

**INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E
TECNOLOGIA DO SERTÃO PERNAMBUCANO.
CAMPUS PETROLINA ZONA RURAL**

CURSO DE BACHARELADO EM AGRONOMIA

**UMIDADE DO SOLO A PARTIR DE DIFERENTES
METODOLOGIAS DE DETERMINAÇÃO**

MÁRCIA VIEIRA DE SOUZA

**PETROLINA, PE
2019**

MÁRCIA VIEIRA DE SOUZA

**UMIDADE DO SOLO A PARTIR DE DIFERENTES
METODOLOGIAS DE DETERMINAÇÃO**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado
ao IF SERTÃO-PE *Campus* Petrolina Zona
Rural, exigido para a obtenção de título de
Engenheiro Agrônomo.

**PETROLINA, PE
2019**

S729

Souza, Márcia Vieira de.

Umidade do solo a partir de diferentes metodologias de determinação / Márcia Vieira de Souza. - 2019.

17 f.: il.; 30 cm.

Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Agronomia)-Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Sertão Pernambucano, Petrolina, 2019.

Bibliografia: f. 14-15.

1. Irrigação. 2. Umidade do solo. 3. Métodos. 4. Equipamentos. I. Título.

CDD 631.587



SECRETARIA DE EDUCAÇÃO PROFISSIONAL E TECNOLÓGICA
INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA
DO SERTÃO PERNAMBUCANO

FOLHA DE APROVAÇÃO

Márcia Vieira de Souza

UMIDADE DO SOLO A PARTIR DE DIFERENTES METODOLOGIAS
DE DETERMINAÇÃO

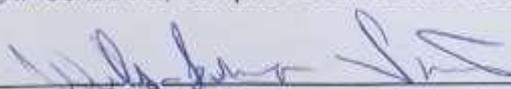
Trabalho de Conclusão de Curso
apresentado como requisito parcial para
obtenção do título de Engenheiro
Agrônomo, pelo Instituto Federal de
Educação, Ciências e Tecnologia Sertão
Pernambucano, Campus Petrolina Zona
Rural.

Aprovado em: 16/ SETEMBRO 2019

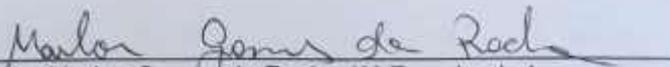
Banca Examinadora



Dr. José Sebastião de Costa Sousa (Orientador/Presidente)
IF Sertão-PE, Campus Petrolina Zona Rural



Dr. Welson Lima Simões (2º Examinador)
EMBRAPA-Semiárido



Dr. Marlon Gomes da Rocha (3º Examinador)
IF Sertão-PE, Campus Petrolina Zona Rural

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho primeiramente a Deus que através da fé sempre me fortaleceu nos momentos angustiosos. Ao meu marido Janielson Ribeiro Gonçalves, por todo apoio, paciência, ensinamentos, e por todo amor que tem por mim. A minha filha, Eloise Ribeiro Souza que é a minha maior conquista e motivação para alcançar todos meus sonhos. A minha madrinha, Ivoneide Delmodes Ribeiro, que durante esta difícil caminhada, tem se dedicado a cuidar de minha filha e da minha família. A minha vovó Jubilina Andrelina de Souza, por ter me criado e educado no caminho que irei seguir profissionalmente. Aos meus pais, Juvenilson Andreliano de Souza e Francisca Vieira da Cruz Souza pelos ensinamentos da vida.

AGRADECIMENTOS

É chegado o momento de prestar homenagem a todas as pessoas que estiveram comigo nessa longa caminhada me dando apoio, ensinamento e incentivo para que eu pudesse realizar essa conquista, a conclusão do meu curso. Por essa razão, agradeço.

A Deus, por toda proteção, força e luz, concedendo a dádiva de concluir com êxito esse tão sonhado curso. Aos meus amigos Micaele Bagagi Araujo, Janiclecia Santos Lima, João Bagagi, Andressa Dayane Pereira da Conceição, Davi Cavalcanti Rodrigues, Letícia Mirella Souza Alves, Maura Marinete de Sousa, Matheus da Silva Santos, Ipojucam Santos, Francisco Nogueira ; A equipe do laboratório de solos, por se empenharem nesse trabalho junto comigo e darem o seu melhor; A equipe de campo, e aos meus colegas de minha turma Ag03 e as demais turmas que estive presente, em especial a turma Ag08, por ter me acolhido e ajudado durante toda esta trajetória, juntos nos trabalhos em equipe, por ser uma turma diferenciada. Muito obrigada a todos!

Agradeço a todos aqueles que foram meus professores, pelos ensinamentos, compreensão, e orientações que somaram na minha formação acadêmica.

Agradeço ao professor e orientador Dr. José Sebastião Costa de Sousa por toda dedicação, paciência, orientações e todo ensinamento, que foi muito proveitoso neste período de convívio, ao Dr. Welson Simões pela orientação neste trabalho de conclusão de curso.

Ao Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Sertão Pernambucano, Campus Petrolina Zona Rural, por todo apoio durante e acolhimento esta trajetória, lugar que tive como minha casa durante esses anos.

Eu serei sempre grata a cada um por tudo o que me ensinaram e fizeram por mim nesses anos de graduação.

Muito obrigada!

SÚMARIO

Item	pg.
Introdução	7
Material e Métodos	9
Resultados e Discussão	11
Conclusões	14
Referências	14
Apêndice	17

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Curva de retenção de água em solo semelhante ao do experimento.	11
Figura 2. Declínio temporal da umidade do solo pelos diferentes métodos de determinação.	12
Figura 3. Curvas de calibração das umidades volumétricas do solo (% de volume), para condições do experimento em redação, para os métodos da Falker (a), TDR (b) e Pesagens (c).	12
Figura 4. Curvas características de retenção de água no solo a partir de dados tensiométricos com curvas pré-definidas [Ten. (UV)] e com dados de umidade da estufa [Est. (Uv)]. Observação todas as umidade são volumétricas.	13
Figura 1A - Representação gráfica da evolução temporal da tensão matricial de água no solo registrada pelos tensiômetros. Dados ajustados apresentados na Tabela 1A.	17
Figura 2A – Umidade volumétrica do solo para os dados da Tabela 3A. Onde foram usados dados da curva de retenção pré-definida para área adjacente ao experimento (a) e para condição de umidade da estufa (b).	18

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Densidade global (D_g) e das partículas (D_p) dos blocos (B) experimentais.	9
Tabela 2. Classificação das médias de umidade volumétrica do solo para o período de testes do experimento.	11
Tabela 3. Classificação das médias de umidade volumétrica do solo para dados calibrados.	13
Tabela 1A - Dados brutos e ajustados estatisticamente, para tensão matricial do solo (Ψ_m).	17
Tabela 2A - Dados da tensiometria (Ψ_m e Tens.) e da estufa (Estu.) usados para geração de curvas de ajuste da umidade do solo. Onde U_v representa umidade volumétrica.	18
Tabela 3A – Umidades volumétricas (U_v) do solo para as curvas características de retenção da Figura 1A.	18

UMIDADE DO SOLO A PARTIR DE DIFERENTES METODOLOGIAS DE DETERMINAÇÃO¹

Márcia vieira de Souza², José Sebastião Costa de Sousa³, Welson Lima Simões⁴, Alysson Lívio Vasconcelos Guedes³

RESUMO: O monitoramento da umidade do solo é uma ferramenta fundamental para o manejo da irrigação, especialmente em regiões de diminuta disponibilidade hídrica. E por assim ser, muitos são os equipamentos e métodos de determinação, desta variável, existente no mercado. Atualmente os mais usados são, dentre outros, o método padrão da estufa, método da tensiometria, métodos eletromagnéticos e capacitivos (a TDR, sonda Falker) e método das pesagens. Observa-se, contudo que apesar desta disponibilidade de métodos e equipamentos, poucos são os trabalhos científicos voltados a compará-los técnico e financeiramente. Desta forma, objetivou-se com este trabalho avaliar a exatidão dos métodos supracitados comparando-os ao método padrão da estufa. O experimento foi realizado em condições de campo na cidade de Petrolina-PE avaliando-se os primeiros 20 cm de um argissolo amarelo de textura superficial franco-arenosa. Observou-se que a TDR foi a metodologia mais eficiente nas determinações da umidade do solo em condições de dados brutos e calibrados. Entretanto, com calibrações todos os métodos apresentaram resultados estatisticamente iguais ao método padrão da estufa.

Palavras-chave: TDR, Manejo da irrigação, Método da estufa, Calibração.

Soil moisture from different determination methodologies

ABSTRACT: Monitoring soil moisture is a key tool for irrigation management, especially in regions of poor water availability. And as such, there are many equipment and methods for determining this variable on the market. Currently the most widely used are, among others, the standard greenhouse method, the tensiometry method, the electromagnetic and capacitive methods (the TDR, Falker probe) and the weighing method. However, despite this availability of methods and equipment, there are few scientific works to compare them technically and financially. Thus, the objective of this work was to evaluate the accuracy of the above methods comparing them to the standard method of the greenhouse. The experiment was carried out under field conditions in the city of Petrolina-PE evaluating the first 20 cm of a yellow sandy loam clayey loam soil. TDR was the most efficient methodology for soil moisture determinations under raw and calibrated data conditions. However, with calibrations all methods presented results statistically equal to the standard greenhouse method.

Key words: TDR, Irrigation Management, Greenhouse Method, Calibration.

Introdução

A água é o recurso natural mais importante para a sobrevivência de qualquer ser vivo que habita neste Planeta. E como ano após ano a sua disponibilidade tem diminuído em termos quantitativos, os conflitos por direito de uso desta, tem gerado debates e investigações em todo o globo (ANA, 2019).

¹Parte do trabalho de conclusão de curso do primeiro autor

²Bacharelada em Eng. Agrônomo, IF Sertão-PE, *Campus* Petrolina Zona Rural, Rodovia PE-647, Km 22, PISNC N-4, Zona Rural, Cx. Postal 277, CEP 56.302-970, Petrolina-PE. e-mail: marciavieraagro@gmail.com.

³Doutor em Eng. Agrícola, professor do IF Sertão-PE, *Campus* Petrolina Zona Rural, Curso de Agronomia, Rodovia PE-647, Km 22, PISNC N-4, Zona Rural, Cx. Postal 277, CEP 56.302-970, Petrolina-PE, Fone: (87) 2101-8050, e-mail: sebastiao.costa@ifsertao-pe.edu.br; alysson.livio@ifsertao-pe.edu.br.

⁴Doutor em Agronomia, pesquisador da Embrapa Semiárido, Rodovia BR-428, Km 152, Zona Rural, Cx. Postal 23, CEP 56.302-970, Petrolina, PE, Fone: (87) 3866-3600, e-mail: welson.simoese@embrapa.br

Na agricultura, setor que mais demanda água, os sistemas de irrigação mais eficientes no uso da água vêm ocupando áreas crescentes nos últimos anos. Como exemplo cita-se que no Brasil, segundo dados do censo agropecuário de 2006, os sistemas de irrigação localizados (gotejamento e microaspersão) ocupavam uma área de aproximadamente 327,90 mil ha, correspondente a 8% de toda a área irrigada no país (Paulino et al., 2011). Cerca de 10 anos após, as projeções do censo de 2017 apontam que estes sistemas ocupam cerca 1 milhão e 650 mil ha (IBGE, 2018), ou seja, a área de irrigação localizada no Brasil mais que quadruplicou.

A importância da umidade no solo em sistemas agrícolas e o seu monitoramento é fundamental, principalmente em regiões em que a disponibilidade de água se torna restritiva, como por exemplo, no semiárido brasileiro.

No entanto, a mudança de sistema de irrigação se não acompanhada de evolução no monitoramento e manejo da irrigação não gerará os efeitos esperados na economia de água.

Neste sentido a condição de umidade do solo, estimada ou medida, é a variável “chave” na definição da necessidade e lâmina de irrigação a aplicar (Bernardo et al., 2006).

Os métodos de determinação da umidade do solo mais empregados e avaliados na atualidade são, dentre outros, o método da estufa (padrão da estufa, padrão ou gravimétrico), pesagem, Reflectometria no Domínio do Tempo (TDR), sondas Falker e tensiometria.

A tensiometria consiste na determinação da tensão com que a água está retida no solo e indiretamente na umidade do mesmo. O equipamento sensor é simples (tubo de PVC, cápsula porosa e tampa de borracha), barato, e não sofre influência da salinidade do solo, podendo ser utilizado tanto em área de produção como para fins de pesquisa. No entanto, carece da curva de retenção de água no solo, é afetado pela variabilidade da qualidade das cápsulas porosas existentes no mercado e é aplicado a restrita faixa de tensão matricial do solo, até 80 kPa (Aguiar Netto & Bastos, 2013).

No método padrão da estufa a água é extraída de uma amostra de solo através de calor, utilizando estufas elétricas, onde a umidade gravimétrica do solo é obtida a partir da relação entre a massa do solo úmido e a massa de solo seco (EMBRAPA, 1997; Klein, 2008). Este método apesar de ser simples, direto e muito exato, tem como desvantagem o tempo necessário para obtenção do resultado, atingido geralmente entre 24 e 48 horas (Santos et al., 2006). Por este motivo, seu emprego tem se dado principalmente como referência para calibrar equipamentos e métodos mais práticos (Braga et al., 2018).

O método das pesagens é também um método direto e de precisão relativamente boa. Foi desenvolvido e apresentado por Papadakis (1941) e em seguida melhorado por KLAR et al. (1966). Tem uma grande vantagem quando comparado com o método padrão da estufa, que é a de fornecer o resultado logo após a retirada da amostra de solo e necessitar apenas de uma balança com sensibilidade de 0,1 g e de um balão volumétrico de 500 mL.

Já o equipamento da TDR é uma técnica que mede o tempo que um pulso eletromagnético se propaga por uma sonda inserida no solo e por meio de equações embargadas no aparelho é determinada a umidade do solo (Rabello, 2009; Santos et al., 2010). É um dos mais utilizado em pesquisas, por causa da facilidade de obtenção e armazenamento de dados (Bizari et al., 2011). Apresenta ainda as vantagens de não destruir a amostra, exibir alta exatidão nas medições, ser portátil e permitir automatização de leituras em qualquer direção no perfil do solo. Tem como desvantagens, seu elevado custo e a necessidade de calibração para cada tipo de solo (Batista et al., 2016).

Os sensores de umidade da Falker, especialmente o aparelho Hidrofarm, usa do mesmo princípio do TDR para leitura da umidade do solo. Sendo que neste a medida se baseia na impedância do solo em Alta Frequência (ISAF), que é proporcional ao teor de água no mesmo (Falker, 2012). O equipamento quando comparado ao TDR, apresenta o custo reduzido, porém, com poucas informações científicas de desempenho.

Diante desta quantidade de métodos e equipamentos existentes para determinação da umidade do solo e da importância desta variável no manejo racional da irrigação, objetivou-se com este trabalho avaliar a exatidão de diferentes métodos de determinação da umidade do solo em comparação ao método da estufa e apresentar calibrações e estratégias que potencializem seus usos.

Material e Métodos

O experimento foi desenvolvido em condições de campo na área experimental do IF Sertão-PE, *campus* Petrolina Zona Rural (CPZR), área rural de Petrolina – PE, durante o mês de julho de 2019. A região apresenta classificação climática de Köppen do tipo BSh, ou seja, semiárido muito quente e com estação chuvosa no verão estendendo-se para o início do outono (Azevedo et al., 2003). O solo do local estudado foi classificado como Argissolo amarelo de textura superficial franco-arenosa (EMBRAPA, 2013).

O experimento teve delineamento em blocos casualizados com quatro tratamentos (métodos e equipamentos para determinação da umidade do solo) e nove blocos (repetições). Os tratamentos foram: T1 – método padrão da estufa, T2 – aparelho da sonda Hidrofarm, com uso do sensor Falker, modelo HFM2030, T3 – equipamento da TDR, modelo TDR 100 do da Campbell, e T4 – método das pesagens.

O método da tensiometria não constitui tratamento para a análise de variância junto aos outros métodos, porém, foi realizada comparação singular, direta, para com o tratamento T1. Desta avaliação foi gerada curva de calibração para o método. O objetivo deste estudo foi o de revelar estratégia de identificação de erros no emprego de curvas de retenção de água no solo e de como contorná-los.

Os blocos tinham 9,00 m² de área e os equipamentos foram instalados aproximadamente no centro destes. Os dados foram coletados na camada superficial do solo, de 0 a 20 cm de profundidade, tomando-se o cuidado de amostrar representativamente toda a camada.

Antecedendo o experimento foram realizadas análises físicas do solo em cada bloco seguindo o manual de orientações da Embrapa (Teixeira et al., 2017). As densidades do solo e das partículas encontram-se apresentadas na Tabela 1.

Tabela 1. Densidade global (Dg) e das partículas (Dp) dos blocos (B) experimentais.

Densidades	Blocos									Média
	B1	B2	B3	B4	B5	B6	B7	B8	B9	
Dg (g cm ⁻³)	1,44	1,47	1,60	1,62	1,64	1,55	1,49	1,67	1,56	1,56
Dp (g cm ⁻³)	2,78	2,67	2,78	2,78	2,74	2,74	2,74	2,70	2,74	2,74

A área experimental recebeu umedecimento suficiente para saturar até 1,00 m de camada do solo e as coletas de dados foram realizadas durante o período de secamento natural do mesmo. A saturação do solo ocorreu no fim da tarde do dia 06/07/2019 e as coletas foram realizadas durante os dias 07, 09, 11, 13, 16, 18 e 20, do mesmo mês, sempre nas primeiras horas da manhã (entre 6:00 e 8:30) para evitar interferências nas leituras dos tensiômetros.

Para o método padrão da estufa, seguiu-se metodologia de Teixeira et al. (2017), coletando-se amostras de solo com auxílio de trado holandês, posicionado concentricamente na camada amostrada, em seguida as amostras foram transferidas para sacolas plásticas e fechadas hermeticamente, logo após as sacolas foram identificadas e levadas ao laboratório, onde amostras de solo foram colocadas em cadinho de alumínio e pesadas, em balança semi analítica com precisão de 0,01 g, antes e após secagem em estufa com circulação de ar forçada a 105 °C durante 24 h. As umidades volumétricas das amostras foram obtidas a partir da Equação 1.

$$U_v = \frac{M_1 - M_2}{M_2 - M_3} \times 100 \times D_g \quad (\text{Eq. 1})$$

Onde: M1 - massa do conjunto solo úmido e recipiente, g; M2 - massa do conjunto solo seco e recipiente, g; M3 - massa do recipiente, g; e Dg - densidade global do solo, g cm⁻³.

Para o método das pesagens, seguiu-se os procedimentos apontados por KLAR et al. (1966), que foram os seguintes: tomando-se inicialmente 100 g de solo seco de cada bloco experimental e transferiu-os para balões volumétricos de 500 ml, em seguida os balões foram preenchidos com água destilada até a marcação e agitados o suficiente para expulsar o ar contido no solo, os balões cheios foram pesados (em balança de precisão de 0,01 g) e os resultados constituíram as massas padrão (M) dos blocos. Em cada dia de coleta uma amostra de 100 g de solo úmido era colocada nos balões e o conjunto pesado para obtenção das massas M'. As umidades das amostras eram então obtidas a partir das Equações 2 e 3 (Bernardo et al., 2006).

$$U_{bu} = (M - M') \times \left(\frac{D_p}{D_p - 1} \right) \quad (\text{Eq. 2})$$

$$U_v = \frac{100 \times U_{bu}}{100 - U_{bu}} \times D_g \quad (\text{Eq. 3})$$

Onde: Ubu - umidade gravimétrica do solo em base úmida, %; M - massa padrão da amostra de solo seco (com balão volumétrico), g; M' - massa úmida da amostra de solo (com balão volumétrico), g; Dp - Densidade das partículas do solo, g cm⁻³; Uv - umidade volumétrica do solo; Dg - densidade global do solo, g cm⁻³.

As umidades volumétricas do solo, para a TDR e o aparelho da Falker (Hidrofarm HFM2030), foram geradas diretamente pelos equipamentos. As sondas da TDR tinham formato de garfo com três hastes de 10 cm de comprimento. As hastes foram instaladas, uma em cada bloco de modo concêntrico à camada amostrada, no início dos testes e permaneceram nas mesmas posições até o final do experimento. Já a sonda da Falker, que era apenas uma para todo o experimento, tinha formato de espátula com 20 cm de comprimento e eram inseridas completamente no solo a cada coleta.

Para o método tensiométrico utilizou-se de tensiômetros de punção instalados de forma que os centros das cápsulas porosas ficaram a 10 cm da superfície (posição representativa para camada de solo de 20 cm) e as leituras eram realizadas com uso de um tensímetro digital. Os dados obtidos (tensão matricial do solo - Ψ_m , leitura do tensímetro, em mbar, subtraída da coluna de água contida no corpo do tensiômetro, cm de coluna de água) foram convertidos em kPa e aplicados na curva de retenção de água no solo da Figura 1, para obtenção da umidade. Elucida-se que esta curva foi obtida para área adjacente ao experimento (cerca de 20 m de distância).

Ainda para a tensiometria, usaram-se os dados de Ψ_m e as umidades médias de T1 (método padrão da estufa) para construção de uma curva característica ajustada.

Partindo-se desta abordagem, curvas similares para cada tratamento foram geradas e os resultados tomados como modelos de calibração dos métodos.

Os dados brutos, obtidos diretamente pelos métodos apresentados (tratamentos T1 a T4), bem como os dados ajustados pelas curvas de calibração, foram submetidos à análise de variância pelo teste f, classificação das médias segundo teste de Tukey a 5% de probabilidade e comparações múltiplas em função do tratamento T1 pela metodologia Bootstrap (Ferreira, 2014). Todos os tratamentos estatísticos foram realizados a partir do software SISVAR versão 5.7 (Ferreira, 2011).

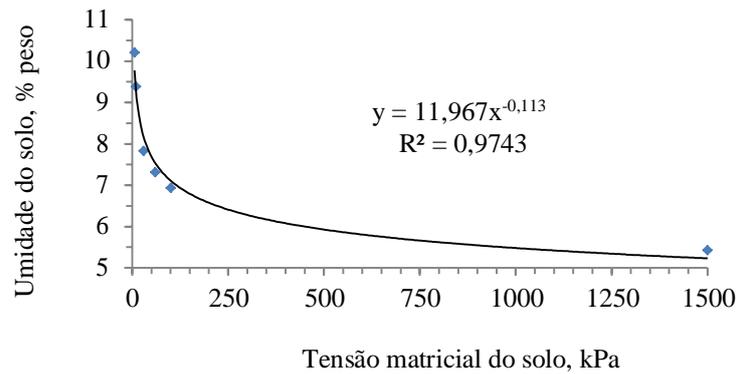


Figura 1. Curva de retenção de água em solo semelhante ao do experimento.

Resultados e Discussão

A partir das análises estatísticas dos dados brutos, os métodos da TDR (em cinco das sete avaliações) e das pesagens (em uma avaliação) foram os únicos equivalentes ao método padrão da estufa (Tabela 1).

Tabela 2. Classificação das médias de umidade volumétrica do solo para o período de testes do experimento.

Tratamentos	Data das coletas						
	07/07/19	09/07/19	11/07/19	13/07/19	16/07/19	18/07/19	20/07/19
T1 – Estufa	18,16 a3	14,81 a2	13,41 a3	10,36 a3	8,90 a3	7,87 a2	7,00 a2
T2 – Falker	11,34 a1	9,08 a1	6,87 a1	5,86 a1	4,68 a1	4,09 a1	3,18 a1
T3 – TDR	15,83 a2	13,20 a2	11,32 a2	10,21 a3	9,53 a3	8,23 a2	7,35 a2
T4 – Pesagens	15,88 a2	13,37 a2	10,86 a2	8,20 a2	6,79 a2	4,73 a1	2,72 a1
CV (%)	10,95	13,95	13,39	13,46	15,96	20,45	21,91

Observação: Letras seguidas de números iguais representa equivalência estatística; CV – coeficiente de variação.

Os trabalhos de Buske et al. (2013), que ao avaliarem a metodologia das pesagens para diferentes texturas de solo, obtiveram correlações classificadas como boas a muito boas para com o método padrão da estufa, e de Nunes et al. (2015) que encontraram tais correlações entre os métodos da TDR e da estufa, corroboram com as observações deste estudo. Para a TDR as comprovações feitas por Nunes et al. (2015) se deram por meios analíticos e gráficos. Nestes últimos os coeficientes lineares das regressões geradas ficaram próximos da unidade e os dados distribuídos adjuntos as linhas diagonais que uniam dados de umidade do método da estufa com dados da TDR. Esta é a situação, apontada pelos autores como necessária para que dados gerados por uma metodologia estime com precisão valores de outra. Ou seja, se as umidades do solo forem plotadas num mesmo gráfico, os modelos com dados equivalentes apresentarão curvas com características semelhantes.

Partindo-se dessa premissa, observou-se que as curvas de decaimento da umidade do solo para as diferentes metodologias seguiram um padrão único (Figura 2), testificando o comentário anterior e evidenciando que, apesar do distanciamento dos métodos para o método padrão da estufa, calibrações poderiam ser suficientes para ajustá-los. Este mesmo entendimento foi apresentado por Batista et al. (2016), Noia Júnior et al. (2017) e Cruz et al. (2019) em trabalhos de verificação da exatidão de equipamentos sensores de umidade do solo. Os autores relataram erros consideráveis nas leituras de dados quando modelos pré-definidos foram usados de forma indiscriminada para as diferentes texturas de solo.

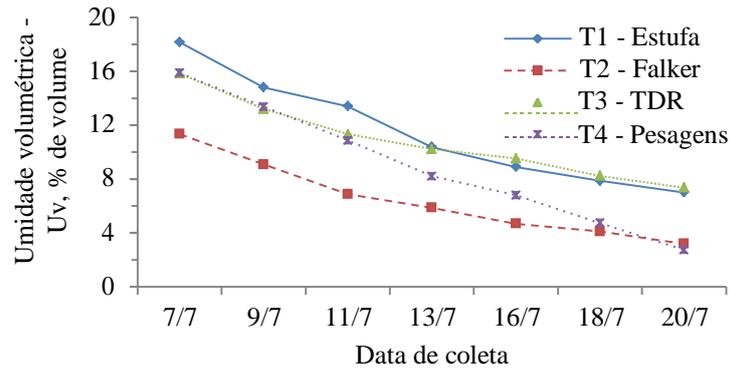


Figura 2. Declínio temporal da umidade do solo pelos diferentes métodos de determinação.

Assim, foram geradas as regressões apresentadas nas Figuras 3a a 3c, que correspondem às calibrações sugeridas para as metodologias e condições estudadas neste experimento.

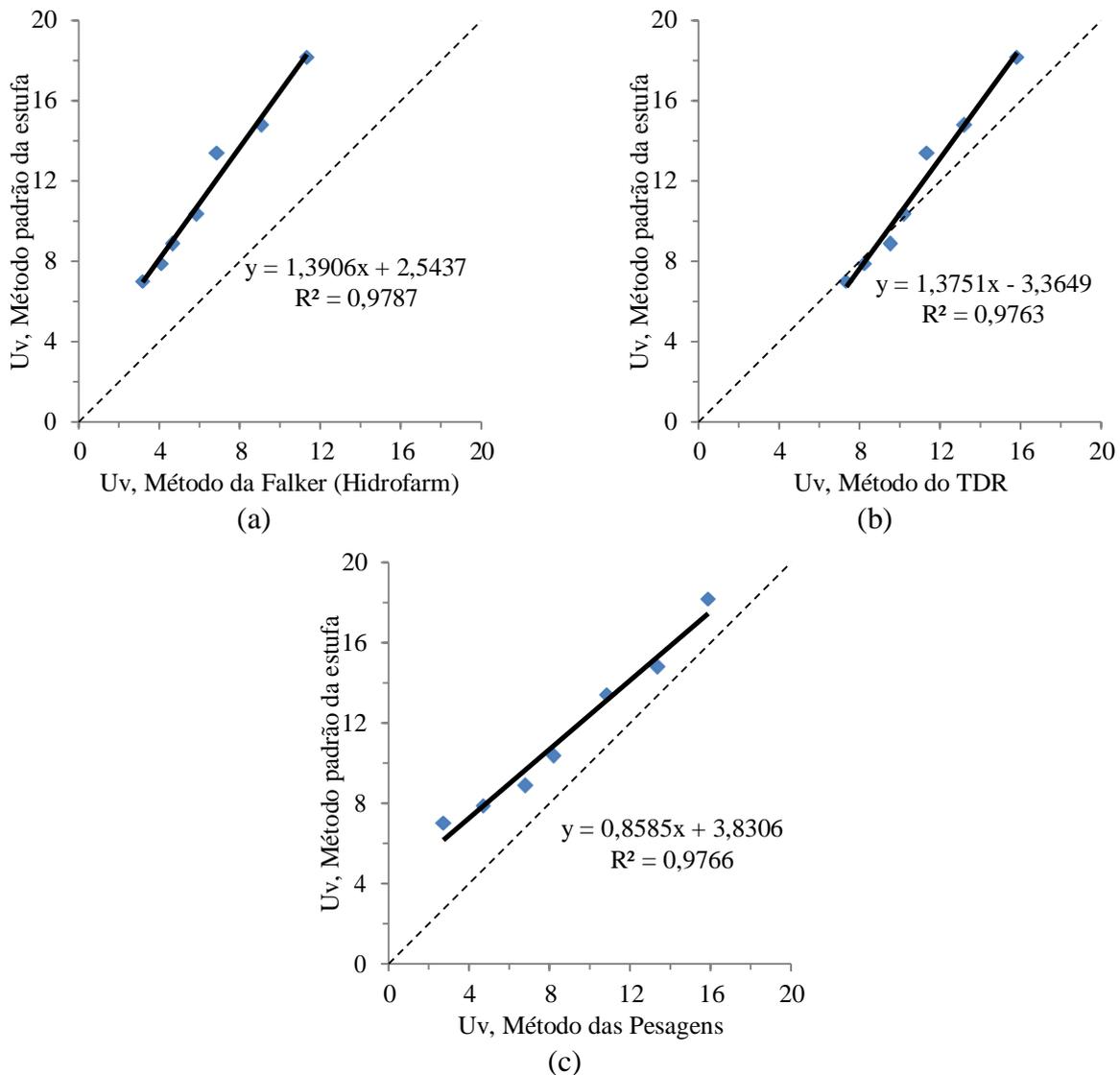


Figura 3. Curvas de calibração das umidades volumétricas do solo (% de volume), para condições do experimento em redação, para os métodos da Falker (a), TDR (b) e Pesagens (c).

Nota-se, nas Figuras 3a e 3c que os dados brutos (representados nos gráficos pelos marcadores ou pontos quadriculados) se mantiveram acima da linha diagonal em todas as faixas de umidade do solo para os métodos da Falker e pesagens, respectivamente, porém, geraram regressões com coeficientes lineares próximos da unidade. Já o método da TDR (Figura 3b) além do coeficiente linear próximo da unidade, os dados foram distribuídos à linha diagonal, especialmente na faixa de umidade entre 8 e 12% de volume.

Para o método da Falker, Gava et al. (2016) observaram divergências de dados de umidade desse método em comparação com umidades da estufa em condições próximas da saturação, e que convergências de dados ocorreram em condições de pouca umidade no solo. Apesar dos autores terem realizados as constatações exibidas em solos argilosos, percebe-se tendência semelhante à Figura 3a (os pontos amostrais se aproximam mais da linha diagonal em umidades mais baixas).

Nóia et al. (2019) apresentaram regressões com coeficientes lineares variando de 0,92 a 0,99 e dados distribuídos ao longo da diagonal para o método da TDR, divergindo em partes da Figura 3b, porém, os autores atribuíram a qualidade dos dados a calibração feita para as condições do experimento. Neste caso, em que ajustes foram feitos, há concordância com os dados da Tabela 3, correspondentes a análises de dados ajustado-calibrados (advindos do emprego das regressões da Figura 3). Donde se verifica que todos os métodos foram estatisticamente iguais.

Tabela 3. Classificação das médias de umidade volumétrica do solo para dados calibrados.

Tratamentos	Data das coletas						
	07/07/19	09/07/19	11/07/19	13/07/19	16/07/19	18/07/19	20/07/19
T1 – Estufa	18,16 a1	14,81 a1	13,41 a1	10,36 a1	8,90 a1	7,87 a1	7,00 a1
T2 – Falker	18,32 a1	15,17 a1	12,09 a1	10,69 a1	9,05 a1	8,23 a1	6,96 a1
T3 – TDR	18,40 a1	14,79 a1	12,21 a1	10,68 a1	9,74 a1	7,95 a1	6,74 a1
T4 – Pesagens	17,46 a1	15,31 a1	13,15 a1	10,87 a1	9,66 a1	7,89 a1	6,17 a1
CV (%)	12,28	15,27	14,22	14,08	15,64	20,01	20,76

Das comparações múltiplas realizadas em função do tratamento T1 pelo emprego da metodologia Bootstrap, os resultados foram idênticos aos gerados pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade. O que significa que as comparações par a par para T1 e demais métodos apresentariam iguais implicações ao teste de Tukey. Optou-se, portanto por não apresentar tabelas com as análises Bootstrap para não gerar duplicidade. Ramos e Ferreira (2009) demonstraram a robustez do método (teste de reamostragem) Bootstrap e apontaram como conservativo o teste de Tukey, gerando interpretação de cenários (normalidade de dados e pouco tratamentos) que condicionam as igualdades observadas neste trabalho.

Para a tensiometria as curvas de umidades geradas encontram-se ilustradas na Figura 4.

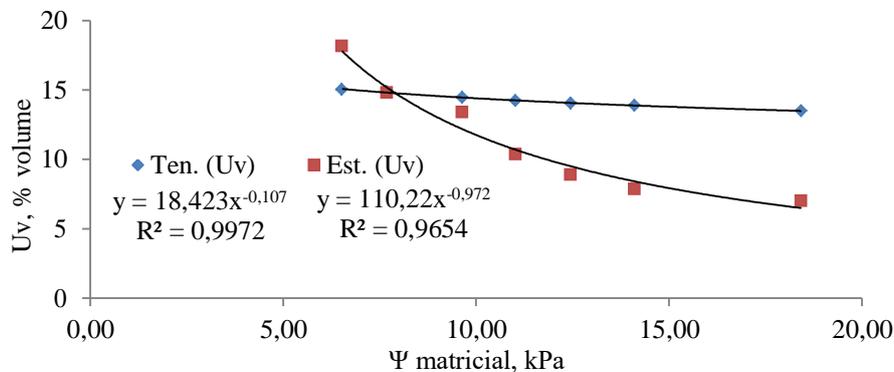


Figura 4. Curvas características de retenção de água no solo a partir de dados tensiométricos com curvas pré-definidas [Ten. (UV)] e com dados de umidade da estufa [Est. (UV)]. Observação todas as umidades são volumétricas.

A diferença observada nas equações da Figura 1 com a Figura 2 (para o caso de uso da curva pré-definida [Ten. (UV)]) ocorreram unicamente por conta de arredondamentos e transformações de dados gravimétricos em volumétricos. O mesmo não se pode apontar para as diferenças entre as equações e estrutura das curvas que compõe a Figura 2 em si. Perceba-se quão distante se comportou a umidade do solo advinda da curva característica de retenção de água no solo para a área vizinha adjacente ao experimento, [Ten. (UV)], em comparação com a curva de ajuste dos de tensão matricial com umidades do método padrão da estufa ([Est. (UV)]). Enquanto o expoente da regressão gerada para as dados corrigidos se aproxima da unidade (sendo negativa) o da curva pré-definida se aproxima de zero. Isso significa que, cada acréscimo de tensão na primeira situação gera redução de praticamente inversa proporcionalidade na umidade do solo, na segunda a redução é praticamente nula (ocorrência que diverge totalmente da tendência dos demais modelos). O motivo de tamanha incoerência pode está relacionado a forma como a curva de retenção foi gerada para os dados que compuseram a Figura 1; Antinoro et al. (2014) comentam que as curvas características de retenção de água no solo geradas pelas câmaras de pressão de Richards podem não representar as condições de campo, especialmente que as amostras forem deformadas (e esse foi o processo realizado para geração da curva representada na Figura 1).

As incoerências dos dados de umidade da tensiometria a partir da regressão da Figura 1, com os demais métodos foi o motivo de não considerá-los na análise de variância. Apesar dos resultados virem a revelar o distanciamento deste como o método padrão da estufa, o uso deles na análise comprometeria as demais constatações (aumentaria o grau de liberdade dos resíduos e geraria decréscimos nos valores dos f calculados, teste f , e nas diferenças mínimas significativas para o teste de Tukey). Analisando-os separadamente, foi possível apresentar o problema constatado sem reduzir a confiabilidade das análises dos demais métodos.

Ademais trabalhos como os realizados por Franco (2015), análise de tensiômetros de diversos formatos e tipo de medidor (tensímetro digital e coluna de mercúrio), e Abreu (2019), calibração e uso de tensiômetros para manejo da irrigação de pimenta “biquinho”, corroboram com a estratégia adotada neste trabalho ao gerar a curva ajustada da Figura 4 para viabilizar o uso do equipamento. Em ambos os trabalhos a geração das curvas características de água no solo foram obtidas a partir de umidades da estufa e não da mesa de tensão.

Conclusões

Para uso de dados não ajustados o método da TDR foi a que gerou dados mais aproximados ao do método padrão da estufa. Já com ajustes todos os métodos apresentaram resultados similares.

A tensiometria pode ser uma solução eficaz para determinação da umidade do solo se a curva de retenção for gerada diretamente no local de uso e correlacionada ao método padrão da estufa.

Referências

- ABREU, G. T. **Calibração de sensores capacitivos e tensiômetros em diferentes tipos de substratos e viabilidade do uso em manejo de irrigação de plantas ornamentais**. Alegrete, 53 p. (Trabalho de Conclusão de Curso em Engenharia Agrícola) Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia Farroupilha, 2019.
- ANA. Agência Nacional de Águas. **Outorga e fiscalização**. Disponível em:< <https://www.ana.gov.br>>, acesso em 09 de Set. 2019.
- ANTINORO, C.; BAGARELLO, V.; FERRO, V.; GIORDANO, G. & IOVINO, M. A simplified approach to estimate water retention for Sicilian soils by the Arya-Paris model. **Geoderma Amsterdam**, 213:226-234, 2014.

- BATISTA, L. S.; COELHO, E. F.; CARVALHO, F. A. P.; SILVA, M. G.; GOMES FILHO, R. R. & GONÇALVES, A. A. Calibração de sonda artesanal de uso com TDR para avaliação de umidade de solos. **Revista Brasileira de Agricultura Irrigada**, 10:522-532, 2016.
- BERNARDO, S., SOARES, A. A., & MANTOVANI, E. C. **Manual de irrigação**. Editora UFV, Viçosa, 8.ed., 625p, 2006.
- BIZARI, D. R.; MATSURA, E. E.; SOUZA, C. F. & ROQUE, M. W. Haste portátil para utilização de sonda de TDR em ensaios de Campo. **Irriga**, 16:31-41, 2011.
- BRAGA, M. B.; GUEDES, I. M. R.; SILVA, J. & LIMA, C. E. P. **Determinação Simplificada da Umidade do Solo Visando o Manejo de Irrigação em Hortaliças**. Brasília: Embrapa Hortaliças, 2018, 20p. (Boletim de pesquisa e desenvolvimento, 155).
- BUSKE, T. C.; ROBINA, A. D.; PEITER, M. X.; ROSSO, R. B.; TORRES, R. R. & NUNES, M. S. Avaliação do desempenho do método das pesagens para a determinação da umidade do solo. **Revista Brasileira de Agricultura Irrigada**, 7:340-348, 2013.
- EMBRAPA – Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. **Manual de métodos de análise de solos**. Rio de Janeiro, 2.ed. , 212p.,1997.
- FALKER. **Hidrofarm – Medidor eletrônico de umidade do solo**. Disponível em <<http://www.falker.com.br/Produto.php?id=28>> Acesso em: 18 de mai. de 2019.
- FERREIRA, D. F. Sisvar, a Guide for its Bootstrap procedures in multiple comparisons. **Ciência e Agrotecnologia**, 38:109-112, 2014.
- FERREIRA, D. F. Sisvar: a computer statistical analysis system. **Ciência e Agrotecnologia**, 35:1039-1042, 2011.
- FRANCO, H. H. S. **Abordagem metodológica envolvendo tensiometria e determinação da curva de retenção de água num solo de textura média**. Piracicaba, 55 p. (Dissertação de mestrado em ciências) Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, 2015.
- GAVA, R.; SILVA, E. E. & BAILO, F. H. R. Calibração de sensor eletrônico de umidade em diferentes texturas de solo, **Brazilian Journal of Biosystems Engineering**, Campus de Chapadão do Sul, MS, 10: 154-162 2016.
- IBGE. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. Censo Agropecuário 2017. Rio de Janeiro, 7:1-108, 2017.
- KLAR, A. E. et al. Determinação da umidade do solo pelo método das pesagens. Anais da Escola Superior de Agricultura Luís de Queiroz, Piracicaba, 23: 15-30, 1966.
- KLEIN, V. A. **Física do Solo** – Passo Fundo, Ed. Universidade de Passo Fundo, 3: 212, 2008.
- NETTO, A. O. A.; & BASTOS, E. A. **Princípios agrônômicos da irrigação**. Embrapa Meio-Norte, Brasília, 1.ed., 262 p, 2013
- NÓIA, R.S.J. et al. Calibração de sonda tdr para a estimativa da umidade em diferentes tipos de substratos. **Revista Brasileira de Agricultura Irrigada**, Fortaleza-CE, 11: 2132 - 2140, 2017.
- NUNES, M. S., ROBAINA, A. D.; PEITER, M. X.; BRAGA, F. V. A. & BRAGAGNOLO, J. Uso do TDR 300 na determinação da umidade volumétrica do solo para manejo da irrigação da soja safrinha. **Revista de Agricultura**, 90: 250 – 255, 2015.
- RABELLO, L.M. Condutividade elétrica do solo, tópicos e equipamentos. Embrapa Instrumentação Agropecuária, (Embrapa Instrumentação Agropecuária. Documentos) São Carlos, 19 p, 2009.
- RAMOS, P. F. & FERREIRA, D.F. Agrupamento de médias via Bootstrap de populações normais e não normais. **Revista Ceres**, 56:140-149, 2009.
- SANTOS, R. M. et al. Montagem e acurácia de um sistema experimental de pesagem para calibração de sensores de umidade de solo. **Ciência e agrotecnologia**, Lavras, 30: 1162-1169,2006.
- SANTOS, R. M.; ZONTA J.H. & MARTINEZ M. A. Influência do tipo de amostragem na constante dielétrica do solo e na calibração de sondas de TDR. **Revista Brasileira de ciência do solo**, 34:299-307, 2010.
- TEIXEIRA, P. C.; DONAGEMMA, G. K.; FONTANA, A. & TEIXEIRA, W. G. **Manual de métodos de análise de solo**. Editora Embrapa, Brasília, 3.ed. 574p, 2017.

Apêndice

As Tabelas (1A, 2A e 3A) bem como as Figuras (1A, 2A e 3A) foram inseridas neste trabalho para melhor compreensão dos artifícios estatísticos e gráficos empregados para uso dos dados tensiométricos.

Tabela 1A - Dados brutos e ajustados estatisticamente, para tensão matricial do solo (Ψ_m).

Ψ_m (kPa)	Dados brutos							Dados ajustados								
	Blocos	07.07	09.07	11.07	13.07	16.07	18.07	20.07	07.07	09.07	11.07	13.07	16.07	18.07	20.07	
B1		6,50	8,60	10,56	11,01	13,11	14,50	16,01	6,50	8,60	10,56	11,01	13,11	14,50	16,01	
B2		7,35	8,21	12,13	12,57	15,78	21,65	27,12	7,35	8,21	12,13	12,57	15,78	21,65	27,12	
B3		6,06	7,88	8,68	11,85	12,38	15,19	17,15	6,06	7,88	8,68	11,85	12,38	15,19	17,15	
B4			7,79	7,00	9,17	11,10	11,95	12,20	19,78	7,79	7,81	9,17	11,10	11,95	12,20	19,78
B5		7,06	8,48	10,22	11,00	12,24	13,08	20,80	7,06	8,48	10,22	11,00	12,24	13,08	20,80	
B6		7,20	8,10	9,84	10,96	13,39	14,20	23,50	7,20	8,10	9,84	10,96	13,39	14,20	23,50	
B7		6,45	6,86	9,04	10,93	11,96	12,66	13,74	6,45	6,86	9,04	10,93	11,96	12,66	13,74	
B8		4,87	6,63	9,56	11,39	12,00	13,63	17,68	4,87	6,63	9,56	11,39	12,00	13,63	17,68	
B9			6,24	7,57	8,45	9,30	9,91	10,14	5,48	6,63	7,57	8,45	9,30	9,91	10,14	
Média		6,66	7,56	9,64	11,03	12,46	14,11	18,44	6,53	7,69	9,64	11,03	12,46	14,11	18,44	

Nota: Fórmulas estatísticas usadas para ajustes de um (X') e dois (X e Y) dados faltantes: $X' = IT + JB - G / [(I-1) * (J-1)]$; $X = [(I-1) * (JB + ITx - G) + (JB + ITy - G)] / [(J-1) * [(I-1)^2 - 1]]$; $Y = [(I-1) * (JB + ITy - G) + (JB + ITx - G)] / [(J-1) * [(I-1)^2 - 1]]$; Onde: I - n° de tratamentos; J - n° blocos; T - somatório do tratamento com parcela perdida; B - somatório dos blocos com parcela perdida; G - somatório de todos os tratamentos e blocos; Tx - somatório do tratamento x; Ty - somatório do tratamento y; x e y - dados faltantes num mesmo bloco. Fonte: Zimmermann (2014)⁵ pg. 75-76.

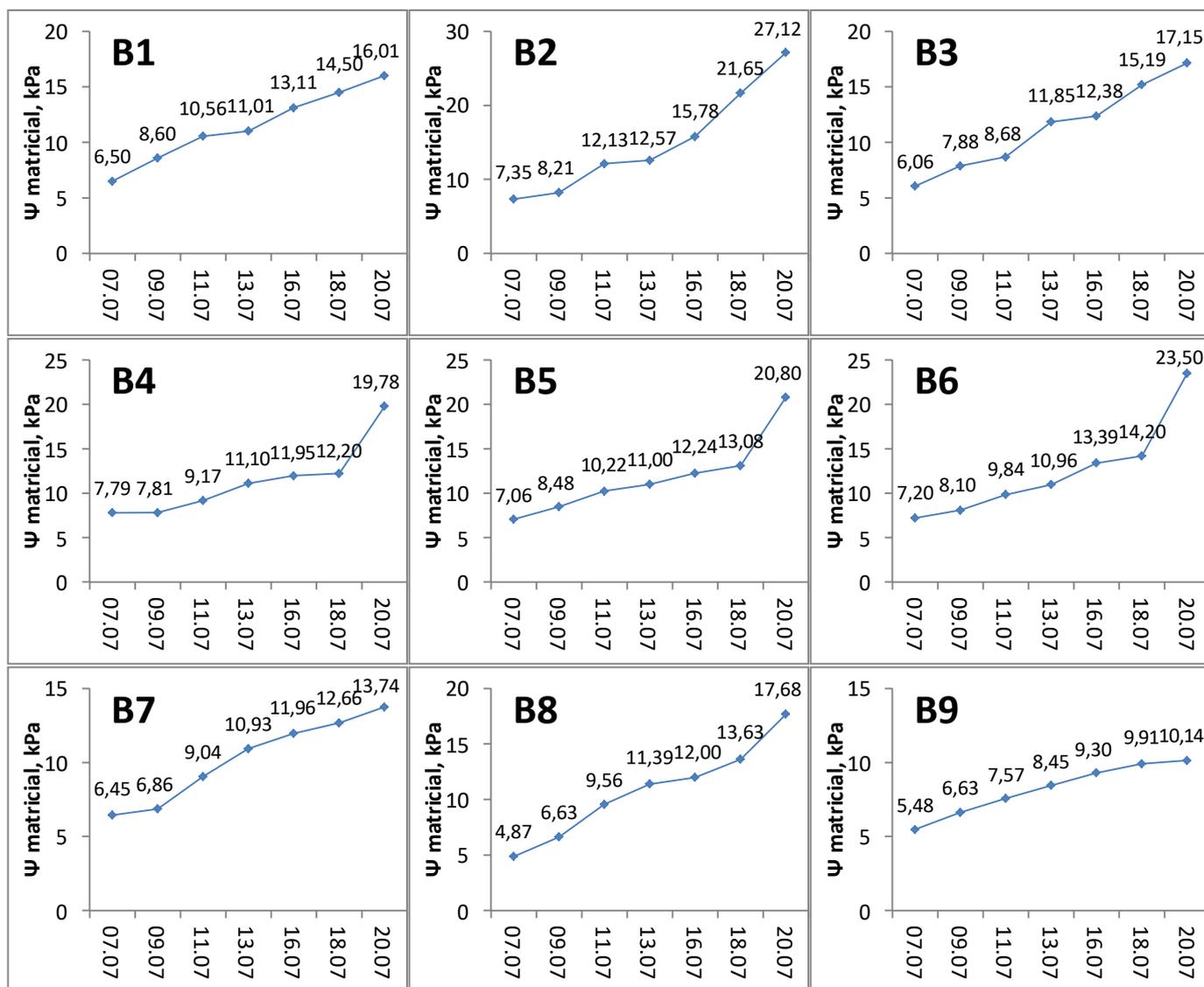


Figura 1A - Representação gráfica da evolução temporal da tensão matricial de água no solo registrada pelos tensiômetros. Dados ajustados apresentados na Tabela 1A.

⁵ ZIMMERMANN, F. J. P. *Estatística aplicada à pesquisa agrícola*. 2 Ed. Rev. Ampl. Brasília: Embrapa, 582p. 2014.

Tabela 2A - Dados da tensiometria (Ψ_m e Tens.) e da estufa (Estu.) usados para geração de curvas de ajuste da umidade do solo. Onde U_v representa umidade volumétrica.

Ψ_m (kPa)	6,53	7,69	9,64	11,03	12,46	14,11	18,44
Tens. (U_v , %)	15,03	14,87	14,47	14,24	14,06	13,88	13,49
Estu. (U_v , %)	18,16	14,81	13,41	10,36	8,90	7,87	7,00

Tabela 3A – Umidades volumétricas (U_v) do solo para as curvas características de retenção da Figura 1A.

U_v (%)	Para curva pré-definida [Ten. (UV)] – Figura 1A.								Para curva da estufa [Est. (UV)] – Figura 1A.					
	Blocos	07.07	09.07	11.07	13.07	16.07	18.07	20.07	07.07	09.07	11.07	13.07	16.07	18.07
B1	15,08	14,63	14,32	14,25	13,99	13,84	13,69	17,87	13,61	11,15	10,70	9,03	8,19	7,44
B2	14,88	14,71	14,11	14,05	13,71	13,26	12,94	15,86	14,24	9,75	9,41	7,55	5,55	4,46
B3	15,19	14,77	14,62	14,14	14,08	13,77	13,59	19,13	14,82	13,49	9,97	9,56	7,83	6,96
B4	14,79	14,79	14,53	14,24	14,13	14,10	13,39	14,99	14,95	12,79	10,62	9,89	9,69	6,06
B5	14,95	14,66	14,37	14,25	14,09	13,99	13,31	16,48	13,79	11,51	10,71	9,66	9,05	5,77
B6	14,91	14,73	14,43	14,26	13,96	13,87	13,14	16,17	14,43	11,94	10,75	8,85	8,36	5,12
B7	15,09	14,99	14,56	14,26	14,13	14,04	13,92	18,00	16,95	12,96	10,79	9,88	9,34	8,63
B8	15,55	15,05	14,47	14,20	14,12	13,93	13,55	23,67	17,53	12,28	10,36	9,85	8,70	6,76
B9	15,36	15,05	14,84	14,66	14,51	14,41	14,38	21,09	17,53	15,41	13,85	12,62	11,86	11,60
Média	15,09	14,82	14,47	14,26	14,08	13,91	13,55	18,14	15,32	12,36	10,80	9,65	8,73	6,98
Máximo	15,55	Mínimo		12,94				Máximo	23,67	Mínimo		4,46		

Nota: foram usadas tensões matriciais ajustadas (Tabela 1A).

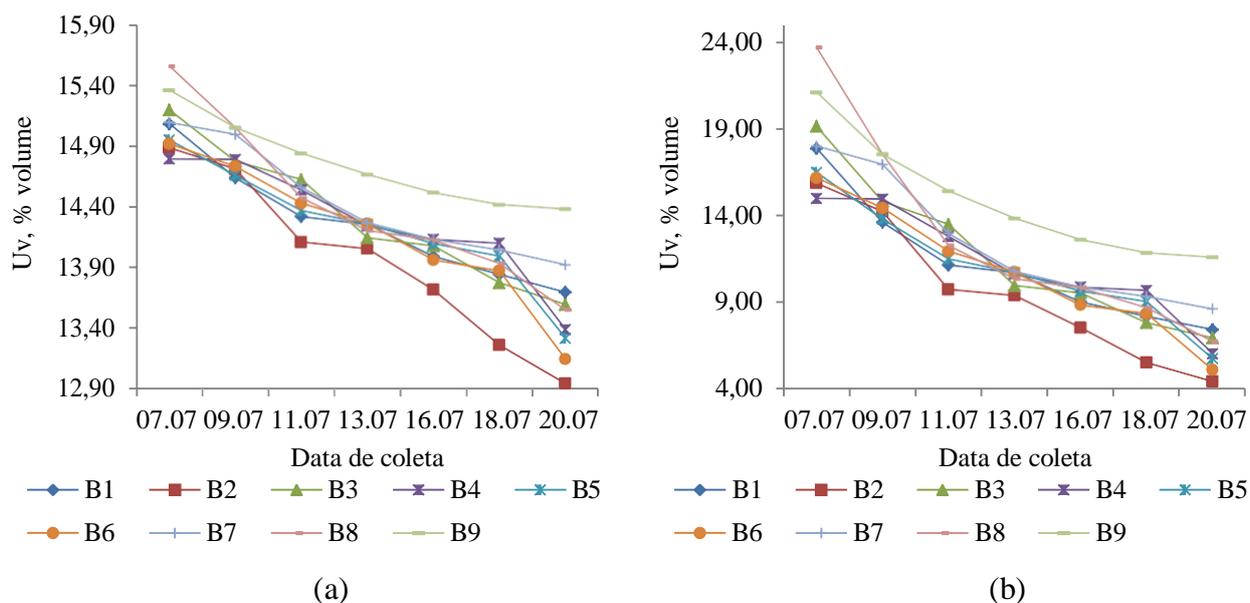


Figura 2A – Umidade volumétrica do solo para os dados da Tabela 3A. Onde foram usados dados da curva de retenção pré-definida para área adjacente ao experimento (a) e para condição de umidade da estufa (b).