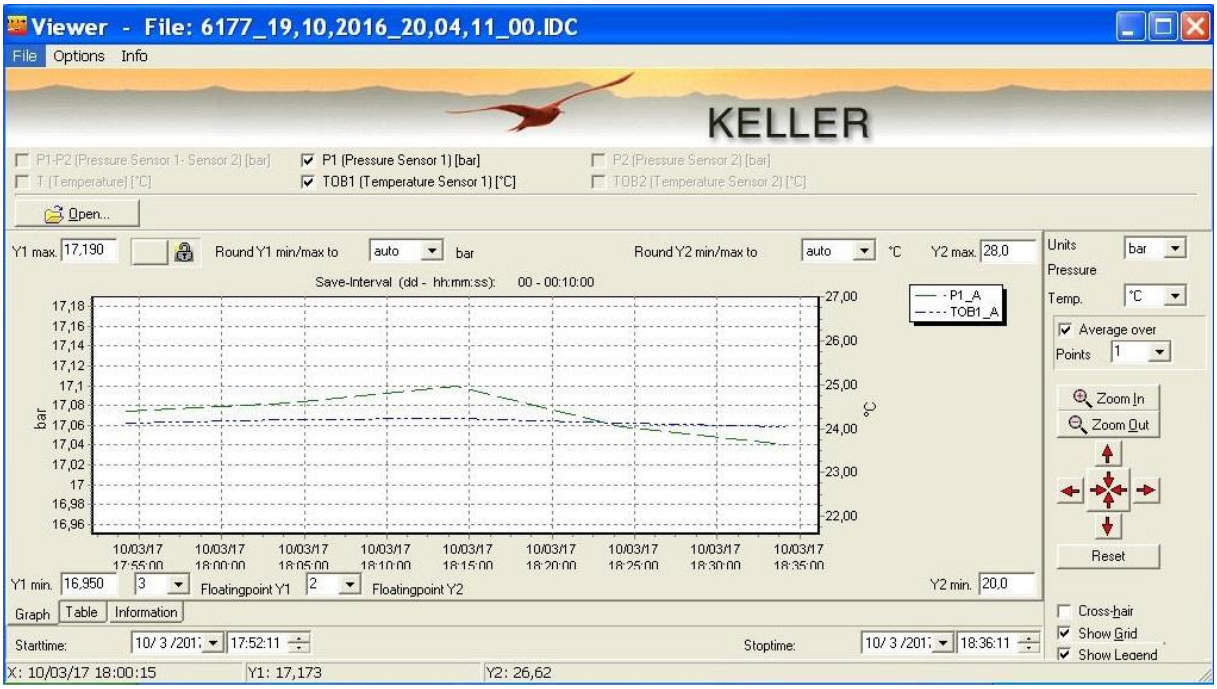
- PoT 6175



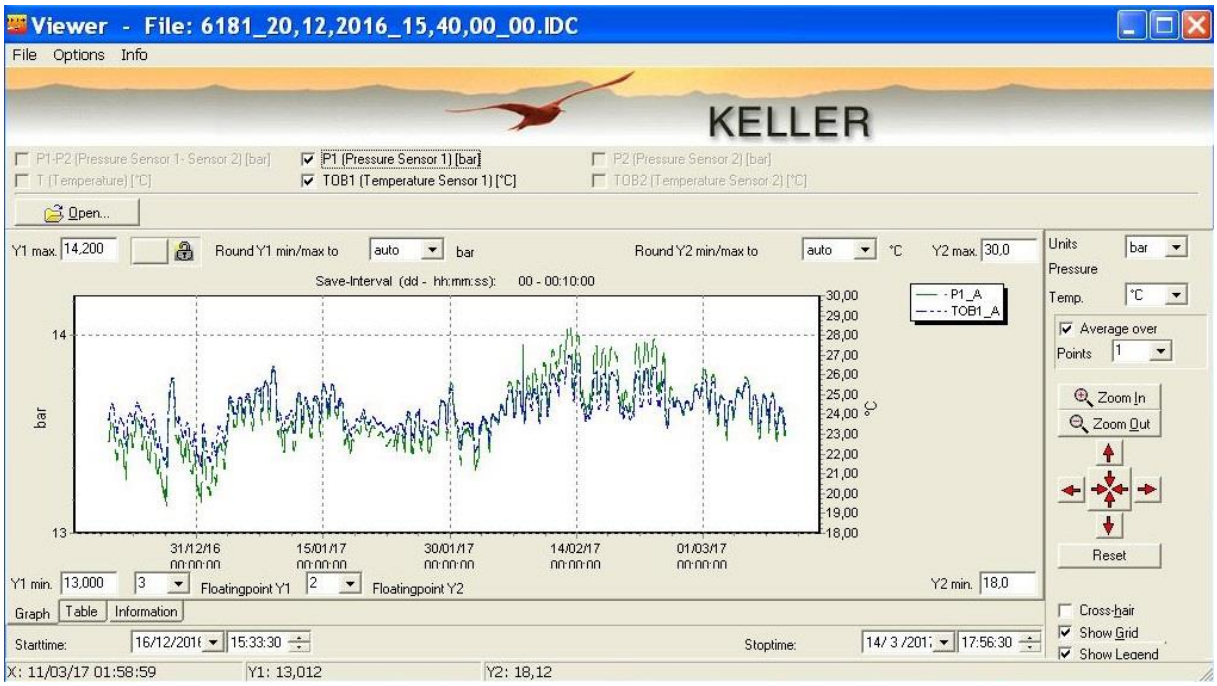
- PoT 6176



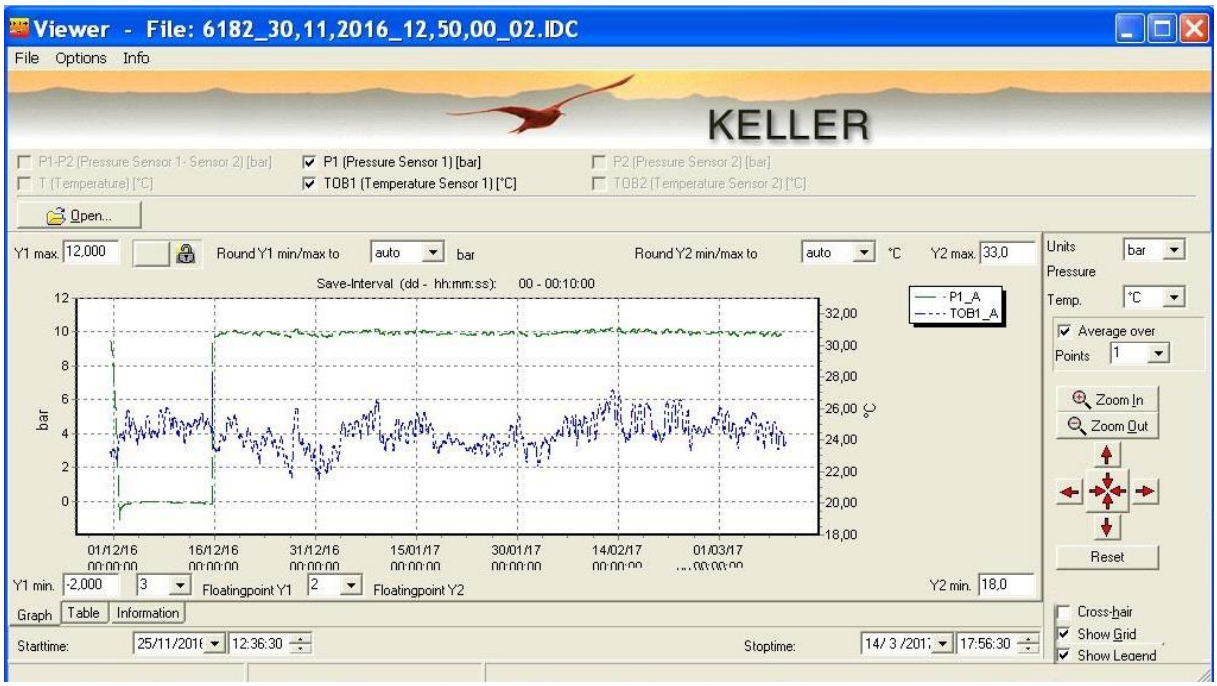
- PoT 6177



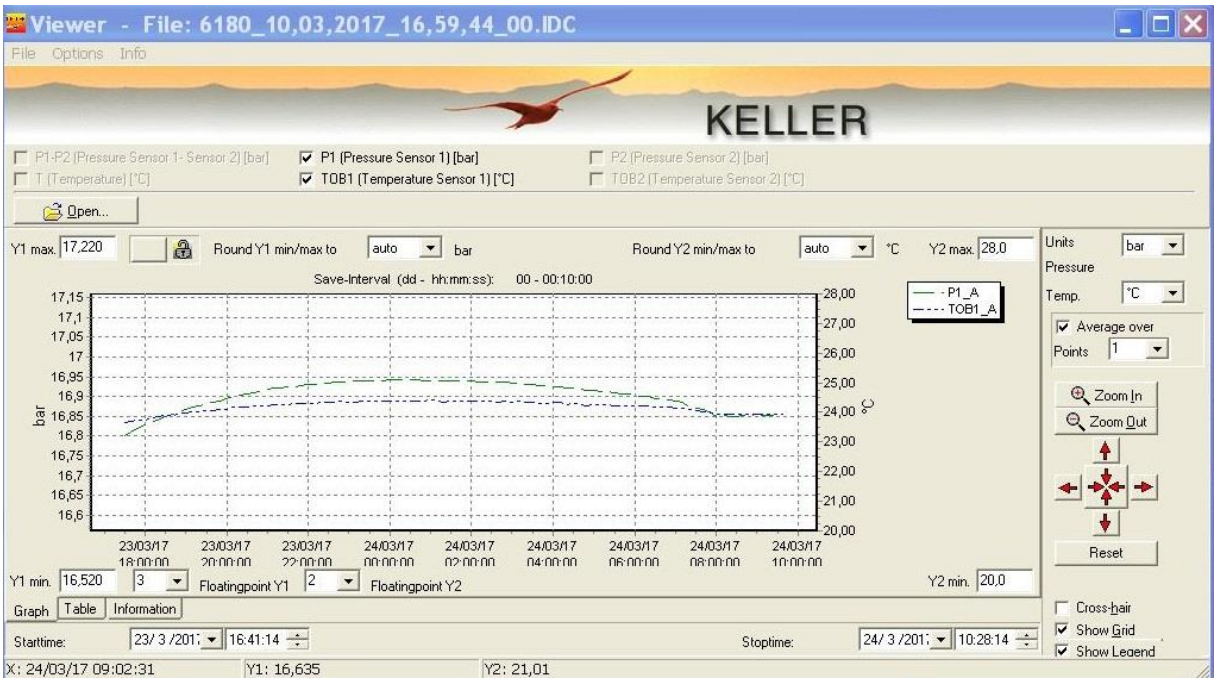
- PoT 6181



- PoT 6182



- PoT 6180


Viewer - File: 6180_10,03,2017_16,59,44_00.IDC
File Options Info
KELLER
P1-P2 (Pressure Sensor 1- Sensor 2) [bar]
T (Temperature) [°C]
P1 (Pressure Sensor 1) [bar]
TOB1 (Temperature Sensor 1) [°C]
P2 (Pressure Sensor 2) [bar]
TOB2 (Temperature Sensor 2) [°C]
Open...
Y1 max. 17,220
Round Y1 min/max to auto bar
Round Y2 min/max to auto °C
Y2 max. 28,0
Units bar
Pressure
Temp. °C
Save-Interval (dd - hh:mm:ss): 00 - 00:10:00
P1_A
TOB1_A
Average over
Points 1
Zoom In
Zoom Out
Reset
Y1 min. 16,520
Floatingpoint Y1 3
Floatingpoint Y2 2
Y2 min. 20,0
Graph
Table
Information
Cross-hair
Show Grid
Show Legend
Starttime: 23/ 3 /201 16:41:14
Stoptime: 24/ 3 /201 10:28:14
X: 24/03/17 09:02:31
Y1: 16,635
Y2: 21,01

Anexo B – Quadro de resumo sobre as metodologias.

Método	Faixa de Medição (m)	Utiliza a Curva de Retenção	Campo	Laboratório	Sensível a composição do solo	Automatizável	Destrutivo
Psicrômetro (WP4C)	0 a -30000			X	X		X
Tensiômetro de Polímero	0 a -160		X	X		X	
Gravimétrico	0 a -150	X		X			X
FDR	0 a -150	X	X	X	X	X	