

CALIBRAÇÃO DE SENSOR PARA MONITORAMENTO DA UMIDADE DO SOLO

**EVERTON ALENCAR PATRICIO¹; ANA ALICE CARDOSO CARNEIRO¹;
CARLOS ALMI NOGUEIRA GOMES¹; ANA CÉLIA MAIA MEIRELES²; CARLOS
WAGNER OLIVEIRA² E SIRLEIDE MARIA DE MENEZES³.**

1 Centro de Ciências Agrárias e da Biodiversidade (CCAB), Universidade Federal do Cariri (UFCA), Rua Ícaro de Sousa Moreira, n.126, Muriti, CEP: 63130-025, Crato, Ceará, Brasil, everton.alencar@aluno.ufca.edu.br, <https://orcid.org/0009-0001-8625-9739>, ana.carneiro@aluno.ufca.edu.br, <https://orcid.org/0009-0008-0964-9873>, carlos.nogueira@aluno.ufca.edu.br, <https://orcid.org/0009-0003-4709-0859>.

2 Centro de Ciências Agrárias e da Biodiversidade (CCAB), Universidade Federal do Cariri (UFCA), Rua Ícaro de Sousa Moreira, n.126, Muriti, CEP: 63130-025, Crato, Ceará, Brasil. ana.meireles@ufca.edu.br, <https://orcid.org/0000-0002-8860-2043>, carlos.oliveira@ufca.edu.br, <https://orcid.org/0000-0003-1013-297>,

3 Pós-Graduação em Desenvolvimento Regional Sustentável (PRODER), Universidade Federal do Cariri (UFCA), Rua Ícaro de Sousa Moreira, n.126, Muriti, CEP: 63130-02, Crato, Ceará, Brasil, sirleidemeneses@hotmail.com, <https://orcid.org/0000-0003-1225-5572>.

1 RESUMO

Conhecer a umidade atual do solo de forma precisa é fundamental para um manejo eficiente de irrigação, visando a racionalização dos recursos hídricos fundamentado na sustentabilidade e na rentabilidade dos cultivos irrigados. Dessa forma, o objetivo deste trabalho foi calibrar o sensor modelo YL-69 e propor uma equação de calibração para o Argissolo Vermelho-Amarelo Distrófico na região do Cariri Cearense. O experimento foi conduzido em casa de vegetação na Universidade Federal do Cariri. O solo em questão foi locado em quatro vasos de 5 L, que teve a umidade monitorada diariamente da saturação até a secagem ao ar. A calibração foi avaliada por meio do emprego de índices estatísticos. A equação de calibração apresentou R^2 de 0,99 e erro quadrático médio (RMSE) de $0,03 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$. Concluiu-se, que a calibração do sensor YL-69 apresenta precisão das leituras de umidade volumétrica do solo, porém, não sedo recomendado a sua utilização sem o emprego da equação de ajuste.

Palavras-chave: Teor de água no solo, sensor resistivo, acurácia.

**PATRICIO, E. A.; CARNEIRO, A. A. C.; GOMES, C. A. N.; MEIRELES, A. C. M.;
OLIVEIRA, C. W.; MENEZES, S. M.
SENSOR CALIBRATION FOR MONITORING SOIL MOISTURE**

2 ABSTRACT

Knowing the current soil moisture accurately is essential for efficient irrigation management, aiming to rationalize water resources on the basis of the sustainability and profitability of irrigated crops. Therefore, the objective of this work was to calibrate the model YL-69 sensor and propose a calibration equation for the Cariri Ceará region. The experiment was conducted in a greenhouse using a Dystrophic Red–Yellow Argisol, which was placed in four 5 L pots, with humidity monitored daily from saturation to air drying. Calibration was evaluated through

the use of statistical indices. The calibration equation presented an R^2 of 0.99 and a root mean square error (RMSE) of $0.03 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$. It was concluded that the calibration of the YL-69 sensor presents accurate volumetric soil moisture readings; however, its use is not recommended without the use of an adjustment equation.

Keywords: Soil water content, capacitive sensor, accuracy.

3 INTRODUÇÃO

No cenário atual, o crescimento exponencial da população, a intensificação dos eventos de mudanças climáticas e o aumento da poluição, torna a disponibilidade de água doce cada vez mais escassa, gerando uma grande preocupação a nível mundial (Orouskhani *et al.*, 2023). Tais fatores, representam obstáculos significativos para o desenvolvimento agrícola em diversas regiões ao redor do mundo (Songara; Patel, 2022).

Nesse contexto, o uso da irrigação se destaca como estratégia fundamental para aumentar produtividade das plantas cultivadas e a estabilidade socioeconômica dos sistemas de cultivos (Alves *et al.*, 2022). Porém, há a necessidade de garantir o uso racional dos recursos hídricos, visando incrementos na quantidade e na qualidade dos produtos, bem como a sustentabilidade das áreas irrigadas (Menezes *et al.*, 2024b). Para alcançar-se estes objetivos, é fundamental um bom gerenciamento da irrigação, proporcionando um aumento na produtividade da água e outros insumos agrícolas ou fatores de produção, como: fertilizantes, mão-de-obra e entre outros (Provenzano *et al.*, 2020).

Buscando um melhor gerenciamento dessa água, a estimativa da real umidade do solo é fundamental, podendo ser medida por métodos diretos e indiretos. Os métodos diretos consistem na separação da água do solo através de reações químicas e/ou secagem em estufa (Schwamback *et al.*, 2023). Já os métodos indiretos apresentam diversas formas de execução, tendo destaque para as técnicas dielétricas e sensores de

capacitância que se destacam dos demais métodos devido a possibilidade de automação (Kulmány *et al.*, 2022).

Para fins de automação, o Arduino destaca-se por ser uma plataforma de baixo custo, capaz de realizar inúmeras operações. Além de possuir um ambiente de desenvolvimento intuitivo e compatível com diversos sistemas operacionais (Cunha, 2022). No entanto, o uso dessa plataforma associado a sensores de monitoramento da umidade do solo ainda é pouco difundido entre os agricultores, sendo necessário realizar testes e calibrações desses equipamentos para que se possa obter dados precisos e representativos. Dessa forma, o objetivo do trabalho foi calibrar o sensor de umidade do solo modelo YL-69 e propor uma equação de calibração para o Argissolo Vermelho-Amarelo Distrófico na região do Cariri Cearense.

4 MATERIAL E MÉTODOS

O trabalho foi desenvolvido em ambiente protegido, na área experimental do Centro de Ciências Agrárias e da Biodiversidade (CCAB) da Universidade Federal do Cariri (UFCA), no Crato, CE ($7^{\circ}14'03''$ S e $39^{\circ}24'34''$ W, altitude de 420 m), de junho a julho de 2024. O clima da região é classificado como tropical quente, semiárido brando e tropical quente subúmido (Sousa, 2019). O solo utilizado é classificado como Argissolo Vermelho-Amarelo Distrófico abrupto (Fundação Cearense de Meteorologia e Recursos Hídricos, 2012), característico da região do

Cariri Cearense, cujas características físicas estão descritas na Tabela 1.

Tabela 1. Atributos físicos do solo estudado

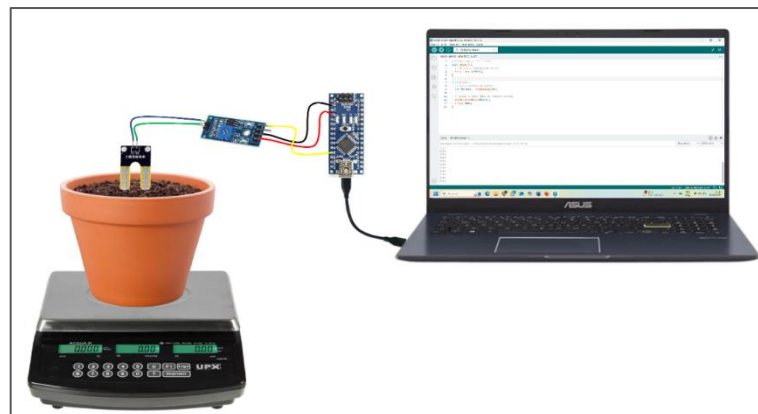
Profundidade	Densidade de Partículas	Densidade do Solo	Porosidade Total	Areia	Silte	Argila
--- m ---	--- kg dm ⁻³ ---	---- % ----	--- g kg ⁻¹ ---			
0 – 0,40	2,86	1,41	50,53	857,72	18,58	123,69

Foram coletadas amostras de solo deformadas na profundidade de 0 a 0,40 m. O solo coletado foi seco ao ar e peneirado em uma malha de 5 mm para posterior alocação em vasos com capacidade de 5 L, considerando o valor da densidade do solo obtida em campo. Foram utilizados quatro vasos, previamente perfurados na base, inicialmente preenchidos com uma camada de brita (1 kg), recobertas com tecido Wipe, sendo o restante do volume de trabalho dos baldes preenchidos com 4,08 kg de solo úmido (43,3% de umidade na capacidade de campo), calculado de forma a manter a densidade original do solo.

Em seguida, foi realizada a metodologia proposta por Jiménez *et al.* (2019), onde o solo foi saturado por

capilaridade, sendo os baldes com o solo alocados dentro de um tanque com água até sua metade, possibilitando a translocação da água da parte mais baixa do balde até a sua superfície, posteriormente, os vasos foram dispostos em uma bancada para drenar o excesso de água durante um período de 24 horas, atingindo supostamente o nível de umidade equivalente à capacidade de campo. Nesse momento foram obtidos os primeiros pesos do solo usando uma balança com precisão de $\pm 0,2$ g, e as leituras de umidade do solo foram determinadas usando o sensor resistivo YL-69. A escolha do sensor baseou-se num modelo de baixo custo que mais tivera sido citado em estudos de monitoramento de umidade de solo.

Figura 1. Esquema operacional utilizado para realização das leituras gravimétricas e volumétricas de umidade solo, utilizando-se uma balança e o Arduino nano respectivamente.



Fonte: Autores (2025)

Os pesos e as leituras de umidade do solo dos vasos foram obtidos diariamente às 8:00 da manhã. Os dados de umidade do solo registrados pelo sensor resistivo foram

enviados para uma placa Arduino do modelo nano, os quais eram pontualmente visualizados no monitor serial do Arduino por meio de um computador e em seguida

passados para uma planilha no Excel (Figura 1). O registro diário dos dados ocorreu até que a massa do conjunto (vaso, brita, tecido Wipe e solo) permanecesse constante pelo menos três leituras seguidas.

O peso diário do conjunto foi utilizado para calcular o conteúdo gravimétrico de água do solo usando o método padrão, segundo equação (1). O conteúdo de água do solo foi determinado em função da umidade gravimétrica, utilizada como base para a calibração do sensor. Considerou-se também a densidade da água de $1,0 \text{ Mg m}^{-3}$ e a densidade do solo, de acordo com a equação (2). Tais procedimentos foram realizados como sugerido por Jiménez *et al.* (2019).

$$U = \frac{Ma}{Mss} \quad (1)$$

$$\theta = U \times Ds \quad (2)$$

Em que: U - Conteúdo gravimétrica de água no solo, g g^{-1} ; θ - umidade volumétrica, $\text{m}^3 \text{m}^{-3}$; Ma - massa de água no solo, g; Mss - massa seca do solo, g; Ds - Densidade do solo, g cm^{-3} .

O conteúdo volumétrico de água medido, Y ($\text{m}^3 \text{m}^{-3}$) foi relacionado com os valores das leituras do sensor, X ($\text{m}^3 \text{m}^{-3}$) por meio de análise de regressão. Esta relação nos permite ter o modelo de calibração, que resultaria em valores estimados de umidade volumétrica a partir de leituras do sensor. Tendo os valores estimados e observados prossegue-se avaliação dos modelos ($P \gg X$ - umidade estimada; $O \gg Y$ - umidade observada). Os modelos de estimativa da umidade do solo foram avaliados com base em índices estatísticos como: coeficiente de determinação (R^2), raiz quadrática do erro médio (RMSE) pela equação (3), o índice de concordância de Willmott (1981) expresso pela equação (4) e o coeficiente de correlação de Pearson (r) pela equação (5).

$$RMSE = \left[\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (O_i - P_i)^2 \right]^{0,5} \quad (3)$$

$$d = 1 - \left[\frac{\sum_{i=1}^n (P_i - O_i)^2}{\sum_{i=1}^n (|P_i - \bar{O}| + |O_i - \bar{O}|)^2} \right] \quad (4)$$

$$r = \frac{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O}) (P_i - \bar{P})}{[\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})^2]^{0,5} [(P_i - \bar{P})^2]^{0,5}} \quad (5)$$

Em que: n é o número de observações, O_i é o valor medido pelo método padrão, P_i é o valor estimado pelos sensores ($i = 1, 2 \dots n$), e \bar{O} é a média dos valores medidos.

O índice de Willmott varia de 0 a 1, quanto mais próximo de 1 indica uma concordância perfeita entre os valores medidos (padrão) e estimados, ao passo que 0 indica nenhuma concordância entre os valores (Walker; Willgoose; Kalma, 2004; Menezes *et al.*, 2024a). Foi calculado também o índice de confiança (c) proposto por Camargo e Sentelhas (1997), de acordo com a equação (6).

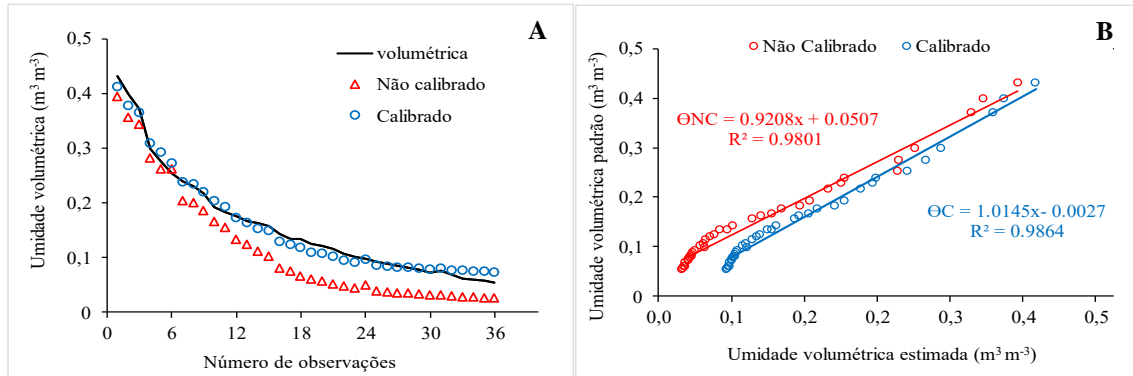
$$c = d \times r \quad (6)$$

O índice de concordância de Camargo e Sentelhas (c) pode ser interpretado de acordo da seguinte forma: $\leq 0,40$ péssimo, de 0,41 a 0,50 mau, de 0,51 a 0,60 sofrível, 0,61 a 0,65 mediano, de 0,66 a 0,75 bom, de 0,76 a 0,85 muito bom e $>0,85$ ótimo (Camargo; Sentelhas, 1997).

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

A variação do conteúdo de água do solo ao longo do período avaliado é mostrada na Figura 2A. Foi determinado a curva de secagem para o solo estudado, onde o conteúdo de umidade volumétrica do solo (eixo y) foi relacionado com o número de observações registrada no estudo (eixo x). Foram necessários 36 dias de observações, sendo uma observação por dia para o solo atingir estabilidade na massa e na umidade do solo.

Figura 2. Curva de secagem para um Argissolo Vermelho-Amarelo Distrófico abruptico (A). Umidade volumétrica padrão e sua correlação com a umidade estimada pelo sensor YL-69 com e sem calibração (B). Θ_{NC} = umidade volumétrica do sensor não calibrado e Θ_C = umidade volumétrica do sensor calibrada.



Fonte: Autores (2025)

Observa-se que antes da calibração, as leituras do sensor variaram de 0,39 a 0,03 m³ m⁻³, tendendo a subestimar a curva padrão, que variou de 0,43 a 0,05 m³ m⁻³. As leituras do sensor foram mais precisas nos primeiros 7 dias de registros, após esse período percebe uma perca na sensibilidade das leituras, levando a registros menores que o padrão. Contudo, a calibração melhorou a precisão do sensor, que passou a registrar uma variação de 0,41 a 0,07 m³ m⁻³, após a calibração. Resultados semelhantes também foram observados por Jiménez *et al.* (2019), calibrando sensores capacitivos para solos característicos do Nordeste brasileiro.

A equação de calibração para o sensor YL-69, foi obtida através da correlação entre a média da umidade gravimétrica dos baldes, baseada na densidade do solo e a média da umidade volumétrica estimada pelo sensor (Figura

2B). Obteve-se um R^2 de 0,99 para a equação de ajuste, resultado superior aos encontrados por Jiménez *et al.* (2019), Pizetta *et al.* (2017), cujos R^2 obtidos foram de 0,96 e 0,72 para as equações de calibrações de um Latossolo Amarelo e um Argissolo Vermelho Distrófico, respectivamente.

Observa-se que após a calibração, os valores de umidade volumétrica estimados pelo sensor melhoraram significativamente aproximando-se da reta 1:1, o que representa valores mais próximos dos reais. No entanto, ainda houve tendência a subestimar os valores reais em leituras inferiores a 0,1 m³ m⁻³ e na faixa de 0,2 a 0,35 m³ m⁻³. O processo de calibração do sensor YL-69 melhorou a precisão das leituras de umidade do solo (Tabela 2), com reflexo, principalmente no índice associado ao erro (RMSE).

Tabela 2. Índices estatísticos para o sensor YL-69 antes e depois da calibração para ambos os solos.

Sensor	Índices			Erro (m³ m⁻³)	
	<i>d</i>	<i>r</i>	<i>c</i>	Desempenho	RMSE
Não calibrado	0,971	0,960	0,932	Excelente	0,031
Calibrado	0,980	0,967	0,947	Excelente	0,026

O índice *d* e o *r* se aproximaram ainda mais da unidade, representando a melhoria

no desempenho e na precisão das leituras, contribuindo o *c* manter-se como excelente.

6 CONCLUSÕES

A calibração do sensor YL-69 melhorou a precisão das leituras de umidade volumétrica do solo para um Argissolo Vermelho-Amarelo Distrófico. Apesar do desempenho permanecer excelente para o sensor calibrado e não calibrado, houve uma melhora na exatidão das leituras do sensor após calibração, melhorando valores como a raiz quadrática do erro médio e os índices de concordâncias. Sendo recomendado, portanto, que a sua utilização em solos do tipo Argissolo Vermelho-Amarelo Distrófico abrupto, seja precedida pelo processo de calibração por meio da equação de ajuste, afim de obter valores mais exatos de umidade do solo.

7 AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao Centro de Ciências Agrárias e da Biodiversidade (CCAB) da Universidade Federal do Cariri (UFCA) pela logística para realização do trabalho, ao grupo de ensino tutorado PETagronomia pelo financiamento das pesquisas, ao grupo de laboratório de estatística, modelagem e geoprocessamento pelo apoio técnico e à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) pelo seu apoio financeiro aos bolsistas pós-doutorandos participantes e orientadores desta pesquisa e ao PROJETO: Edital n.162022, PDPG – Pós-doutorado Estratégico.

8 REFERÊNCIAS

ALVES, H. K. M. N.; JARDIM, A. M. D. R. F.; ARAÚJO, J. G. N.; SOUZA, C. A. A.; LEITE, R. M. C.; SILVA, G. I. N.; SILVA, T. G. F. Uma abordagem sobre práticas agrícolas resilientes para maximização sustentável dos sistemas de produção no Semiárido brasileiro. **Revista**

Brasileira de Geografia Física, Recife, v. 15, n. 1, p. 373-392, 2022.

CAMARGO, A. D.; SENTELHAS, P. C. Avaliação do desempenho de diferentes métodos de estimativa da evapotranspiração potencial no Estado de São Paulo, Brasil. **Revista Brasileira De Agrometeorologia**, Serra Talhada, v. 5, n. 1, p. 89-97, 1997.

CUNHA, M. S. S. **Gerência e automação de irrigação de plantio com a utilização de Arduino**. 2022. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Ciência da Computação) – Pontifícia Universidade Católica de Goiás, Goiana, 2022.

Fundação Cearense de Meteorologia e Recursos Hídricos. **Levantamento de reconhecimento de média intensidade dos solos** - Mesorregião do Sul Cearense. Fortaleza: Coletivo Duas Catitas, 2012.

JIMÉNEZ, A. D. L. Á. C.; ALMEIDA, C. D. G. C.; JÚNIOR, J. A. S.; MORAIS, J. E. F.; ALMEIDA, B. G.; ANDRADE, F. H. N. Accuracy of capacitive sensors for estimating soil moisture in northeastern Brazil. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v. 195, article 104413, p. 1-5, 2019.

KULMÁNY, I. M.; BEDE-FAZEKAS, Á.; BESLIN, A.; GICZI, Z.; MILICS, G.; KOVÁCS, B.; VONA, V. Calibration of an Arduino-based low-cost capacitive soil moisture sensor for smart agriculture. **Journal of Hydrology and Hydromechanics**, [s. l.], v. 70, n. 3, p. 330-340, 2022.

MENEZES, S. M.; PINHEIRO, A. G.; LIMA, D. F.; SANTOS, L. B.; SILVA, C. B.; SANTOS, D. P.; SILVA, T. G. F. Lisimetria de drenagem e ajuste de modelos matemáticos na determinação da evapotranspiração e coeficiente de cultivo

do pepino. **Revista Brasileira De Geografia Física**, Recife, v. 17, n. 5, p. 3109-3124, 2024a.

MENEZES, S. M.; SILVA, G. F.; SILVA, M. M.; MORAIS, J. E. F.; VASCONCELOS, M. C.; SOUZA, C. S.; ROLIM, M. M. Pulsed drip irrigation reduces sugarcane water consumption and improves growth, productivity, sugar and ethanol yields. **BioEnergy Research**, New York, v. 17, n. 1, p. 1413-1424, 2024b.

OROUSKHANI, E.; SAHOO, S.; AGYEMAN, B.; BO, S.; LIU, J. Impact of sensor placement in soil water estimation: a real-case study. **Irrigation Science**, New York, v. 41, n. 3, p. 395-411, 2023.

PIZETTA, S. C.; RODRIGUES, R. R.; PEREIRA, G. M.; PACHECO, F. E. D.; VIOLA, M. R.; LIMA, L. A. Calibração de um sensor capacitivo para estimativa da umidade em três classes de solos. **Irriga**, Botucatu, v. 22, n. 3, p. 458-468, 2017.

PROVENZANO, G.; RALLO, G.; ALMEIDA, C. D. G. C.; ALMEIDA, B. G. Development and validation of a new calibration model for diviner 2000® probe based on soil physical attributes. **Water**, Basel, v. 12, n. 12, article 3414, p. 1-16, 2020.

SCHWAMBACK, D.; PERSSON, M.; BERNDTSSON, R.; BERTOTTO, L. E.; KOBAYASHI, A. N. A.; WENDLAND, E. C. Automated low-cost soil moisture sensors: trade-off between cost and accuracy. **Sensors**, Porto, v. 23, n. 5, article 2451, p. 1-18, 2023.

SONGARA, J. C.; PATEL, J. N. Calibration and comparison of various sensors for soil moisture measurement. **Measurement**, Londres, v. 197, article 111301, p. 1-9, 2022.

SOUSA, S. G. Análise temporal do comportamento da precipitação pluviométrica na Região Metropolitana do Cariri (CE), Brasil. **Revista Geográfica da América Central**, [s. l.], v. 2, n. 63, p. 319-340, 2019.

WALKER, J. P.; WILLGOOSE, G. R.; KALMA, J. D. In situ measurement of soil moisture: a comparison of techniques. **Journal of Hydrology**, Amsterdam, v. 293, n. 1/4, p. 85-99, 2004.

WILLMOTT, C. J. On the validation of models. **Physical Geography**, Londres, v. 2, n.1, p. 184-194, 1981.