

Comparação de Sensores Resistivos de Umidade do Solo em Diferentes Modos de Operação Quanto à Degradação por Corrosão

Ayrton Henrique Rubira Farias Fernandes¹, Gilson Fernandes Braga Junior²

¹Universidade Federal do Oeste do Pará, Santarém, Brasil, ayrtonrubira07@gmail.com

²Universidade Federal do Oeste do Pará, Santarém, Brasil

Resumo: Sensores resistivos de umidade do solo são soluções de baixo custo utilizadas com Arduino, mas sofrem corrosão eletroquímica pelo uso contínuo de corrente. Este trabalho compara dois sensores: um com corrente alternada e leituras a cada minuto, e um controle com uma leitura diária. Após sete dias, o sensor CA apresentou degradação severa dos eletrodos e perda de confiabilidade, enquanto o controle permaneceu íntegro, indicando que a frequência de medição é um dos fatores determinantes na corrosão.

Palavras-chave: sensores resistivos; umidade do solo; corrosão eletroquímica; Arduino; eletrodos

INTRODUÇÃO

Um sensor pode ser definido como um dispositivo capaz de detectar uma grandeza física ou química do meio e convertê-la em um sinal elétrico mensurável, que é então interpretado por um sistema eletrônico, como um microcontrolador (PEREIRA et al., 2021). No contexto da medição da umidade do solo, dois tipos se destacam: os capacitivos, que operam com base na variação da permissividade dielétrica do solo e tendem a apresentar maior estabilidade nas leituras, e os resistivos, que funcionam de forma mais direta, que consiste em dois eletrodos metálicos inseridos no solo e a resistência elétrica entre eles é medida (SOUSA et al., 2025). Quanto mais úmido o solo, menor a resistência registrada, pois a presença de água aumenta a condutividade (ALVES, 2020). Essa simplicidade construtiva torna os sensores resistivos amplamente utilizados em projetos de baixo custo em conjunto com o Arduino, como demonstrado por Fernandes et al. (2024) ao avaliar o sensor YL-69 em diferentes texturas de solo.

A plataforma Arduino tem se consolidado como uma das principais ferramentas de prototipagem científica de baixo custo na área agrícola e ambiental. Sua acessibilidade, compatibilidade com uma ampla gama de sensores e módulos, e a facilidade de programação tornam-na uma escolha frequente em projetos de monitoramento que demandam coleta automatizada de dados em campo (ALVES, 2020). Dessa forma, a combinação entre sensores resistivos de umidade e microcontroladores Arduino tem possibilitado o desenvolvimento de soluções acessíveis para irrigação inteligente, monitoramento agrícola e estudos experimentais relacionado ao comportamento hídrico do solo.

No entanto, uma limitação inerente ao funcionamento dos sensores resistivos merece atenção. A passagem contínua de corrente elétrica pelos eletrodos metálicos promove um processo de eletrólise na solução do solo, acelerando a degradação do material dos eletrodos ao longo do tempo, esse fenômeno é conhecido como corrosão eletroquímica (FERNANDES et al., 2024). A eletrólise é um processo eletroquímico não espontâneo no qual uma corrente elétrica externa força a ocorrência de reações de oxirredução que, em condições naturais, não aconteceriam (GENTIL; CARVALHO, 2022). Ao serem inseridos no solo úmido, os eletrodos do sensor estabelecem contato com uma solução iônica rica em sais minerais, e quando uma diferença de potencial é aplicada entre eles, esse sistema passa a se comportar como uma célula eletrolítica: o solo funciona como eletrólito, e os eletrodos assumem os papéis de ânodo e cátodo. O resultado é uma degradação progressiva do eletrodo anódico, que libera íons metálicos para o solo, comprometendo, ao longo do tempo, tanto a integridade física do sensor quanto a confiabilidade de suas leituras. Pinto, Vilasboas e Stefanello (2018), ao avaliarem o sensor FC-28 em Latossolo durante uma semana de medições contínuas, já documentaram que a corrosão nas hastes interferiu diretamente nos valores medidos do sensor, com leituras que extrapolaram significativamente os limites esperados. Sousa et al. (2025) também apontam a oxidação dos eletrodos expostos como uma das principais desvantagens dos sensores resistivos frente aos capacitivos.

A intensidade desse processo está diretamente relacionada ao tipo de corrente elétrica e à frequência com que o sensor será acionado. Na corrente

alternada, o sentido do fluxo de elétrons se inverte periodicamente, fazendo com que cada eletrodo alterne entre os papéis de ânodo e cátodo a cada meio ciclo, o que tende a redistribuir o desgaste eletroquímico entre as duas superfícies e reduzir a perda líquida de material em cada uma delas (GENTIL; CARVALHO, 2022). Já um sensor operado com menor frequência de medição, como apenas uma leitura por dia, tem menor tempo total de exposição à corrente, o que também pode retardar o processo corrosivo. Elia (2025), em revisão abrangente sobre tecnologias de sensoriamento de umidade do solo, aponta que quanto maior o tempo de exposição à corrente, mais pronunciado tende a ser o processo de corrosão eletrolítica nos eletrodos, comprometendo a estabilidade das leituras ao longo do tempo. O que ainda carece de investigação mais detalhada é como essas duas formas de operação, corrente alternada com leituras frequentes e controle com apenas uma medição diária, se comportam comparativamente em termos de degradação dos eletrodos ao longo do tempo.

É nesse ponto que o presente trabalho se insere. Foram utilizados dois sensores resistivos idênticos, operando em condições controladas: um sensor de controle (CO), com medições espaçadas realizadas uma vez ao dia no horário das 17h04, e um sensor alimentado por corrente alternada (AC), com leituras a cada um minuto. Ao longo dos sete dias, cada um dos sensores recebeu 100 ml de água diariamente às 12h, e às 13h30 foram coletados fotografias e dados de umidade para acompanhar a evolução do estado dos eletrodos. A hipótese central é que o sensor AC apresentará menor grau de degradação visual e menor alteração nas leituras ao longo do tempo em relação ao sensor de controle (CO), dado que a inversão cíclica da polaridade distribui as reações de oxidação e redução entre os dois eletrodos. Diante disso, os objetivos deste trabalho são: avaliar comparativamente o comportamento dos dois sensores ao longo dos sete dias de experimento; observar visualmente a progressão da corrosão nos eletrodos por meio das fotografias coletadas diariamente; e analisar os dados de umidade registrados por meio de gráficos, verificando se o processo corrosivo gerou alterações ou erros nas leituras ao longo do tempo em cada configuração de operação.

MATERIAL E MÉTODOS

O experimento foi realizado em ambiente interno, com dois vasos de planta preenchidos com terra preta como substrato. Cada vaso tinha abertura superior de 15 cm de diâmetro, e o substrato foi preenchido até 9 cm de altura a partir da base interna, medida padronizada entre os dois recipientes para que a profundidade de inserção dos sensores fosse a mesma nos dois casos (Figura 1).



Figura 1. Visão geral do experimento.

Em cada vaso foi instalado um sensor resistivo de umidade do solo. Um deles, chamado de sensor controle (CO), realizava uma única leitura diária às 17h04. O segundo foi configurado para operar com corrente alternada (CA), com leituras a cada um minuto de forma contínua ao longo de todo o período do experimento. Ambos foram conectados na mesma placa de Arduino, com os dados registrados em um cartão SD e exportados para tabulação posterior no Excel.

Os valores apresentados nos gráficos correspondem às leituras brutas do conversor analógico-digital (ADC) do Arduino, sem conversão para grandezas físicas como tensão ou resistência.

O código que controla a lógica de medição de cada sensor foi desenvolvido na própria Arduino IDE, e a montagem do circuito foi feita com o auxílio do orientador. Para registrar automaticamente o horário de cada leitura, foi colocado no circuito um módulo de relógio em tempo real o DS3231. Nos testes em laboratório, o módulo funcionou sem problemas apenas quando o Arduino estava conectado ao computador via USB. Ao ser alimentado diretamente na tomada, o DS3231 não manteve o horário de forma confiável, o que foi atribuído à ausência da comunicação serial com o computador, ele era responsável por inicializar o módulo com o horário correto nos testes. A saída encontrada foi registrar os horários manualmente, com os dados tabulados ao longo dos sete dias. O esquema geral de como foi estabelecido o do código está representado na figura 2 abaixo.

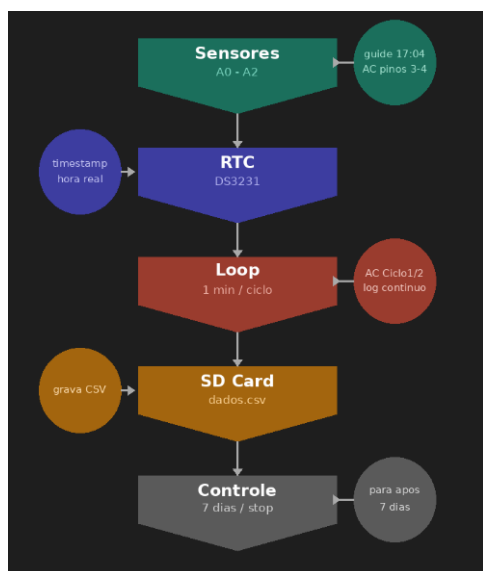


Figura 2. Esquema geral do código.

A experimento foi mantido constante durante todo o período. Às 12h de cada dia, 100 ml de água foram adicionados a cada vaso com auxílio de um recipiente de medição. Esse volume foi escolhido por ser compatível com a irrigação diária de plantas de pequeno porte cultivadas em vasos, como um por exemplo manjerição, sendo suficiente para preencher o substrato sem provocar encharcamento no vaso.

Às 13h30, os sensores foram desligados e retirados do solo, limpos com papel seco e fotografados com boa iluminação para que as fotos de dias diferentes pudessem ser comparadas. Depois de fotografados, os sensores voltavam ao solo para continuar operando. Em paralelo com o registro fotográfico, os dados registrados no cartão SD eram coletados todos os dias para possibilitar melhor tabulação dos dados.

Os dados de umidade registrados ao longo dos sete dias foram analisados em conjunto com as fotografias para acompanhar o estado dos sensores. As fotos mostram a evolução da corrosão visualmente, enquanto os dados de leitura permitem verificar se essa corrosão foi alterando o comportamento elétrico do sensor ao longo dos dias.

Para melhor visualização dos gráficos da figura 3 a Figura 9, foi feito uma média móvel a cada 15 dados.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os gráficos de resistência do solo obtidos ao longo dos sete dias de experimento revelam padrões distintos entre o sensor CA e o sensor CO, tanto em termos de magnitude dos valores registrados quanto em termos de estabilidade das leituras ao longo do tempo.

Nos primeiros dias, os valores de resistência do sensor CA apresentaram amplitude maior e variação mais pronunciada ao longo do dia. No dia 16/05, as leituras iniciaram em torno de 300, recuaram para

aproximadamente 200 nas horas seguintes e foram subindo gradualmente até o final do período (Figura 3), sugerindo uma resposta direta à variação de umidade provocada pela adição de água às 12h. Comportamento semelhante foi observado no dia 19/05, onde a curva em formato de U evidencia com clareza o efeito da irrigação (Figura 6): queda na resistência após a adição de água e recuperação progressiva nas horas subsequentes, à medida que o solo voltava a perder umidade. Esse padrão é fisicamente coerente com o princípio de funcionamento dos sensores resistivos, no qual a presença de água aumenta a condutividade do solo e, consequentemente, reduz a resistência registrada (PEREIRA et al., 2021).

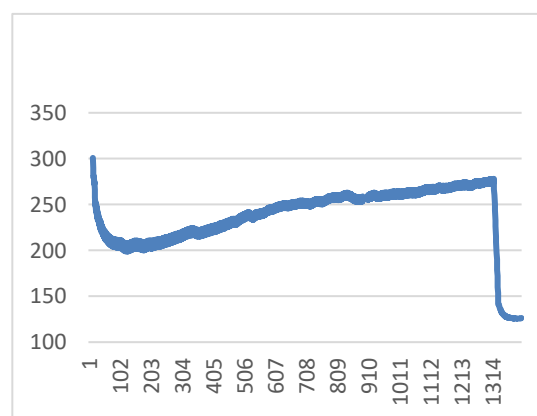


Figura 3. Leitura ADC do sensor CA no dia 16/05.

O dia 17/05 merece atenção especial por apresentar uma interrupção visível no gráfico (Figura 4), correspondente às faltas de energia elétrica ocorridas durante o período de coleta. Desconsiderando essas interrupções, o comportamento do sensor se manteve relativamente estável ao longo do dia, com leituras entre 130 e 200. O gráfico do dia 18/05 (Figura 5) também apresenta variação com tendência de queda seguida de estabilização, refletindo a resposta à irrigação diária.

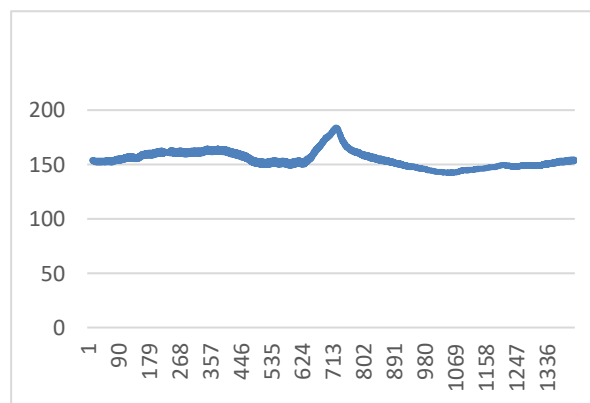


Figura 4. Leitura ADC do sensor CA no dia 17/05, com interrupção por falta de energia.

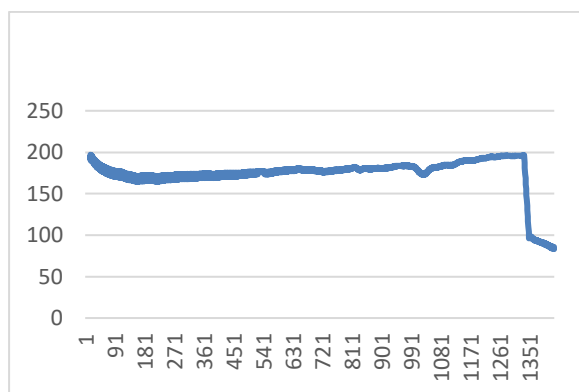


Figura 5. Leitura ADC do sensor CA no dia 18/05.

A partir do dia 20/05, observa-se uma mudança no comportamento das leituras do sensor CA. Os valores passam a apresentar tendência crescente ao longo de cada dia, sem o recuo pronunciado que caracterizaria a resposta à irrigação das 12h, com os gráficos dos dias 20 e 21 exibindo curvas que sobem de forma quase contínua até o momento da retirada do sensor (Figuras 7 e 8). Esse comportamento pode indicar que a degradação dos eletrodos já estava interferindo nas leituras, elevando artificialmente os valores de resistência registrados independentemente da umidade real do solo. Pinto, Vilasboas e Stefanello (2018), ao monitorarem o sensor FC-28 em Latossolo ao longo de uma semana de medições contínuas, documentaram exatamente esse tipo de deriva progressiva nas leituras, atribuindo-a ao avanço da corrosão nas hastes metálicas. Sousa et al. (2025) reforçam que a oxidação dos eletrodos expostos é uma das principais limitações dos sensores resistivos em operação prolongada.

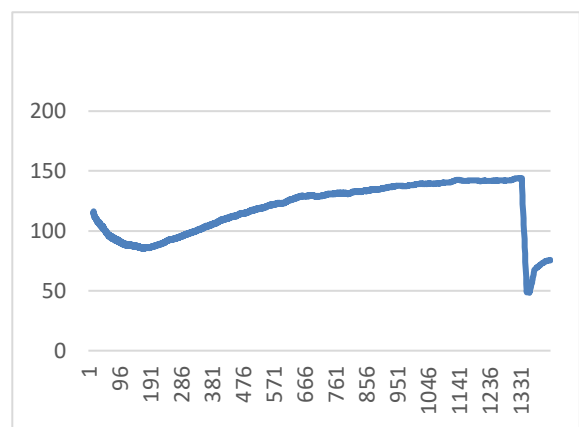


Figura 6. Leitura ADC do sensor CA no dia 19/05.

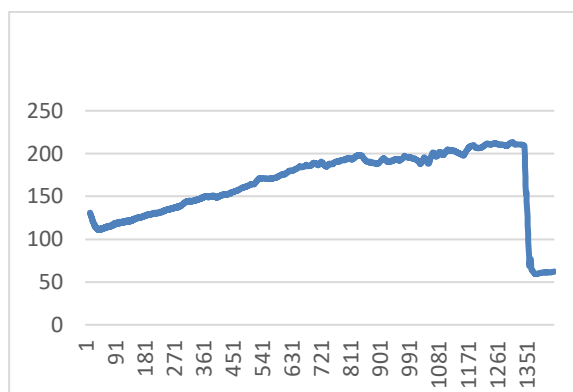


Figura 7. Leitura ADC do sensor CA no dia 20/05.

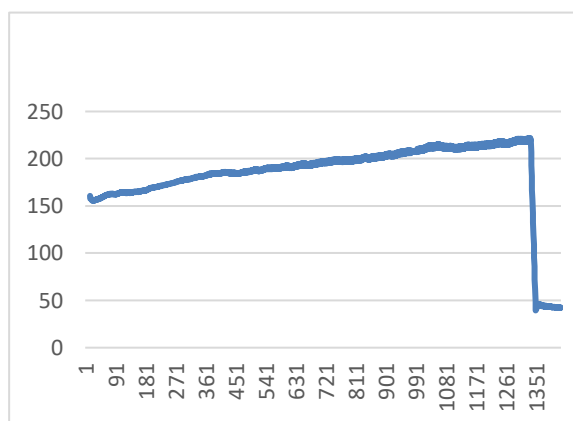


Figura 8. Leitura ADC do sensor CA no dia 21/05.

O dia 22/05 representa o ponto mais crítico do experimento. Os valores de resistência do sensor CA despencaram para a faixa de 5 a 45 (Figura 9), muito abaixo de qualquer registro anterior, enquanto a curva perdeu a estrutura que havia caracterizado os dias anteriores. Esse comportamento atípico é consistente com uma degradação avançada dos eletrodos: à medida que o material metálico se dissolve e deposita no solo, a interface eletrodo-solo sofre alterações significativas, podendo tanto elevar quanto reduzir os valores registrados de forma não relacionada à umidade real. A frequência de medição de uma leitura por minuto adotada pelo sensor CA resultou em exposição praticamente contínua à corrente elétrica ao longo dos sete dias, o que, pela relação direta entre tempo de exposição e intensidade da eletrólise, potencializou o processo corrosivo nos eletrodos (GENTIL; CARVALHO, 2022).

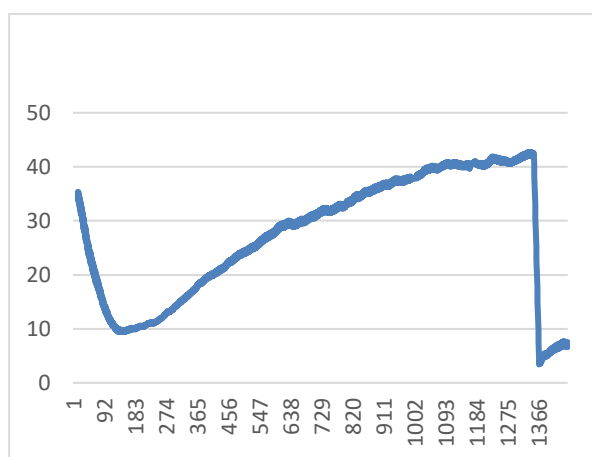


Figura 9. Leitura ADC do sensor CA no dia 22/05.

O sensor CO, por sua vez, realizou apenas uma leitura diária às 17h04, acumulando ao longo de todo o experimento sete registros no total. Os valores obtidos foram: 467, 288, 297, 282, 361, 201 e 224, esses valores não apresentam tendência monotônica clara, oscilando entre os dias sem evidência de deriva sistemática (Figura 10). Essa variabilidade é mais facilmente atribuível às diferenças reais de umidade entre os dias do que à degradação dos eletrodos, justamente porque o tempo total de exposição à corrente foi drasticamente menor.

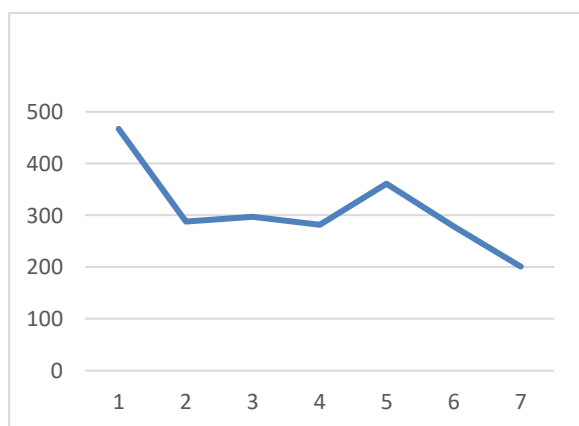


Figura 10. Leitura do sensor CO ao longo dos sete dias de experimento.

As fotografias coletadas diariamente confirmam essa interpretação (Figura 11). Ao final dos sete dias, os eletrodos do sensor CO apresentavam aparência praticamente inalterada, sem sinais visíveis de corrosão, enquanto os eletrodos do sensor CA exibiam degradação excessiva visível, com a alteração de coloração e perda de material na superfície metálica.

Vale ressaltar, no entanto, que os vasos não continham plantas, durante o experimento, o que reduziu o consumo de água pelo substrato e pode ter contribuído para que a terra não secasse completamente entre uma irrigação e outra, mantendo os níveis de umidade mais elevados que o esperado de condições reais de cultivo

esse fator pode ter influenciado à queda dos valores medidos.



Figura 11. Eletrodos dos sensores CO e CA após primeiro dia de experimento.



Figura 12. Comparação visual dos eletrodos dos sensores CO e CA após sete dias de experimento.

A Figura 11 registra o estado dos eletrodos de ambos os sensores ao final do primeiro dia de experimento. O sensor CO, posicionado à esquerda da imagem, apresenta superfície metálica completamente uniforme e sem qualquer alteração visível. O sensor CA, posicionado à direita, já exibe uma pequena



mancha em uma das hastes, possivelmente indicando o início do processo de corrosão eletroquímica decorrente da exposição contínua à corrente elétrica. Ao longo dos sete dias, essa diferença se intensificou progressivamente: o sensor CA apresentou perda de estrutura nas leituras elétricas, com os gráficos deixando de refletir as variações reais de umidade a partir do quinto dia e os valores caindo abruptamente para a faixa de 5 a 45 no sétimo dia, enquanto seus eletrodos exibiam degradação visível generalizada (Figura 12). O sensor CO, em contraste, manteve tanto a integridade visual dos eletrodos quanto valores de leitura ADC coerentes com as condições de umidade do solo, oscilando entre 201 e 467 sem tendência de deriva durante todo o período. Essa trajetória oposta entre os dois sensores, operando no mesmo tipo de substrato, sob o mesmo volume de água e nas mesmas condições ambientais, indica que a frequência de exposição à corrente foi o principal fator responsável pelas diferenças observadas.

Baciu e Fodor (2025), ao compararem sensores resistivos alimentados por corrente contínua e alternada, verificaram que a inversão periódica da polaridade reduz os processos de eletro-corrosão e resulta em maior estabilidade das leituras ao longo do tempo. No entanto, os autores adotaram uma configuração de medição pontual, sem a exposição contínua que caracterizou o presente experimento. Isso sugere que o benefício da corrente alternada se manifesta de forma mais clara quando o intervalo entre medições é suficiente para que os eletrodos se recuperem eletricamente entre um ciclo e outro, condição que não foi atendida com leituras a cada um minuto (BACIU; FODOR, 2025). o que contraria parcialmente a hipótese inicial de que o sensor CA apresentaria menor degradação. Isso sugere que, para aplicações que exigem monitoramento contínuo, o intervalo entre medições deve ser considerado uma variável tão relevante quanto o tipo de corrente utilizada.

CONCLUSÃO

O experimento demonstrou que a frequência de medição exerce papel determinante na velocidade do processo corrosivo em sensores resistivos de umidade do solo. O sensor CA, operando com leituras a cada um minuto de forma praticamente ininterrupta ao longo de sete dias, apresentou degradação visual expressiva dos eletrodos e progressiva perda de confiabilidade nas leituras, com os valores registrados deixando de refletir as variações reais de umidade do solo a partir do quinto dia de experimento. O sensor CO, com apenas uma leitura diária, manteve a integridade física dos eletrodos e a consistência das medições ao longo de todo o período, sem sinais visíveis de corrosão ao final do experimento.

Os resultados também indicam que, nas condições adotadas neste trabalho, o benefício potencial da corrente alternada na redução da eletro-corrosão foi insuficiente para compensar a exposição cumulativa decorrente do elevado número de medições, o que contraria parcialmente a hipótese inicial de que o sensor CA apresentaria menor degradação. Isso sugere que, para aplicações que exigem monitoramento contínuo, o intervalo entre medições deve ser considerado uma variável tão relevante quanto o tipo de corrente utilizada. insuficiente para compensar a exposição cumulativa decorrente do elevado número de medições.

Como perspectiva para trabalhos futuros, sugere-se investigar intervalos de medição intermediários, como leituras a cada 5, 15 ou até 30 minutos, a fim de determinar a frequência mínima que preserva a integridade dos eletrodos sem comprometer a resolução temporal dos dados. Recomenda-se também a inclusão de um terceiro sensor operando com corrente contínua de forma ininterrupta ao longo de todo o experimento, o que permitiria testar diretamente a hipótese de que a corrente contínua acelera a corrosão em comparação à alternada sob a mesma frequência de medição. Por fim, também pode aumentar a quantidade e a frequência de irrigações com intuito de obter dados mais ricos sobre a resposta dos sensores a variações maiores de umidade, contribuindo para uma análise mais completa do comportamento elétrico dos eletrodos ao longo do tempo.

AGRADECIMENTOS

Agradeço ao professor Gilson, por ter me orientado nesse projeto e ajudado nas horas em que precisei.

Agradeço a minha família e amigos que me deram apoio e conforto para a execução do projeto.

REFERÊNCIAS

- ALVES, Bruno Godoy Segaloti. Análise da durabilidade e eficiência de sensores resistivos de umidade do solo em plataforma Arduino. 2020. 68f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Agrícola e Ambiental) — Universidade Federal Fluminense, Escola de Engenharia, Niterói, 2020.
- BACIU, Ionel Horea; FODOR, Alexandra. Comparative Analysis of DC and AC Power Supply for Resistive Soil Moisture Sensors. In: IEEE INTERNATIONAL SYMPOSIUM FOR DESIGN AND TECHNOLOGY IN ELECTRONIC PACKAGING (SIITME), 31., 2025. Anais [...] IEEE, 2025. DOI: 10.1109/SIITME67657.2025.11293581.
- ELIA, Antonio. Soil Moisture Sensing Technologies: Principles, Applications, and Challenges in



Agriculture. Agronomy, v. 15, n. 12, p. 2788, 2025. DOI: 10.3390/agronomy15122788.

FERNANDES, C. N.; PEREIRA, A. de J.; ROCHA, L. A. L. da; PEREIRA, R. A. P.; PAI, A. D.; FRANCO, J. R.; PAI, E. D. Avaliação e calibração do sensor de umidade do solo YL-69 de baixo custo em três texturas de solo. Observatório de la Economía Latinoamericana, Curitiba, v. 22, n. 10, p. e7114, 2024. DOI: 10.55905/oelv22n10-139.

GENTIL, Vicente; CARVALHO, Ladimir José de. Corrosão. 7. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2022.

PEREIRA, F. A. de L.; MEDEIROS, J. F. de; DIAS, N. da S.; SÁ, F. V. da S.; SILVA, S. de L.; FERREIRA NETO, M. Desenvolvimento de sensor de umidade do solo utilizando o princípio da resistência elétrica. Irriga, Botucatu, v. 26, n. 1, p. 29–41, 2021. DOI: 10.15809/irriga.2021v26n1p29-41.

PINTO, Jeison; VILASBOAS, Marcio; STEFANELLO, Fábio. Comportamento do sensor de umidade do solo com Arduino® em Latossolo. In: SEMANA DO AGRÔNOMO, 2018, Cascavel. Anais... Cascavel: FAG, 2018.

SOUSA, G. P.; MENEZES, A. S.; SOUSA, C. H. C. de; MOURÃO, O. de S.; ARAGÃO, F. T. de A.; MENEZES, F. F. F. Comparação de sensores de umidade utilizando microcontrolador Arduino em solo de textura franco arenosa. Revista DELOS, Curitiba, v. 18, n. 65, e4449, 2025. DOI: 10.55905/rdelosv18.n65-097.