

Revista
Ciência, Tecnologia & Ambiente

Calibração de sensores capacitivos para a estimativa da umidade do solo

Capacitive sensors calibration for soil moisture estimation

Saulo Manoel da Silva¹, Juliana Gilbert Pessoa¹, Claudinei Fonseca Souza^{1*}

¹ Departamento de Recursos Naturais e Proteção Ambiental, Universidade Federal de São Carlos – UFSCar, Araras, SP, Brasil. *Autor para correspondência: cfsouza@ufscar.br

Como citar: SILVA, S.M.; PESSOA, J.G.; SOUZA, C.F., 2022. Calibração de sensores capacitivos para a estimativa da umidade do solo. *Revista Ciência, Tecnologia e Ambiente*, vol. 12, e12217. <https://doi.org/10.4322/2359-6643.12217>.

RESUMO

Cada solo possui suas próprias características físicas, que estão relacionadas a seus processos de formação, características estas que estão intimamente relacionadas com sua retenção hídrica. Os sensores capacitivos são capazes de disponibilizar informações importantes para prosseguir com o manejo de culturas agrícolas, além da umidade também pode se ter uma estimativa sobre a fertilidade do solo. Esses sensores podem ser conectados via Bluetooth a um smartphone facilitando a obtenção das estimativas, entretanto, a calibração do sensor é operação importante para garantir o manejo adequado da fertirrigação. Objetivou-se avaliar e calibrar dois sensores de capacitância comerciais com base no método padrão (gravimétrico) e sondas de TDR. Realizou-se a validação das estimativas da variação da umidade do solo (Latosolo Vermelho Distroférrico). Baldes de 8 L foram preenchidos com amostras do solo e saturados com água. As amostras de solo foram submetidas ao secamento natural do ar e a variação da umidade foi estimada pelos diferentes sensores, juntamente com a massa para obtenção dos valores gravimétricos. Os sensores capacitivos superestimaram os outros métodos (TDR e Gravimétrico) para a estimativa da água no solo, porém, apresentaram uma forte correlação. Com isso, pode-se concluir que os sensores de capacitância se apresentam confiáveis para a realização das estimativas da umidade do solo, devendo-se apenas se atentar a necessidade de calibração.

Palavras-chave: eficiência no uso da água, TDR, irrigação.

ABSTRACT

Each soil has its own physical characteristics, which are related to its formation processes and closely related to its water retention. Capacitive sensors can provide important information to proceed with the management of crops; in addition to moisture, one can also estimate soil fertility. These sensors can be connected via Bluetooth to a smartphone, making it easier to obtain estimates. However, sensor calibration is essential to ensure proper management of fertigation. The objective was to evaluate and calibrate two commercial capacitance sensors based on the standard method (gravimetric) and TDR probes. The estimates of soil moisture variation were validated (Distroferric Red Latosol). 8 L buckets were filled with soil samples and saturated with water. Soil samples were subjected to natural air drying, and the different sensors and the mass estimated the moisture variation to obtain the gravimetric values. Capacitive sensors overestimated the other methods (TDR and Gravimetric) for soil water estimation; however, they showed a strong correlation. With this, it can be concluded that the capacitance sensors are reliable for carrying out soil moisture estimates. Therefore, one should only pay attention to the need for calibration.

Keywords: water use efficiency, TDR, irrigation.



INTRODUÇÃO

Usar a água de forma consciente e sustentável é essencial para se obter sucesso na produção agropecuária, assim como, é fundamental garantir o acesso a água para as futuras gerações. O crescimento da população mundial impacta no aumento da necessidade de produzir alimentos, sendo importante inserir novas tecnologias que permitam a produção de alimentos de modo sustentável na utilização dos recursos hídricos (Urbano et al., 2017).

Conhecer movimento da água e suas formas de armazenamento no solo se torna essencial quando se busca otimizar a produção e amenizar sua percolação e lixiviação, garantindo assim sustentabilidade do sistema produtivo (Souza et al., 2013).

Determinar os teores de água em campo é importante em diferentes situações na agricultura, sendo fundamental para definir momentos de manejo, como operações mecanizadas e controle da irrigação (Kaiser et al., 2010).

Diversas técnicas podem ser utilizadas para o monitoramento da água no solo, cada método escolhido irá apresentar vantagens e desvantagens, porém todos devem apresentar resultados confiáveis. Esses podem ser separados em métodos diretos ou indiretos. Entre os métodos diretos a gravimetria, é considerada um método padrão por ser simples, prático e preciso, porém, destrutivo e demorado. Os indiretos, possuem respostas rápidas e geralmente necessitam de algum tipo de calibração dos equipamentos utilizados (Santos et al., 2006; Silva et al., 2020).

Técnicas eletromagnéticas são consideradas métodos indiretos de rápida resposta, que funciona com base na emissão de ondas eletromagnéticas e sua propagação pelo solo. Os resultados desse método são obtidos pelo tempo que estas ondas levam para se dispersar no solo, este tempo pode ser rápido ou lento dependendo da permissibilidade do meio (Souza et al., 2016; Silva et al., 2020).

Existem duas vertentes para a utilização de técnicas eletromagnéticas para a aferição da umidade do solo no que diz respeito à frequência de operação do equipamento. Na primeira, a frequência de operação flutua entre valores inferiores a 0,1 GHz, capacitância, também chamada de Reflectometria no Domínio da Frequência (FDR); a segunda opera na frequência aproximada de 1,2 GHz, as

chamadas Reflectometria no Domínio do Tempo (TDR) (Souza et al., 2016).

Frequência reduzida proporciona custo menor, o qual permite melhores condições para aquisição da capacitância quando comparada a TDR. Acredita-se, também, que a uso não está consolidado entre os agricultores e pesquisadores, devido à ausência de informações que descrevem suas limitações, principalmente no que tange a necessidade de uma calibração para cada tipo de solo (Souza et al., 2013; Silva et al., 2020).

O desenvolvimento de ferramentas tecnológicas computacionais, convergiu no aprimoramento dos sensores, os tornando mais simples, eficientes e com grande facilidade de conexão e armazenamento de dados, possibilitando a automação do manejo da irrigação. Entretanto, o conhecimento das vantagens e desvantagens pode ser um aliado na utilização correta da técnica, principalmente como limitante para suprir adequadamente a tomada de decisões dentro das condições de incertezas (Leão et al., 2007).

A principal desvantagem é a necessidade de calibração para os diferentes solos tropicais pois, a presença de teores elevados de argila, óxido de ferro e matéria orgânica podem interferir diretamente nas medidas. Dificilmente uma equação que representa uma calibração específica para um tipo de solo poderá ser utilizada com precisão para outro tipo de solo (Souza et al., 2013).

No balanço entre as vantagens e desvantagens para utilização das técnicas eletromagnéticas, a calibração é uma desvantagem de fácil superação para a obtenção de estimativas precisas e rápidas da umidade do solo visando o manejo da agricultura irrigada. Este trabalho teve o objetivo de avaliar e calibrar dois sensores comerciais, Power Flower (Parrot S.A., Paris, França) e Flower Care (Beijing HuaHuaCaoCao Technology – Eco System Mi, Pequim, China) com base no método padrão (gravimétrico) e sondas de TDR.

MATERIAL E MÉTODOS

O estudo foi conduzido no Laboratório de Física do Solo e Qualidade da Água do Centro de Ciências Agrárias da Universidade Federal de São Carlos, localizado no município de Araras-SP. As coordenadas geográficas locais

são: 22°18' de latitude sul e 47°23' de longitude oeste. A altitude média da área é de aproximadamente 700 m.

O solo utilizado no experimento foi um Latossolo vermelho, distrófico, de textura argilosa. Nos primeiros 60 cm, apresenta uma composição textural média de 54% de argila, 31% de silte e 15% de areia. Para a mesma profundidade, as médias da densidade do solo e das partículas são, respectivamente, 1,30 e 2,65 g cm⁻³. A porosidade do solo é de 51%.

O experimento foi instalado em 3 baldes (Figura 1), cujas dimensões eram de 0,24 m de diâmetro e 0,18 m de altura, com volume unitário de 8 dm³. Os vasos foram preenchidos primeiramente com 1,5 kg de pedra tipo brita, uma manta geotêxtil para evitar a perda de solo pela drenagem e, por fim, 8 kg de TFSE (terra fina seca em estufa) passados em peneira de 2 mm até o solo atingir 20 mm da borda. Foi feito um dreno na lateral inferior do balde para permitir a saída do excesso de água do solo depois de saturado.

Os sensores utilizados foram, Parrot Flower Power® e Flower Care® (Figura 2), ambos com tamanho de haste igual a 0,15 m. Os sensores possuem *Bluetooth*, a qual é o nome de uma tecnologia de comunicação sem fios (*wireless*) que interliga e permite a transmissão dos dados de umidade do solo para um Smartphone através de ondas de rádio.

Além disso, uma sonda de TDR (Reflectometria no Domínio do Tempo) foi instalada ao redor dos sensores de capacitância, a 0,05 m de distância, para a comparação entre os métodos de estimativa da umidade do solo. Estas sondas foram ligadas ao aparelho TDR-100 da Campbell Scientific acoplados a um coletor de dados para realização das leituras diárias. A equação de

calibração utilizada no equipamento foi a descrita por Mendonça et al. (2019).

$$\theta = 0,000005Ka^3 - 0,0003Ka^2 + 0,0161Ka + 0,0132 \quad (1)$$

Em que,

θ - umidade do solo, m³ m⁻³;

Ka - constante dielétrica, adimensional.

Para determinação da variação da umidade do solo pelo método gravimétrico, os baldes foram pesados em balanças (capacidade máxima de 50 kg, mínima de 250 g e precisão de 10 g).

O experimento iniciou-se com a aplicação de 4,5 L de água em cada vaso para saturação do solo, utilizando como aplicador um chuveirinho adaptado a uma garrafa plástica de 2 L. Após a saturação do solo, foram abertos os drenos em cada vaso para possibilitar a drenagem. As medições iniciaram-se em 30 de Maio de 2019, as avaliações de variação de massa (método gravimétrico), umidade (Capacitância) e constante dielétrica aparente (TDR) do solo ocorreram duas vezes ao dia nos primeiros 2 dias do experimento e, posteriormente, aumentou-se o intervalo para 5 dias.

A finalização das medidas ocorreu em 19 de setembro de 2019 devido à não ocorrência de variação na umidade do solo. As estimativas obtidas foram comparadas com o método padrão (gravimétrico), utilizando diagrama de dispersão e coeficiente de correlação. O erro médio foi calculado através da equação:

$$\text{erro médio} = \pm \sqrt{\frac{\sum(\text{ajustado}_i - \text{medido}_i)^2}{n}} \quad (2)$$

Em que:

N – número total de valores observados.



Figura 1. Baldes utilizados na calibração dos sensores de capacitância.



Figura 2. Sensores de capacitância Parrot Flower Power® (A) e Flower Care® (B).

Fonte: Parrot Drone SAS. (2022) e Xiaomi (2022).

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Entre os métodos analisados, a variação da umidade do solo estimadas pela capacitância apresentaram um comportamento similar, enquanto, o método gravimétrico e a TDR apresentaram paridade nos resultados observados para o período (Figura 3).

Observa-se que os sensores de capacitância superestimaram os resultados encontrados pelo método gravimétrico e o TDR, sendo um indicativo para a necessidade de uma calibração.

A Figura 4 apresenta a correlação para o sensor Flower Care e o método gravimétrico, pode-se analisar que os métodos apresentaram uma correlação forte, entretanto, o sensor em análise superestimou o método gravimétrico em 14%, que pode ser um valor prejudicial quando se necessita de manejos de irrigação precisos, buscando trabalhar com o limite do armazenamento de água do solo.

O sensor Flower Power, também, apresentou uma correlação forte com o método gravimétrico, $R^2 = 0,9$ e, uma superestimativa de 7,7%, Figura 5. O resultado é melhor que o demonstrado pelo sensor Flower Care, mas não apresenta diferença significativa ($\alpha = 0,05$) no teste de média entre os dados estimados pelo método de capacitância, $valor-p = 0,72$.

Segundo Silva et al. (2012), variações dos resultados para os sensores de capacitância em relação ao modelo gravimétrico podem ter ocorrido por conta dos altos teores de óxido de ferro e aos elevados níveis de intemperismo destes solos, que podem afetar a constante dielétrica, consequentemente afetando a umidade do solo estimada.

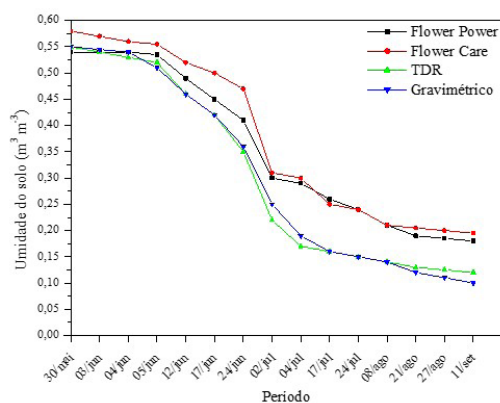


Figura 3. Variação média da umidade do solo medida por gravimetria e estimadas pela TDR e por sensores de capacitância (Parrot Flower Power® e Flower Care®).

Com base nesses resultados, pode-se observar que esses sensores capacitivos são viáveis para a quantificação da umidade do solo, podendo ser úteis quando se busca conservação do solo e água.

Segundo Mizuguchi et al. (2015) as estruturas dos solos brasileiros apresentam grandes diferenças entre si, que ocorrem principalmente com base no seu material de origem. Com isto, estes sensores necessitam ser calibrados para cada tipo de solo que serão utilizados, e que quando feito de maneira correta tornam-se muito úteis por conta de sua rapidez e fluidez no fornecimento de dados (Ritter e Regalado, 2007).

Nas Figura 4 e 5 são apresentadas duas equações de calibração para os sensores de capacitância testados, Equação 1 – Regressão linear e Equação 2 – Polinômio de terceiro grau. Adotou-se o modelo polinomial cúbico, pois encontrou-se, na literatura, que o mesmo se mostra superior a todos os outros, apresentando os maiores valores de coeficiente de correlação para solos com textura fina.

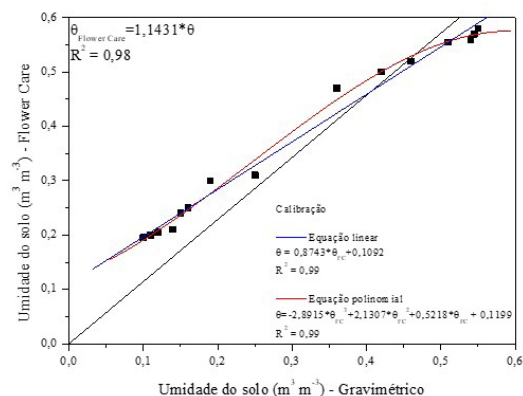


Figura 4. Correlação entre as médias da umidade do solo (gravimetria) e umidade do solo (Flower Care).

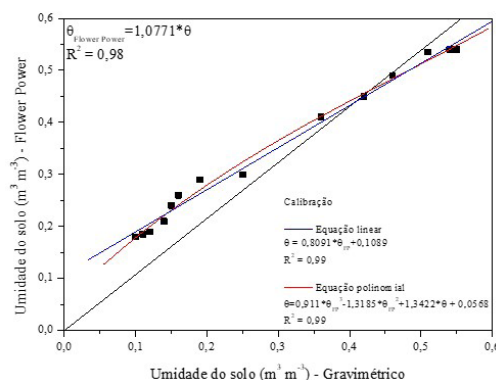


Figura 5. Correlação entre umidade do solo (gravimetria) e umidade do solo (Flower Power).

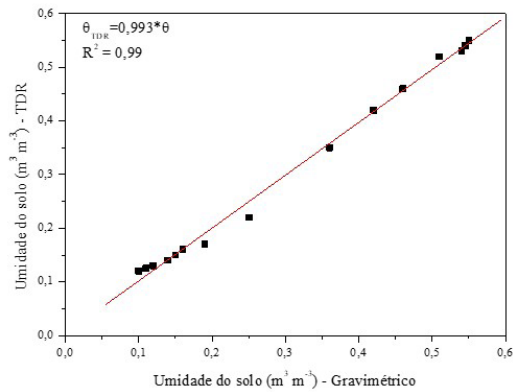


Figura 6. Comparação entre a umidade do solo medida pelo método gravimétrico e a estimada pela TDR para o Latossolo vermelho, distrófico, de textura argilosa.

Tommaselli e Bacchi (2001) constataram que o termo cúbico da umidade do solo deixa de ser importante, à medida que a textura do solo se torna mais grosseira.

Entretanto, a simplificação apresentada pela equação linear aliada a forte correlação, $R^2 = 0,99$, sugere que o modelo cúbico para esse estudo não demonstra vantagens em sua utilização. Assim, pôde-se concluir que as equações de calibração linear poderiam ser utilizadas para a condição de estudo, erro médio de $\pm 0,06$.

A Figura 6 apresenta-se uma correlação entre os métodos gravimétrico e a TDR, a qual confirma que a TDR, desde que calibrada para o solo em estudo, pode substituir o método padrão (gravimétrico) dentro da metodologia de calibração de sensores de umidade do solo.

CONCLUSÕES

Com base nesse estudo, pode-se concluir que os sensores de capacitância se apresentam confiáveis para a realização de estimativas da umidade do solo, apresentando correlações com métodos tradicionais, como o modelo padrão (gravimétrico) e até mesmo a TDR, devendo apenas se atentar a necessidade de calibração para evitar superestimativas dos valores obtidos.

REFERÊNCIAS

KAISER, D.R., REINERT, D.J., REICHERT, J.M. & MINELLA, J.P.G., 2010. Dielectric constant obtained from TDR and volumetric moisture of soils in southern Brazil. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, vol. 34, no. 3, pp. 649-658. <http://dx.doi.org/10.1590/S0100-06832010000300006>.

LEÃO, R.A.O., TEIXEIRA, A.S., CANAFÍSTULA, F.J.F., MESQUITA, P.E.G. & COELHO, S.L., 2007. Desenvolvimento de um dispositivo eletrônico para calibração de sensores de umidade do solo. *Engenharia Agrícola*, vol. 27, no. 1, pp. 294-303. <http://dx.doi.org/10.1590/S0100-69162007000100024>.

MENDONÇA, T.G., BERÇA, A.S. & SOUZA, C.F., 2019. Uso da água em tomateiro cultivado com cobertura morta em casa de vegetação. *Revista Brasileira de Agricultura Irrigada*, vol. 13, no. 1, pp. 3236-3246. <http://dx.doi.org/10.7127/RBAI.V13N1001008>.

MIZUGUCHI, J., PIAI, J.C., FRANÇA, J.A., FRANÇA, M.B.M., YAMASHITA, K. & MATHIAS, L.C., 2015. Fringing field capacitive sensor for measuring soil water content: design, manufacture, and testing. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, vol. 64, no. 1, pp. 212-220. <http://dx.doi.org/10.1109/TIM.2014.2335911>.

PARROT DRONE SAS [online], 2022 [acesso em 3 maio 2022]. Disponível em: www.parrot.com

RITTER, A. & REGALADO, C.M., 2007. Eficacia de un sensor de capacitancia para medir simultáneamente salinidad y contenido hídrico. In: *Jornadas de Investigación en la Zona no Saturada del Suelo*, 2007. Córdoba: Universidad de Córdoba, pp. 145-151.

SANTOS, R.M., OLIVEIRA, A.S., VELLAME, L.M. & BRANDÃO, F.J.C., 2006. Montagem e acurácia de um sistema experimental de pesagem para calibração de sensores de umidade do solo. *Ciência e Agrotecnologia*, vol. 30, no. 6, pp. 1162-1169. <http://dx.doi.org/10.1590/S1413-70542006000600019>.

SILVA, A.O., SILVA, B.A., SOUZA, C.F., AZEVEDO, B.M., BASSOI, L.H., VASCONCELOS, D.V., BONFIM, G.V., JUAREZ, J.M., SANTOS, A.F. & CARNEIRO, F.M., 2020. Irrigation in the age of agriculture 4.0: management, monitoring and precision. *Revista Ciência Agronômica*, vol. 51, e20207695. <http://dx.doi.org/10.5935/1806-6690.20200090>.

SILVA, B.M., OLIVEIRA, G.C., SERAFIM, M.E., SILVA JÚNIOR, J.J., COLOMBO, A. & LIMA, J.M., 2012. Acurácia e calibração de sonda de capacitância em Latossolo Vermelho cultivado com cafeeiro. *Pesquisa*

Agropecuária Brasileira, vol. 47, no. 2, pp. 277-286.
<http://dx.doi.org/10.1590/S0100-204X2012000200017>.

SOUZA, C.F., PIRES, R.C.M., MIRANDA, D.B. & VARALLO, A.C.T., 2013. Calibração de sonda FDR e TDR para a estimativa da umidade em dois tipos de solo. *Irriga*, vol. 18, no. 4, pp. 597-606. <http://dx.doi.org/10.15809/irriga.2013v18n4p597>.

SOUZA, C.F., SILVA, C.R., ANDRADE JUNIOR, A.S. & COELHO, E.F., 2016. Monitoramento do teor de água no solo em tempo real com as técnicas de TDR e FDR. *Irriga*, vol. 1, no. 1, pp. 26-42. <http://dx.doi.org/10.15809/irriga.2016v1n01p26-42>.

TOMMASELLI, J.T.G. & BACCHI, O.O.S., 2001. Calibração de um equipamento de TDR para medida da umidade de solos. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, vol. 36, no. 9, pp. 1145-1154. <http://dx.doi.org/10.1590/S0100-204X2001000900008>.

URBANO, V.R., MENDONÇA, T.G., BASTOS, R.G. & SOUZA, C.F., 2017. Effects of treated wastewater irrigation on soil properties and lettuce yield. *Agricultural Water Management*, vol. 181, pp. 108-115. <http://dx.doi.org/10.1016/j.agwat.2016.12.001>.

XIAOMI [online], 2022 [acesso em 3 maio 2022]. Disponível em: www.xiaomi-mi.com