

Sete Lagoas, MG / Novembro, 2024

Protocolo para a calibração e a aferição de sensores de umidade de solo

João Herbert Moreira Viana

Pesquisador, Embrapa Milho e Sorgo, Sete Lagoas, MG.

Embrapa Milho e Sorgo

Rodovia MG 424, KM 65
Caixa Postal 151
35701-098 Sete Lagoas, MG
<https://www.embrapa.br/milho-e-sorgo>
<https://www.embrapa.br/fale-conosco/sac>

Comitê Local de Publicações

Presidente

Maria Marta Pastina

Secretário-executivo

Antônio Carlos de Oliveira

Membros

*Cláudia Teixeira Guimarães,**Mônica Matoso Campanha,**Roberto dos Santos Trindade e**Maria Cristina Dias Paes*

Edição executiva

*Márcio Augusto Pereira do**Nascimento*

Revisão de texto

Antonio Claudio da Silva Barros

Normalização bibliográfica

*Rosângela Lacerda de Castro**(CRB-6/2749)*

Projeto gráfico

Leandro Sousa Fazio

Diagramação

*Márcio Augusto Pereira do**Nascimento*

Publicação digital: PDF

Todos os direitos
reservados à Embrapa.

Resumo – A calibração dos sensores de umidade de solo é essencial para a utilização dos dados produzidos por eles. Na calibração, os resultados das medidas dos sensores em teste são comparados aos de um método-padrão, como o método gravimétrico. Neste trabalho, foram avaliados os resultados de umidade do sensor ATV-S01, por comparação com medidas diretas de umidade em bases gravimétrica e volumétrica; foram desenvolvidos modelos de calibração específicos para os solos brasileiros, a serem incorporados ao sistema de monitoramento de pivôs; e foi avaliado o tempo de resposta do sensor. Foram montados dois ensaios com três repetições, um para a calibração estática dos sensores e outro para a avaliação dinâmica do processo de leitura sob tensão de água controlada. Foram usadas amostras de calibração de dois grupos, um com variação de granulometria e outro com variação de composição elementar. O sensor foi inserido verticalmente nas amostras, ligado ao notebook, e a aquisição dos dados se deu por um programa feito para este fim. Os resultados foram o desenvolvimento de um modelo mais simples para correção dos dados brutos, com base apenas nas leituras do sensor, e modelos mais completos, que incorporam dados adicionais dos atributos dos solos, com melhores resultados em termos de acurácia. O tempo de resposta do sensor medido foi rápido e adequado a seu objetivo.

Termos para indexação: umidade gravimétrica, umidade volumétrica, regressão linear *stepwise*, regressão linear *bootstrap*.

Protocol for the calibration and verification of soil moisture sensors

Abstract – The calibration of soil moisture sensors is essential for the use of its data. In that process, the results for the measurements of the tested sensors are compared to the standard method, the gravimetric one. In this work, the results of the moisture measurements for the ATV-S01 sensor were evaluated with direct measurements by the gravimetric and volumetric methods; calibration models were developed specifically for

the Brazilian soils, to be used in the pivot monitoring system and the sensor response time was evaluated. Two experiments were performed, one for the static calibration of the sensors and another for the dynamic evaluation of the data acquisition under controlled water tension. Two groups of samples were used, one with varying texture and another with varying elemental composition. The sensor was vertically inserted in the soil samples, connected to the laptop and a software specifically developed for that purpose acquired the data. The results were a simpler model for the raw sensor data, and more comprehensive models that use additional soil information, with more accurate results. The sensor response time was fast and adequate for its purposes.

Index terms: gravimetric moisture, volumetric moisture, stepwise linear regression, bootstrap linear regression.

Introdução

A aferição e a calibração dos sensores de umidade de solo são operações essenciais para a utilização dos dados produzidos por eles. Os procedimentos de calibração permitem avaliar o comportamento dos sensores, em sua maioria importados e desenvolvidos para solos diversos dos brasileiros, e gerar modelos que permitem a correção dos resultados, além de estimar os intervalos de confiança para o uso seguro dos dados produzidos. Características específicas dos solos tropicais brasileiros, como alto teor de ferro, alto teor de argila e expansibilidade, exigem a calibração dos sensores para obtenção da acurácia adequada (Villwock et al., 2004).

Nos estudos de calibração, os resultados das medidas dos sensores em teste são comparados aos de um método-padrão, como o método gravimétrico de determinação de umidade no solo (Teixeira et al., 2017). A partir desses resultados, se necessário, podem ser desenvolvidos modelos de ajustes para correção dos dados. Vários estudos indicam que, para as condições brasileiras, são necessários ajustes dos dados gerados por sensores de umidade de solo. Silva et al. (2012) mostraram que as calibrações de fábrica do sensor capacitivo *Delta Probe* não foram adequadas às condições de um Latossolo argiloso, mas foi possível ajustar equações de calibração aos dados. Serrarens et al. (2000) calibraram uma sonda TDR e ajustaram modelos lineares aos dados. Villwock et al. (2004) ajustaram um modelo cúbico polinomial para ajuste dos dados de calibração de um equipamento de TDR.

Lima et al. (2018) ajustaram modelos lineares e quadráticos para a calibração de um sensor capacitivo, realçando a necessidade desta calibração. Batista et al. (2016) usaram um modelo polinomial cúbico para a calibração dos dados de umidade de solo de uma sonda TDR. Leão et al. (2007) construíram um dispositivo para calibração de sensores de umidade do solo, a sua calibração e a determinação de suas principais propriedades, como precisão e cargas mínima e máxima. Santos et al. (2006) desenvolveram e testaram um sistema de pesagem de grande capacidade para utilização em gravimetria como método padrão de calibração de sensores de umidade do solo.

Este trabalho foi desenvolvido no âmbito do projeto Sistema para automatização do manejo de irrigação para pivôs centrais, e visa permitir o uso dos sensores de umidade de solo, integrados ao sistema em desenvolvimento, para monitoramento da umidade do solo sob os pivôs e para ativação da irrigação de forma otimizada, conforme as necessidades da cultura implantada.

Os objetivos deste trabalho foram:

- 1 – Aferir os resultados de umidade
- 2 – Desenvolver curvas de calibração específicas para os solos brasileiros, a serem incorporadas ao sistema de monitoramento de pivôs centrais, considerando diferentes cenários de disponibilidade de dados de solo.

Material e métodos

Foram montados dois ensaios: um para a calibração direta dos sensores e outro para a avaliação dinâmica do processo de leitura, sob tensão de água controlada. As amostras utilizadas para calibração foram divididas em dois grupos, um grupo com solos com a granulometria variando desde muito argilosa até arenosa (Tabela 1), e outro grupo, com variação dos teores de elementos principais (Tabela 2). Algumas das amostras foram coletadas na mesma área onde foram instalados os sensores para o teste inicial do sistema, sob um pivô central (Figura 1), para correção dos dados já em fase de coleta.

Para o primeiro ensaio de calibração direta de umidade de solo, amostras destorroadas (terra fina seca ao ar, TFSA) dos solos selecionados foram montadas em anéis de PVC de 330 mL (Figura 2B, fechados no fundo com tecido fino. Para cada solo, foram montadas três repetições. Nas amostras montadas, foi inserido o sensor de umidade verticalmente, de modo que a haste dele ficou completamente inserida no solo. O sensor foi ligado ao notebook por meio do cabo apropriado, e o programa de

leitura foi iniciado. Após a montagem, as amostras foram saturadas por capilaridade, e as leituras foram feitas após intervalos para secagem ao ar das amostras, segundo o protocolo de leitura esquematizado abaixo:

As pesagens foram feitas em balança analítica para obtenção da massa total da amostra, e as medidas de temperatura e de umidade foram tomadas

pelo sensor em avaliação. Foram tomadas dez leituras do sensor, para cada ponto de umidade. Ao final do ensaio de cada amostra, os anéis foram desmontados e foram determinados a massa seca em estufa a 105 °C da amostra e as dimensões internas de cada anel com um paquímetro. Com esses dados, foram calculadas as umidades em base gravimétrica e volumétrica, para comparação com as leituras do sensor, feitas em base volumétrica.

Protocolo de leitura

- 1) Saturar a amostra por capilaridade.
- 2) Retirar do pote e pesar na balança de duas casas.
- 3) Retornar ao pote e inserir o sensor.
- 4) Iniciar o programa com intervalo de 5 segundos.
- 5) Fazer 10 leituras do sensor na primeira repetição.
- 6) Retirar o sensor e colocar na próxima amostra. Repetir o item 5.
- 7) Retirar o sensor e colocar na última amostra. Repetir o item 5.
- 8) Fechar o programa e renomear o arquivo com a identificação da amostra e a data.
- 9) Colocar as amostras abertas na caixa para evaporar.
- 10) Tampar e aguardar 24 horas.
- 11) Retirar do pote e pesar na balança de duas casas.
- 12) Retornar ao pote e inserir o sensor.
- 13) Repetir os procedimentos de 4 a 12.

As leituras de umidade foram feitas da saturação até próximo da amostra seca ao ar, inicialmente, totalizando oito períodos de leitura de umidade.

Para o segundo ensaio de avaliação dinâmica do processo de leitura sob tensão, amostras indeformadas foram coletadas em anéis de PVC de 330 mL, fechados no fundo com tecido fino. As amostras com o sensor de umidade inserido verticalmente foram montadas sobre mesas de tensão em miniatura, e assentadas sobre balanças analíticas (Figura 3), e o conjunto foi ligado ao notebook por meio dos cabos apropriados. Após a montagem, as

amostras foram saturadas por capilaridade e, após um período de leitura, submetidas a tensões preestabelecidas por meio do aparato da mesa de tensão. A coleta contínua de dados foi feita pelo programa de leitura.



Figura 1. Locais de implantação dos sensores no pivô central da Embrapa Milho e Sorgo. Sete Lagoas, MG.

Tabela 1. Solos usados na calibração 1.

Amostra	Local de coleta	Areia (%)	Silte (%)	Argila (%)
Cerrado	Embrapa Milho e Sorgo, Sete Lagoas, MG	12	10	78
Estação	Embrapa Milho e Sorgo, Sete Lagoas, MG	33	16	51
Baiana	Embrapa Milho e Sorgo, Sete Lagoas, MG	21	37	43
Sensor 3	Embrapa Milho e Sorgo, Sete Lagoas, MG	41	32	27
Sensor 2	Embrapa Milho e Sorgo, Sete Lagoas, MG	50	26	25
TRI P07	Cocos, BA	88	1	12
Ver 02	Cocos, BA	97	1	3

Tabela 2. Solos usados na calibração 2.

Amostra	Local de coleta	Ataque sulfúrico (%)					Granulometria (%)			
		SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	TiO ₂	P ₂ O ₅	Areia grossa	Areia fina	Silte	Argila
SR	Santa Rosa	3,9	19,1	3,6	4	0,05	18	19	11	53
SG	São Gotardo	4,4	24,7	15,4	3,7	0,12	3	3	12	82
PM	Patos de Minas	2,4	12,5	37,9	15,2	0,89	13	13	38,6	35
NL	Nova Lima	0	7,1	60,5	2,8	0,13	6	20	42	22

Sensor

Foi utilizado o sensor ATV-S01 (Tabela 3), fornecido pela empresa Ativa, a ser utilizado em conjunto com o sistema de coleta e envio de dados do projeto (Figura 2). Para os ensaios, o sensor foi acoplado

a um cabo fabricado pela Ativa e conectado a um notebook (Figura 3). A coleta dos dados foi feita por um programa desenvolvido para esse fim pela Ativa (Figura 4).

Tabela 3. Especificações técnicas do sensor, conforme material técnico do fornecedor.

Especificações técnicas	Item	
	Umidade	Temperatura
Faixa	0% (m ³ /m ³) a 100% (m ³ /m ³)	-30 °C a +70 °C
Acurácia	±3% (0% – 50%)	±0.3 °C
Sinal	4mA–20 mA, 0Va -V, RS485 opcional	
Tempo de resposta	< 1s	
Fonte	5 VDC, 12V a 24 VDC	
Área de medida efetiva	Centro do diâmetro da sonda 70 mm, altura do cilindro 70 mm	
Carcaça	ABS	
Dimensões	71 x 45 x 16 mm (sonda: diâmetro 2 mm comprimento 55 mm)	
Temperatura de operação	-40 °C a +80 °C	
Proteção de entrada	IP68	
Estocagem	10°C a 60 °C e 20% a 90% de umidade relativa	
Material da sonda	Aço inox 316 L	

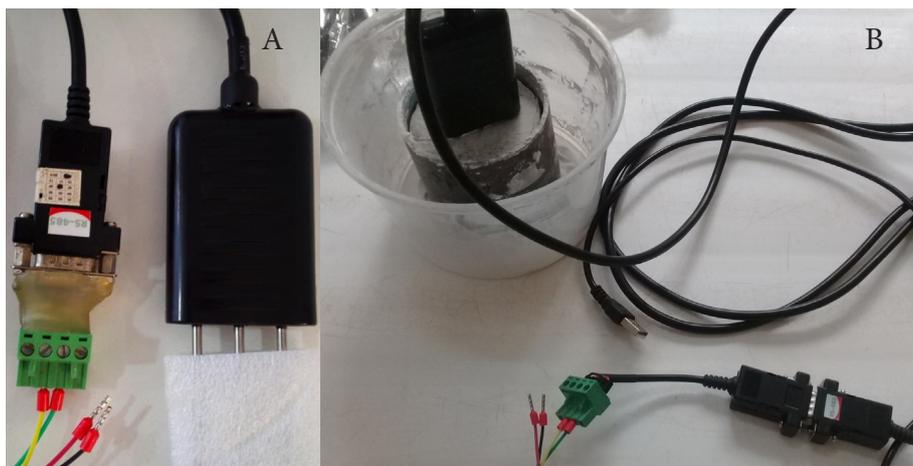


Figura 2. Sensor ATV-S01 acoplado ao cabo de dados (A) e sensor instalado no anel com a amostra de solo (B).

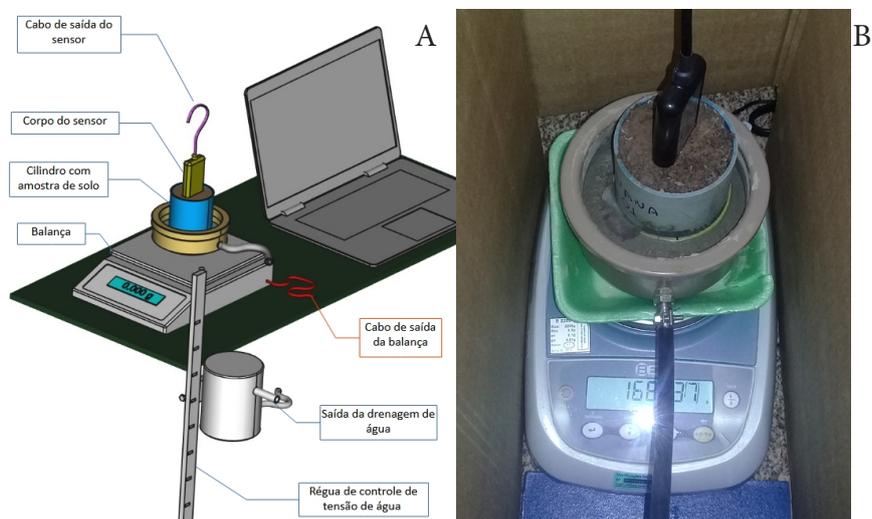


Figura 3. Esquema do dispositivo de medida simultânea de umidade, tensão e peso das amostras (A) e imagem da instalação (B).

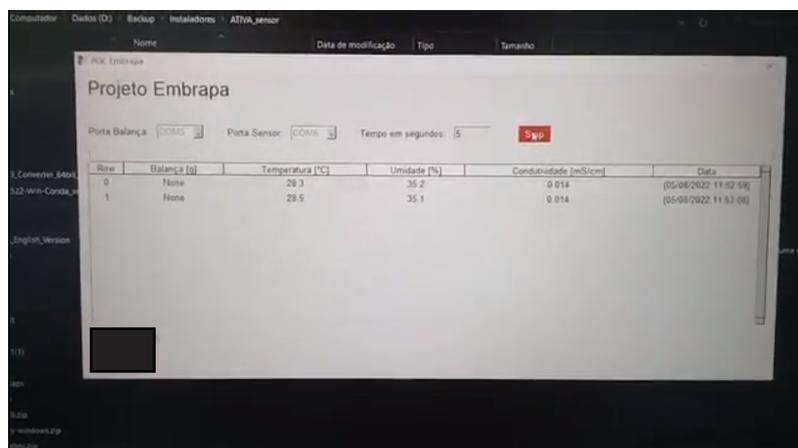


Figura 4. Interface desenvolvida para aquisição dos dados.

Tabela 4. Equações ajustadas dos modelos.

Número	Modelo	Equação	R ²
1	regressão linear simples geral	$UP (%) = 6,11 + 1,24 \times US$	0,786
2	regressão linear stepwise com dados de solo	$UP (%) = 12,719 + ArG_argila \times (-1,76) + ArF_argila \times 2,23 + Sil_argila \times (8,65) + 1,24 \times US$	0,83
3	regressão linear bootstrap om dados de solo e temperatura	$UP (%) = 21,54 - 6,42 \times Sil_argila - 0,6 \times T + 1,3 \times US$	0,986
4	regressão linear stepwise com dados de granulometria e de composição elementar de solo	$UP (%) = 5,57 - 6,0 \times Sil_argila + 1,40 \times US$	0,951

US = umidade em base volumétrica medida pelo sensor;

UP (%) = umidade em base volumétrica corrigida; ArG_argila = razão de teores areia grossa/argila; ArF_argila = razão de teores areia fina/argila; Sil_argila = razão de teores silte/argila; T = temperatura (°C).

Foram desenvolvidas outras equações de regressão, que permitem incorporar informações dos solos e melhorar a qualidade do ajuste dos dados medidos. Uma equação de regressão linear (Equação 2) foi gerada pelo procedimento 'stepwise', com base nos

dados de granulometria de solo (Tabela 4), e que permite um ganho de acerto do modelo em relação à regressão geral, como o R² passando de 0,79 para 0,83 (Figura 6).

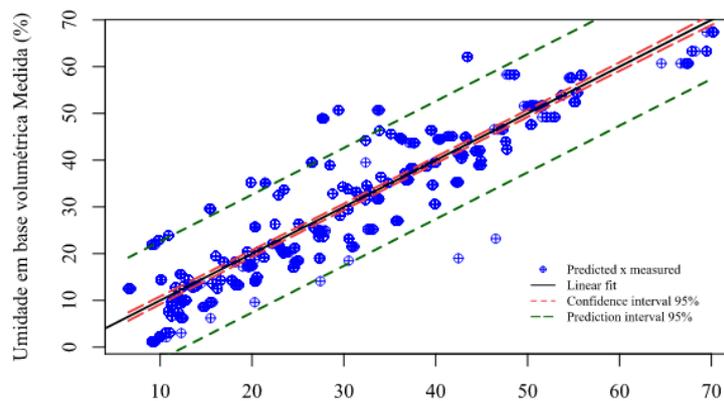


Figura 7. Gráfico da regressão linear *stepwise* com dados de granulometria de solo, com a umidade em base volumétrica predita em função da umidade medida.

O sensor utilizado mede também a temperatura do solo, que foi incorporada em um modelo de regressão linear pelo procedimento *bootstrap* (Equação 3), que incorpora os dados de granulometria de solo

(Tabela 4). Neste caso, o ganho de acerto do modelo em relação à regressão geral foi maior, com o R² passando de 0,79 para 0,97 (Figura 7).

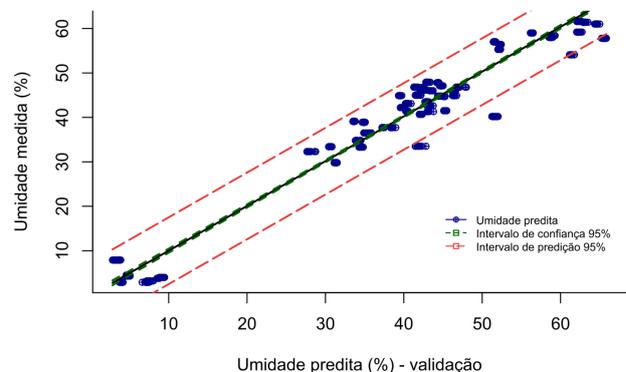
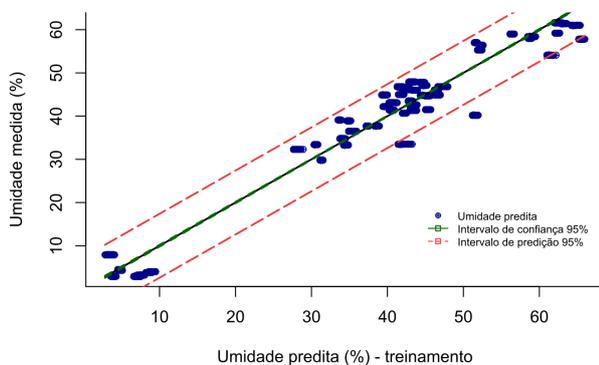


Figura 8. Gráficos da regressão linear *bootstrap*, para os dados de treinamento e validação, com dados de granulometria de solo e da temperatura medida pelo sensor, com a umidade em base volumétrica predita em função da umidade medida.

Foram também testados modelos de regressão incorporando os dados de composição elementar de outro grupo de amostras (Tabela 2), para avaliar se a variação dos teores de ferro total poderia interferir nas leituras do sensor (Villwock et al., 2004). Uma equação de regressão linear (Equação 4) foi gerada pelo procedimento *Stepwise*, com base nos dados de granulometria de solo e composição elementar

(Tabela 4). Esse procedimento testa o efeito da incorporação de variáveis ao modelo na melhoria do acerto. Os resultados indicaram que não houve ganho de acerto do modelo com a incorporação dos dados de composição, e a melhor equação gerada incorporou apenas os dados de granulometria, com o R^2 de 0,95, similar ao do outro conjunto de dados (Figura 8).

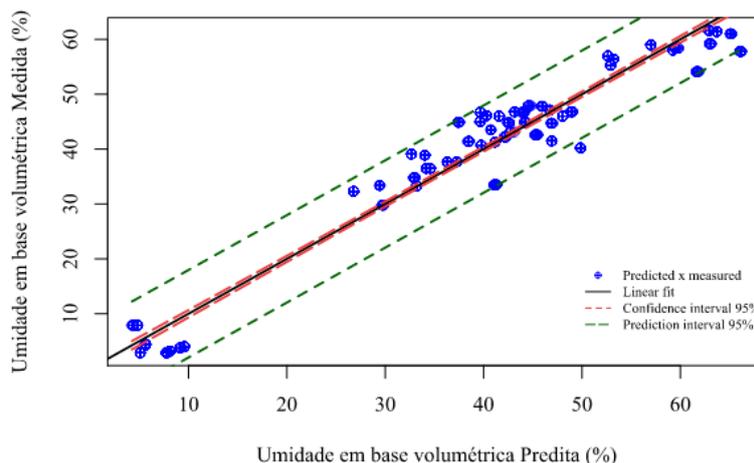


Figura 9. Gráfico da regressão linear *stepwise*, com dados de granulometria e de composição elementar de solo (ataque sulfúrico), com a umidade em base volumétrica predita em função da umidade medida.

Os ensaios feitos por Manieri et al. (2007) apontaram os erros-padrão das estimativas de 3% a 6% na calibração de laboratório e de 5% a 6% nos testes de campo, utilizando equações de calibração específicas por grupo de textura e com todos os solos em conjunto, respectivamente.

Ensaio de calibração dinâmicos

Esses ensaios avaliaram os tempos de resposta do sensor em relação à medida de referência por balança analítica medida simultaneamente, durante a aplicação de diferentes tensões de água por meio do aparato da mesa de tensão. Foram usadas amostras indeformadas, que preservam a estrutura do solo e permitem uma avaliação mais realista dos processos de transporte de água no solo. As tomadas de dados foram feitas com intervalos de meio minuto entre as leituras e se prolongaram até a aparente estabilização do peso das amostras. São apresentados os resultados da umidade normalizada, para poder comparar os resultados no tempo.

Os resultados indicam que o sensor responde rapidamente à aplicação da tensão que provoca a drenagem da amostra (Figuras 9 a 13), com

diferenças inferiores a um minuto entre as medidas do sensor e da balança, não significativas para os objetivos do uso dos sensores.

Para a tensão de 2 kiloPascais (kPa) (Figuras 9 a 11), os valores da umidade normalizada convergiram após cerca de 10 minutos do início do ensaio. Para a carga de 4 kPa, a convergência ocorreu após cerca de uma hora, e para a carga de 6 kPa, após cerca de cinco horas. Isso indica que são necessárias pelo menos algumas horas de equilíbrio para se considerar os resultados para fins de decisão, especialmente para a faixa mais seca de umidade do solo.

Cruz et al. (2010) avaliaram um sensor capacitivo e constataram que este apresentou alta velocidade de resposta (menos de 1 segundo) às variações da quantidade de água na amostra de solo. Também identificaram que este sensor apresentou maior sensibilidade à medida que se diminui o conteúdo de água no solo, sendo adequado para determinar o teor de água do solo de forma adequada.

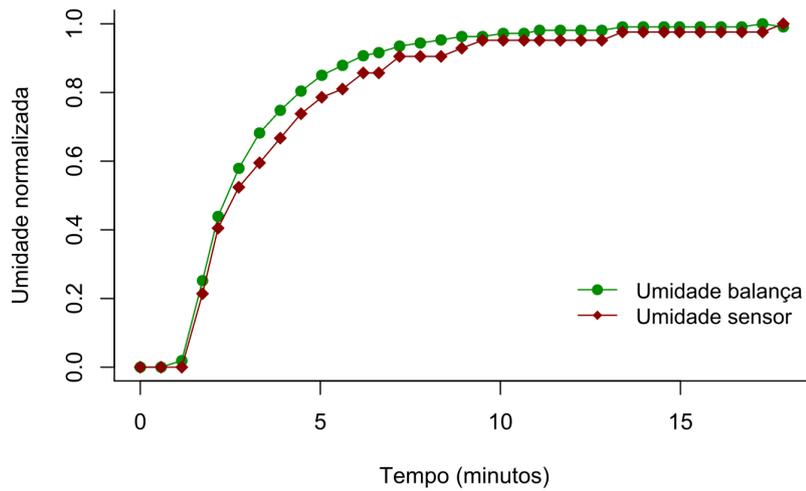


Figura 10. Ensaio de avaliação de tempo de resposta do sensor. Dados normalizados, amostra Cerrado 1, carga 20 cm, repetição 1.

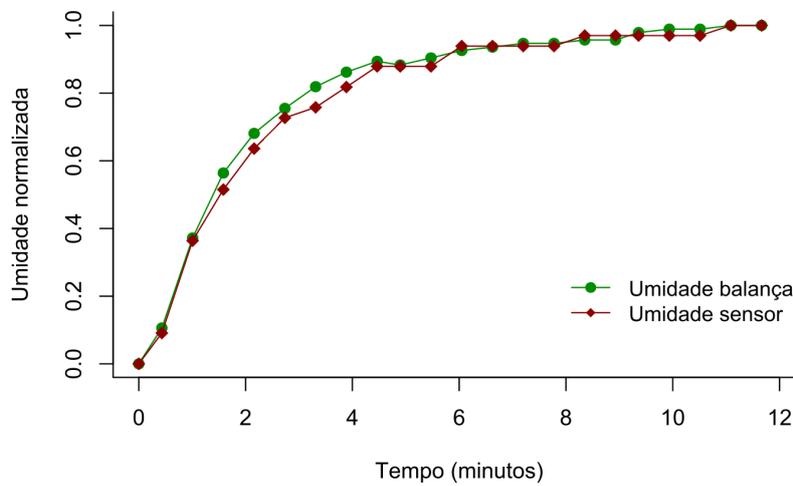


Figura 11. Ensaio de avaliação de tempo de resposta do sensor. Dados normalizados, amostra 'Cerrado 1', carga 20 cm, repetição 2.

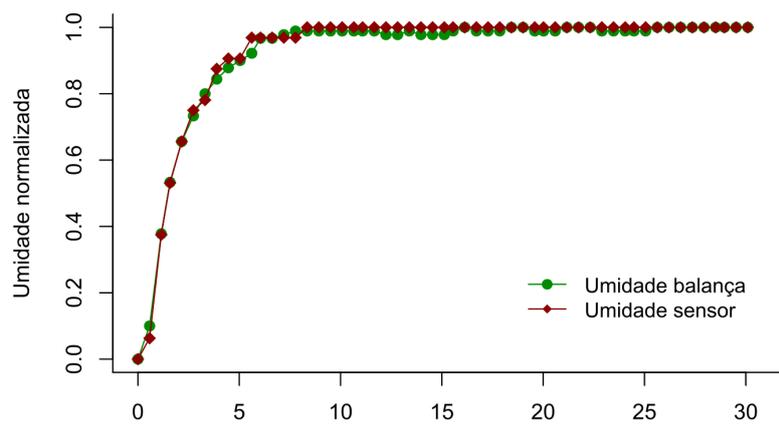


Figura 12. Ensaio de avaliação de tempo de resposta do sensor. Dados normalizados, amostra Cerrado 1, carga 20 cm, repetição 3.

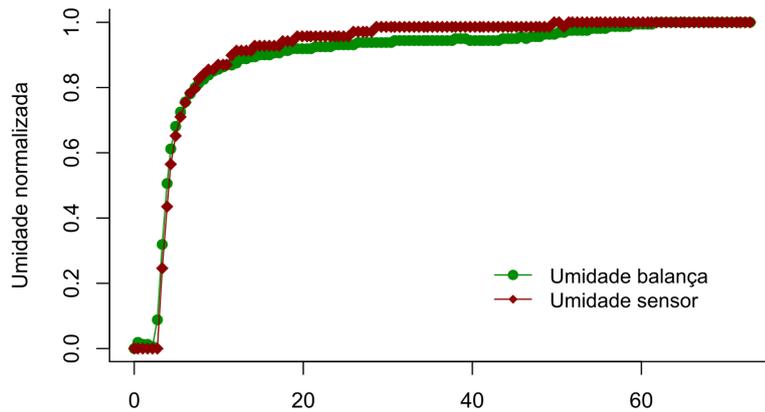


Figura 13. Ensaio de avaliação de tempo de resposta do sensor. Dados normalizados, amostra 'Cerrado 1', carga 40 cm, repetição 1

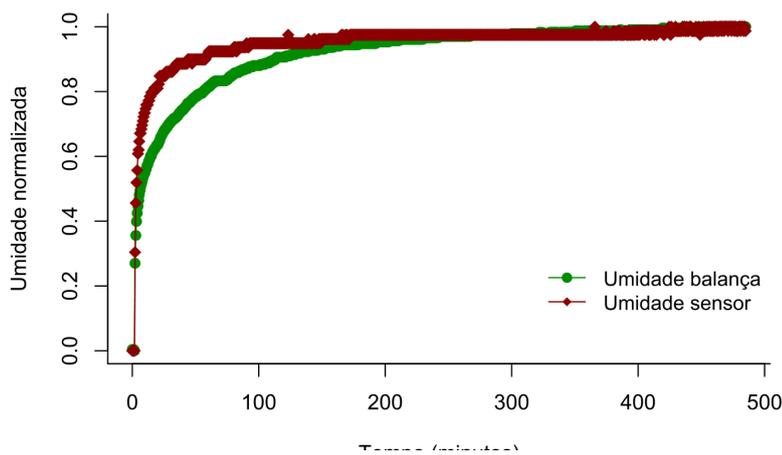


Figura 14. Ensaio de avaliação de tempo de resposta do sensor. Dados normalizados, amostra Cerrado 1, carga 60 cm, repetição 1.

Conclusões

Foi avaliado o desempenho de um sensor de solo para medição da umidade em base volumétrica, e, em função dos desvios encontrados em relação a amostras do controle de solos com diferentes propriedades, foram desenvolvidos modelos lineares para correção dos valores, para futura incorporação no sistema de manejo de irrigação. Foi desenvolvido um modelo simples, apenas para correção

dos dados brutos, e modelos mais completos, que incorporam dados adicionais de atributos medidos dos solos, com melhores resultados em termos de acurácia. Foi também avaliado o tempo de resposta do sensor, sendo constatado que o sensor tem um tempo de resposta rápido e adequado a seu objetivo.

Agradecimentos

Este trabalho foi feito no escopo do projeto “Sistema para automatização do manejo de irrigação para pivôs centrais” (30.21.90.061.00.00), uma parceria da Embrapa e da Ativa Soluções Tecnológicas Indústria e Comércio S/A. Atividade 30.21.90.061.00.02.003).

Referências

BATISTA, L. S.; COELHO, E. F.; PEREIRA, F. A. C.; SILVA, M. G.; GOMES FILHO, R. R.; GONÇALVES, A. A. Calibração de sonda artesanal de uso com TDR para avaliação de umidade de solos. **Revista Brasileira de Agricultura Irrigada**, v. 10, n. 2, p. 522-532, 2016. DOI: <https://doi.org/10.7127/rbai.v10n200388>.

CRUZ, T. M. L.; TEIXEIRA, A. S.; CANAFÍSTULA, F. J. F.; SANTOS, C. C.; OLIVEIRA, A. D. S.; DAHER, S. Avaliação de sensor capacitivo para o monitoramento do teor de água do solo. **Engenharia Agrícola**, v. 30, n. 1, p. 33-45, 2010. DOI: <https://doi.org/10.1590/S0100-69162010000100004>.

LEÃO, R. A. O.; TEIXEIRA, A. S.; CANAFÍSTULA, F. J. F.; MESQUITA, P. E. G.; COELHO, S. L. Desenvolvimento de um dispositivo eletrônico para calibração de sensores de umidade do solo. **Engenharia Agrícola**, v. 27, n. 1, p. 294-303, 2007. DOI: <https://doi.org/10.1590/S0100-69162007000100024>.

LIMA, J. G. A.; OLIVEIRA, A. S.; SOUZA, L. S.; SILVA, N. D.; VIANA, P. C. Calibration of a soil moisture sensor with disturbed and undisturbed soil samples from Bahia. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 22, n. 10, p. 696-701, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1590/1807-1929/agriambi.v22n10p696-701>.

MANIERI, J. M.; VAZ, C. M. P.; DE MARIA, I. C. Sonda espiral de TDR para a medida da umidade no perfil do solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 31, n. 2, p. 191-198, 2007. DOI: <https://doi.org/10.1590/S0100-06832007000200001>.

R CORE TEAM. **R**: a language and environment for statistical computing. Vienna, 2024. Disponível em: <http://www.R-project.org>. Acesso em: 22 jun. 2024.

SANTOS, R. M.; OLIVEIRA, A. S.; VELLAME, L. M.; BRANDÃO, F. J. C. Montagem e acurácia de um

sistema experimental de pesagem para calibração de sensores de umidade do solo. **Ciência e Agro-tecnologia**, v. 30, n. 6, p. 1162-1169, 2006. DOI: <https://doi.org/10.1590/S1413-70542006000600019>.

SERRARENS, D.; MACINTYRE, J. L.; HOPMANS, J. W.; BASSOI, L. H. Soil moisture calibration of TDR multilevel probes. **Scientia Agricola**, v. 57, n. 2, p. 349-354, 2000. <https://doi.org/10.1590/S0103-90162000000200024>.

SILVA, B. M.; OLIVEIRA, G. C.; SERAFIM, M. E.; SILVA JÚNIOR, J. J.; COLOMBO, A.; LIMA, J. M. Acurácia e calibração de sonda de capacitância em Latossolo Vermelho cultivado com cafeeiro. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 47, n. 2, p. 277-286, 2012. DOI: <https://doi.org/10.1590/S0100-204X2012000200017>.

TEIXEIRA, P. C.; DONAGEMMA, G. K.; FONTANA, A.; TEIXEIRA, W. G. (ed.). **Manual de métodos de análise de solo**. 3. ed. rev. e ampl. Brasília, DF: Embrapa, 2017. 573 p.

VILLWOCK, R.; TAVARES, M. H. F.; VILAS BOAS, M. A. Calibração de um equipamento TDR em condições de campo. **Irriga**, v. 9, n. 1, p. 82-88, 2004. DOI: <http://dx.doi.org/10.15809/irriga.2004v9n1p82-88>.



*Ministério da
Agricultura e Pecuária*