

Plataforma Digital Integrada a Rede de Sensores Sem Fio para Monitoramento Contínuo da Umidade do Solo

Antonio Carlos Silva¹, Rosane F. de Oliveira¹,
Luiz Carlos G. Sacramento Junior², Fabricio L. Silva²,
Valdinei M. de Oliveira², Cristiano de S. de Carvalho²
João Pedro Lorangeira¹, Marcos Bacis Ceddia¹, Diego Brandão²

¹Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro
Seropédica – RJ – Brasil

²Centro Federal de Educação Tecnológica Celso Suckow da Fonseca (CEFET/RJ)
Rio de Janeiro – RJ – Brasil

{diego.brandao}@cefet-rj.br, ceddia@ufrrj.br

Abstract. *Monitoring the spatial variability of soil moisture is essential for improving water use efficiency in agriculture. However, implementing a monitoring system requires a combination of technology (soil moisture sensors, signal conditioning, and processing, data transmission and processing methods) and low cost. Wireless soil moisture sensor networks (WSMN) have emerged in recent years. These systems encompass soil sensors, wireless communication technologies, and hardware platforms. In this paper, we present the development of a digital platform integrated with a wireless sensor network (WSN) for continuous soil moisture monitoring, focused on assisting decision-making regarding crop management in an agroecological production system.*

Resumo. *O monitoramento da variabilidade espacial da umidade do solo é essencial para melhorar a eficiência do uso da água na agricultura. No entanto, a implementação de um sistema de monitoramento exige a combinação de tecnologia (sensores de umidade do solo, condicionamento e processamento de sinais, métodos de transmissão e processamento de dados) e baixo custo. Nos últimos anos, surgiram redes de sensores de umidade do solo sem fio (WSMN). Basicamente, esses sistemas englobam sensores de solo, tecnologias de comunicação sem fio e plataformas de hardware. No presente trabalho apresentamos o desenvolvimento de uma plataforma digital integrada a rede de sensores sem fio (RSSF) para monitoramento contínuo de umidade do solo, focada em auxiliar a tomada de decisão referente ao manejo da cultura em um sistema de produção agroecológico.*

1. Introdução

A umidade do solo é uma variável de estado chave no sistema terrestre uma vez que controla a troca de água e energia entre a superfície terrestre e a atmosfera [OMITIDO]. O conteúdo de água no solo é o principal fator limitante ao desenvolvimento das plantas, afetando diretamente a agricultura [OMITIDO]. Segundo a Organização das Nações Unidas para a Alimentação e Agricultura (FAO, do inglês, *Food and Agriculture Organization*)[OMITIDO], 70% de toda a água consumida no mundo é destinada a atividade

agropecuária, a qual é utilizada principalmente na irrigação de lavouras. No caso do Brasil, que é um país com forte produção nesse setor da economia, esse percentual se eleva para 72%.

Segundo o relatório publicado pela Plataforma Brasileira de Biodiversidade e Serviços Ecossistêmicos (BPBES, do inglês, *Brazilian Platform on Biodiversity and Ecosystem Services*), em 2030, a demanda de água no Brasil terá aumentado 2000% em relação aos últimos 100 anos, o que possivelmente conduziria em uma nova crise hídrica no país [OMITIDO]. Considerando a elevada demanda e a crescente escassez de água fresca em muitas partes do mundo [OMITIDO], torna-se fundamental o desenvolvimento de técnicas de manejo da água que aumentem a eficiência do seu uso.

Neste contexto, a irrigação de precisão é uma técnica usada para melhorar a eficiência do uso da água em sistemas agrícolas. Basicamente, a irrigação de precisão consiste em aplicar água em quantidade ideal em uma determinada região, para isso torna-se necessário conhecer a variabilidade espacial e temporal da umidade do solo, pois a taxa de aplicação de água no solo apresenta significativa variação em uma área. Um dos principais benefícios da irrigação de precisão é exatamente usar menos água, uma vez que a aplicação de dose média (irrigação convencional), além de ser insuficiente ou excessiva para um local, acaba resultando em maior consumo como um todo, sobretudo em grandes campos de cultivo. Assim, para a aplicação da técnica de irrigação de precisão é imprescindível à adequada caracterização da variabilidade espacial e temporal da umidade do solo.

Neste contexto, este trabalho apresenta o desenvolvimento de um sistema de monitoramento da umidade do solo, que utiliza um conjunto de sensores com transmissores de dados sem fio de baixo custo e de consumo energético reduzido. O diferencial deste trabalho consiste na sua avaliação realizada em um ambiente de produção agroecológico real, que permite demonstrar a viabilidade de sua utilização para a agricultura de precisão.

O presente trabalho está organizado da seguinte maneira. Uma breve revisão sobre artigos focados em sistemas de monitoramento de umidade é apresentada na Seção 2. Em seguida, a Seção 3 apresenta a fundamentação teórica de sistemas de monitoramento, sensores e comunicação de dados. A Seção 4 apresenta o sistema proposto, descrevendo os elementos de *hardware* que o compõem. A avaliação experimental da proposta deste trabalho é apresentada na Seção 5. Por fim, a Seção 6 apresenta as considerações finais e trabalhos futuros.

2. Trabalhos Relacionados

O interesse no desenvolvimento de sistemas para monitoramento da umidade do solo cresceu consideravelmente nos últimos anos, surgindo inúmeras pesquisas sobre o assunto. Diversas pesquisas focam em sistemas para monitoramento de nutrientes e umidade [Kashyap and Kumar 2021, Lloret et al. 2021], outras pesquisas para o desenvolvimento da integração do monitoramento de umidade agregado a automatização do processo de irrigação [Pramanik et al. 2022].

Ainda existem trabalhos focando em aspectos tecnológicos como, sensores, comunicação de dados e avaliação de protocolos de comunicação [Deng et al. 2020, Ali et al. 2020]. Abordagens que utilizam técnicas de inteligência artificial sobre os dados oriundos de tais sistemas também vem sendo realizadas [Singh et al. 2020]. Por fim,

o trabalho aqui apresentado não visa realizar uma revisão exaustiva sobre artigos focados em sistemas para monitoramento de umidade do solo. Mais informações sobre o assunto podem ser obtidas em [Yu et al. 2021]. Salienta-se que o diferencial do presente trabalho em relação aos artigos avaliados consiste no estudo de caso realizado em uma fazenda agroecológica. Esse tipo de fazenda adota práticas que promovem a saúde do solo, a biodiversidade, o uso eficiente dos recursos naturais e o respeito às comunidades locais e aos trabalhadores. Tal ambiente apresenta desafios devido a diversidade de culturas, processo de adubação por meio de ciclo fechado de nutrientes, dentre outros, que acabam aumentando a variabilidade da umidade do solo[Araújo et al. 2007].

3. Fundamentação Teórica

Redes de Sensores Sem Fio (RSSF) contemplam além dos módulos de comunicação, os atuadores que são dispositivos capazes de adquirir dados de certas propriedades do meio no qual estão inseridos. Esse tipo de tecnologia permite que os usuários gerenciem em alto nível aplicações que podem ser estruturalmente complexas, fornecendo uma arquitetura capaz de se comunicar a longa distância com sensores que estão fixos em campo [Loureiro 2010]. As tecnologias mais recentes nesta área apresentam baixo consumo de energia e baixo custo de aquisição [Figueiredo and Nakamura 2003].

3.1. Comunicação de dados

Entre os vários protocolos que podem ser usados para assegurar a comunicação entre dispositivos, o ZigBee (IEEE 802.15.4) tem se destacado [Malik and Kushwah 2023]. Este protocolo é projetado para aplicações que requerem economia de energia, além da transmissão de dados [Litjens 2009]. Os dispositivos em uma rede ZigBee podem ser categorizados como dispositivos de função completa e dispositivos de função reduzida. Os dispositivos de função completa são mais complexos e podem se comunicar com gateways (coordenadores) e nós (roteadores), enquanto os dispositivos de função reduzida são colocados na periferia da rede, priorizando a otimização de energia.

4. Plataforma Proposta

A plataforma consiste em módulos de monitoramento de umidade do solo distribuídos no campo. Tais módulos são programados para efetuar sua função na rede de comunicação sem fio. O dispositivo final faz a leitura dos sensores e transmite o sinal. O roteador é utilizado, além da função de leitura dos sensores, para ampliar o alcance da rede, através da retransmissão de sinais (ponte entre nós). O coordenador é conectado a um computador o tornando responsável por inicializar e reconhecer todos os nós, bem como receber e armazenar todos os dados da rede em um banco de dados na “nuvem” Figura 1. Todos os dados podem ser acessados de forma remota através do *website* da plataforma para melhor visualização da distribuição espacial dos módulos e temporal dos dados.

4.1. Hardware desenvolvido

Os dispositivos que compõem a rede de sensores podem ser divididos em módulo sensor (roteadores e dispositivos finais) Figura 2 e módulo coordenador/*gateway* Figura 3. O módulo sensor é a unidade de monitoramento de umidade do solo, compostos por: Arduino, XBee, Sensor de Umidade, Painel Fotovoltaico, Bateria, Regulador de Tensão,

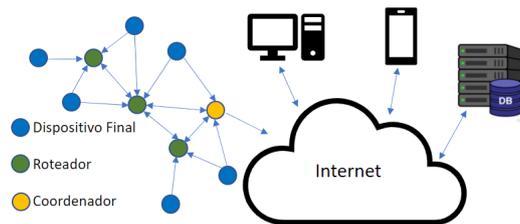


Figura 1. Visão geral da plataforma.

Carregador da Bateria e Módulo Real Time Clock (RTC). O consumo do módulo é aproximadamente de 56 mA durante a transmissão/recepção de dados e de 6 mA no modo de hibernação/*sleep*. O módulo coordenador/*gateway* é encarregado de estabelecer a comunicação entre a rede de sensores e o banco de dados na “nuvem”, composto por: Odroid , Celular, XBee e Nobreak.

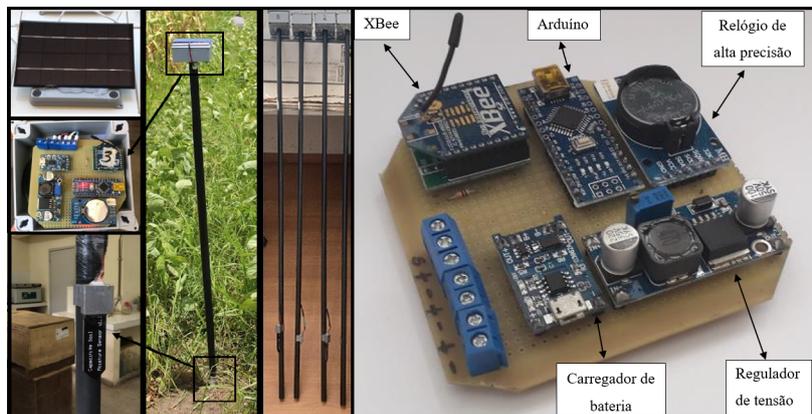


Figura 2. Módulo Sensor.



Figura 3. Módulo Coordenador.

4.2. Aplicação de Software

O propósito da aplicação de Software é permitir a gestão e monitoramento dos dados coletado pela rede de sensores. Na página inicial do sistema, Figura 4, pode ser visualizado um mapa com a distribuição dos sensores no campo, ao clicar no sensor, Figura 5 obtém-se as informações geográficas e outras características pertinente ao módulo, bem como um botão para visualizar os dados.

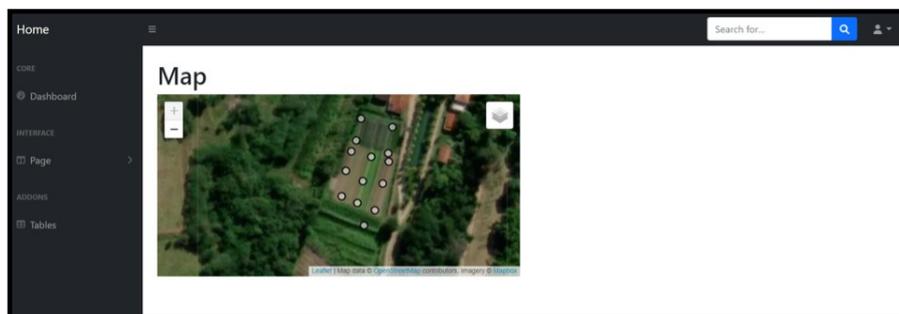


Figura 4. Página inicial do Sistema.

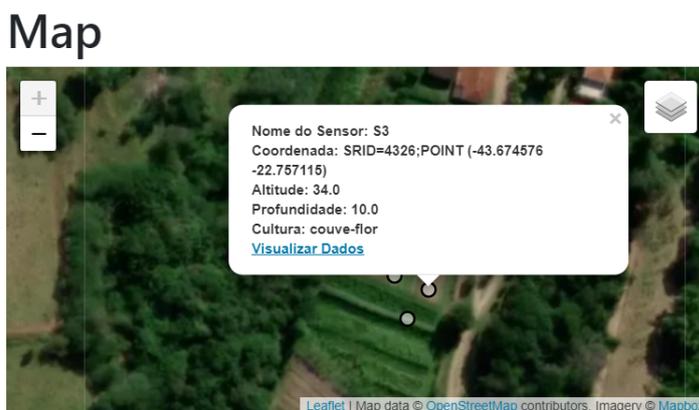


Figura 5. Página inicial do website.

Ao clicar no botão visualizar dados o utilizador é redirecionado para página de *dashboard* Figura 6 onde é apresentado o gráfico de umidade em relação ao tempo e a tabela com dos dados pertinente ao sensor escolhido. O sistema também possui um menu de navegação na lateral esquerda, dentre suas funcionalidades vale destacar o botão que permite baixar os dados em formato csv.

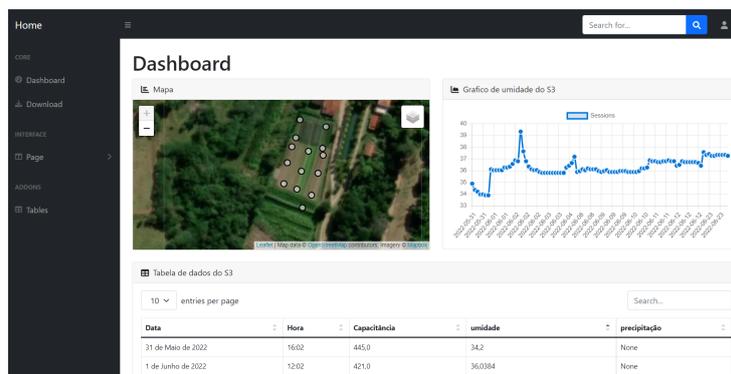


Figura 6. Dashboard.

4.3. Construção da curva de calibração

Antes de usar os sensores para monitoramento da umidade no campo, estes foram calibrados em laboratório para ajustar um modelo de estimativa da umidade do solo baseado

na informação capacitância. Um protótipo do módulo sensor foi montado em laboratório para testar o funcionamento dos componentes (eletrônica, energia e comunicação) bem como para construir uma curva de calibração que relacionasse os valores de capacitância com os teores de umidade dos solos da área de estudo. Na Figura 7 é mostrado o protótipo utilizado no laboratório. Um suporte desenvolvido com impressora 3d para acoplar o sensor a um cano protegendo o circuito e possibilitando a fixação na terra, ao topo uma caixa impermeável protegendo os componentes eletrônicos.



Figura 7. Módulo Protótipo para avaliação da eletrônica e construção da curva de calibração.

Em laboratório, o sensor foi instalado em recipientes contendo o solo da camada superficial (0 a 10 cm), como mostrado. As amostras de terra utilizadas foram acondicionadas nos recipientes em diferentes condições de umidade, partindo-se de uma umidade muito baixa, até atingir a saturação. Criou-se então uma variação de umidade que variou de umidade residual (umidade da amostra na condição de terra fina seca ao ar – $U_r/TFSA$) até a saturação. A partir do cálculo da quantidade de água necessária para saturar o solo, foram estabelecidos cinco níveis crescentes de umidade: $U_r/TFSA$, 25%, 50%, 75% e 100% saturada. Para cada nível de umidade, foram feitas três repetições, resultando em três recipientes contendo cada um dos cinco níveis de umidade. O solo utilizado em cada experimento anterior foi descartado, totalizando 15 ensaios. Uma vez instalada a sonda em cada recipiente foram feitas 5 leituras consecutivas de capacitância. Nesse caso, procurou-se avaliar a repetibilidade das leituras de capacitância do sensor de baixo custo. Assim, para cada recipiente e nível de umidade, obteve-se uma média de capacitância (média de 5 repetições).

A Figura 8 mostra como varia a capacitância do sensor de baixo custo com o aumento da umidade do solo. Observa-se que a capacitância tem uma relação inversa com a umidade do solo, ou seja, maiores umidades apresentam menores valores de capacitância. Ajustou-se um modelo linear com r^2 de 0.93, o qual foi utilizado para converter as leituras de capacitância em umidade volumétrica no monitoramento de campo.

5. Avaliações Experimentais

O sistema foi implementado em linguagem Python por meio do framework Django, enquanto os sensores e nós utilizaram as linguagens C e C++, o banco de dados utiliza PostgreSQL. Todos os códigos podem ser obtidos no github do laboratório(OMITIDO).

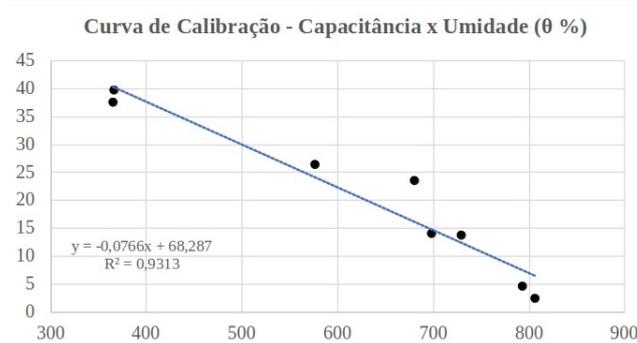


Figura 8. Curva de calibração relacionando a Capacitância com umidade volumétrica.

Em relação ao custo do sistema, uma Rede de Sensores Sem Fio (RSSF) composta de 14 unidade de monitoramento foi instalada em um módulo de produção orgânica. Cada módulo sensor custou R\$ 315,00, totalizando R\$ 5.122 reais.

5.1. Área de Estudo

O Sistema Integrado de Produção Agroecológica (SIPA) – “Fazendinha Agro-ecológica do Km 47” Figura 9, foi criada em 1993 com a finalidade de abrir um espaço para o exercício da agroecologia em bases científicas, explorando os recursos naturais disponíveis. A variabilidade espacial do comportamento das culturas dentro das glebas do SIPA é bastante grande, sobretudo em função da grande complexidade dos sistemas de produção agroecológicos. Desta forma, em um mesmo momento, existe grande variabilidade espacial da umidade do solo, demandando uma estratégia de caracterização contínua da umidade. Assim, considerando os diferentes manejos e os mapas de variabilidade espacial já existente na área de estudo, tais como textura, retenção de água, aeração e resistência à penetração [OMITIDO], planejou-se uma rede de monitoramento sem fio.

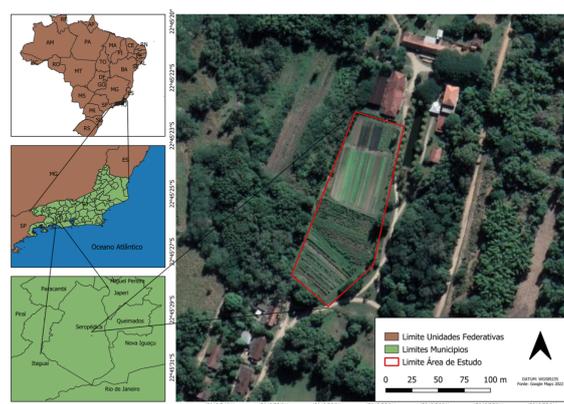


Figura 9. Módulo de produção orgânica da Fazendinha do Km 47.

5.2. A acurácia das leituras de umidade dos módulos sensores

Os dados de validação das medidas de umidade do solo com as estimativas dos sensores estão organizados na Tabela 1 e na Figura 10. A avaliação do desempenho no campo se deu no período de 11 de maio a 8 de junho, pois durante esse período os sensores estavam

mais estabilizados. Após esse intervalo, os sensores começaram a apresentar sinais de deterioração. Um sensor que apresenta melhor acurácia (o valor estimado mais se aproxima do valor medido) é aquele que possui máximo r^2 (1) e mínimo erro médio absoluto (EM = 0). Considerando esses valores de referência, pode-se afirmar que o sensor R é o único que forneceu estimativas de umidade com boa acurácia (EM = 1,7), estando dentro do padrão aceitável de desvio de sensores considerados acurados no mercado (até 2% de umidade). Os demais sensores apresentaram erro médio absoluto muito elevado (de 5.7 a 17%). Os resultados demonstram que embora os sensores sejam relativamente sensíveis às variações de umidade do solo, estes geralmente fornecem estimativas sistematicamente maiores de umidade. O único sensor que apresentou estimativas de umidade sistematicamente inferiores ao medido foi o sensor S2. Considerando as diferenças de repetibilidade entre os sensores nos diferentes meses, uma causa das disparidades identificadas pode estar relacionada à heterogeneidade dos sensores de baixo custo adquiridos, os quais os fornecedores podem não oferecer garantias de qualidade na fabricação aos compradores.

Tabela 1. Correlação e Erro Médio Absoluto das estimativas de umidade dos sensores com os dados medidos.

Sensor	R^2	Erro Médio
S1	0,139	8,8
S2	0,067	17,0
S3	0,075	12,0
S4	0,163	5,7
S5	0,065	10,3
S6	0,003	9,2
S7	0,023	15,5
S8	0,056	10,6
S9	0,08	6,2
S10	0,955	10,3
S12	0,097	9,0
R	0,51	1,7
R1	0,303	14,5

6. Considerações Finais

O presente trabalho teve por objetivo apresentar um sistema de monitoramento de umidade do solo. Uma Rede de Sensores Sem Fio (RSSF) composta de 14 unidade de monitoramento de baixo custo foi instalada em uma área de produção orgânica. O sistema desenvolvido realizou a leitura e transmissão de dados referentes a umidade do solo, permitindo o armazenamento dos dados em um banco de dados em “nuvem”, o qual pode ser visualizado no website OMITIDO.

Embora o projeto tenha atendido o objetivo de fornecer uma plataforma digital de monitoramento remoto de umidade do solo a baixo custo, a acurácia das estimativas de umidade não foi considerada adequada, uma vez que o erro médio absoluto dos sensores foi bem superior ao aceito quando comparado com outros equipamentos do mercado (> 2%). A principal causa da baixa acurácia se deve ao sensor físico utilizado, o qual

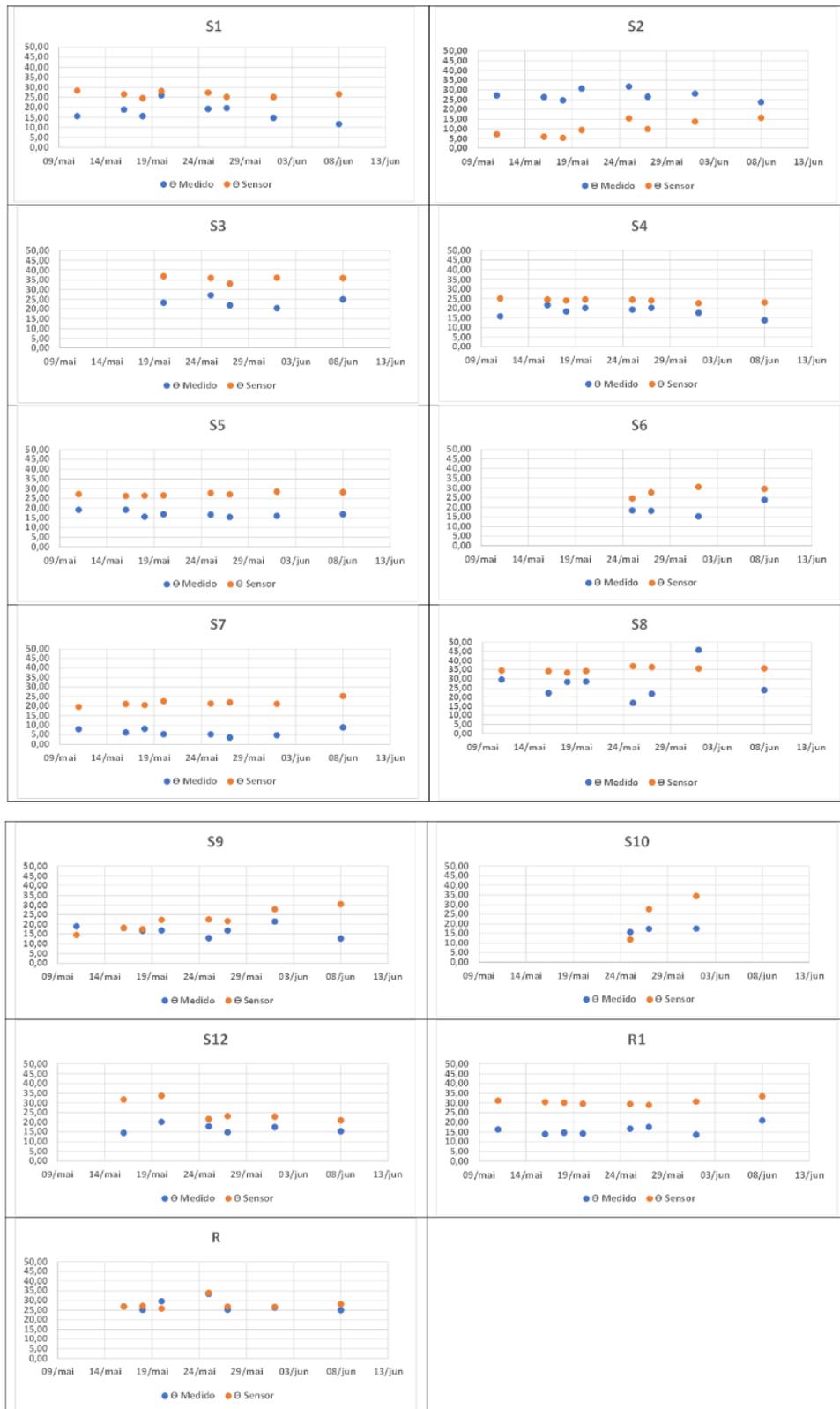


Figura 10. Valores medidos e estimados de umidade do solo por módulo sensor

apresenta grande instabilidade de leituras. O sensor utilizado, apesar de de todo o processo de calibração desenvolvido especificamente para o solo da área de estudo, acabou sistematicamente superestimando os valores de umidade.

Como trabalho futuro, serão realizadas avaliações de novos sensores de outros fornecedores para monitorar a umidade do solo. Além disso, uma avaliação em diferentes ambientes, como em diferentes regiões do país, deverá ser realizada, além de estudos sobre os melhores materiais para encapsulamento dos componentes eletrônicos. Um outro aspecto a ser aprimorado, consiste na avaliação de diferentes tecnologias de comunicação, como a utilização do protocolo LoRa, que pode garantir um alcance mais abrangente e ainda baixo consumo de energia para o sistema. A análise dos dados gerados por meio de algoritmos de estatística e aprendizado de máquina também será realizada.

Referências

- Ali, M., Kanwal, N., Hussain, A., Samiullah, F., Iftikhar, A., and Qamar, M. (2020). Iot based smart garden monitoring system using nodemcu microcontroller. *International Journal of Advances in Applied Sciences*, 7(8):117–124.
- Araújo, R., Goedert, W. J., and Lacerda, M. P. C. (2007). Qualidade de um solo sob diferentes usos e sob cerrado nativo. *Revista Brasileira de Ciência do solo*, 31:1099–1108.
- Deng, F., Zuo, P., Wen, K., and Wu, X. (2020). Novel soil environment monitoring system based on rfid sensor and lora. *Computers and Electronics in Agriculture*, 169:105169.
- Figueiredo, C. M. S. and Nakamura, E. (2003). Computação móvel: Novas oportunidades e novos desafios. pages 16–28.
- Kashyap, B. and Kumar, R. (2021). Sensing methodologies in agriculture for soil moisture and nutrient monitoring. *IEEE Access*, 9:14095–14121.
- Litjens, O. J. (2009). Automação de estufas agrícolas utilizando sensoriamento remoto e o protocolo zigbee.
- Lloret, J., Sendra, S., Garcia, L., and Jimenez, J. M. (2021). A wireless sensor network deployment for soil moisture monitoring in precision agriculture. *Sensors*, 21(21):7243.
- Loureiro, A. A. F. (2010). Redes de sensores sem fio. *Grandes Desafios da Pesquisa em Computação para o Período 2006-2016*.
- Malik, A. and Kushwah, R. (2023). Energy-efficient scheduling in iot using wi-fi and zigbee cross-technology. *The Journal of Supercomputing*, pages 1–30.
- Pramanik, M., Khanna, M., Singh, M., Singh, D., Sudhishri, S., Bhatia, A., and Ranjan, R. (2022). Automation of soil moisture sensor-based basin irrigation system. *Smart Agricultural Technology*, 2:100032.
- Singh, R., Srivastava, S., and Mishra, R. (2020). Ai and iot based monitoring system for increasing the yield in crop production. In *2020 International Conference on Electrical and Electronics Engineering (ICE3)*, pages 301–305. IEEE.
- Yu, L., Gao, W., R Shamshiri, R., Tao, S., Ren, Y., Zhang, Y., and Su, G. (2021). Review of research progress on soil moisture sensor technology.