

UNIVERSIDADE FEDERAL DOS VALES DO JEQUITINHONHA E MUCURI

Instituto de Ciências Agrárias – ICA

Daniel Mai

**CALIBRAÇÃO DE SENSORES PARA ESTIMATIVA DE UMIDADE EM
QUATRO CLASSES DE SOLO**

Unai

2023

Daniel Mai

**CALIBRAÇÃO DE SENSORES PARA ESTIMATIVA DE UMIDADE EM
QUATRO CLASSES DE SOLO**

Monografia apresentada ao Instituto de Ciências Agrárias da Universidade Federal dos Vales do Jequitinhonha e Mucuri, como requisito para obtenção do título de Engenheiro (a) Agrônomo (a).

Orientador: Prof. Dr. Wesley Esdras Santiago

Unai

2023

Daniel Mai

**CALIBRAÇÃO DE SENSORES PARA ESTIMATIVA DE UMIDADE EM
QUATRO CLASSES DE SOLO**

Monografia apresentada ao Instituto de Ciências Agrárias da Universidade Federal dos Vales do Jequitinhonha e Mucuri, como requisito para obtenção do título de Engenheiro(a) Agrônomo(a).

Orientador: Prof. Dr. Wesley Esdras Santiago

Data de aprovação ____/____/____.

Prof Dr. Igor Alexandre de Souza

Instituto de Ciências Agrárias - UFVJM

Prof Dr. Rafael Faria Caldeira

Instituto de Ciências Agrárias - UFVJM

Prof. Dr. Wesley Esdras Santiago

Instituto de Ciências Agrárias - UFVJM

Unai

RESUMO

Os sensores de umidade do solo são uma ferramenta útil no gerenciamento de irrigação, mas precisam ser calibrados localmente para melhorar sua precisão, levando em consideração a sensibilidade aos atributos naturais do solo relacionados a sua classe. O objetivo desse trabalho foi avaliar e calibrar três sensores de umidade do solo (HidroFarm, Vergtrug Care e PMS710) em quatro classes de solo (Latosolo Vermelho Distrófico, Latossolo Amarelo Distrófico, Nitossolo Vermelho Distrófico e um Cambissolo Háptico). Foram utilizadas amostras de solo indeformadas coletadas em colunas de solo de PVC de 112 mm de diâmetro por 200 mm de altura, que foram saturadas com água destilada e logo após a saturação os sensores foram inseridos na amostra. Em razão das características específicas de cada sensor e solo, foram obtidas curvas de calibração personalizadas, que analisadas pelos critérios do coeficiente de determinação, coeficiente de Kendall, coeficiente de Pearson, P-valor e RMSE, demonstraram que apenas os sensores Vergtrug Care e PMS710 são recomendados para a estimativa de umidade volumétrica em Latossolo Vermelho Distrófico, Latossolo Amarelo Distrófico, Nitossolo Vermelho Distrófico e Cambissolo Háptico.

Palavras-chave: agricultura de precisão, instrumentação, irrigação, manejo da água.

LISTA DE ABREVIATURAS

CXbe2 - Cambissolo Háptico Tb Eutrófico típico, horizonte A moderado, textura argilosa, caulínico.

LAD - Latossolo Amarelo Distrófico plintossólico, horizonte A moderado, textura muito argiloso caulínico;

LVd1 - Latossolo Vermelho Distrófico típico com horizonte A moderado, textura muito argilosa, caulínico;

NVd - Nitossolo Vermelho Distrófico típico, horizonte A proeminente, textura muito argilosa, caulínico;

SUMARIO

1 INTRODUÇÃO.....	7
2 OBJETIVO.....	9
2 MATERIAIS E MÉTODOS.....	10
3 RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	13
4 CONCLUSÃO.....	17
5 REFERÊNCIAS.....	18

1. INTRODUÇÃO

O aumento de produção sem agressão ao meio ambiente tem sido caracterizado como um dos maiores desafios para a Agricultura no século 21 (DAVIDSON et al., 2015; VOS e BELLÚ, 2019), principalmente em regiões onde a disponibilidade hídrica do solo é abaixo do demandado pelas culturas agrícolas (XU et al., 2019).

Classificada como Aw (Koppen), a região de cerrados do Brasil central possui duas estações climáticas bem definidas (seca de abril a outubro e chuvosa de outubro a abril), fazendo com que seja necessária a adoção de sistemas de irrigação para reposição da água no solo e hidratação das culturas agrícolas, garantindo produção agrícola durante toda a estação seca e, eventualmente, durante a estação chuvosa. Entretanto, como a água é um recurso finito, os sistemas de irrigação adotados devem ser eficientes para atender um modelo de produção agrícola sustentável (HAMIDOV et al., 2020).

Independente do sistema adotado (superfície, sulco ou aspersão), o manejo racional da irrigação depende basicamente da cultura, do clima e das características do solo; portanto a definição do manejo tem de levar em conta estes fatores para determinar o momento e quantidade correta de água a ser aplicada durante o ciclo das culturas (OLIVEIRA et al., 2003). Sistemas de irrigação que não possuem um método de controle são ineficientes, pois a fim de evitar que a cultura sofra um estresse hídrico irrigam em excesso desperdiçando água e energia (BWAMBALE et al., 2018).

A eficiência de um sistema de irrigação é alcançada a partir da relação entre a quantidade de água requerida pela cultura e a quantidade total aplicada pelo sistema a fim de suprir essa necessidade (KOECH e LANGAT, 2018; ADEYEMI et al., 2018). Existem vários métodos ou critérios para estabelecer esquemas de irrigação, tais como: relacionar a evapotranspiração da cultura com a evapotranspiração potencial (OLIVEIRA et al., 2003); evaporação em Tanque Classe A (ARAÚJO et al., 2012); teor de água no solo (HEDLEYA et al., 2013); imagens termais (BELLVERT et al., 2016); sensoriamento remoto por vant (BELLVERT et al., 2014); lâminas de irrigação fixas baseado no estágio de desenvolvimento da cultura (FARES e ALVA, 2000).

Nas condições edafoclimáticas encontradas na região dos cerrados, a definição de um sistema de irrigação automático deve incluir o máximo de variáveis possíveis de modo a reduzir o risco de estresse hídrico devido à aplicação insuficiente, bem como de

encharcamento do solo causado por aplicação excessiva. A integração de medidas ambientais, do solo e da cultura, tais como: temperatura e umidade relativa do ar, temperatura, umidade e condutividade elétrica do solo e evapotranspiração da cultura servem como importantes subsídios para a realização de um manejo mais racional. Apesar de vários métodos de estimativa do consumo hídrico já terem se consagrado na literatura científica, os métodos diretos e que envolvem o monitoramento local de parâmetros da planta, do clima e principalmente do solo têm sido relatados como de maior eficiência (VENANCIO et al., 2019; SANTOS et al., 2019). Neste cenário, uma importante informação para o correto manejo da irrigação tem sido a umidade do solo (GAVA et al., 2016).

Dentre os diversos métodos utilizados para a determinação da umidade do solo, predominam o método gravimétrico (SHARMA et al., 2018; MAJHI e SARKAR, 2019) e a tensiometria (SINGH et al., 2019; MAJHI e SARKAR, 2019). Porém, os entraves operacionais para coleta e processamento das amostras, a indisponibilidade de equipamentos e infraestrutura laboratorial em determinadas localidades, bem como o desenvolvimento de áreas tecnológicas como a “internet das coisas” tem impulsionado o surgimento de aplicações baseadas em sensores eletrônicos, capazes de medirem instantaneamente, registrarem e ainda transmitirem remotamente o nível de umidade do solo (CÁSSARO, et al. 2020; SANTOS NETO, et al., 2020).

Embora sejam bastante precisos, os sensores eletrônicos de umidade de solo demandam uma calibração em condições de campo para que o valor lido seja condizente com o real (SENA et al., 2020). Ademais, a distribuição dos tipos de solos nas áreas agrícolas não é uniforme (SANTOS NETO, et al., 2020), ensejando que curvas de calibração para diferentes tipos de solo sejam desenvolvidas para o uso correto do equipamento.

Assim, este trabalho foi desenvolvido com o objetivo de avaliar e calibrar três tipos de sensores eletrônicos de umidade do solo para uso em quatro classes de solo, através da metodologia gravimétrica.

2. OBJETIVO

2.1 Objetivo geral

Comparar a precisão e a exatidão de três tipos de sensores eletrônicos de umidade do solo em relação à metodologia gravimétrica, por meio da avaliação e calibração desses sensores em quatro classes de solo distintas.

2.2 Objetivos específicos

- Avaliar o desempenho de três tipos de sensores eletrônicos de umidade do solo em relação à medição da umidade do solo.
- Determinar a calibração necessária para cada tipo de sensor eletrônico em relação às diferentes classes de solo.
- Comparar os resultados obtidos pelos sensores eletrônicos com os valores de umidade do solo obtidos por meio da metodologia gravimétrica.
- Avaliar a viabilidade e eficiência dos sensores eletrônicos como ferramentas para monitoramento da umidade do solo e manejo da irrigação em diferentes tipos de solo.
- Fornecer informações e diretrizes para o uso adequado dos sensores eletrônicos de umidade do solo em sistemas de irrigação na região dos cerrados do Brasil central.

3. MATERIAL E MÉTODOS

O experimento foi conduzido no Laboratório de Pesquisas do Instituto de Ciências Agrárias da Universidade Federal dos Vales do Jequitinhonha e Mucuri (ICA/UFVJM), na cidade de Unaí – MG. Foram utilizados no experimento os sensores HidroFarm, Vergtrug Care e PMS710 (Figura 1) e quatro classes de solos classificados (GONÇALVES; EMBRAPA SOLOS, 2018) como sendo Latossolo Vermelho Distrófico típico com horizonte A moderado, textura muito argilosa, caulínítico (LVd1), Latossolo Amarelo Distrófico plintossólico, horizonte A moderado, textura muito argiloso caulínítico (LAd), Nitossolo Vermelho Distrófico típico, horizonte A proeminente, textura muito argilosa, caulínítico (NVd) e Cambissolo Háptico Tb Eutrófico típico, horizonte A moderado, textura argilosa, caulínítico (CXbe2).



Figura 1. Sensores de umidade do solo utilizados. (a) Sensor HidroFarm; (b) Sensor Vergtrug Care; (c) Sensor PMS710.

As amostras de solo foram coletadas na Fazenda Experimental Santa Paula (FESP), pertencente ao Instituto de Ciências Agrárias da Universidade Federal dos Vales do Jequitinhonha e Mucuri – ICA/UFVJM, situado no município de Unaí-MG, a latitude S 16°26'11.5" e longitude W46°53'55.4"W, com altitude média de 622 m e relevo plano. Numa região do bioma cerrado, o clima local de acordo a classificação de Köppen é do tipo Aw – tropical com estação seca de inverno, 23.5 °C é a temperatura média, enquanto

a média anual de pluviosidade é de 1275 mm.

Foram coletadas 3 amostras indeformadas em cilindros de PVC com 200 mm de altura e 112 mm de diâmetro interno, de forma a representar a camada de 0 a 200 mm de profundidade em cada uma das classes de solo. Após a coleta as amostras foram devidamente acondicionadas para transporte e encaminhadas para o Laboratório de Pesquisas do ICA/UFVJM. Em laboratório, com o intuito de garantir que a massa de material de solo estivesse contida apenas no interior dos cilindros, o excedente de material foi removido. Após o preparo as amostras foram submetidas individualmente a saturação lenta por capilaridade com água destilada.

Depois de saturada a amostra de solo foi pesada e então os sensores foram inseridos e mantidos durante todo o período de avaliação, a face inferior das amostras foi colocada sobre uma coluna de areia para tornar o processo de secagem homogêneo. As amostras foram mantidas no laboratório a uma temperatura constante de 25 °C, as leituras de umidade foram realizadas diariamente durante 7 dias, no mesmo horário, em três momentos do dia às 8 horas, 12 horas e 18 horas. Quando as medições de umidade no instrumento foram adquiridas, as colunas também foram pesadas para obter a umidade gravimétrica (Figura 2).



Figura 2. Amostra indeformada, em processo de pesagem após leituras dos sensores.

A umidade gravimétrica foi obtida de acordo com a equação $\mu = 100 \times (Mu - Ms / Ms)$. Em que: μ – umidade com base em massa, %; Mu – massa de água, gramas; Ms – massa do solo seco, gramas; 100 – fator de conversão para porcentagem.

A densidade do solo (D_s) foi calculada ao final das avaliações dividindo-se a massa de solo seco pelo volume total de solo no cilindro volumétrico após secagem das amostras em estufa a 105 °C por 24 horas. Assim, usando a umidade gravimétrica, foi possível calcular a umidade volumétrica utilizando a equação: $\theta = \mu * D_s$. Onde: - θ umidade baseada em volume; %; - μ umidade baseada em massa, %; D_s - densidade do solo, $g\ cm^{-3}$. As curvas de correlação entre as leituras do sensor e as umidades volumétricas reais determinadas pela razão área-massa-volume foram ajustadas. O programa Matlab (The MathWorks, MA, USA) versão R2015 foi utilizado para análise estatística da correlação.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os resultados que permitiram a calibração do equipamento para os diferentes tipos de solo são apresentados abaixo, iniciando pelas características físico-hídricas das colunas de calibração para os solos do tipo LVd1, LAd, NVd e CXbe2, presentes na Tabela 1.

Símbolo	Densidade (g cm ³)	Umidade Gravimetria (g g ⁻¹)	Umidade Volumétrica (g cm ⁻³)
LVd1	1,26	39,2	49,4
LAd	1,2	41,7	50
NVd	1,22	39,3	47,9
CXbe2	1,32	34,4	45,4

Tabela 1. Valores médios de densidade do solo (g cm⁻³), umidade gravimétrica (g g⁻¹) e umidade volumétrica (g cm⁻³) das colunas de solo utilizadas para a calibração em diferentes classes de solo.

O conteúdo volumétrico de água aferido pelos sensores HydroFarm, Vergtrug Care e PMS710 para os solos do tipo LVd1, LAd, NVd e CXbe2 são plotados na Figura 3 em função do teor de água volumétrico medido.

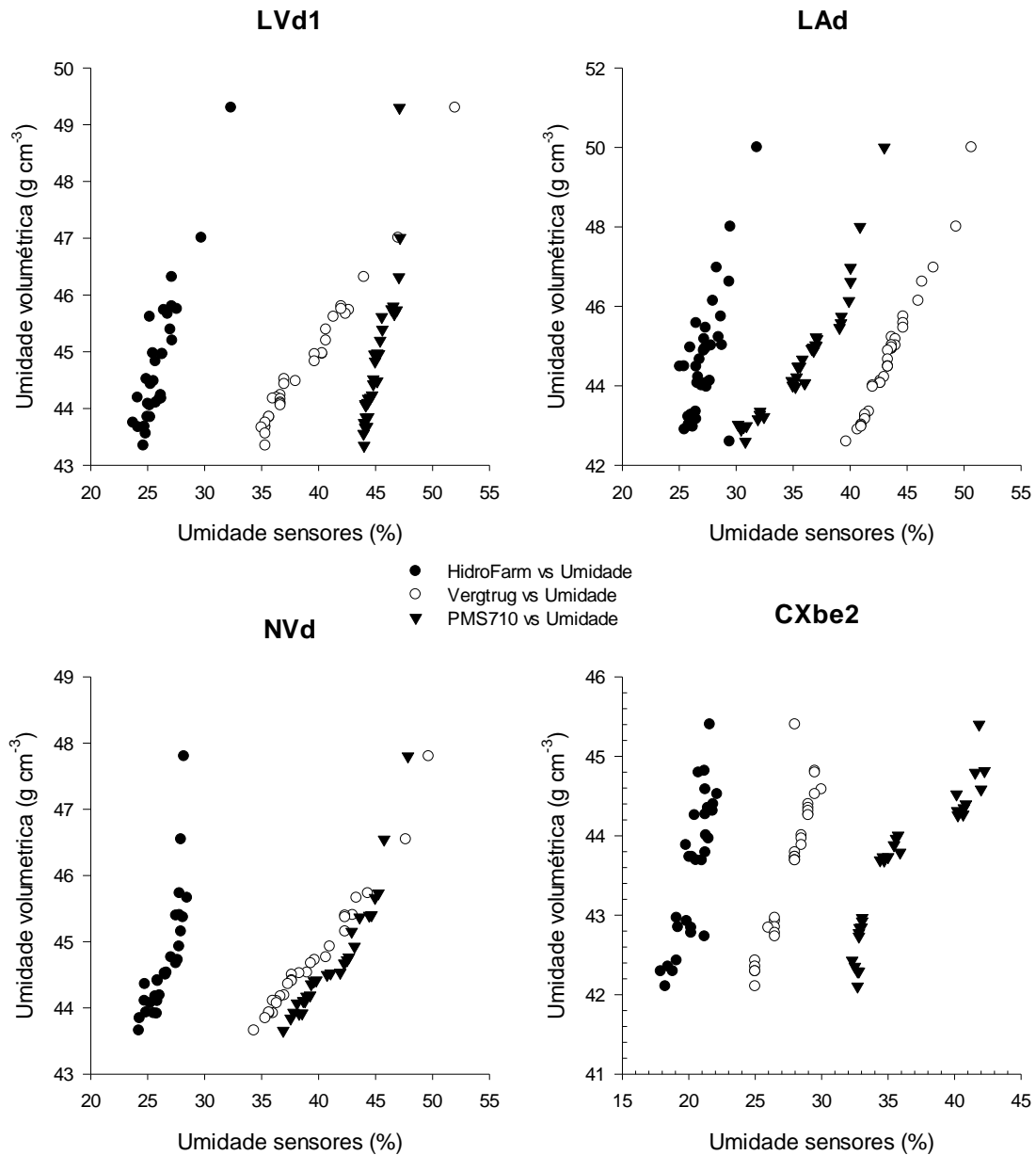


Figura 3. Conteúdo volumétrico de água aferido por diferentes sensores. (a) LVD1; (b) LAd; (c) NVd e (d) CXbe2.

A análise dos diferentes sensores para um mesmo tipo de solo indica que os equipamentos possuem baixo grau de concordância entre si, isto é, para cada tipo de solo é recomendável o uso de apenas um modelo de sensor. (Nagahage et al., 2019) argumentam que o desempenho de sensores para monitoramento de umidade de solo é dependente do material constituinte do solo. Essa abordagem explicaria a variabilidade dos sensores para cada tipo de solo analisado neste trabalho, principalmente a identificada em LVd1 e LAd.

O estudo desenvolvido por (Gava et al. 2016) reforça os argumentos (Nagahage et al., 2019). Os autores identificaram que sensores capacitivos para monitoramento da umidade aplicados em solos argilosos subestimam a umidade real em aproximadamente 8%, com as principais diferenças ocorrendo em mensurações próximo à capacidade de campo. Quando aplicado em solos arenosos, devido à drenagem mais rápida o sensor capacitivo subestima a umidade real em torno de 4%. (CARVALHO, C. et al. 2020)

Considerando os valores lidos pelos sensores, as funções de calibração ajustadas para determinação do conteúdo volumétrico de água derivado dos três sensores para os diferentes tipos de solos e seus parâmetros de desempenho são apresentados na Tabela 2.

Tabela 2. Medidas de desempenho da calibração estática dos sensores de umidade em diferentes solos

Sensor	Tipo de solo	Curva de calibração	R2	RMSE	P-valor	Pearson	Kendall
HidroFarm	LVd1	$y = 0.015x^2 - 0.14x + 39$	0.85	0.492	0,08	0,32	0,59
Vergtrug Care	LVd1	$y = -0.0021x^3 + 0.28x^2 - 12.04x + 210.4$	0.92	0.36	0,00	0,90	0,82
PMS710	LVd1	$y = 0.07x^2 - 5.3x + 143$	0.81	0.55	0,00	0,90	0,89
HidroFarm	LAd	$y = 0.1039x^2 - 5.29x + 104.4$	0.57	1.05	0.00	0.72	0.48
Vergtrug Care	LAd	$y = 0.6538x + 16.3$	0.98	0.22	0.00	0.99	0.96
PMS710	LAd	$y = 0.004329x^3 - 0.435x^2 + 14.84x - 127.9$	0.97	0.29	0.30	0.18	0.86
HidroFarm	NVd	$y = 0.06012x^3 - 4.567x^2 + 115.8x$	0.72	0.52	0.00	0.79	0.80
Vergtrug Care	NVd	$y = 0.001135x^3 - 0.1352x^2 + 5.551x - 33.54$	0.99	0.09	0.00	0.98	0.97
PMS710	NVd	$y = 0.004837x^3 + 0.5825x^2 + 23.55x - 275.2$	0.98	0.14	0.00	0.94	0.97
HidroFarm	CXbe2	$y = -0.01003x^2 + 1.039x + 26.61$	0.68	0.53	0.00	0.82	0.62
Vergtrug Care	CXbe2	$y = -0.001492x^2 + 0.6069x + 28$	0.87	0.34	0.00	0.93	0.85
PMS710	CXbe2	$y = 0.009451x^3 - 1.078x^2 + 41x - 476.3$	0.95	0.22	0.00	0.92	0.88

Sena et al. (2020) argumentam que curvas de calibração de sensores de umidade de solo devem ser personalizadas considerando não só o tipo, mas também a camada de solo. Influenciada pelo manejo e trânsito de máquinas, a camada do solo pode apresentar variações consideráveis na densidade do solo, induzindo o sensor a realizar leituras falhas apesar da curva de calibração ser específica para o tipo de solo estudado (SENA et al. 2019).

O teste de significância estatística dos parâmetros revela que apenas o sensor HidroFarm e o sensor PMS710 não apresentaram resultados estatísticos significativos. Os valores de P foram maiores que o nível de significância padrão de 0.05, para os solos LVd1 (0.08) e LAd (0.30), respectivamente.

De acordo com o coeficiente de correlação de Kendall, todos os tratamentos (sensores e solos) apresentaram correlações significativamente diferentes de zero. O destaque é para o sensor HidroFarm, o qual obteve os menores valores de correlação para todos os solos analisados.

As curvas de calibração obtidas para os sensores apresentaram coeficientes de determinação variando entre 0.57 e 0.99. O coeficiente de determinação descreve o quanto o modelo é capaz de explicar o fenômeno em estudo, assim, quanto mais próximo ao valor 1 (um), melhor é o ajuste do modelo ao conjunto de dados, aumentando a precisão e exatidão dos sensores (MARTINS et al., 2018).

5. CONCLUSÃO

A utilização dos sensores de umidade de solo para estimativa do teor de água em solos agrícolas possibilita maior eficiência no manejo da irrigação.

Os sensores avaliados neste trabalho apresentam características específicas, demandando curvas de calibração personalizadas tanto para o modelo do sensor, quanto para a classe de solo. Em relação ao desempenho das curvas de calibração dos sensores, conclui-se que com exceção do sensor HidroFarm, os sensores Vergtrug Care e PMS710 podem ser adotados para estimativa de umidade volumétrica em Latossolo Vermelho Distrófico, Latossolo Amarelo Distrófico, Nitossolo Vermelho Distrófico e Cambissolo Háplico, desde que respeitada a curva de calibração específica para a classe de solo.

6. REFERÊNCIAS

ADEYEMI, O. et al. Dynamic Neural Network Modelling of Soil Moisture Content for Predictive Irrigation Scheduling. *Sensors*, v. 18, n. 10, p. 3408, 11 out. 2018.

ARAÚJO, H. F. et al. Produtividade e análise de indicadores técnicos do maracujazeiro-amarelo irrigado em diferentes horários. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, v. 16, n. 2, p. 159-164, 2012.

BELLVERT, J. et al. Mapping crop water stress index in a “Pinot-noir” vineyard: comparing ground measurements with thermal remote sensing imagery from an unmanned aerial vehicle. *Precision Agriculture*, v. 15, n. 4, p. 361–376, 8 nov. 2013.

BELLVERT, J. et al. Airborne Thermal Imagery to Detect the Seasonal Evolution of Crop Water Status in Peach, Nectarine and Saturn Peach Orchards. *Remote Sensing*, v. 8, n. 1, p. 39, 5 jan. 2016.

BWAMBALE, E.; ABAGALE, F. K.; ANORNU, G. K. Smart irrigation monitoring and control strategies for improving water use efficiency in precision agriculture: A review. *Agricultural Water Management*, v. 260, p. 107324, fev. 2022.

CARVALHO, C. et al. Calibração do sensor capacitivo de umidade do solo EC-5 em resposta a granulometria do solo. 1 jan. 2020.

CÁSSARO, F. A. M. et al. Utilização de um sensor de umidade para o Arduino na determinação da curva característica de retenção de água por um sistema poroso. *Pesquisa em Ensino de Física - Revista Brasileira de Ensino de Física*, v. 42, 2020.

DAVIDSON, E. H. et al. More Food, Low Pollution (Mo Fo Lo Po): A Grand Challenge for the 21st Century. *Journal of Environmental Quality*, v. 44, n. 2, p. 305–311, 1 mar. 2015.

EUGÊNIA GRAÇA MARTINS, M. Coeficiente de determinação. *Revista de Ciência Elementar*, v. 6, n. 1, 30 mar. 2018.

FARES, A.; ALVA, A. K. Evaluation of capacitance probes for optimal irrigation of citrus through soil moisture monitoring in an entisol profile. *Irrigation Science*, v. 19, n. 2, p. 57–64, 31 jan. 2000.

GAVA, R.; SILVA, E. E.; BAIO, F. H. R. Calibração de sensor eletrônico de umidade em diferentes texturas de solo. *Brazilian Journal of Biosystems Engineering*, v. 10, n. 2, p. 154-162, 2016.

GONÇALVES, H.; EMBRAPA SOLOS. Sistema brasileiro de classificação de solos. Brasília, Df: Embrapa, 2018.

HAMIDOV, A.; HELMING, K. Sustainability Considerations in Water–Energy–Food Nexus Research in Irrigated Agriculture. *Sustainability*, v. 12, n. 15, p. 6274, 4 ago. 2020.

HEDLEY, C. B. et al. Soil water status and water table depth modelling using electromagnetic surveys for precision irrigation scheduling. *Geoderma*, v. 199, p. 22–29, maio 2013.

KOECH, R.; LANGAT, P. Improving Irrigation Water Use Efficiency: A Review of Advances, Challenges and Opportunities in the Australian Context. *Water*, v. 10, n. 12, p. 1771, 2 dez. 2018.

MAJHI, T.; SARKAR, N. Study on soil moisture variations in responding to Tensiometer and soil moisture meter with respect to gravimetric method. *International Journal of Chemical Studies*, 2019.

NAGAHAGE, E. A. A. D.; NAGAHAGE, I. S. P.; FUJINO, T. Calibration and Validation of a Low-Cost Capacitive Moisture Sensor to Integrate the Automated Soil Moisture Monitoring System. *Agriculture*, v. 9, n. 7, p. 141, 1 jul. 2019.

OLIVEIRA, R. A. et al. Coeficientes de cultura da cenoura nas condições edafoclimáticas do Alto Paranaíba, no Estado de Minas Gerais. Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental, v. 7, n. 2, p. 280-284, 2003.

SANTOS NETO, S. M. et al. Performance e calibração de um sensor tipo TDR em solos do estado de Pernambuco, Brasil. Revista AIDIS de Ingeniería y Ciencias Ambientales: Investigación, desarrollo y práctica, vol. 13, no. 1, p. 33-47, abril de 2020.

SENA, C. C. R. et al. Calibração do sensor de umidade do solo DSMM500 em latossolo vermelho distrófico. Gl. Sci Technol, Rio Verde, v. 12, n. 02, p. 141-151, mai/ago. 2019.

SHARMA, P.; KUMAR, D.; SRIVASTAVA, H. Assessment of Different Methods for Soil Moisture Estimation: A Review. Journal of Remote Sensing & GIS, v. 9, p. 57-73, 2018.

SING, A. K. et al. Soil Moisture Sensing Techniques for Scheduling Irrigation. ago. 2019.

VENANCIO, L. P. et al. Evapotranspiração de cultura: uma abordagem dos principais métodos aplicados às pesquisas científicas e na agricultura. 16 dez. 2019.

VOS, R.; BELLÙ, L. G. Global Trends and Challenges to Food and Agriculture into the 21st Century. p. 11-30, 1 jan. 2019.

XU, H. et al. Future increases in irrigation water requirement challenge the water-food nexus in the northeast farming region of China. Agricultural Water Management, v. 213, 2019.