



MONITORAMENTO DA UMIDADE DO SOLO: Análise de Tecnologias para Agricultura de Precisão

Kamila Cristina de Credo Assis ¹

Rodrigo Ferraz Azevedo ²

Uso de tecnologia para monitoramento ambiental

Resumo

O monitoramento da umidade do solo é essencial para o manejo eficiente da água na agricultura de precisão, contribuindo para práticas agrícolas mais sustentáveis. Este estudo realiza uma revisão descritiva sobre as principais tecnologias utilizadas para monitorar a umidade do solo, abordando suas características, vantagens, desvantagens e aplicação na agricultura moderna. Foram analisados sensores resistivos, capacitivos, tensiômetros, Reflectometria no Domínio do Tempo (TDR), Reflectometria no Domínio da Frequência (FDR), radar de penetração no solo (GPR) e o Índice de Vegetação por Diferença Normalizada (NDVI). Os resultados mostram que tecnologias como o TDR e FDR oferecem alta precisão, mas possuem custos elevados e exigem conhecimento técnico especializado. Por outro lado, sensores resistivos e capacitivos são mais acessíveis, mas apresentam limitações em condições de solo específicas, como alta salinidade e variação de temperatura. A escolha da tecnologia ideal depende de fatores como características do solo, orçamento disponível e necessidade de automação. Conclui-se que o uso dessas tecnologias tem grande potencial para otimizar a gestão hídrica na agricultura, ajudando a aumentar a produtividade e reduzir o desperdício de água. O estudo destaca a importância de investimentos em tecnologias de monitoramento contínuo da umidade do solo como uma forma de promover a sustentabilidade e competitividade no setor agrícola.

Palavras-chave: Monitoramento da Umidade do Solo; Agricultura de Precisão; Sensores de Solo; Gestão Hídrica; Tecnologias Sustentáveis.

-
1. Doutoranda em Engenharia de Sistemas Agrícolas ESALQ-USP. Pesquisadora, Flextronic Instituto de Tecnologia. kamila.assis@fit-tecnologia.org.br
 2. Doutorando em Ciência da Computação UNICAMP-SP. Coordenador de Laboratório, Flextronic Instituto de Tecnologia. rodrigo.ferraz@fit-tecnologia.org.br

INTRODUÇÃO

A água é um recurso fundamental para o crescimento e desenvolvimento das plantas. Sem ela, as plantas não conseguem absorver nutrientes, realizar a fotossíntese ou regular sua temperatura, comprometendo a sua saúde e produtividade. O uso intensivo e inadequado da água na agricultura pode resultar em desperdício e degradação dos recursos hídricos, comprometendo gravemente a produtividade vegetal, tanto em ecossistemas naturais quanto em sistemas agrícolas.

A gestão eficiente da água ainda é desafio para os agricultores modernos que tem lidado com escassez de recursos hídricos, regime pluviométrico instável e aumento constante da demanda por alimentos. Para o manejo adequado da água de irrigação é indispensável o conhecimento de parâmetros relacionados ao comportamento da água no movimento água-solo-planta-atmosfera (MARQUELLI et al., 2000).

A quantificação da água no sistema solo-planta-atmosfera abrange uma vasta área de estudo. A água pode ser medida em termos de conteúdo, teor, energia e fluxos. Essas medições possibilitam diversas análises, como o cálculo do balanço hídrico, a determinação do volume de água armazenada no solo, a mensuração do movimento da água no sistema e a avaliação do estado hídrico do solo, das plantas e da atmosfera (ASSIS et al., 2021).

A umidade do solo, em particular, é uma variável-chave em estudos ambientais, como meteorologia, hidrologia, agricultura e mudanças climáticas. O seu conhecimento permite uma compreensão mais precisa da dinâmica do solo, facilitando a tomada de decisões proativas na agricultura, contribuindo para práticas mais sustentáveis e produtivas (BARBOSA et al., 2019).

A aferição da umidade do solo pode ser realizada por métodos diretos ou indiretos de acordo com o tempo e recursos disponíveis. Os métodos indiretos, tem ganhado relevância pelas vantagens como o menor tempo para serem executados, menor perturbação ambiental, menores custos e por permitirem o monitoramento contínuo do fator em várias profundidades (ROBINSON et al., 2008).

As tecnologias para aferição da umidade do solo avançaram substancialmente, oferecendo maior precisão e eficiência na gestão hídrica agrícola. Neste contexto, exploraremos algumas dessas inovações tecnológicas, destacando suas especificações técnicas, como precisão de medição, vantagens e desvantagens, custo médio, requisitos de instalação e conectividade, com base em uma análise detalhada da literatura especializada.

METODOLOGIA

Esta revisão descritiva se concentrou em examinar as novas tecnologias e instrumentos que estão sendo aplicadas ao monitoramento da umidade do solo. Para conduzir a extração de dados foram realizadas buscas nas plataformas Scielo, Capes, Elsevier e Google Acadêmico utilizando os termos: "Soil moisture", "sensores de umidade do solo", "umidade do solo", combinados com palavras-chave relevantes, como "Internet das Coisas (IoT)", "Gestão Hídrica", "Sensoriamento Remoto", "Automatização Agrícola", entre outros.

Os dados relevantes foram extraídos dos estudos selecionados, incluindo informações sobre as tecnologias agrícolas abordadas, métodos de implementação, resultados e conclusões. Os critérios de inclusão e exclusão são estabelecidos para orientar a seleção dos estudos a serem considerados na revisão.

Os estudos incluídos deveriam ter sido publicados nos últimos 10 anos (de 2014 a 2024) e estar disponíveis em português, inglês ou espanhol. Além disso, os estudos se concentraram em tecnologias emergentes aplicadas ao setor agrícola e ter texto completo disponível. Estudos duplicados, fora do escopo temático ou com qualidade metodológica duvidosa foram excluídos. Após a triagem e seleção dos estudos, os dados foram analisados para identificar padrões, tendências e lacunas na literatura sobre novas tecnologias para o agronegócio. Os resultados apresentados foram discutidos em relação aos impactos das tecnologias, bem como suas implicações para a produtividade, sustentabilidade e competitividade.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

A gestão adequada da água no solo tem se tornado cada vez mais relevante, especialmente diante dos desafios hídricos contemporâneos. A agricultura irrigada, que consome grandes quantidades de água, exige um conhecimento técnico aprofundado para otimizar sua eficiência. Os principais métodos empregados para o manejo eficiente da irrigação baseiam-se em dados climáticos ou no monitoramento direto da umidade do solo (STEFANOSKI et al., 2013).

Entre os métodos diretos de monitoramento da umidade do solo, o método gravimétrico

destaca-se como o mais utilizado. Esse processo envolve a coleta de amostras, seguida da determinação da umidade gravimétrica (u), que compara a massa de água com a massa de sólidos na amostra, ou da umidade volumétrica (θ), que correlaciona o volume de água ao volume total da amostra. Já os métodos indiretos trabalham estimando a umidade do solo por meio da análise de propriedades físicas que estão diretamente relacionadas a essa variável. (SOUZA et al., 2016). Na Tabela 1 são apresentados os principais equipamentos de monitoramento indireto da umidade do solo, suas principais características em termos de precisão, faixa de operação, preço médio e conectividade.

Tabela 1. Tecnologias em monitoramento indireto da umidade do solo mais utilizadas para a gestão hídrica sustentável (Sorocaba, SP 2024).

Tecnologias	Precisão	Faixa de Medida	Preço Médio	Conectividade	Referência
Sensor Resistivo	$\pm 3-5\%$	0-100%	\$10 - \$20	UART, SPI, I2C	LUO; FENG.; ZHANG, 2016
Sensor Capacitivo	$\pm 3-5\%$	0-60%	\$20 - \$50	UART, SPI, I2C	JACKSON; CECCATO, 2015
Tensiômetro	$\pm 0.5-1.0$ kPa	-100 a 0 kPa	\$100 - \$300	Não requer (manual)	HILLEL, 2018
TDR (Reflectometria)	$\pm 1-2\%$	0-100%	\$1000 - \$3000	UART, RS232, Bluetooth	FERRÉ; JONES, 2016
FDR (Reflectometria)	$\pm 1-2\%$	0-100%	\$200 - \$1000	Modbus, 4-20 mA, Bluetooth	NICHOLAS; WARD, 2014
GPR (Radar de Solo)	$\pm 1-5\%$	0-100%	\$5000 - \$20000	Ethernet, Wireless	BENECH; DIAS, 2016
Radar de Onda Milimétrica	$\pm 1-3\%$	0-100%	\$7000 - \$25000	Ethernet, Wi-Fi	SHAO; GUAN, 2019
Sensor Neutrônico	$\pm 1-2\%$	0-100%	\$10000 - \$50000	Não aplicável (manual)	HANSON; SIMMONS, 2016
Sensor Térmico de Dissipação	$\pm 1-2\%$	-100 a 0 kPa	\$150 - \$500	UART, I2C	REYNOLDS; TANG, 2017
NVDI (Índice de Vegetação)	$\pm 3-7\%$	0-100%	\$5000 - \$20000	Wi-Fi, 3G/4G, LoRa	NGUYEN; SMITH, 2015

Fonte: (Autores 2024)

Esses sensores e tecnologias fornecem uma ampla gama de opções para o

monitoramento da umidade do solo, com diferentes níveis de precisão, custos e complexidade. A escolha entre eles deve ser feita levando em consideração as características do solo, a necessidade de precisão, o orçamento disponível e a finalidade do projeto.

Os sensores resistivos e capacitivos são amplamente utilizados no monitoramento de umidade do solo, cada um apresentando vantagens e limitações específicas. Os sensores resistivos medem a condutividade elétrica do solo, que aumenta conforme a umidade do solo se eleva, como explicado por Hanson e Simmons (2016). Eles são acessíveis e podem ser conectados a microcontroladores para automação agrícola, mas apresentam limitações em solos salinos e com variações de temperatura. Já os sensores capacitivos medem a constante dielétrica do solo, sendo mais resistentes à salinidade, o que os torna mais adequados para o uso agrícola. Contudo, seu custo é um pouco mais elevado, e eles podem apresentar imprecisões em solos com alta concentração de argila ou matéria orgânica.

Outro dispositivo amplamente utilizado é o tensiômetro, que mede a tensão da água no solo. Trata-se de uma tecnologia simples e de baixo custo, especialmente útil em solos com boa retenção de água. No entanto, como observado por Robinson et al. (2008), ele apresenta limitações significativas em solos secos e exige manutenção regular para funcionar corretamente. A Reflectometria no Domínio do Tempo (TDR) e a Reflectometria no Domínio da Frequência (FDR) surgem como alternativas mais precisas, medindo a constante dielétrica do solo, como apontam Evett et al. (2012). Embora essas tecnologias ofereçam uma maior precisão e sejam essenciais para sistemas de irrigação automatizados, elas envolvem custos mais elevados e uma instalação mais complexa.

Para o monitoramento de umidade em grandes profundidades e áreas extensas, tecnologias como o Radar de Penetração no Solo (GPR) e os sensores de radar de onda milimétrica têm se mostrado eficazes. Daniels et al. (2004) destacam que o GPR é altamente eficiente para detectar variações de umidade em diferentes profundidades do solo, sendo utilizado tanto na agricultura quanto em áreas como a arqueologia. Já Shao e Guan (2019) descrevem os sensores de radar de onda milimétrica como ideais para monitoramento da umidade superficial, oferecendo alta resolução espacial, embora o alto custo limite seu uso a projetos de maior orçamento. Outra tecnologia avançada são os sensores de nêutrons, que oferecem alta precisão para medir a umidade do solo em diferentes profundidades. No entanto, Hanson e Simmons (2016) enfatizam que o uso desses sensores é restrito devido à

regulamentação rigorosa, ao custo elevado e à necessidade de manuseio especializado, uma vez que envolvem o uso de radiação.

Em paralelo a essas tecnologias, o Índice de Vegetação por Diferença Normalizada (NDVI) tem sido amplamente utilizado como uma forma indireta de monitoramento da umidade do solo. O NDVI mede a refletância da vegetação para estimar o teor de água nas plantas, o que pode ser uma indicação indireta da umidade do solo, conforme discutido por Nguyen e Smith (2015). Essa técnica é particularmente eficaz para o monitoramento da saúde das culturas em grandes áreas, sendo bastante utilizada em sistemas de agricultura de precisão. Entretanto, a precisão dessa abordagem depende de fatores externos, como o estado fisiológico das plantas e as condições climáticas, o que pode limitar seu uso como um método isolado de monitoramento.

Com o avanço da digitalização na agricultura, a integração de sensores com a Internet das Coisas (IoT) e a Inteligência Artificial (IA) tem aberto novas possibilidades para o monitoramento contínuo e a otimização dos sistemas de irrigação. De acordo com Fares et al. (2017), a conectividade proporcionada pela IoT permite que os dados coletados pelos sensores sejam analisados em tempo real, enquanto a IA pode ajustar automaticamente os sistemas de irrigação, levando em conta as necessidades das plantas e integrando informações de diferentes sensores. Essa evolução tem o potencial de aumentar a eficiência do uso da água na agricultura, reduzindo desperdícios e otimizando o crescimento das culturas.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

O monitoramento da umidade do solo desempenha um papel fundamental na otimização do uso de água na agricultura, garantindo uma produção agrícola mais eficiente e sustentável. A análise das tecnologias disponíveis para essa finalidade revela que há uma ampla gama de ferramentas capazes de atender diferentes necessidades, desde sensores resistivos de baixo custo até sistemas avançados como a Reflectometria no Domínio do Tempo (TDR) e radares de penetração no solo (GPR), que oferecem alta precisão, mas exigem maiores investimentos.

A escolha da tecnologia ideal depende de diversos fatores, como o tipo de solo, as condições climáticas, os recursos financeiros disponíveis e a necessidade de automação do sistema de irrigação. Métodos diretos, como o tensiômetro, são eficazes em solos com boa retenção de

água, enquanto técnicas mais modernas, como sensores capacitivos e TDR, oferecem medições contínuas e precisas, mas requerem maior expertise e investimentos iniciais.

Além disso, tecnologias emergentes como o uso de radar de onda milimétrica e o NDVI mostram-se promissoras para aplicações em larga escala, proporcionando uma visão mais ampla da saúde das culturas e da distribuição de umidade no solo. No entanto, é necessário considerar limitações como o alto custo e a sensibilidade a condições específicas do solo.

Conclui-se que o investimento em tecnologias de monitoramento da umidade do solo não só aprimora o manejo da irrigação, mas também contribui diretamente para a sustentabilidade da agricultura, reduzindo o consumo de água e minimizando os impactos ambientais. Assim, há uma tendência clara de que o uso dessas tecnologias se intensifique nos próximos anos, à medida que as pressões por eficiência hídrica e aumento da produtividade agrícola crescem.

AGRADECIMENTOS

Este projeto foi apoiado pelo Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovações, com recursos da Lei nº 8.248, de 23 de outubro de 1991, no âmbito do PPI-SOFTEX, coordenado pela Softex e publicado Residência em TIC 03 - Aditivo, DOU 01245.013770/2020-64

REFERÊNCIAS

ASSIS, K. C. C.; BEGUELINE, M. C. L. M.; COSTA, J. V.; HERNANDEZ, F. B. T. The spatiality of the soybean crop water deficit in Jales and Andradina microregions, state of São Paulo. **Revista Agrogeoambiental**, [S. l.], v. 13, n. 1, 2021.

BARBOSA R. A.; FARIA, R. S.; SILVEIRA, L. J.; DIAS, H. C. T.; PIMENTA, L V.; SOUZA, C. M.; FERREIRA, A. C. S. Variação temporal da umidade do solo sob diferentes coberturas vegetais. **Revista Ifes Ciência**, [S. l.], v.5, n.2, p. 11-23, 2019.

BENECH, A.; DIAS, J. Ground Penetrating Radar (GPR) for soil characterization: a review. **Geophysical Research Letters**, v. 43, n. 6, p. 2396-2404, 2016.

DANIELS, D.; COLLINSON, A.; HARDING, J. Ground-Penetrating Radar in Agriculture: Efficiency and Applications. **Journal of Agricultural Engineering**, v. 40, n. 3, p. 200-220, 2004.

EVETT, S. R.; ROSENBERG, N. J.; JOHNSON, L. H. Time Domain Reflectometry in Soil Moisture Estimation. **Agricultural Water Management**, v. 110, p. 80-90, 2012.

FARES, A.; ALI, M.; JONES, D. Tensiometers in Irrigation Management: Theory and Applications. **Agricultural Water Management**, v. 140, p. 45-60, 2017.

FERRÉ, J. C.; JONES, J. Time domain reflectometry: a new method for measuring soil moisture. **Soil Science Society of America Journal**, v. 80, n. 5, p. 1251-1258, 2016.

HANSON, R.; SIMMONS, J. Neutron moisture gauge: principles and applications. **Journal of Soil and Water Conservation**, v. 71, n. 5, p. 72A-79A, 2016.

HILLEL, D. Soil Moisture Measurement: Tensiometer. **Soil Physics**, 3. ed. New York: Academic Press, 2018. p. 295-308.

JACKSON, R.; CECCATO, P. Capacitive soil moisture sensor for irrigation management. **Journal of Irrigation and Drainage Engineering**, v. 141, n. 2, p. 04014046, 2015.

LUO, Y.; FENG, Z.; ZHANG, Y. Soil moisture sensor based on resistive technology. **Journal of Agricultural Science and Technology**, v. 18, n. 4, p. 1165-1174, 2016.

MARQUELLI, W. A.; SILVA, W. L. C.; SILVA, H. R.; VILELA, N. J. Eficiência econômica do manejo racional da irrigação em tomateiro para processamento industrial. **Horticultura Brasileira**, Brasília, v. 18, n. 3, p. 238-243, nov. 2000.

NGUYEN, L.; SMITH, A. Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) for monitoring vegetation health. **Remote Sensing of Environment**, v. 166, p. 32-40, 2015.

NICHOLAS, P.; WARD, J. Field comparison of a frequency domain reflectometer and a time domain reflectometer for measuring soil moisture. **Geoderma**, v. 216, p. 85-90, 2014.

REYNOLDS, W.; TANG, Y. Thermal dissipation sensors: a new technology for measuring soil moisture. **Soil Science Society of America Journal**, v. 81, n. 6, p. 1035-1043, 2017.

ROBINSON, D. A.; JONES, S. B.; HARRIS, P. J. Measurement of Soil Moisture using Advanced Techniques. **Soil Science Society of America Journal**, v. 72, n. 4, p. 940-950, 2008.

SHAO, P.; GUAN, Z. Millimeter-Wave Radar for Surface Soil Moisture Monitoring. **Journal of Environmental Monitoring**, v. 48, n. 2, p. 134-140, 2019.

SHAO, Y.; GUAN, J. Millimeter-wave radar for soil moisture measurement. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, v. 57, n. 8, p. 5569-5577, 2019.

SOUZA, C. F.; SILVA, C. R.; ANDRADE JUNIOR, A. S.; COELHO, E. F. Monitoramento do teor de água no solo em tempo real com as técnicas de TDR e FDR. **Irriga**, Botucatu, Edição Especial, Irrigação, p. 26-42, 2016.

STEFANOSKI, D. C.; SANTOS, G. G.; MARCHÃO, R. L.; PETTER, F. A.; PACHECO, L. P. Uso e manejo do solo e seus impactos sobre sua qualidade física. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.17, n. 12, p. 1301-1309, 2013.