

DESENVOLVIMENTO E CALIBRAÇÃO DE UM SENSOR DE UMIDADE DO SOLO DE BAIXO CUSTO COM ESP32 PARA APLICAÇÃO EM LATOSSOLOS VERMELHOS

Thiago Henrique de Oliveira¹, Matheus Henrique Andrade de Paula², Natalia Lourenço da
Silva², Gabriel Barbosa do Prado², Sémebber Silva Lino³

RESUMO: A gestão eficiente da água é fundamental para a sustentabilidade na agricultura irrigada, exigindo tecnologias de monitoramento que aliem precisão e viabilidade econômica. Embora sensores de umidade do solo sejam essenciais, seu custo elevado dificulta a adoção em propriedades rurais menores. Este trabalho teve como objetivo desenvolver e calibrar um sensor de umidade de baixo custo como alternativa acessível. O protótipo foi construído com hastes de aço inox, um circuito oscilador CI555 e um microcontrolador ESP32, operando com base na variação de frequência influenciada pela constante dielétrica do solo. A calibração foi conduzida em laboratório, com 12 amostras de Latossolo Vermelho em diferentes níveis de umidade (de saturado a seco), com cinco repetições por ponto. A umidade gravimétrica foi determinada por secagem a 105 °C por 24 horas. Os resultados indicaram forte correlação linear entre as leituras do sensor e a umidade gravimétrica ($R^2 = 0,9421$). A equação obtida foi $Y = -0,0003 X + 0,3855$, permitindo a conversão precisa das leituras. Conclui-se que o sensor desenvolvido representa uma solução eficaz e de baixo custo para o manejo otimizado da irrigação.

PALAVRAS-CHAVE: Agricultura de Precisão, Manejo da Água, Irrigação.

DEVELOPMENT AND CALIBRATION OF A LOW-COST SOIL MOISTURE SENSOR WITH ESP32 FOR APPLICATION IN RED LATOSOLS

ABSTRACT: Efficient water management is fundamental to sustainability in irrigated agriculture, requiring monitoring technologies that combine precision with economic viability.

¹ Prof. Doutorando, Departamento de Agronomia, Universidade Estadual de Goiás, Avenida Brasil N° 435, CEP:75860-000, Quirinópolis, Go. Fone: (64) 99288-7507. Email: thiago.henrique@ueg.br

² Graduando em Agronomia, Departamento de Agronomia, UEG, Quirinópolis, Go.

³ Professor Mestre, Departamento de Agronomia, UEG, Quirinópolis, Go.

Although soil moisture sensors are essential, their high cost makes them difficult to adopt on smaller farms. The aim of this work was to develop and calibrate a low-cost moisture sensor as an affordable alternative. The prototype was built using stainless steel rods, a CI555 oscillator circuit and an ESP32 microcontroller, operating on the basis of frequency variation influenced by the soil's dielectric constant. Calibration was carried out in the laboratory with 12 samples of red latosol at different moisture levels (from saturated to dry), with five repetitions per point. Gravimetric moisture was determined by drying at 105 °C for 24 hours. The results indicated a strong linear correlation between the sensor readings and gravimetric moisture ($R^2 = 0.9421$). The equation obtained was $Y = -0.0003 X + 0.3855$, allowing accurate conversion of the readings. It can be concluded that the sensor developed represents an effective, low-cost solution for optimized irrigation management.

KEYWORDS: Precision Agriculture, Water Management, Irrigation.

INTRODUÇÃO

A agricultura irrigada desempenha um papel fundamental na segurança alimentar global. No entanto, a busca por maior eficiência no uso da água torna-se cada vez mais desafiadora diante das variações climáticas e da crescente escassez hídrica (O'Shaughnessy et al., 2011; Silva et al., 2017). Nesse contexto, o monitoramento preciso da umidade do solo é essencial para otimizar tanto o uso da água quanto da energia nos sistemas de irrigação (Vandôme et al., 2023).

Embora o método gravimétrico seja considerado referência, sua aplicação rotineira é limitada por ser destrutiva e demorada. Por outro lado, avaliações empíricas carecem de precisão (Pizetta, 2015; Jiménez, 2018). Sensores eletrônicos surgem como uma alternativa promissora, oferecendo medições contínuas, em tempo real, e possibilitando a automação dos processos (Vilela et al., 2015). No entanto, seu custo ainda é um entrave para muitos produtores rurais, especialmente os de pequeno porte (Oliveira, 2018).

No Brasil, a ampla ocorrência de Latossolos Vermelhos, cujas características interferem diretamente na retenção e movimentação da água, reforça a necessidade de calibração específica dos sensores, a fim de garantir a confiabilidade dos dados no manejo da irrigação (Santos et al., 2018; Pizetta, 2015; Paris & Rosa, 2017).

Diante desse cenário, o presente trabalho teve como objetivo desenvolver e calibrar um sensor de umidade do solo de baixo custo. Para isso, foi construído um protótipo com

componentes acessíveis e definida uma curva de resposta adaptada às características do Latossolo Vermelho.

MATERIAL E MÉTODOS

O presente estudo foi conduzido no Laboratório Multidisciplinar e no Laboratório de Informática da Universidade Estadual de Goiás (UEG), Campus Sudoeste, localizado no município de Quirinópolis, estado de Goiás, durante o primeiro semestre de 2025.

O desenvolvimento do protótipo do sensor de umidade do solo teve como base o microcontrolador ESP32, utilizado como unidade central de processamento. Para realizar a medição do teor de água, foi incorporado ao sistema um circuito oscilador fundamentado no circuito integrado 555, juntamente com resistores, capacitores e hastes de aço inoxidável, que atuam como elementos sensores. O funcionamento do sensor se baseia na variação da frequência gerada pelo circuito, influenciada diretamente pela capacitância e resistência entre as hastes. Essas variações são consequência das mudanças na constante dielétrica do solo, que está diretamente relacionada ao seu conteúdo de umidade. A programação do ESP32 foi realizada em linguagem C++, utilizando a plataforma Arduino IDE.

A calibração do sensor foi realizada com amostras de Latossolo Vermelho, coletadas na camada de 0 a 20 cm de profundidade em uma propriedade rural localizada nas proximidades de Quirinópolis. A análise granulométrica indicou que o solo possui 654,0 g kg⁻¹ de areia, 61,0 g kg⁻¹ de silte e 285,0 g kg⁻¹ de argila, sendo classificado como franco-arenoso. As análises físico-químicas, cujos resultados estão organizados na Tabela 1, foram realizadas em laboratório. Para padronizar as condições dos testes, todas as amostras foram compactadas com a mesma massa em recipientes de volume uniforme, o que resultou em uma densidade do solo (Ds) de aproximadamente 1,23 g cm⁻³.

Tabela 1. Característica química do solo.

Prof.	N	P	K	Ca	Mg	S	Al	H+Al	pH
m	%	mg dm ⁻³		cmolc dm ⁻³		mg dm ⁻³	cmolc dm ⁻³		CaCl ₂
0,00-0,20		9,20	180,00	1,66	0,57	7,00	0,60	5,45	4,3
Prof.	Na	Zn	B	Cu	Fe	Mn	M.O	CTC	V
m				mg dm ⁻³			g dm ⁻³		%
0,00-0,20	5,00	1,00	0,20	2,40	41,70	87,00	27,4	8,16	33,29

¹Profundidade (Prof); Extrator de P e K, Mehlich⁻¹; Matéria Orgânica (M.O); Capacidade de troca de cátions (CTC); Porcentagem de saturação de bases (V).

Foram preparadas 12 amostras idênticas, previamente destorroadas e secas ao ar livre, com teores de umidade variando de 0,120 g g⁻¹ a 0,330 g g⁻¹. Dez pontos intermediários foram obtidos por meio da adição controlada de água. As leituras do sensor foram realizadas a cada 5 segundos, com cinco repetições por amostra, sendo os dados registrados em planilhas eletrônicas. A umidade gravimétrica de referência foi determinada pelo método de secagem em estufa a 105 °C por 24 horas, utilizando uma balança analítica de precisão. Este método é amplamente reconhecido como padrão-ouro na calibração de sensores de umidade do solo (MARCELINO et al., 2023).

Para correlacionar as leituras do sensor com os valores obtidos por meio do método gravimétrico, será aplicado um modelo de regressão linear simples. A qualidade do ajuste e o desempenho do sensor serão avaliados por meio do coeficiente de determinação (R²). Todas as análises estatísticas, o ajuste da curva de calibração e a elaboração dos gráficos serão realizados utilizando o software Microsoft Excel.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

A calibração do protótipo do sensor de umidade do solo revelou uma relação linear consistente entre os valores registrados pelo microcontrolador ESP32 e a umidade gravimétrica do Latossolo Vermelho, conforme apresentado na Figura 1. Para representar essa correlação, foi aplicado um modelo de regressão linear simples, cujo ajuste resultou na seguinte equação:

$$Y = -0,0003 X + 0,3855 \quad (1)$$

Em que:

Y - umidade gravimétrica do solo (g g⁻¹);

X - leitura do sensor (escala de 0 a 1023).

A qualidade do ajuste foi confirmada pelo alto coeficiente de determinação (R²) obtido, que alcançou o valor de 0,9421. Isso significa que cerca de 94,21% da variação observada na umidade gravimétrica pode ser explicada diretamente pelas leituras fornecidas pelo sensor.

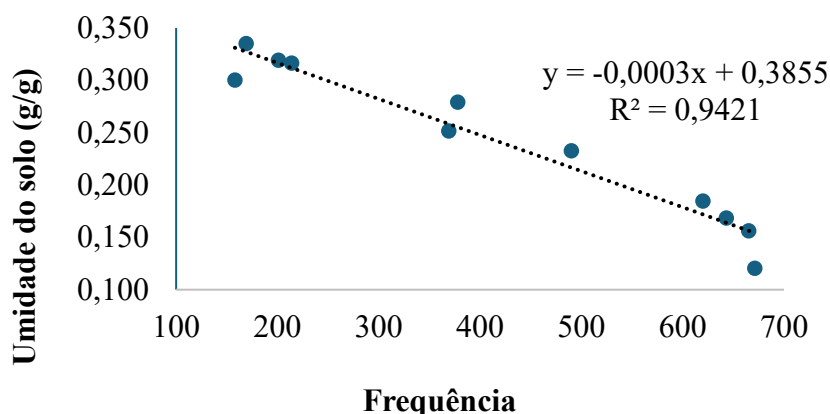


Figura 1. Gráfico de Calibração do Sensor de Umidade do Solo em Latossolo Vermelho.

O coeficiente de determinação obtido na calibração ($R^2 = 0,9421$) é um forte indicativo da elevada acurácia do protótipo, demonstrando sua capacidade de estimar com precisão a umidade do solo dentro da faixa testada ($0,120 \text{ g g}^{-1}$ a $0,335 \text{ g g}^{-1}$). Esse desempenho se mostra comparável e em alguns casos até superior ao de diversos sensores de umidade de baixo custo e até mesmo a modelos comerciais. Por exemplo, Pizetta (2015) relatou valores de R^2 entre 0,90 e 0,98 para sensores capacitivos aplicados em diferentes tipos de solo, enquanto Paris e Rosa (2017) alcançaram R^2 de 0,97 ao calibrar um sensor capacitivo CS12 especificamente em Latossolo Vermelho. Da mesma forma, o estudo de Oliveira (2018) obteve altos coeficientes de determinação ao trabalhar com sensores acessíveis, reforçando o potencial de soluções de baixo custo para o monitoramento da umidade do solo.

A inclinação negativa da reta de calibração ($a = -0,0003$) está alinhada com o princípio de funcionamento de sensores capacitivos. Nestes, o aumento da umidade, por consequência, da constante dielétrica do solo provoca uma variação inversamente proporcional na frequência ou na leitura do sensor, resultando em valores decrescentes à medida que o solo se torna mais úmido.

Além da acurácia, a simplicidade de construção do protótipo e sua integração com o microcontrolador ESP32 tornam esta solução especialmente promissora para aplicações em propriedades agrícolas de pequeno e médio porte. Nessas realidades, onde recursos para aquisição de tecnologias mais avançadas podem ser limitados, ferramentas como essa podem auxiliar significativamente no manejo mais eficiente da irrigação. Outro ponto positivo é o uso de hastes de inox, que contribuem para a durabilidade do sensor em contato com o solo, reduzindo os problemas de corrosão comumente observados em sensores resistivos com hastes de cobre, como evidenciado por Pinto et al. (2017).

No entanto, é importante destacar que a calibração foi realizada em condições controladas e para um tipo específico de solo (Latossolo Vermelho). A resposta de sensores de umidade pode variar conforme características como textura, salinidade e densidade aparente do solo (Pizetta, 2015). Por isso, estudos futuros deverão se concentrar na validação do sensor em campo, abrangendo diferentes classes de solo, condições de salinidade variadas, bem como análises de sua estabilidade e durabilidade ao longo do tempo.

CONCLUSÕES

Diante desse cenário, este trabalho teve como objetivo geral desenvolver e calibrar um sensor de umidade do solo de baixo custo. Para isso, foram definidos dois objetivos específicos: (i) construir um protótipo do sensor utilizando componentes acessíveis; e (ii) realizar sua calibração em laboratório, com foco na obtenção de uma curva de resposta específica para o Latossolo Vermelho, assegurando precisão e aplicabilidade das medições.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- JIMÉNEZ, A. L. A. C. **Calibração de sensor de umidade do solo modelo yl-69 para manejo da irrigação**. (Dissertação de Mestrado), 51p., Recife, 2018.
- MARCELINO, A. S. et al. **Calibração de sensores resistivos para determinação do conteúdo de água no solo e automação de sistema irrigado**. In: Congresso Nacional de Irrigação e Drenagem (CONIRD), INOVAGRI, 2023.
- O'SHAUGHNESSY, S. A.; HEBEL, M. A.; EVETT, S. R.; COLAIZZI, P. D. Evaluation of a wireless infrared thermometer with a narrow field of view. **Computers and Electronics in Agriculture**, v.76, p.9-68, 2011.
- OLIVEIRA, C. L. **Calibração de sensores de umidade do solo de baixo custo**. 2018. 52f. Monografia, Universidade Federal Rural de Pernambuco, Garanhuns - PE, 2018.
- PARIS, L. A.; ROSA, H. A. **Calibração de sensor de umidade de solo capacitivo CS12 em Latossolo Vermelho Distroférico**. Centro Universitário da Fundação Assis Gurgacz. 2017.

PINTO, J. J.; VILAS BOAS, M. A.; SILVEIRA, V. F. **Correlação entre sensor de umidade do solo de baixo custo com TDR**. 2017. 48 f. Trabalho de Conclusão de Curso – Universidade Estadual do Oeste do Paraná, Cascavel, 2017.

PIZETTA, S. C. **Calibração de sensores de capacitância (fdr) para estimativa da umidade em diferentes solos 2015**. 68f. Dissertação (Pós-Graduação em Recursos Hídricos em Sistemas Agrícolas), Universidade Federal de Lavras, 2015.

SANTOS, H. G. JACOMINE, P. K. T. ANJOS, L. H.C. OLIVEIRA, V. A. LUMBRERAS, J.F. COELHO, M. R. ALMEIDA, J. Á. ARAÚJO FILHO, J. C. OLIVEIRA, J. B. & CUNHA, T. J. F. **Sistema Brasileiro de Classificação de Solos**. 5ed.rev.ampl. Brasília, DF: Embrapa. 390p. (2018).

SILVA, H. C. DA, GOMES, F. H. F., FILHO, L. C. L., VIDAL, V., TEIXEIRA, M. B., & SOARES, F. A. L. Calibração de um sensor de umidade do solo de baixo custo. **Revista Brasileira de Agricultura Irrigada**, v.11, n.4, p.1509-1516. (2017).

VANDÔME, P. et al. Making technological innovations accessible to agricultural water management: Design of a low-cost wireless sensor network for drip irrigation monitoring in Tunisia. **Smart Agricultural Technology**, v. 4, p. 100227, ago. 2023.

VILELA, M. DA S., FILHO, F.R.C., TEIXEIRA, M.B., AMARAL, A.M., VELLAME, L.M., SOARES, F.A.L.. Acurácia de um mini-lisímetro de pesagem eletrônica de baixo custo. **Irriga**, 1(2): 158-167, 2015.