

Análise Crítica: Aplicação de Sensores de Umidade do Solo de Baixo Custo para Manejo de Irrigação em Couve

Antoniél Bordin

Universidade Tecnológica Federal do Paraná

2025

Resumo

Esta análise crítica examina o artigo “Application of low-cost soil moisture sensors for irrigation management in Brassica oleracea var. acephala cultivation” de Pitoro et al. (2025), focando na física do solo e na integração de tecnologias da Agricultura 4.0 com foco em sensores SKU: CE09640 combinados com arduino e LEDs RGB aplicados na cultura de couve. Avalio contribuições em calibração de sensores, curvas de retenção e monitoramento IoT, destacando forças, limitações e impacto para agricultores de baixa renda.

1 Introdução

O cenário global de escassez hídrica e crescimento populacional impõe uma pressão sem precedentes sobre os sistemas agrícolas, demandando saltos de eficiência no uso da água. Neste contexto, presupo-se que a física do solo, especialmente a dinâmica da umidade, é crucial para a agricultura sustentável em cenários de escassez hídrica. O artigo analisado [1] propõe um sistema de monitoramento baseado em sensores capacitivos de baixo custo (SKU: CE09640) integrado ao Arduino, com alertas via LEDs RGB, testado em cultivo de couve.

Tese desta análise: Embora o trabalho avance na aplicação acessível de tecnologias 4.0 contendo uma solução inovadora e validada para manejo de irrigação, subestima variações edáficas e desafios de escalabilidade, limitando sua robustez em solos heterogêneos.

2 Contribuições para a Física dos Solos

2.1 Determinação da Umidade

O cerne da contribuição do estudo reside na rigorosa calibração dos sensores capacitivos SKU: CE09640. O método empregado, baseado na perda de massa por secagem em condições ambientais controladas, alinha-se com o padrão ouro gravimétrico.

$$\mu = \frac{m_w - m_d}{m_d} \times 100, \quad \theta_v = \mu \cdot \rho_b \quad (1)$$

Os resultados da calibração: $R < -0.964$ (correlação inversa forte), $R^2 > 0.95$ (ajuste alto), $RMSE < 0.05$ (precisão aceitável), indicam que, para o Latossolo Vermelho Distrófico específico do experimento, o sensor responde de forma previsível e precisa às variações de umidade.

2.2 Relação Teor de Água e Potencial

Uso de curvas de retenção via modelo van Genuchten ajustado:

$$\theta(\psi_m) = \theta_r + \frac{\theta_s - \theta_r}{[1 + (|\alpha\psi_m|^n)]^m} \quad (2)$$

Contendo os seguintes parâmetros (0-0.20 m): $\alpha = 1.225$, $m=0.260$, $n=2.918$, $\theta_r = 0.172$, $\theta_s = 0.782 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$, compondo uma integração rigorosa de métodos clássicos com sensores acessíveis, enriquecendo Física do Solo.

3 Contribuições para Agricultura 4.0

3.1 Popularização de IoT

A arquitetura proposta por é composta de Sensores SKU: CE09640 (3.3-5.5V), Arduino Mega 2560 e LEDs RGB (azul=saturado > 0.48 , verde/amarelo=intermediário $0.28 - 0.48$, vermelho=seco $< 0.28 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$), com um custo estimado de $< R\$100$.

3.2 Democratização e Eficiência

O uso de LEDs RGB como interface de usuário é um elemento de inovação notável no contexto da Agricultura 4.0. Tradicionalmente, as tecnologias 4.0 geram fluxos de dados digitais (gráficos, números, alertas em apps, entre outros), sendo assim demandam certo nível de alfabetização digital e treinamento para interpretação. Ao traduzir a leitura do sensor e, por consequência, o estado hídrico do solo inferido pela física da medida em uma linguagem visual universal (cores), o sistema reduz drasticamente a barreira de entrada,

propiciando assecibilidade à produtores com baixa escolaridade, além de proporcionar sustentabilidade para pequenos produtores. WUP: IMC 10.95 g L⁻¹ (economia 12% vs ETc 12.42 g L⁻¹).

Método	WUP (g L ⁻¹)	Economia (%)
ETc	12.42	-
Sensores (IMC)	10.95	+12%
Tensiômetros (IMT)	9.82	-

4 Limitações e Desafios para a Escalabilidade

Nesta revisão avaliamos as limitações apontadas pelo próprio estudo no que tange ao contexto (Edáfico, Tecnológico e Analítico) e outras inerentes à abordagem:

1. **Variabilidade e Calibração:** A necessidade de calibração específica, embora bem executada, é uma barreira operacional. Para uma adoção ampla, seriam necessários protocolos simplificados de calibração "no campo" ou a disponibilização de bibliotecas de curvas de calibração para diferentes classes de solo.
2. **Desempenho em Extremos:** Como observado nos resultados, a precisão do sensor diminui nas faixas de solo muito seco constante dielétrica do meio muda pouco, reduzindo a sensibilidade. Este é um limite físico do método capacitivo que deve ser comunicado aos usuários.
3. **Durabilidade e Manutenção:** O estudo foi de curta duração (dois ciclos), entretanto a durabilidade dos sensores de baixo custo, da eletrônica do Arduino e dos LEDs em condições adversas de campo (umidade, temperatura, raios UV) é uma questão em aberto, deste modo a manutenção do sistema, ainda que potencialmente baixa, precisa ser considerada para um período maior do que o exposto no estudo.
4. **Integração com Outras Camadas da 4.0:** O sistema é, em sua essência, uma solução local e isolada. O verdadeiro potencial da Agricultura 4.0 estaria na integração desses dados de umidade com outras fontes (imagens de satélite, estações meteorológicas, modelos de previsão) em uma plataforma de gestão, ou seja o protótipo atual é um primeiro passo, mas sua evolução natural seria a transmissão sem fio dos dados para uma dashboard digital.

5 Conclusão

O estudo revisado oferece uma contribuição valiosa e prática no campo da interseção entre física do solo e tecnologias 4.0. Ele demonstra, com rigor metodológico, que é possível

desenvolver sistemas de monitoramento de umidade do solo com precisão agronômica aceitável utilizando componentes de baixo custo e hardware aberto. A inovação da interface visual baseada em LEDs é particularmente meritória, pois aborda a questão crítica da usabilidade e inclusão digital.

Do ponto de vista da física do solo, o trabalho reforça a importância da calibração *in situ* para qualquer sensor que se proponha a medir propriedades do solo de forma indireta. Também evidencia que, para a finalidade específica de gestão de irrigação de uma cultura sensível como a couve, a medida volumétrica direta (via sensor capacitivo calibrado) pode ser mais eficiente em termos de WUP do que a medida do potencial matricial (via tensiômetro) em um solo tropical.

Em última análise, este trabalho representa um modelo de como a ciência da física do solo pode ser traduzida em tecnologias 4.0 não apenas avançadas, mas também acessíveis, inclusivas e orientadas para a solução de problemas reais da agricultura sustentável, em sintonia com os desafios globais de segurança hídrica e alimentar.

5.1 Edáficas

- Solo único: Latossolo Vermelho Distrófico (sand 638, silt 66, clay 296 g kg⁻¹)
- Calibração local obrigatória (textura, salinidade EC=0.15 dS m⁻¹)
- Sem testes multi-solo

5.2 Tecnológicas

1. Durabilidade não validada > 1 ano para corrosão
2. Interface LEDs limitada (sem WiFi/IA)
3. Amostra sensores pequena (12 calibrados, 4 usados), sem ML para dados

5.3 Analíticas

O estudo não propôs análise econômica (ROI, manutenção) e possível comparação com soluções comerciais, sendo assim limitada à classificação como solução 4.0 completa.

6 Avaliação Metodológica

Pontos fortes (★★★★): Design fatorial 4x3, comparação ETc/IMT/IMC, DAQ customizado (Arduino mais SD), 2 safras.

Pontos fracos (★★): Solo único (Latossolo Vermelho), amostra limitada (12 sensores), sem ML para dados.

Sólido, mas poderia ser mais generalista.

7 Conclusão e Recomendações

Veredito: 4.3/5 ★★☆☆ Democratiza precisão para milhões de produtores.

Recomendações:

1. Multi-solo: Testar 5 texturas.
2. IoT avançado: ESP32 + app.
3. Automação: Válvulas + ML.
4. Economia: CBA (3 anos).

Frase final: “De sensores baratos a irrigação otimizada: revolução acessível.”

O artigo organiza-se em quatro pilares principais:

1. **Calibração Laboratorial:** Sensores calibrados via método gravimétrico ($R^2 \geq 0.95$, RMSE ≤ 0.05)
2. **Curva de Retenção:** Modelo de van Genuchten ($\theta_s = 0.782 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$)
3. **Experimento de Campo:** Design fatorial 4×3 (50-125% ETc)
4. **Resultados:** WUP = 10.95 g L^{-1} (sensores) vs 12.42 g L^{-1} (ETc)

Método	WUP (g L^{-1})	R^2	RMSE
ETc	12.42	-	-
Sensores (IMC)	10.95	0.95-0.97	0.017-0.019
Tensiômetros	9.82	-	-

8 Análise das Forças

8.1 Física do Solo

- **Calibração Rigorosa:** Método gravimétrico + van Genuchten para Latossolo Vermelho
- **Equações Precisas:** $\theta_{actual} = \mu \cdot \rho_b$ e $\theta_{rep} = \theta_{fc} - \theta_{actual}$
- **Realismo:** Amostras inalteradas (PVC $10 \text{ cm} \times 12 \text{ cm}$)

8.2 Agricultura 4.0

- **IoT Acessível:** Arduino + LEDs RGB (custo \approx R\$ 100)
- **Interface Intuitiva:** Verde (úmido) \rightarrow Amarelo \rightarrow Vermelho (seco)
- **Open Source:** Código disponível em suplemento

9 Críticas e Limitações

9.1 1. Física do Solo - Heterogeneidade

Problema: Calibração em **um único solo** (64.5% argila)

Evidências:

- Sensores capacitivos falham em solos salinos ($EC > 1 \text{ dS m}^{-1}$)
- Sem testes em Latossolos Arenoso/Álico (comuns no Brasil)
- RMSE pode subir para 0.10+ em campo real

9.2 2. Agricultura 4.0 - Escalabilidade

- **Sem conectividade:** LEDs limitam vs WiFi/LoRaWAN
- **Durabilidade:** Sem testes > 1 ano (corrosão em PVC)
- **Automação:** Falta integração com válvulas solenoidais

9.3 3. Análise Econômica Incompleta

- Custo do sistema: R\$ 85 vs ROI não calculado
- Economia de água: 12% vs custo energia Arduino omitido

10 Conclusão e Recomendações

Vantagens: Democratiza agricultura de precisão para pequenos produtores.

Limitações: Robustez limitada a solos específicos.

Recomendações:

1. **Multi-solo:** Testar em 3-5 classes texturais
2. **IoT Avançado:** ESP32 + MQTT + app Android
3. **Automação:** Válvulas + previsão via ML

4. **Economia:** Análise CBA (custo-benefício)

Veredito Final: ★★☆☆ (4/5)

Excelente protótipo, mas precisa de validação ampliada.

Referências

- [1] Pitoro, V.S.J. et al. (2025). Application of low-cost soil moisture sensors for irrigation management in Brassica oleracea var. acephala cultivation. *Smart Agricultural Technology*, **12**, 101596.
- [2] Ahmed, N. et al. (2018). IoT for Smart Precision Agriculture. *IEEE Internet of Things Journal*.
- [3] Dobriyal, P. et al. (2012). Review of soil moisture estimation methods. *Journal of Hydrology*.