

ARTUR BONINI DO PRADO

**SUORTE AO MANEJO DE IRRIGAÇÃO COM BASE NA DETECÇÃO DA
FRENTE DE UMEDECIMENTO**

Botucatu
2025

ARTUR BONINI DO PRADO

**SUPORTE AO MANEJO DE IRRIGAÇÃO COM BASE NA DETECÇÃO DA
FRENTE DE UMEDECIMENTO**

Tese apresentada à Faculdade de Ciências Agronômicas da Unesp Câmpus de Botucatu, para obtenção do título de Doutor em Irrigação e Drenagem.

Orientador: Lineu Neiva Rodrigues

Botucatu

2025

P896s Prado, Artur Bonini
Suporte ao manejo de irrigação com base na
detecção da frente de umedecimento / Artur Bonini
Prado. -- Botucatu, 2025
64 p.

Tese (doutorado) - Universidade Estadual Paulista
(UNESP), Faculdade de Ciências Agrônomicas,
Botucatu
Orientador: Lineu Neiva Rodrigues

1. Irrigação agrícola. 2. Agricultura familiar. 3.
Umidade do solo. 4. Sensores. I. Título.

Sistema de geração automática de fichas catalográficas da Unesp.
Dados fornecidos pelo autor(a).

CERTIFICADO DE APROVAÇÃO

TÍTULO DA TESE:

SUPORTE AO MANEJO DE IRRIGAÇÃO COM BASE NA DETECÇÃO DA FRENTE DE UMEDECIMENTO

AUTOR: ARTUR BONINI DO PRADO

ORIENTADOR: LINEU NEIVA RODRIGUES

Aprovado como parte das exigências para obtenção do Título de Doutor em Agronomia (Irrigação e Drenagem), pela Comissão Examinadora:

Pesquisador Doutor LINEU NEIVA RODRIGUES (Participação Virtual)
Centro de Pesquisa Agropecuária dos Cerrados / EMBRAPA

Documento assinado digitalmente
LINEU NEIVA RODRIGUES
Data: 26/06/2025 18:37:18-0300
Verifique em <https://validar.it.gov.br>

Professor Doutor LUIZ FABIANO PALARETTI (Participação Presencial)
Departamento de Engenharia e Ciências Exatas / Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias de Jaboticabal
- Unesp

Documento assinado digitalmente
LUIZ FABIANO PALARETTI
Data: 30/06/2025 00:48:35-0300
Verifique em <https://validar.it.gov.br>

Professor Doutor LUIS FERNANDO DE SOUZA MAGNO CAMPECHE (Participação Virtual)
Campus Petrolina / Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Sertão Pernambucano

Documento assinado digitalmente
LUIS FERNANDO DE SOUZA MAGNO CAMPECHE
Data: 27/06/2025 06:33:46-0300
Verifique em <https://validar.it.gov.br>

Professor Doutor JOÃO CARLOS CURY SAAD (Participação Presencial)
Departamento de Engenharia Rural e Socioeconomia / Faculdade de Ciências Agrônomicas de Botucatu - Unesp

Documento assinado digitalmente
JOAO CARLOS CURY SAAD
Data: 01/07/2025 13:35:26-0300
Verifique em <https://validar.it.gov.br>

Professor Doutor FERNANDO BRAZ TANGERINO HERNANDEZ (Participação Presencial)
Departamento de Fitossanidade, Engenharia Rural e Solos / Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira - Unesp

Documento assinado digitalmente
FERNANDO BRAZ TANGERINO HERNANDEZ
Data: 30/06/2025 14:29:51-0300
Verifique em <https://validar.it.gov.br>

Professor Doutor FERNANDO BRAZ TANGERINO HERNANDEZ (Participação Presencial)
Departamento de Fitossanidade, Engenharia Rural e Solos / Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira - Unesp

Botucatu, 24 de junho de 2025

*Dedico este trabalho às pessoas que
tornam a minha vida completa e plena.*

AGRADECIMENTOS

Agradeço ao Professor Dr. Lineu Neiva Rodrigues pela dedicação em me orientar nesta pós-graduação.

Agradeço à UNESP FCA - campus Botucatu e a todos os professores que tive o prazer e conhecer.

À UNESP FCAT - campus Dracena e ao Departamento de Produção Vegetal, liderado pelo Professor Dr. Ronaldo Cintra Lima, pela oportunidade em participar no desenvolvimento do projeto.

À UFSCar – campus Araras/SP e ao Centro de Ciências Agrárias (CCA), liderado pelo Professor Dr. Claudinei Fonseca Souza, pela colaboração técnica oferecida.

Agradeço por todo amor e carinho que recebo de meus familiares.

“É preciso amar as pessoas
como se não houvesse amanhã”.

(RUSSO, R., 1989).

RESUMO

A agricultura irrigada é uma atividade que faz uso intensivo de recursos hídricos, sendo necessário o desenvolvimento contínuo de tecnologias que possibilitem o uso mais eficiente da água. Para melhorar o desempenho de irrigação, é fundamental desenvolver estratégias de manejo que possam reduzir o uso de recursos hídricos sem comprometer a produção agrícola. Existem diversos métodos e instrumentos que podem ser utilizados para manejar um sistema de irrigação. Grande parte da tecnologia existente para manejar a irrigação, entretanto, não é de fácil acesso para a pequena agricultura. Além disso, os instrumentos existentes para manejar a irrigação, na sua maioria, são pouco duráveis, apresentam custos elevados e são de difícil manutenção e reposição. O objetivo geral desta tese foi desenvolver e avaliar um sistema para manejo de irrigação (SAAPD), com base na detecção da frente de umedecimento de água no solo. O SAAPD foi desenvolvido em arquitetura modular, o que possibilita a integração de novos sensores, como, por exemplo, sensores de clima e novas funcionalidades, como, por exemplo, diferentes formas de comunicação com o irrigante, novas estratégias de manejo da irrigação e alternativas de interligação com sensores de campo. O SAAPD foi instalado no campo por um período de dois anos (2024 e 2025). Durante esse período, o SAAPD esteve exposto às condições extremas do tempo, sem apresentar nenhuma anormalidade ou defeito em seus componentes de controle, de comunicação ou de transformação de energia. Para detecção da frente e umedecimento, foram avaliados três sensores de solo, um capacitivo e outros dois resistivos. O sensor resistivo HL-69 foi escolhido por apresentar respostas mais rápidas à detecção da chegada da frente de umedecimento. Foram testadas duas estratégias para reduzir as perdas por percolação profunda. A melhor estratégia para a detecção da chegada da frente de umedecimento, evitando a percolação profunda, consistiu em utilizar dois sensores, colocados em profundidades distintas, sendo um sensor de alerta e um sensor de controle.

Palavras-chave: agricultura irrigada; eficiência de irrigação; agricultura familiar; aquisição de dados; sensores de umidade do solo.

ABSTRACT

Irrigated agriculture is an activity that makes intensive use of water resources, requiring the continuous development of technologies that enable more efficient water use. To improve irrigation performance, it is essential to develop management strategies that can reduce the use of water resources without compromising agricultural production. Several methods and instruments can be used to manage an irrigation system. Much of the existing technology for managing irrigation, however, is not easily accessible to small-scale farmers. In addition, the existing instruments for managing irrigation are mostly short-lived, expensive, and difficult to maintain and replace. The general objective of this thesis was to develop and evaluate an irrigation management system (SAAPD) based on the detection of the wetting front in the soil. SAAPD was designed using modular architecture, which allows the integration of new sensors, such as climate sensors, and new functionalities, such as different forms of communication with the irrigator, new irrigation management strategies, and alternatives for interconnection with field sensors. The SAAPD was installed in the field for two years (2024 and 2025). During this period, the SAAPD was exposed to extreme weather conditions without presenting any abnormalities or defects in its control, communication, or energy transformation components. For wetting front detection, three soil sensors were evaluated, one capacitive and two resistive. The HL-69 resistive sensor was chosen because it presents faster responses in detecting the wetting front arrival. Two strategies were tested to reduce losses due to deep percolation. The best strategy for detecting the wetting front arrival time at a depth, avoiding deep percolation, consisted of using two sensors, placed at different depths, one alert sensor and one control sensor.

Keywords: irrigated agriculture; irrigation efficiency; family farming; data acquisition; soil moisture sensors.

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	17
2	OBJETIVOS	20
2.1	Objetivo geral	20
2.2	Objetivos específicos	20
3	REVISÃO DE LITERATURA.....	21
3.1	Manejo da irrigação	21
3.2	Sistema de aquisição, armazenamento e processamento de dados (SAAPD)	22
3.3	Sensores elétricos de baixo custo	24
3.4	Movimento de água no solo	26
4	MATERIAL E MÉTODOS.....	30
4.1	Área experimental.....	30
4.2	Desenvolvimento de sistema de aquisição, armazenamento e processamento de dados (SAAPD)	31
4.3	Avaliação de sensores elétricos de baixo custo e aprimoramento de métodos para detecção da frente de umedecimento	32
5	RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	35
5.1	Sistema de aquisição, armazenamento e processamento de dados (SAAPD)	35
5.1.1	Interface de configuração do sistema de manejo de irrigação	39
5.1.2	Avaliação da demanda de energia	40
5.1.3	Software	42
5.2	Avaliação de sensores elétricos de baixo custo para detecção da frente de umedecimento	43
5.3	Avaliação do sistema de manejo de irrigação com base na detecção da frente de umedecimento de água no solo	46
5.3.1	Dados climatológicos	46
5.3.2	Avaliação de estratégias para a detecção da frente de umedecimento	47
5.3.3	Avaliação do sistema de manejo de irrigação com base na detecção da frente de umedecimento de água no solo	51

6	CONCLUSÕES.....	54
	REFERÊNCIAS.....	55

1 INTRODUÇÃO

A população mundial é estimada em 9,7 bilhões de habitantes em 2050, podendo crescer para 11 bilhões em 2100, segundo estimativas da Organização das Nações Unidas. Esse crescimento populacional, aliado a outros fatores, como, por exemplo, as mudanças do clima, impactará a demanda e a produção mundial de alimentos (Pereira, 2022).

Cenários de aumento da demanda por alimentos indicam a necessidade de aumentar a produção agrícola. Esse aumento, entretanto, tem que estar associado a um crescimento sustentável da produção, que dependerá, cada vez mais, da agricultura irrigada, que, por sua vez, é a principal usuária de recursos hídricos (Rodrigues, 2017).

Qualquer estratégia que vise melhorar o desempenho de irrigação, envolve melhorar o manejo, reduzindo o uso de recursos hídricos sem comprometer a produção agrícola. Essas estratégias precisam ser apoiadas por inovações tecnológicas que contribuam para uma alocação mais equitativa da água (Rosegrant, 2010).

Vários estudos (Das Neves, 2024; Feitosa, 2023) têm destacado a importância da irrigação para a manutenção da qualidade de vida de pequenos agricultores, principalmente em regiões, como o Cerrado, onde a chuva é muito variável. Estudo realizado nos estados Indianos de Andhra Pradeshe e Gujarat indicou um aumento de 30% a 100% na renda de pequenos agricultores que tiveram mais acesso à irrigação (Rodrigues, 2020).

Expandir o uso de sistemas de irrigação eficientes e de tecnologias que favoreçam o manejo da água na agricultura é parte fundamental da solução para aumentar os rendimentos das culturas de forma sustentável (Colbak, 2018). Nesse contexto, nota-se ser necessário o desenvolvimento contínuo de tecnologias que possibilitem o uso mais eficiente de água na irrigação. Essas tecnologias precisam ser robustas, em termos de durabilidade, e apresentar custos acessíveis para serem utilizadas também pelo pequeno produtor rural.

No Brasil, o pequeno produtor pode ser caracterizado de diferentes maneiras, como, por exemplo, pela renda. O desenvolvimento dessa agricultura geralmente ocorre em áreas de 5 a 10 hectares, na região Nordeste, e 10 a 50 hectares nas regiões Centro-Oeste e Norte (IBGE, 2017). Para essas áreas serem

economicamente viáveis, deve-se plantar culturas de alto valor agregado, como, por exemplo, fruticultura e hortaliças. Essas culturas dependem da irrigação para que sejam economicamente produtivas. O custo com energia elétrica para acionar os sistemas de irrigação pode chegar a 35% do custo total de produção (De Oliveira Feitosa, 2015).

Esse pequeno produtor representa aproximadamente 23% da produção brasileira de alimentos básicos, ocupando cerca de 80 milhões de hectares, divididos em 3,897 milhões de imóveis rurais (IBGE, 2017). Nessa classe de pequenos agricultores, encontra-se também os produtores que vivem em assentamentos, que apresentam ainda maior vulnerabilidade financeira. Na região do Vão do Paranã, em Goiás, por exemplo, são mais de cinco mil famílias.

Grande parte da tecnologia existente para manejar a irrigação, entretanto, não é de fácil acesso para a pequena agricultura. Além disso, os instrumentos existentes para manejar a irrigação, na sua maioria, são pouco duráveis, apresentam custos elevados e são de difícil manutenção e reposição. Muitos desses instrumentos são importados, outros apresentam limitação na sua operação, ou depende de informações adicionais, como, por exemplo, informações sobre as características físicas do solo, o que dificulta a sua utilização (Rodriguez-Ortega, 2017).

Nota-se, assim, a necessidade de desenvolver métodos e instrumentos simples e de fácil operação para manejar a irrigação, que possam ser facilmente apropriados e utilizados pelo pequeno agricultor irrigante. Outro aspecto importante, é que esses instrumentos sejam baseados em metodologia que necessitem de pouca informação adicional de solo ou clima para a sua operação.

O manejo de irrigação com base no deslocamento da frente de umedecimento no solo baseia-se no princípio de que a água no solo se move como um bloco contínuo, exceto nos casos de fluxo preferencial. A frente de umedecimento se forma em virtude da diferença resultante na umidade entre a zona superior saturada e o solo não saturado abaixo da zona úmida. A zona de transição entre o solo úmido e o solo seco é caracterizada por mudanças rápidas na umidade e é chamada de frente de molhamento ou de umedecimento. Na frente de umedecimento, o gradiente de umidade é tão acentuado que parece haver uma fronteira nítida entre o solo umedecido acima e o solo inicialmente seco abaixo. Isto ocorre porque a condutividade hidráulica do solo ainda não molhado é tão baixa que a água só consegue infiltrar quando o gradiente é muito acentuado (Hillel, 1998).

O deslocamento da frente de umedecimento pode ser utilizado para manejar a irrigação, dispensando a necessidade de se conhecer a priori as características do solo ou a sua umidade antecedente. Em solos mais secos, a frente se desloca com uma velocidade menor do que em solos mais úmidos. Diversos trabalhos que manejaram a irrigação com base na detecção da frente de umedecimento indicaram aumento da produtividade de uso da água (Ibragimov, 2021; Mengistu, 2015). Esses resultados sugerem que o manejo de irrigação com base no deslocamento da frente de umedecimento da água no solo parece ser uma estratégia bastante promissora, entre outras coisas, por necessitar de poucas informações adicionais sobre solo, clima e cultura.

No entanto, ainda existem poucas opções de instrumentos para manejar a irrigação com base na detecção da frente de umedecimento. Hasnainsingh (2022) destaca que os métodos e dispositivos atualmente disponíveis para manejar a irrigação tornaram-se obsoletos ou limitados a aplicação em laboratórios experimentais e raramente são usados pelos agricultores para manejar a irrigação. Esses mesmos autores desenvolveram e testaram um detector eletrônico de frente de molhamento, que pode estimar a umidade do solo, detectar e alertar a necessidade de irrigação, se o teor de umidade do solo na zona radicular da cultura cair abaixo ou acima de um determinado nível.

Nota-se que há oportunidade para o desenvolvimento de sistemas automáticos, robustos e de baixo custo visando o manejo da irrigação do pequeno irrigante. Nesse contexto, o manejo com base no deslocamento da frente de umedecimento parece ser uma opção promissora.

2 OBJETIVOS

2.1 Objetivo Geral

Aprimorar e desenvolver ferramentas que contribuam para melhorar e facilitar o manejo de irrigação.

2.2 Objetivos específicos

- i. Desenvolver e avaliar sistema de aquisição, armazenamento e processamento de dados;
- ii. Avaliar sensores elétricos de baixo custo para detecção da frente de umedecimento;
- iii. Desenvolver e avaliar sistema para manejo de irrigação, com base na detecção da frente de umedecimento de água no solo.

3 REVISÃO DE LITERATURA

3.1 Manejo da irrigação

O momento ideal para o início da irrigação depende de vários fatores, incluindo o tipo de cultura, o clima, a umidade do solo e a fase de desenvolvimento da planta. No entanto, algumas diretrizes gerais são recomendadas: monitoramento da umidade do solo, evapotranspiração e déficit hídrico, horário do dia e fases fenológicas da cultura (Allen, 1998).

Considerando a planta como referência para o controle da irrigação existem alguns métodos que auxiliam a tomada de decisão: resistência dos estômatos, potencial hídrico das folhas, temperatura do dossel vegetativo e grau de turgescência das folhas. Estes métodos são complexos, de alto custo e necessitam de automação, geralmente utilizados somente em pesquisa (Alfonsi, 1990).

Quando o manejo da irrigação é feito de forma direta, com base em informações do solo, o método gravimétrico é geralmente utilizado como referência. Porém, esse método, além de altamente demandante em termos de mão de obra e tempo para coleta das amostras, o resultado leva, em geral, 24 horas para ser obtido (Kargas, 2012).

Os métodos indiretos de estimativa da umidade do solo, são alternativas usualmente utilizadas no manejo. Existem técnicas mais precisas, porém com preços mais elevados, como, por exemplo, as técnicas de dispersão de nêutrons, atenuação de raios gama e ressonância magnética. Essas técnicas além do custo, também apresentam riscos da manipulação da radiação nuclear (Zazueta, 1994).

As medições da quantidade de água no solo também podem ser realizadas com técnicas eletromagnéticas como: sensores resistivos, sensores capacitivos e sensores TDR (Time-Domain Reflectometer) (Zazueta, 1994). Ainda, o manejo da irrigação via solo pode ser realizado com o emprego de tensiômetro, o qual possibilita o monitoramento do potencial matricial da água no solo, informando ao irrigante o momento de início da irrigação e, também, controlando o quanto irrigar (Pires, 1999).

O manejo da irrigação também pode ser monitorado via clima, pela reposição da demanda hídrica desde o último evento de irrigação ou pelo balanço hídrico, que considerada todas as entradas e saídas de água do solo, irrigação precipitação e evapotranspiração. Para o cálculo da evapotranspiração existem vários modelos já

propostos: o modelo Penman-Monteith (Allen, 1998), o modelo de Hargreaves-Samani (Carvalho, 2015), o modelo de Camargo (Pereira, 1997), o modelo de Makkink (Pereira, 1997), o modelo de Linacre (Pereira, 1997), o modelo de McGinness-Bordne (Oudin, 2005), o modelo de Romanenko (Oudin, 2005), o modelo de Holdridge (Holdridge, 1959), o modelo Jensen-Haise (Pereira, 1997), entre outros.

3.2 Sistema de aquisição, armazenamento e processamento de dados (SAAPD)

A aquisição, o armazenamento e o processamento do dado para o manejo da irrigação são os grandes desafios a serem enfrentados na atualidade. Sistemas de coleta de dados pouco confiáveis comprometem a tomada de decisão, impactando diretamente na produção.

O sistema de aquisição, armazenamento e processamento de dados (SAAPD) é um sistema de controle baseado em um microprocessador dedicado a funções de aquisição de dados e algoritmos dedicados a uma determinada tarefa. No caso específico de sistemas de irrigação, onde o equipamento fica exposto às condições do ambiente, sujeito a alta temperatura, umidade e poeira, é fundamental que o SAAPD tenha maior resistência à exposição a condições de operação extremas.

O SAAPD possui memória programável para armazenamento do programa de software que desenvolve tarefas de aquisição de dados, sequenciamento de operações e controle de tempo (IEC, 2003). O sistema de aquisição, armazenamento e processamento de dados pode ser programado para detectar, ativar e controlar equipamentos, incorporando várias entradas e saídas de dados, permitindo que sinais elétricos sejam interligados (BS, 1994).

A principal função do SAAPD é interpretar funções lógicas, dependendo do estado dos circuitos de entrada e saída (Dementyev, 2017). O sistema de aquisição, armazenamento e processamento de dados codifica os valores das entradas analógicas e/ou digitais e sua unidade central de processamento utiliza os comandos programados pelo operador durante a configuração para determinar a resposta que será dada em suas saídas analógicas e/ou digitais.

Sensores são conectados as entradas do sistema de aquisição, armazenamento e processamento de dados, fornecendo medidas elétricas que são interpretadas pelo software de controle armazenado na memória, fornecendo informações de interesse ao usuário (IEC, 2003).

Os valores de interesse que o sistema de aquisição, armazenamento e processamento de dados precisa disponibilizar ao irrigante são armazenados em um cartão de memória removível, na tecnologia SD. Um módulo SD (Secure Digital) de memória é um dispositivo de armazenamento portátil que utiliza tecnologia de memória flash para armazenar dados (IEC, 2003).

Quanto à modularidade, o SAAPD pode ser expandido sem necessidade de qualquer alteração em seu software de controle. O software de controle é um programa instalado no sistema de aquisição de dados que é o responsável pela sua inicialização e o reconhecimento de todos os periféricos ligados (IEC, 2003).

A confiabilidade e robustez do SAAPD estão relacionadas com a segurança do sistema, operando em condições adversas e sem falhas por um longo período. A precisão está vinculada ao sistema de conversão dos sinais analógicos em sinais digitais, sem perda da confiabilidade e precisão dos dados da informação coletada. As ferramentas de gerenciamento permitem que o SAAPD seja configurado conforme a aplicação em que está sendo empregada (Goyal, 2012). Quando uma aplicação está sendo executada no SAAPD, um programa de software é continuamente executado em um ciclo de varredura, sempre fazendo uma imagem dos valores amostrados nas entradas de dados e atualizando os valores das saídas de dados (Parr, 2003).

Ainda, o SAAPD pode registrar dados provenientes de fontes externas como uma estação agrometeorológica ou dados de sensoriamento remoto (Voutos, 2019).

Existem muitos fabricantes de sistema de aquisição, armazenamento e processamento de dados. Cada um apresenta pontos fortes e fracos. Alguns fabricantes apresentam sistema de aquisição, armazenamento e processamento de dados com alta capacidade de armazenamento de dados, mas com poucas entradas para sensores (Rajmond, 2010; Ning, 2010; Suzdalenko, 2012; Nkom, 2009; Mahzan, 2013). Outros fabricantes têm sistemas com grande quantidade de entradas para sensores, porém com baixa capacidade de armazenamento (Rafique, 2014; Kemis, 2012; Chaudhary, 2014; Coopmans, 2008; Johnson, 2014; Kioumars, 2011).

Uma das características mais importantes para o SAAPD dedicado ao manejo da irrigação é sua robustez e resistência às intempéries. Como exemplo de estação robusta e resistente a intempéries existem no mercado alguns fabricantes como: Campbell, Vaisala, OTT Hydromet, entre outros.

Os principais meios de transmissão remota de dados do SAAPD são: Rádio, Satélite, Telefone e rede sem fio. A escolha do sistema de transmissão deve

considerar: a qualidade e cobertura do serviço, a frequência de transmissão, quantidade de dados a serem transmitidos, distâncias entre os pontos de comunicação, fontes de alimentação para todos os dispositivos, preço de instalação e manutenção, licença de frequência de transmissão (Rádio) e as possibilidades de desenvolvimento futuro (Rosiek, 2008).

3.3 Sensores elétricos de baixo custo

As variáveis de interesse para o manejo da irrigação vão depender, em grande parte, da metodologia de manejo que se está utilizando (KRAMER, 1995). Para o manejo via solo, as variáveis que influenciam o crescimento das culturas são a temperatura, nutrientes, quantidade de umidade disponível, pH, entre outros (Venter, 2010).

A temperatura do solo é um parâmetro que influencia a germinação, floração e o crescimento de plantas. Também influencia os aspectos físicos, químicos, e processos microbiológicos em solos (Viets, 1990). As propriedades do solo afetam sua temperatura. Aspectos como capacidade térmica específica, condutividade térmica, densidade aparente, textura, quantidade de umidade disponível e cobertura da superfície afetam diretamente a temperatura do solo (Chapin, 2012).

Alguns sensores eletrônicos de temperatura estão disponíveis no mercado, como os termopares, os detectores de temperatura por resistência e os termistores (McGee, 1988). Os termopares possuem um par de condutores de materiais eletricamente diferentes para obter uma leitura elétrica que é correlacionada com a temperatura, proporcionando uma medição precisa da temperatura (Yolcubal, 2003). Os detectores de temperatura por resistência funcionam medindo a variação de uma resistência elétrica, normalmente de platina, em função da variação da temperatura. Comparado com termopares, os detectores de temperatura por resistência têm maior precisão, melhor estabilidade e melhor repetibilidade em medições de temperatura (Yang, 2013). Os termistores são confeccionados em uma cerâmica semicondutora ou um polímero, possuindo um coeficiente positivo ou negativo de temperatura. Ainda, apresentam uma melhor resolução de leitura comparado com os detectores de temperatura por resistência (Sui, 2019).

A medição de pH do solo indica sua acidez ou alcalinidade, sendo impactado pelo material de formação do solo, organismos e clima. O pH do solo determina o

comportamento de diferentes nutrientes, afetando sua disponibilidade para a planta. O pH ideal do solo para o crescimento da planta varia entre 5,5 e 7,5 (Nielsen, 2010). A medição do pH pode ser por técnica ótica, podendo utilizar o método colorimétrico ou fotométrico, ou técnica eletroquímica, através dos métodos condutometria ou potenciometria (Khan, 2017). Pela complexidade das medições da técnica ótica, este método não é muito utilizado para medições no campo (Yin, 2021). Para a medição pela técnica eletroquímica, o sensor condutométrico de pH utiliza um polímero sensível ao pH em seu eletrodo (Palaparthi, 2013). O sensor potenciométrico de pH possui dois eletrodos, sendo um revestido com material sensível ao pH e o outro revestido de material inerte, por exemplo prata, sendo a referência. O valor medido do pH é a diferença de potencial entre os eletrodos (Nielsen, 2010).

A quantidade de umidade disponível no solo tem uma importância muito grande no crescimento das plantas e nas propriedades físico-químicas do solo. Para determinar a umidade disponível no solo, sensores elétricos medem a permissividade dielétrica, o potencial matricial e a massa do solo. Os sensores de umidade do solo são classificados como capacitivos, de indução eletromagnética, ultrassônicos e óticos (Sulaiman, 2009; Andrade-Sánchez, 2004; Robinson, 2008).

Existe uma variedade de sensores comerciais que fornecem, com precisão, a umidade no solo. Porém, devido ao alto custo de aquisição e manutenção, procedimentos elaborados para a calibração e a necessidade de pessoal treinado, as aplicações no campo são limitadas. Por outro lado, existem vários tipos de sensores de baixo custo que fornecem a quantidade de umidade disponível no solo a custos acessíveis (Schwambach, 2023).

Para a coleta de dados de umidade do solo, podem ser usados sensores capacitivos, ©093, de baixo custo e de fácil aplicação (Martini, 2015). O sensor capacitivo é baseado no princípio da permissividade dielétrica. Como a permissividade dielétrica da água é muito maior do que dos outros componentes do solo, ar e minerais, a presença ou não de água afeta diretamente medição do sensor capacitivo. Porém, esses sensores de baixo custo podem apresentar variabilidade na mesma medição entre sensores diferentes, o que pode afetar a precisão da medição quando se deseja determinar a quantidade de umidade disponível no perfil de solo (Bogena, 2017).

Também podem ser utilizados sensores resistivos de baixo custo, por exemplo, o HD-38 e o HL-69, que medem a impedância do solo, a qual varia com a quantidade

de umidade disponível. A medição da impedância do solo também varia com sua temperatura e salinidade. (Miller, 1997). O sensor resistivo possui duas pontas de prova funcionando como resistências variáveis em função da umidade disponível no solo. O aumento da umidade no solo aumenta a condutividade entre as pontas de prova do sensor resistivo (Saleh, 2016).

Para a determinação do potencial matricial na frente de umedecimento (ψ_f) pode-se utilizar um tensiômetro digital na profundidade desejada (Cecílio, 2007). O sensor registra a pressão de meios gasosos de acordo com o princípio de medição piezoresistivo, na faixa de -100 a 0 kPa de pressão relativa. O princípio de medição piezoresistivo refere-se a um método de medição baseado na variação da resistência elétrica de um material quando submetido a uma deformação mecânica, como pressão ou tensão (Cecílio, 2007).

Estes sensores instalados em profundidades pré-determinadas podem detectar a chegada da frente de umedecimento em eventos de irrigação. Com a chegada da frente de umedecimento, as variações elétricas são detectadas nos sensores e informadas ao usuário.

3.4 Movimento de água no solo

No ciclo hidrológico, a infiltração é o processo de passagem da água da superfície para as profundezas do solo. A quantidade de água infiltrada pode recarregar os aquíferos ou ser o manejo de irrigação (Skaggs, 1982).

O processo de infiltração é descrito aproximadamente através do uso de equações matemáticas. Existem dois tipos de equação para estimar a infiltração da água no solo: as equações empíricas e as equações baseadas na representação física do processo de infiltração (Skaggs, 1969). As equações empíricas têm seus parâmetros obtidos a partir do ajuste aos dados de campo, dificultando sua aplicação. As equações físicas são desenvolvidas através de uma análise teórica do processo (Rodrigues, 1997).

O monitoramento da infiltração da água no solo teve início com o desenvolvimento da técnica dos tensiômetros, medição do teor de água usando a sonda de nêutrons e medições da propriedade dielétrica do solo (Richards, 1936; Gardner, 1952; White, 1995).

A infiltração da água no solo pode ser dividida em três fases (Halevy, 1973):

Fase I – Zona de transmissão: a umidade do solo está próxima da saturação;

Fase II – Zona de umedecimento: ocorre o fluxo da água na direção do menor potencial total; e

Fase III – Frente de umedecimento: é o limite extremo da zona de molhamento.

O movimento da água no solo se dá entre dois pontos, onde exista uma força ou um gradiente de potencial entre eles. O sentido do movimento da água é sempre do potencial negativo mais alto para o mais baixo (Withers, 1986).

Os potenciais que atuam no solo são o matricial (devido as forças capilares), o osmótico (resultante dos sais dissolvidos na água) e a gravidade. Para o sistema radicular da planta absorver água do solo, a planta deve aplicar uma força de sucção que, por ser pequena, retirará primeiro a água dos poros grandes até o esgotamento. A facilidade com que a planta extrai essa água varia com a umidade existente no solo (Pequeno, 2002).

Este estudo testa três tipos de sensores elétricos de baixo custo, dois resistivos e um capacitivo, para tentar identificar a posição da frente de umedecimento, para que o sistema de irrigação aplique somente a quantidade de água necessária para suprir a área de raiz da cultura, evitando a percolação, que significa perda de água, nutrientes e energia elétrica.

Para acompanhar o comportamento da água no solo durante o desenvolvimento da cultura, foram utilizados sensores TDR nas profundidades 10 e 20 cm. Também foi feito o uso do método gravimétrico para quantificação da umidade disponível no solo no perfil estudado.

Em sistemas de agricultura de precisão, os métodos indiretos são empregados para monitoramento da umidade disponível no solo, pois possibilitam repetidas medições, com a redução da margem de erro das leituras (Zazueta, 1994).

A condutividade hidráulica foi quantificada em 1856 pelo engenheiro francês Henri Darcy através de um experimento que relacionava a velocidade de percolação do fluido no meio poroso com o gradiente hidráulico, representando uma variável importante para análise da intensidade do deslocamento da água no solo, analisando o movimento da água no solo (Freeze, 1979).

O potencial matricial do solo é a energia potencial da água retida no solo devido à atração existente entre suas partículas, o qual indica a disponibilidade de água para as plantas, influenciando a capacidade do solo de reter e fornecer água para as raízes. O potencial matricial é afetado pela textura do solo, estrutura, conteúdo de matéria

orgânica e outros fatores. Essa medida é fundamental para compreender a hidrologia do solo e o manejo em sistemas de irrigação (Reichardt, 1985).

Dentre os parâmetros de entrada do modelo de GA, o potencial matricial na frente de umedecimento (ψ_f) é o de mais difícil determinação. O cálculo do potencial matricial na frente de umedecimento é obtido a partir do cálculo da área sob a curva de potencial matricial versus condutividade hidráulica relativa no solo, ou através de medição pelo tensiômetro digital (Cecilio, 2007).

A equação de Green-Ampt (Green, 1911; Mein e Larson, 1973):

$$T_i = K_0(1 + (\psi(\theta_s - \theta_i)/I))$$

T_i – taxa de infiltração da água no solo, mm/h;

K_0 – condutividade hidráulica do solo saturado, mm/h;

ψ – potencial matricial médio na frente de umedecimento, mm;

θ_s – umidade do solo na saturação, cm³/cm³;

θ_i – umidade inicial do solo, cm³/cm³ e

I – infiltração acumulada, mm.

A infiltração acumulada (I) é dada por:

$$I = L(\theta_s - \theta_i),$$

onde L : profundidade da frente de umedecimento.

O movimento da água no solo acontece como uma frente devido à diferença na condutividade hidráulica entre o solo úmido e a camada mais profunda do solo, ainda não molhada. Isto é, a condutividade hidráulica do solo seco é baixa, possibilitando que a água penetre o solo quando houver um gradiente de condutividade hidráulica entre as camadas do solo. Assim, conclui-se que quanto mais seco o solo estiver inicialmente, mais abrupta deve ser a frente de umedecimento (Hillel, 1998).

Quando a profundidade do solo úmido é pequena e as camadas de solo subjacente estão relativamente secas, um forte gradiente de sucção aumenta o gradiente gravitacional, causando uma rápida taxa de redistribuição da umidade no solo. Em situação contrária, quando a profundidade do solo úmido é grande e as camadas adjacentes de solo estão úmidas, o gradiente de sucção será pequeno,

deixando a taxa redistribuição da umidade no solo ser influenciada somente pela gravidade (Hillel, 1998).

Após a detecção da chegada da frente de umedecimento, o sistema de irrigação é desligado. Porém, a umidade infiltrada continua penetrando no solo, o que é conhecido como redistribuição. Acontece um alongamento da frente de umedecimento devido ao fluxo não-saturado devido as forças de capilaridade e gravitacional. A profundidade da frente de umedecimento (L) aumenta durante a redistribuição, diminuindo a quantidade de água disponível no perfil L (Ogden, 1997).

4 MATERIAL E MÉTODOS

4.1. Área experimental

Para avaliação do sistema de aquisição, armazenamento e processamento de dados (SAAPD), foi instalado experimento de junho de 2024 a março de 2025, com a cultura aveia preta. O experimento foi instalado na área experimental de agricultura irrigada da Faculdade de Ciências Agrárias e Tecnológicas da UNESP, Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, campus Dracena, coordenadas geográficas, 21°29' de Latitude Sul e 51°32' de Longitude Oeste e altitude média de 385 m.

O clima da área é classificado como tipo Aw (tropical úmido), com temperatura média anual de 22,1°C e umidade relativa média igual a 64,2% (Koeppen, 1948). A precipitação anual é de 1.563,8 mm, sendo que 1.090,2 mm ocorrem na primavera e verão. A evapotranspiração anual é de 1.324,4 mm, variando de 441,5 no verão a 201,9 mm no inverno (Barbosa, 2024).

O solo da área experimental foi classificado como oxissolo, com 91% de areia, 3% de silte e 7% argila, na camada de 0 a 10 cm; já, a camada de 10 a 20 cm, apresentou 89%, 5% e 6% de areia, silte e argila, respectivamente. Para as camadas de 0 a 10 e 10 a 20 cm, as umidades do solo na capacidade de campo (-30 kPa) foram iguais a 0,17 e a 0,14 m³ m⁻³ e no ponto de murcha permanente (-1500 kPa) iguais a 0,06 e 0,07 m³ m⁻³, respectivamente (Olivério, 2020). A condutividade hidráulica do solo saturado varia de 200 a 300 mm h⁻¹ (Fernandes, 2011).

A irrigação foi realizada por meio de um sistema de irrigação por microaspersão. O sistema consistia em dez microaspersores conectados por tubos de 4 mm (1 metro de comprimento), conectados a 2 linhas com tubos de 16 mm, conectados a uma adutora de 25 mm, todos de polietileno. Os microaspersores foram espaçados 2,5 m entre linhas e 3,0 m entre si, aplicando uma lâmina de irrigação de 3 mm h⁻¹.

O experimento foi montado no delineamento em blocos casualizados, com seis repetições em um tratamento (sensor HL-69 na profundidade 5cm), totalizando seis parcelas experimentais. Os resultados foram avaliados por correlação e análise de variância.

A irrigação foi aplicada em intervalos de tempo variando entre dois, três ou quatro dias. Antes e 12 horas após a ocorrência de cada evento de irrigação, eram coletadas amostras de solo para avaliação da umidade por gravimetria. A umidade do solo foi também monitorada por meio de sensores TDR (Time Domain Reflectometry) instalados a 10 e 20 cm de profundidade.

A profundidade do sistema radicular da cultura foi avaliada semanalmente, utilizando-se aleatoriamente três plantas para análise. O solo ao redor da planta era escavado até expor o sistema radicular. Essa avaliação possibilitou monitorar o desenvolvimento radicular ao longo do ciclo da cultura, fornecendo dados sobre o desenvolvimento da planta.

4.2. Desenvolvimento de sistema de aquisição, armazenamento e processamento de dados (SAAPD)

Um sistema de aquisição, armazenamento e processamento de dados (SAAPD) é um sistema eletrônico usado em sistemas de automação para monitorar, controlar e gerenciar máquinas e processos. Ele é projetado para substituir sistemas de controle baseados em relés e temporizadores, oferecendo maior flexibilidade, confiabilidade e capacidade de reprogramação.

Neste trabalho, o SAAPD foi utilizado para fazer a aquisição de dados dos sensores de campo de forma automática, eliminando o trabalho manual de leitura dos sensores. O SAAPD possibilita também a criação de rotinas de manejo, que utiliza os dados coletados em campo e apresenta respostas otimizadas para a utilização do sistema de irrigação (Bolton, 2015).

Um SAAPD é composto por um microprocessador, sistemas de entradas e saídas de dados e canais de comunicação com o usuário. O SAAPD controla os sensores de aquisição de dados de campo, atua no sistema de irrigação e se comunica com o usuário irrigante.

No caso específico da irrigação, o SAAPD fica exposto às condições do tempo, sujeito a altas temperaturas, poeira e umidade. Assim, é fundamental que o SAAPD seja robusto e resistente às variações climáticas. Na etapa de avaliação dos melhores componentes para compor o SAAPD, foi considerado a capacidade de suportar operações em condições extremas, sem perder a confiabilidade e a precisão.

Na escolha do SAAPD, foi levado em consideração a possibilidade de expandir os módulos de entrada e de saída. A expansão é interessante por possibilitar acrescentar outras características ao sistema, como, por exemplo, aumentar o número de sensores de umidade de solo.

Uma característica importante do SAAPD é a sua autonomia. Isso é, o tempo que o sistema pode operar apenas com a bateria. Para estimar esse tempo e dimensionar as características necessárias da bateria e do sistema fotovoltaico, a demanda energética do SAAPD foi medida utilizando um medidor de potência do tipo DC 96 Plus – Multimetro CC (Kron, 2024).

A medição do consumo de energia foi feita em cada um dos elementos do sistema. Essa medida possibilitou definir a capacidade da bateria e do sistema fotovoltaico necessário para suprir a demanda de energia exigida para a operação.

4.3. Avaliação de sensores elétricos de baixo custo e aprimoramento de métodos para detecção da frente de umedecimento

Uma etapa estratégica no desenvolvimento do SAAPD foi a seleção de sensores de umidade do solo. Como existe uma grande variedade de sensores no mercado, foi necessário definir algumas características mínimas do sensor mais adequado, tais como baixo custo, resistência mecânica ao uso e uma saída analógica para conexão ao SAAPD.

Na segunda etapa do trabalho, o objetivo foi definir, entre os sensores escolhidos, o sensor com a resposta mais rápida a detecção da chegada da frente de umedecimento na profundidade de controle. Foram realizados vários eventos de irrigação onde os tempos de resposta dos sensores à chegada da frente de umedecimento foram monitorados. Com base nos dados coletados foi identificado o sensor com a melhor sensibilidade a detecção da chegada da frente de umedecimento, isto é, o sensor que apresentava o menor tempo de detecção da chegada da frente de umedecimento.

Uma vez definido os sensores, eles foram calibrados. Para calibração, os sensores foram avaliados em ambiente controlado (Figura 1a). Para isto, foram utilizadas três caixas de pvc preenchidas com solo. O solo foi umedecido até a saturação. Posteriormente, as caixas foram cobertas (figura 1b). Após 48 horas, por

45 dias, foram retiradas amostras de solo diariamente para avaliação da umidade por gravimetria (Embrapa, 1997).

Os sensores instalados nas caixas, nas profundidades de 10, 20 e 30 cm, forneceram valores elétricos diários que foram comparados, por meio de regressão linear, com a umidade estimada pelo método gravimétrico, obtendo os coeficientes de calibração dos sensores.

Figura 1 – Vista das caixas de pvc utilizadas na calibração dos sensores



Fonte: O autor.

Na sequência foram testadas duas estratégias de operação para melhorar a acurácia na detecção da chegada da frente de umedecimento na profundidade pré-estabelecida. O foco principal nesta etapa foi reduzir as perdas por percolação profunda.

A primeira estratégia avaliada consistiu em monitorar a tendência de variação da umidade do solo, ao longo do tempo, indicada pelo sensor na profundidade de controle, 10 cm. Para isso, após o início da irrigação, monitorava-se as alterações nos valores medidos pelos sensores na profundidade de controle.

A segunda estratégia utilizada para reduzir as perdas por percolação profunda foi monitorar o tempo de chegada da frente de umedecimento na profundidade de alerta, 5 cm, ou seja, monitorar a chegada da frente antes da profundidade de controle, 10 cm. Com base no tempo de chegada na profundidade de 5 cm, o SAAPD realiza

uma estimativa do tempo necessário para a frente de umedecimento atingir a profundidade preestabelecida para o manejo, por exemplo, 10 cm.

Para isso, após a obtenção do tempo de chegada da frente de umedecimento na profundidade 5 cm, foram realizados testes, mantendo a irrigação ligada por um tempo: $t_a+10\%$, $t_a+20\%$ e $t_a+30\%$.

4.4. Avaliação do sistema para manejo de irrigação com base na detecção da frente de umedecimento de água no solo

Para a avaliação do sistema de manejo de irrigação foram realizadas irrigações, com turno de regas diferentes, visando avaliar a influência de diferentes déficits de umidade no solo no deslocamento da frente de umedecimento.

Foi instalado um sensor de alerta a 5 cm de profundidade e um sensor de controle a 10 cm. O controle da irrigação era feito com base no tempo gasto para a frente de umedecimento atingir o sensor de alerta (t_a).

Antes de cada irrigação, retirava-se uma amostra de solo para estimativa da umidade do solo por gravimetria. Doze horas após a irrigação, retirava-se outra amostra de solo com a finalidade avaliar a umidade final.

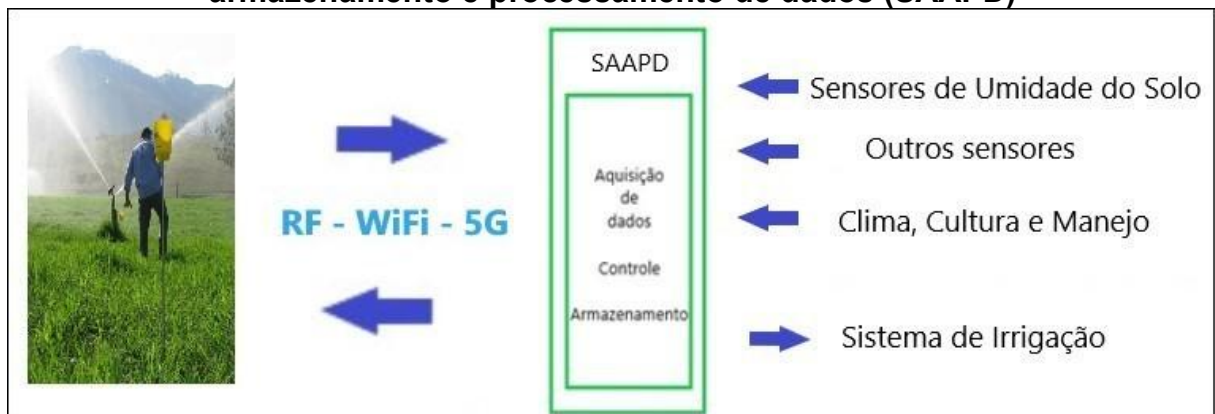
5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1 Sistema de aquisição, armazenamento e processamento de dados (SAAPD)

É importante se ter em mente que o SAAPD foi desenvolvido pensando em uma solução para o pequeno produtor irrigante, que muitas vezes não dispõe de acesso à internet e, em alguns casos, tem dificuldade de leitura. Assim, a versão mais básica da estação é uma solução analógica, ou seja, uma solução onde as informações são apresentadas na forma de sinais e botões no painel da SAAPD. A ideia foi trazer robustez e simplicidade à estação. A SAAPD apresenta também uma versão com opções de comunicação via WiFi, rede celular e WhatsApp.

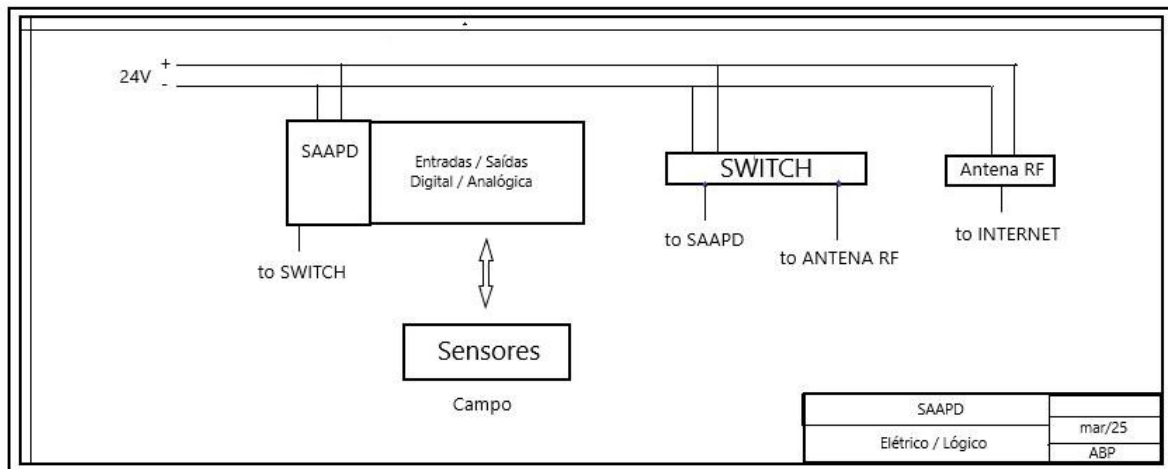
O SAAPD foi desenvolvido em arquitetura modular, Figuras 2 e 3, o que possibilita a integração de novos sensores, como, por exemplo, sensores de clima e novas funcionalidades, como, por exemplo, diferentes formas de comunicação com o irrigante, novas estratégias de manejo da irrigação e alternativas de interligação com sensores de campo.

Figura 2 – Esquema representativo do sistema de aquisição, armazenamento e processamento de dados (SAAPD)



Fonte: O autor.

Figura 3 – Projeto elétrico do sistema de aquisição, armazenamento e processamento de dados (SAAPD)



Fonte: O autor.

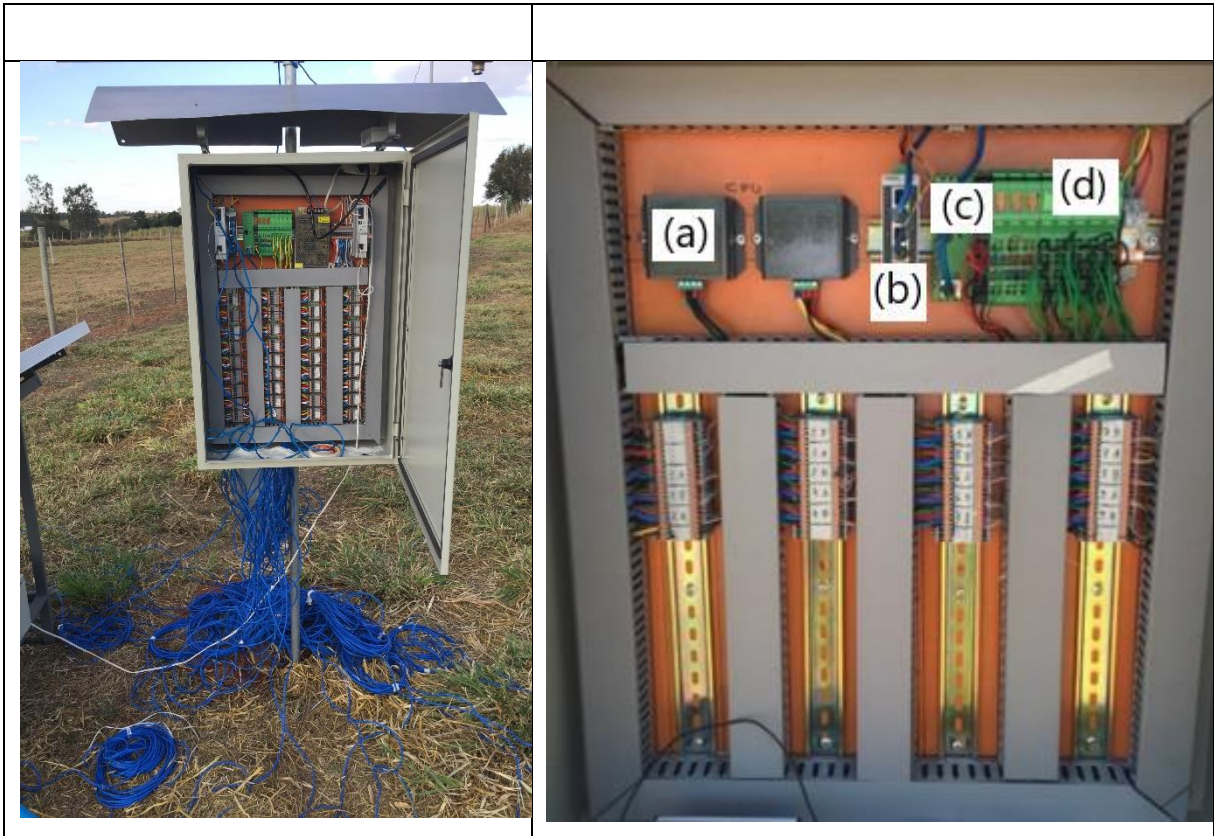
Após analisar as características de vários sistemas de aquisição, armazenamento e processamento de dados, considerando a capacidade de suportar operações em condições extremas de operação, sem perder a confiabilidade e a precisão, foi escolhido o controlador lógico programável ILC 131 ETH (Phoenix, 2024), que utiliza o microprocessador CPU Altera Nios II, com velocidade de processamento de 64 MHz, 8 kByte de memória interna, com possibilidade de ampliação de memória para até 2 GB (Phoenix, 2024).

O controlador ILC 131 ETH tem 8 entradas e 4 saídas digitais integradas. O SAAPD possui expansão para até 5 módulos de entrada analógica de 4 a 20mA, totalizando 20 entradas analógicas. Sua temperatura de funcionamento é definida entre -25 °C e 55 °C. Um módulo de entrada analógica de 4 a 20 mA é um padrão de conexão entre a porta analógica e o sensor. O sinal do sensor varia de 4 a 20 mA. Isso é, para o valor mínimo medido pelo sensor, se obtém a indicação de 4 mA e para o valor máximo é obtido o valor de 20 mA. Quando a leitura do valor do sensor está fora da janela 4 a 20 mA é um indicativo de defeito no sensor.

Os conceitos de interfaces de entrada e saída (I/O) e a programação do controlador ILC 131 ETH estão de acordo com IEC61131-3 (Phoenix, 2024), que é a norma que rege a padronização das linguagens de programação para a automação industrial.

Na Figura 4 apresenta-se foto do sistema de aquisição, armazenamento e processamento de dados (SAAPD), com destaque para os principais componentes.

Figura 4 – Sistema de aquisição, armazenamento e processamento de dados e seus componentes – (a) conversores de energia; (b) switch de comunicação; (c) microcontrolador e (d) portas de entradas analógicas



Fonte: O autor.

O conversor de energia é utilizado para converter as voltagens de 12V para 5V, para os sensores, e para 24V para o microcontrolador. O switch de comunicação é utilizado para conectar a antena de rádio frequência ao SAAPD. O microcontrolador controla o sistema e as portas recebem os sinais medidos pelos sensores.

O SAAPD foi instalado no campo em maio de 2023. Durante esse período, o SAAPD esteve exposto às condições do extremas do clima, sem apresentar nenhuma anormalidade ou defeito em seus componentes de controle, de comunicação ou de transformação de energia.

O custo final do SAAPD foi cerca de 15% do valor de um sistema similar no mercado. Por exemplo, o custo no mercado de um sistema de aquisição de dados, com 20 entradas analógicas 4-20mA e 20 sensores de umidade do solo, em outubro de 2024, foi cotado em cerca de R\$ 18.540,00. O custo do protótipo desenvolvido para realizar as mesmas operações teria um valor aproximado de R\$ 2.800,00.

Para apresentar uma solução economicamente viável ao irrigante, após a calibração do sensor ao solo da cultura, é possível utilizar uma solução onde apenas uma lâmpada indicativa é conectada ao sensor. Quando a lâmpada é acesa significa que o irrigante pode desligar o sistema de irrigação. Essa solução teria um custo aproximado de R\$ 100,00.

Na Figura 5 apresenta-se uma vista frontal do painel do SAAPD. Neste painel frontal é possível operar o SAAPD. O irrigante pode escolher a profundidade a ser monitorada, assim como iniciar a irrigação.

Figura 5 – Painel frontal Sistema de aquisição, armazenamento e processamento de dados SAAPD



Fonte: O autor.

No início da irrigação, o irrigante escolhe a profundidade a ser monitorada e pressiona o botão liga-desliga e o sistema começa a contabilizar o tempo até a chegada da frente de umedecimento na profundidade de alerta. Durante esse período, a luz indicativa (“ligado-piscando”), ficará piscando, assim como a luz indicativa da profundidade escolhida. Após transcorrido o tempo de chegada da frente de umedecimento na profundidade de alerta mais 10% deste tempo, a luz indicativa da profundidade de controle ficará acesa continuamente e a luz ligado-piscando apagará.

Na versão mais aprimorada do sistema, existe a possibilidade de o irrigante interagir com o SAAPD, via Whatsapp, definindo a profundidade de controle da frente de umedecimento desejada e monitorando o sistema de irrigação.

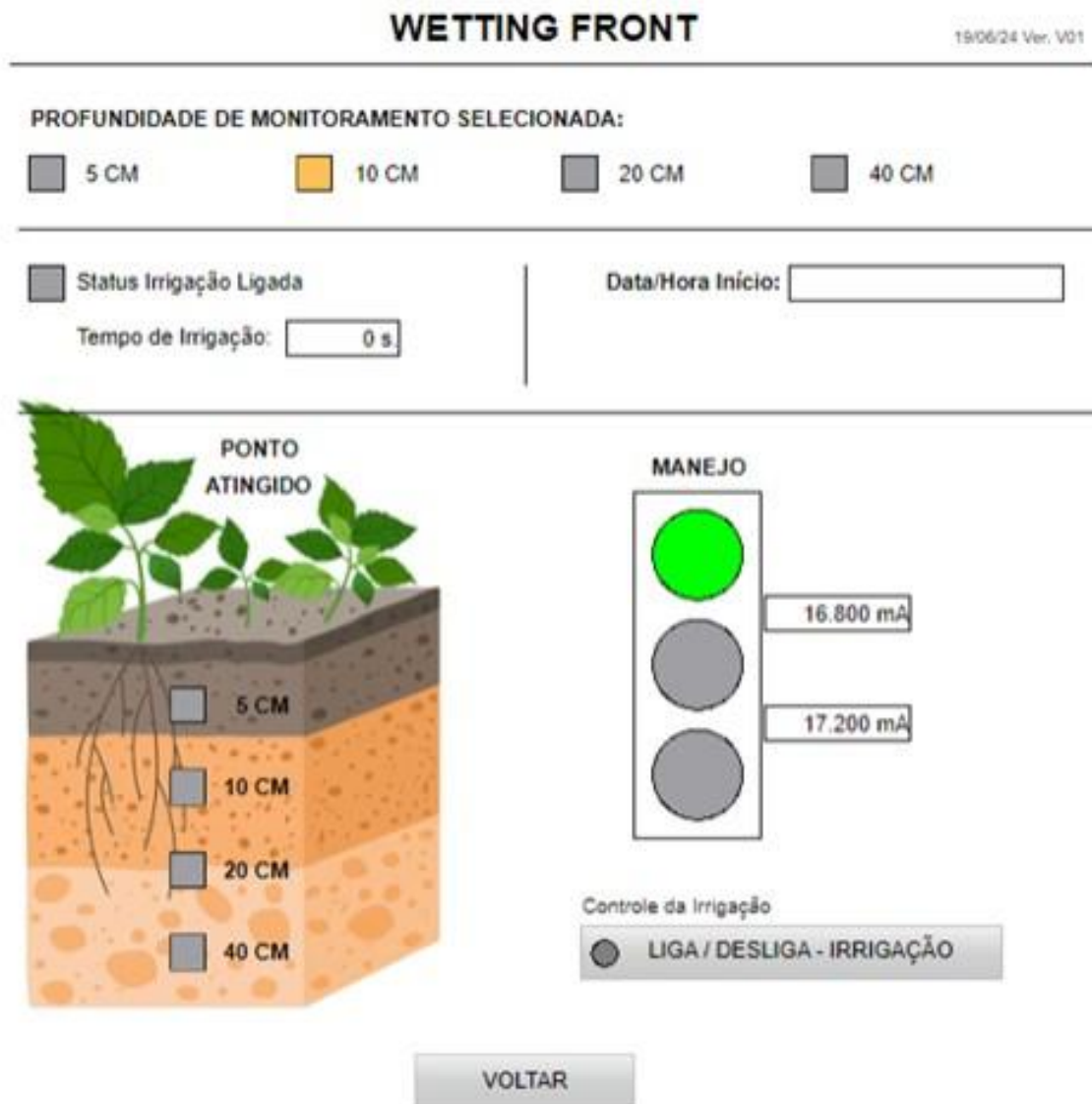
5.1.1 Interface de configuração do sistema de manejo de irrigação

O SAAPD possui interface gráfica web para a configuração da profundidade da frente de umedecimento que se deseja monitorar, Figura 6.

Para o desenvolvimento do acesso web, a interface gráfica que permite interação via navegador com o SAAPD, foram implementadas algumas telas como a tela de login para autenticação do usuário e a tela principal de parametrização. Essas telas foram implementadas usando as ferramentas HTML e JavaScript.

Na tela de parametrização, o usuário escolhe em qual profundidade a frente de umedecimento será monitorada e inicia o monitoramento da frente de umedecimento no botão LIGA / DESLIGA IRRIGAÇÃO.

Figura 6 – Tela de configuração do sistema de manejo de irrigação



Fonte: O autor.

5.1.2 Avaliação da demanda de energia

Na tabela 1 apresenta-se o consumo de energia médio por hora de cada componente do SAAPD. O cálculo da demanda de potência para suprir a necessidade de energia indicou que o SAAPD apresenta um consumo de energia médio de 212 Watts por dia, sendo necessário uma potência de 6,4 Kwh/mês.

Tabela 1 – Energia demandada pelos componentes do sistema de aquisição, armazenamento e processamento de dados

ID	Componente	Potência (W)
1	Controlador fotovoltaico	0,13
2	Conversor de tensão de 12V para 5V	0,07
3	Conversor de tensão de 12V para 24V	0,07
4	Microcontrolador	6,65
5	Switch	0,60
6	Antena de rádio frequência	0,50
7	Sensor de umidade do solo	0,85

Fonte: O autor.

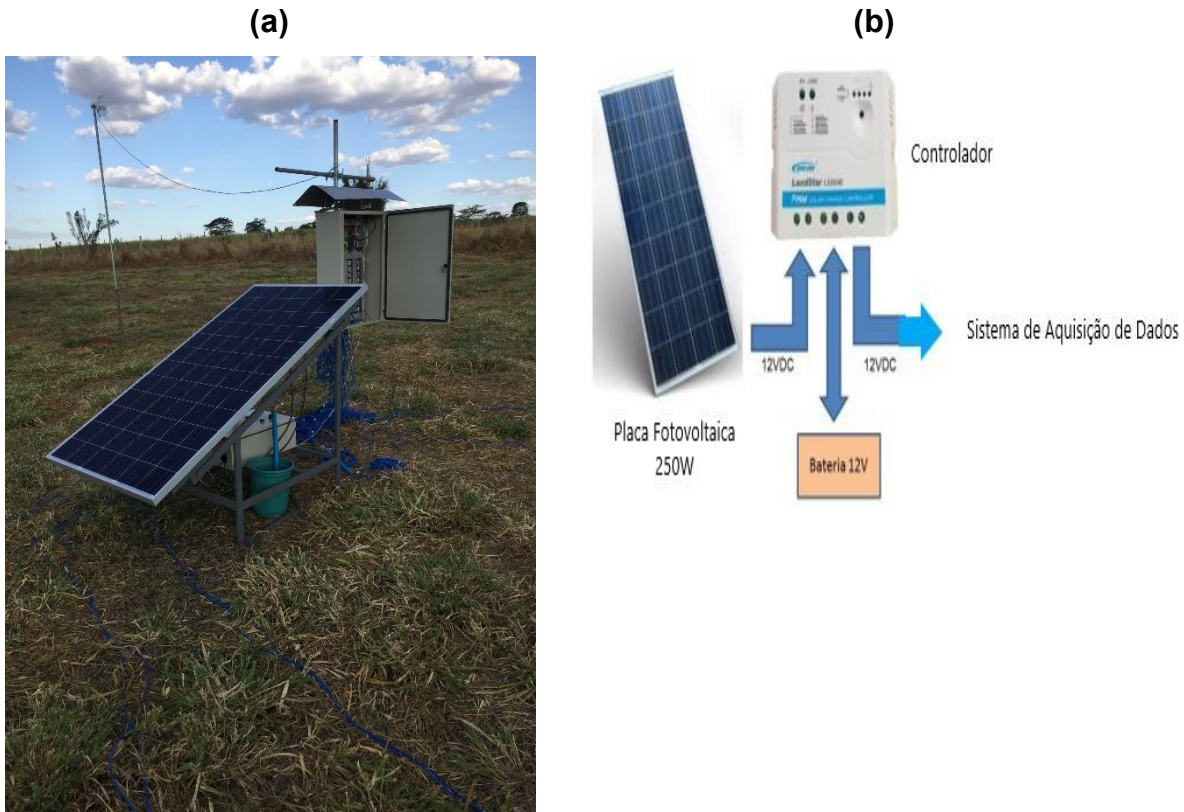
Durante as irrigações, os sensores de umidade do solo foram energizados até a frente de umedecimento atingir a profundidade de 5 cm. Após a chegada da frente de umedecimento na profundidade de alerta os sensores são desligados.

Assim, para suprir a necessidade de energia do sistema, foi instalada uma placa solar de 250W, que gera 30 kWh/Mês, o que equivale a uma geração diária de 1 kW ou de 40 W por hora. O sistema fotovoltaico projetado tem geração diária de energia elétrica de 1.000W e o sistema de aquisição de dados consome, em média, 212 W. Com isso, o sistema gera um excedente diário de energia de 790 W, que futuramente pode ser utilizado para a implementação de novos instrumentos e sensores.

Para armazenar a energia elétrica gerada pelo sistema fotovoltaico foi utilizado uma bateria fotovoltaica de 60 Ah, com capacidade de fornecer 720 W ao sistema de aquisição de dados. Essa configuração é capaz de suprir energia ao sistema por mais de 72 horas, sem nenhuma geração de energia elétrica pelo sistema fotovoltaico.

Na figura 7a apresenta-se o sistema fotovoltaico instalado na área experimental e na Figura 7b os componentes elétricos do sistema fotovoltaico.

Figura 7 – Sistema Fotovoltaico



Fonte: O autor.

5.1.3. Software

A programação do SAAPD foi estruturada nos softwares PCWORX, C++, HTML e JavaScript, utilizando a norma IEC 61131-3. No experimento, a programação do sistema de interpretação e armazenamento de dados foi dividida em cinco programas: o algoritmo de inicialização, o modo automático, o modo manual, tratamento de entradas analógicas e comunicação (Phoenix, 2011).

O software do sistema foi estruturado em módulos, propiciando que a operação seja independente do tipo de sensor utilizado. Portanto, novos sensores podem ser integrados ao sistema, sem necessidade de grandes alterações no software de controle. Com isso, diversas aplicações podem ser implementadas, com as mais diversas tecnologias de sensores disponíveis no mercado.

O algoritmo de inicialização foi desenvolvido utilizando diagramas de blocos para as ações de reconhecimento dos módulos de entrada analógica, responsáveis

pela aquisição de dados do campo e o módulo da comunicação de dados com servidor externo.

O modo automático é iniciado assim que o algoritmo de inicialização for concluído. Nos horários pré-determinados o sistema faz a aquisição dos dados dos sensores de campo.

O modo manual foi programado no programa principal e é utilizado quando o operador quer fazer uma aquisição dos dados dos sensores de campo, fora dos horários pré-programados.

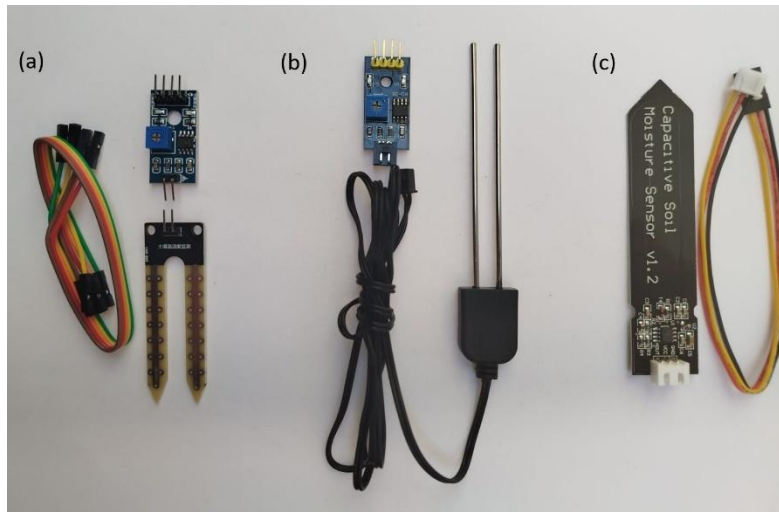
O tratamento das entradas analógicas é realizado por um algoritmo que interpreta os valores elétricos lidos nos sensores de campo e os apresenta ao operador.

O programa de comunicação via rádio frequência inicializa a rotina de comunicação de dados, que possibilita a transmissão de pacote de dados entre a estação de aquisição de dados e o mundo externo, viabilizando o acesso via web.

5.2 Avaliação de sensores elétricos de baixo custo para detecção da frente de umedecimento

Após os testes em casa de vegetação e com foco nas premissas de escolher sensores de baixo custo e de rápida resposta à variação de umidade do solo, foram selecionados para avaliação dois sensores resistivos, HL-69 (Tan, 2019), Figura 8^a, e o sensor HD-38 (Pinheiro, 2022), Figura 8b, e o sensor capacitivo SEN0193 (Muzdrikah, 2018), Figura 8c.

Figura 8 – Sensores de umidade do solo. (a) HL-69; (b) HD-38; (c) SEN0193



Fonte: O autor.

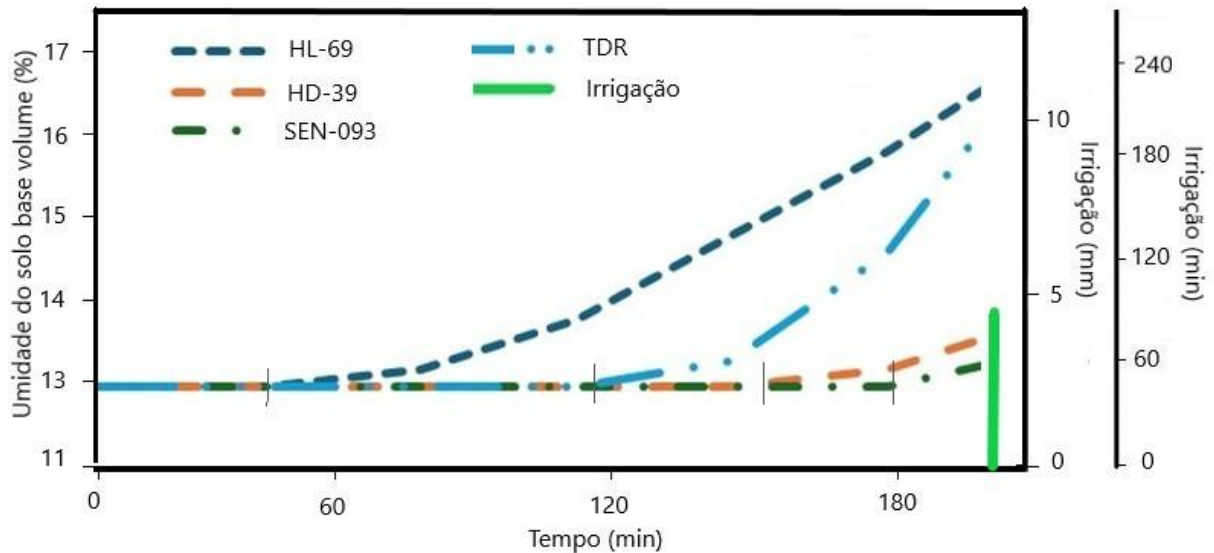
O sensor SEN0193 é um sensor capacitivo de umidade do solo de baixo consumo de energia, baixo custo, disponível comercialmente e com uma saída analógica. O sensor é feito de material resistente à corrosão que aumenta a durabilidade. Um ponto positivo deste sensor é que ele não é afetado pela presença de sais comumente usados durante a fertilização de culturas. Um ponto bastante negativo do sensor SEN0193, é que seus componentes eletrônicos estão expostos o que limita sua aplicabilidade em aplicações fora do laboratório (Schwamback, 2023).

O sensor HD-38 (Pinheiro, 2022) e o sensor HL-69 (Tan, 2019) são sensores resistivos de umidade do solo, de baixo consumo de energia, baixo custo, disponíveis comercialmente e com uma saída analógica. A diferença entre esses dois sensores é o tipo de sonda utilizada. O sensor HD-38 apresenta sonda em material não oxidável, enquanto o sensor HL-69 apresenta uma sonda, onde os terminais podem sofrer processo de corrosão. Um ponto positivo para esses dois sensores é que sua eletrônica não fica na sonda de prova, propiciando uma maior facilidade em aplicações de campo.

Para avaliação e escolha do sensor com o melhor desempenho para detecção da chegada da frente de umedecimento, foram realizados, de junho/2024 a outubro/2024, diversos eventos de irrigação. Na Figura 9 apresenta-se o resultado de uma das irrigações realizadas, indicando a resposta dos sensores à chegada da frente de umedecimento na profundidade de controle (traço em cor preta na vertical).

Conforme pode ser visto na figura 9, no início da irrigação a umidade do solo era de aproximadamente 13% (4% abaixo da umidade do solo na capacidade de campo). Foi realizada uma irrigação de 4,6 mm, com duração de 92 minutos.

Figura 9 – Umidade do solo e resposta dos sensores à chegada da frente de umedecimento



Fonte: O autor.

Analisando a Figura 9, observa-se que o sensor HL-69 começou a indicar variação de umidade do solo aproximadamente 47 minutos após o início da irrigação. O sensor resistivo HD-39 começou a indicar variação de umidade no solo aos 150 minutos após o início da irrigação. O sensor capacitivo SEN-093 indicou a variação aos 180 minutos.

Durante os eventos de irrigação, o deslocamento da frente de umedecimento foi também acompanhado por sensores TDR. O sensor TDR começou a indicar variação de umidade no solo 115 minutos após o início da irrigação. O sensor HL-69 indicou a chegada da frente de umedecimento 68 minutos antes do sensor TDR.

Ao final das avaliações de campo, considerando o tempo de resposta dos sensores à chegada da frente de umedecimento, optou-se por utilizar o sensor HL-69, que indicou o tempo de chegada da frente de umedecimento com sessenta e oito minutos de antecedência, quando comparado com o segundo sensor mais sensível.

Esse sensor mede a umidade do solo detectando a variação de resistência elétrica entre seus eletrodos. Ele possui interface analógica que facilita sua integração

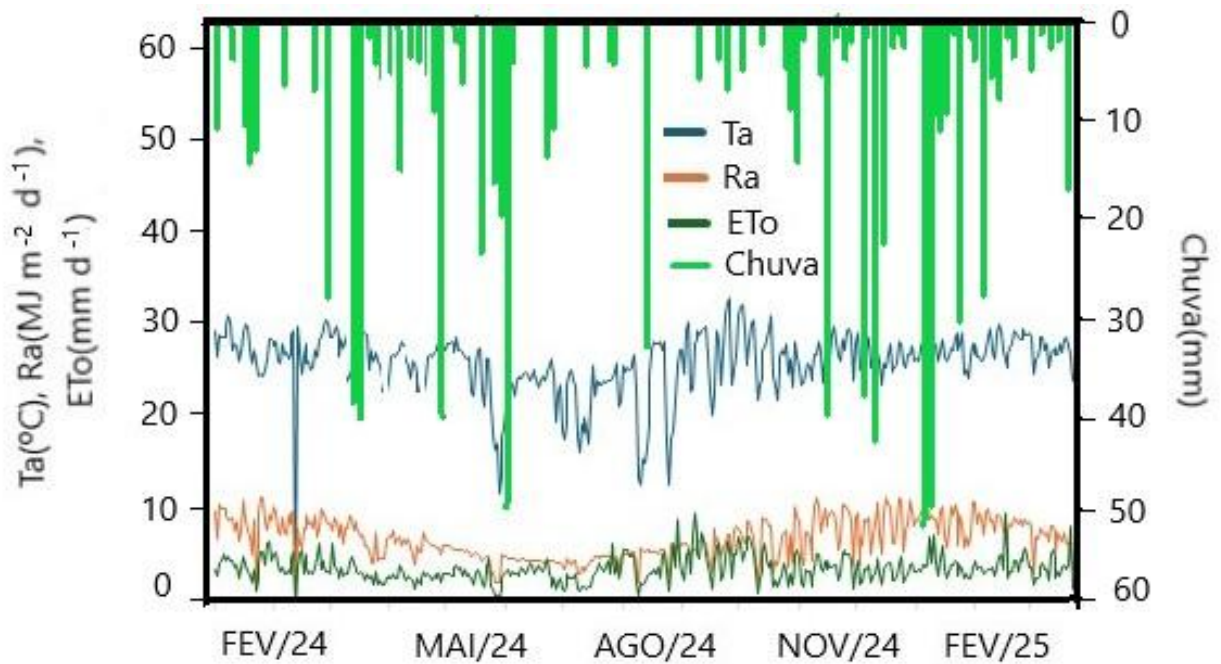
em sistema de automação. Por ser pequeno e compacto apresenta facilidade de aplicação no campo. Sua sonda pode sofrer degradação por corrosão a longo prazo, porém não necessitando de calibrações frequentes. Para a aplicação de detecção da frente de umedecimento, a corrosão tem pouca influência na resposta do sensor. O custo desse sensor varia entre R\$ 3,00 e R\$ 6,00. Ainda, após longo prazo de utilização do sensor, é possível a substituição somente de sua sonda, que custa R\$ 1,00.

5.3 Avaliação do sistema de manejo de irrigação com base na detecção da frente de umedecimento de água no solo

5.3.1. Dados climatológicos

As informações referentes à meteorologia diária observada na área do experimento estão apresentadas na Figura 10. Entre 2024 e 2025, a temperatura média diária do ar variou de 19,2 a 32,7 °C, com média anual igual a 25,8 °C. A radiação solar variou entre 6,5 e 9,9 MJ/m² e a evapotranspiração de referência variou entre 0,5 e 8,8 mm/dia, com média igual a 3,5 mm/dia. Embora a maior parte da precipitação (90%) tenha ocorrido entre os meses outubro a abril, observou-se alguns eventos, representando 10% do total, entre maio e setembro.

Figura 10 - Temperatura média do ar (Ta), radiação solar média (Ra) e evapotranspiração de referência média (ETo), em 2024 e 2025



Fonte: O autor.

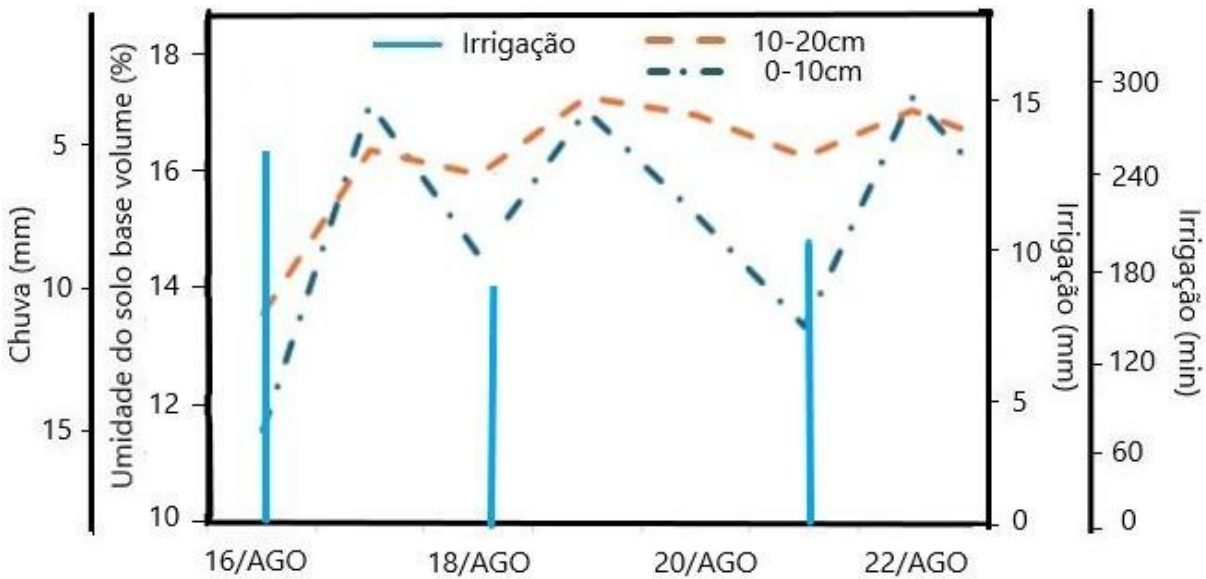
5.3.2 Avaliação de estratégias para a detecção da frente de umedecimento

Uma vez definido o sensor mais adequado, foram testadas diferentes estratégias para melhorar a acurácia do sistema que controla a chegada da frente de umedecimento na profundidade pré-estabelecida, com foco na redução das perdas por percolação profunda.

A primeira estratégia testada consistiu em monitorar a tendência de variação da umidade do solo indicada pelo sensor colocado na profundidade de controle, 10 cm. Isto é, após o início da irrigação, monitorava-se as alterações na tendência dos valores medidos pelo sensor. Após alguns testes, foi estabelecido como indicativo da chegada da frente de umedecimento uma variação de 0,05 no valor do sensor elétrico, na profundidade monitorada.

Após a avaliação dos resultados, Figura 11, constatou-se que ainda havia perda de água por percolação profunda, ou seja, a frente de umedecimento avançou a profundidade de controle, 10 cm.

Figura 11 - Variação da umidade do solo nas profundidades de (0-10 cm) e de (10-20cm) – Estratégia 1



Fonte: O autor.

A ocorrência de percolação profunda pode ser avaliada analisando-se a Figura 11. Observa-se que, no início da irrigação, no dia 16 de agosto, a umidade do solo na profundidade controle de 0-10 cm (linha azul) era de aproximadamente 11,5 em volume, e a umidade do solo na profundidade 10-20 cm (linha marrom) era aproximadamente 13,5% em volume. Após a irrigação a umidade do solo na profundidade controle de 0-10 cm (linha azul) era aproximadamente 17% em volume, e a umidade na profundidade 10-20 cm (linha marrom) era aproximadamente 16,5% em volume. As irrigações, nos dias 18 e 21 de agosto, também indicaram perda de água por percolação profunda.

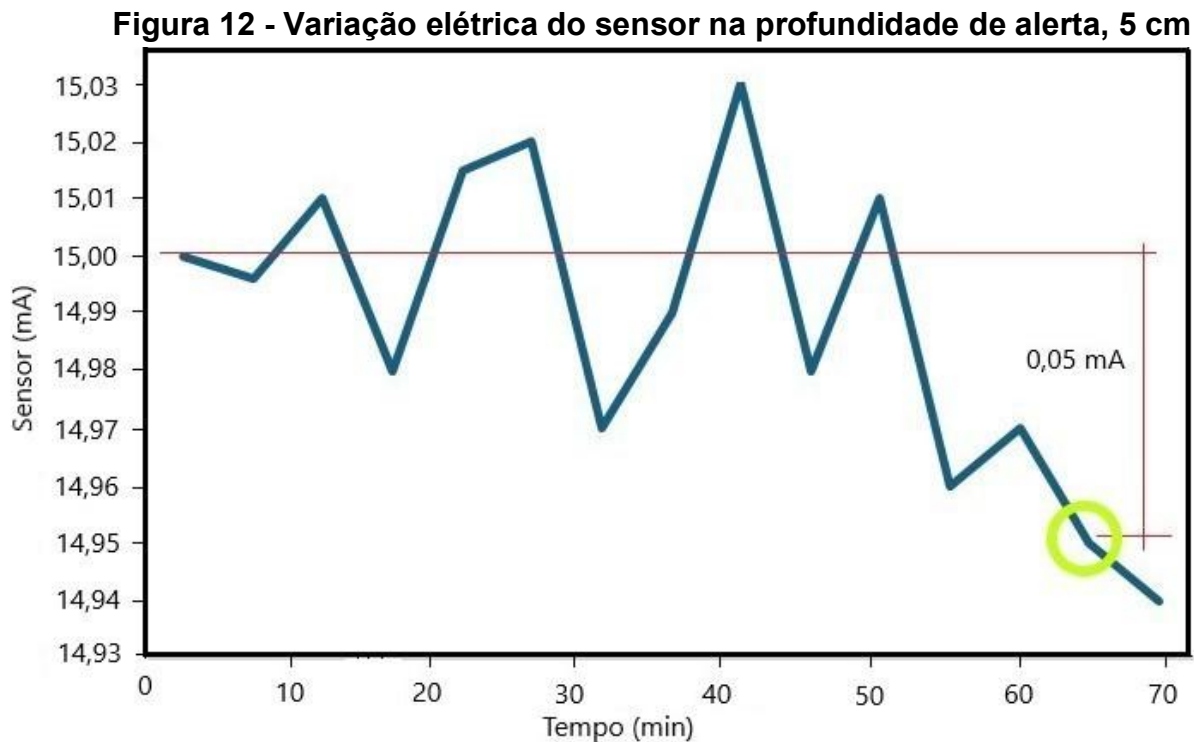
Analisando o comportamento das linhas, observa-se que a dinâmica da umidade do solo na profundidade de 10-20 cm é similar ao observado na profundidade controle, indicando perda por percolação. Do total irrigado, cerca de 60% foi perdido por percolação profunda. Esse resultado indicou a necessidade de melhorar a estratégia de manejo.

A segunda estratégia testada para reduzir as perdas por percolação profunda, consistiu em monitorar o tempo de chegada da frente de umedecimento em uma profundidade menor que a profundidade de controle. Nesse caso, foi adotada uma profundidade de 5 cm. Isto é, monitorou-se o tempo gasto para a frente de umedecimento chegar à profundidade de 5 cm e, a partir desse tempo, o SAAPD

realizou uma estimativa do tempo necessário para a frente de umedecimento atingir a profundidade de controle (10cm). O tempo gasto para a frente de umedecimento chegar na profundidade de 5 cm depende, entre outros fatores, da umidade atual do solo no início da irrigação.

Na figura 12 apresenta-se a variação elétrica observada no sensor de alerta, instalado na profundidade de 5 cm. Analisando a figura, pode-se observar que no início da irrigação a leitura indicada pelo sensor era de 15,00 mA. A próxima leitura, realizada no tempo de 3 min, apresentou um valor variando entre 14,99 e 15,00. A cada intervalo de 3 min era registrado uma nova medida.

No tempo sessenta e cinco minutos, indicado na figura por um círculo amarelo, obteve-se uma leitura de 14,95 mA, correspondendo a uma variação, quando comparada à leitura inicial igual a 0,05 mA. Observou-se que a diferença de leitura no sensor maior ou igual a 0,05 mA era indicativo que o sensor havia detectado a chegada da frente de umedecimento. Essa conclusão foi devido ao fato de que, com essa diferença de valores, a variação do valor da corrente indicada pelo sensor ficava sempre em níveis inferiores aos valores das medições anteriores.



Fonte: O autor.

Para a análise do comportamento do sensor frente a chegada da frente de umedecimento, foi montado um experimento no delineamento em blocos casualizados, com seis repetições em um tratamento (sensor HL-69 na profundidade 5cm), totalizando seis parcelas experimentais. A análise da correlação simples apresentou um valor de 0,92, indicando que, mesmo com pequena variação no tempo de chegada entre repetições, a resposta do sensor foi consistente. Na análise de variância, foi verificado que não há diferença significativa entre os blocos, sugerindo boa repetibilidade do sensor.

Com base nos resultados da avaliação de estratégias para a detecção da frente de umedecimento, foram realizadas algumas avaliações para verificar o tempo mais adequado de irrigação, considerando um balanço entre a percolação profunda e a elevação da umidade do solo a sua capacidade de campo na profundidade monitorada.

Após algumas análises, considerando a profundidade de alerta a 5 cm e a profundidade de controle a 10 cm, observou-se que o tempo de irrigação mais adequado poderia ser calculado com base na Equação 1. Isso é, o tempo de irrigação é igual ao tempo de deslocamento da frente de umedecimento até o sensor de alerta, acrescido de 10%. É conveniente deixar claro que esse acréscimo no tempo é uma característica do local, ou seja, esse tempo deve ser configurado especificamente para cada local.

$$t_i = t_a + 0,1 t_a \quad (1)$$

em que

t_i = tempo total da irrigação, min;

t_a = tempo da chegada da frente de umedecimento na profundidade de 5cm, min.

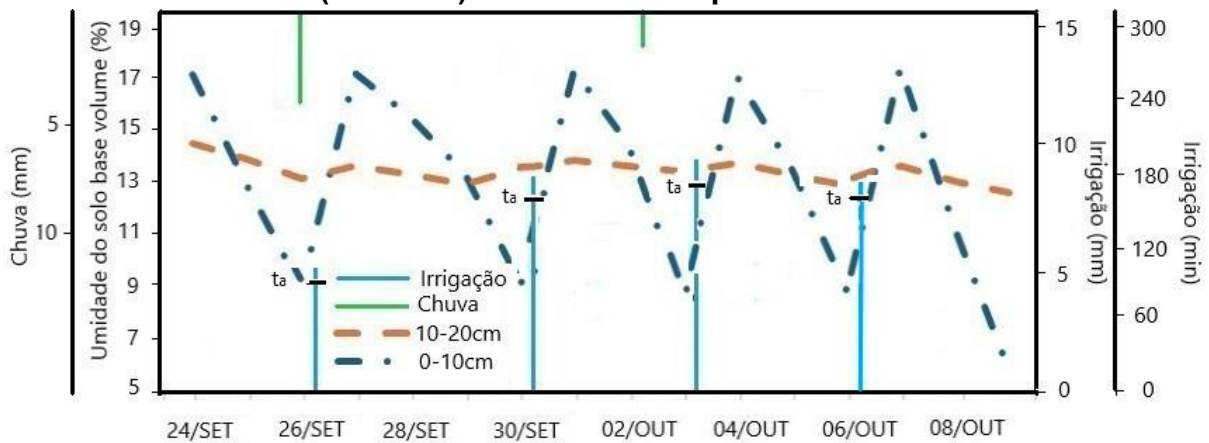
Na Figura 13 apresenta-se a variação da umidade do solo, em volume, nas profundidades de 0-10 cm e de 10-20 cm. Analisando a Figura 13 observa-se a ocorrência de dois eventos de chuva, nos dias 26 de setembro (4 mm) e 2 de outubro (1,3 mm). Foram realizados quatro eventos de irrigação nos dias 26 de setembro (5 mm), 30 de setembro (9 mm), 3 de outubro (9,5 mm) e 6 de outubro (9 mm).

Analisando-se a Figura 13, observa-se que a umidade do solo na profundidade de 0-10 cm variou de 8,5 a 17,2%, enquanto na profundidade de 10-20 cm se manteve praticamente estável, variando de 14,5 a 13%.

Analisando a Figura 13, nota-se que não houve aumento de umidade na profundidade de 10-20 cm, indicando a não ocorrência de perdas por percolação profunda.

Os traços horizontais, em cor preta, colocados junto com a barra de irrigação, indicam o tempo de alerta.

Figura 13 - Variação da umidade do solo nas profundidades de (0-10 cm) e de (10-20cm). ta indica o tempo de alerta.



Fonte: O autor.

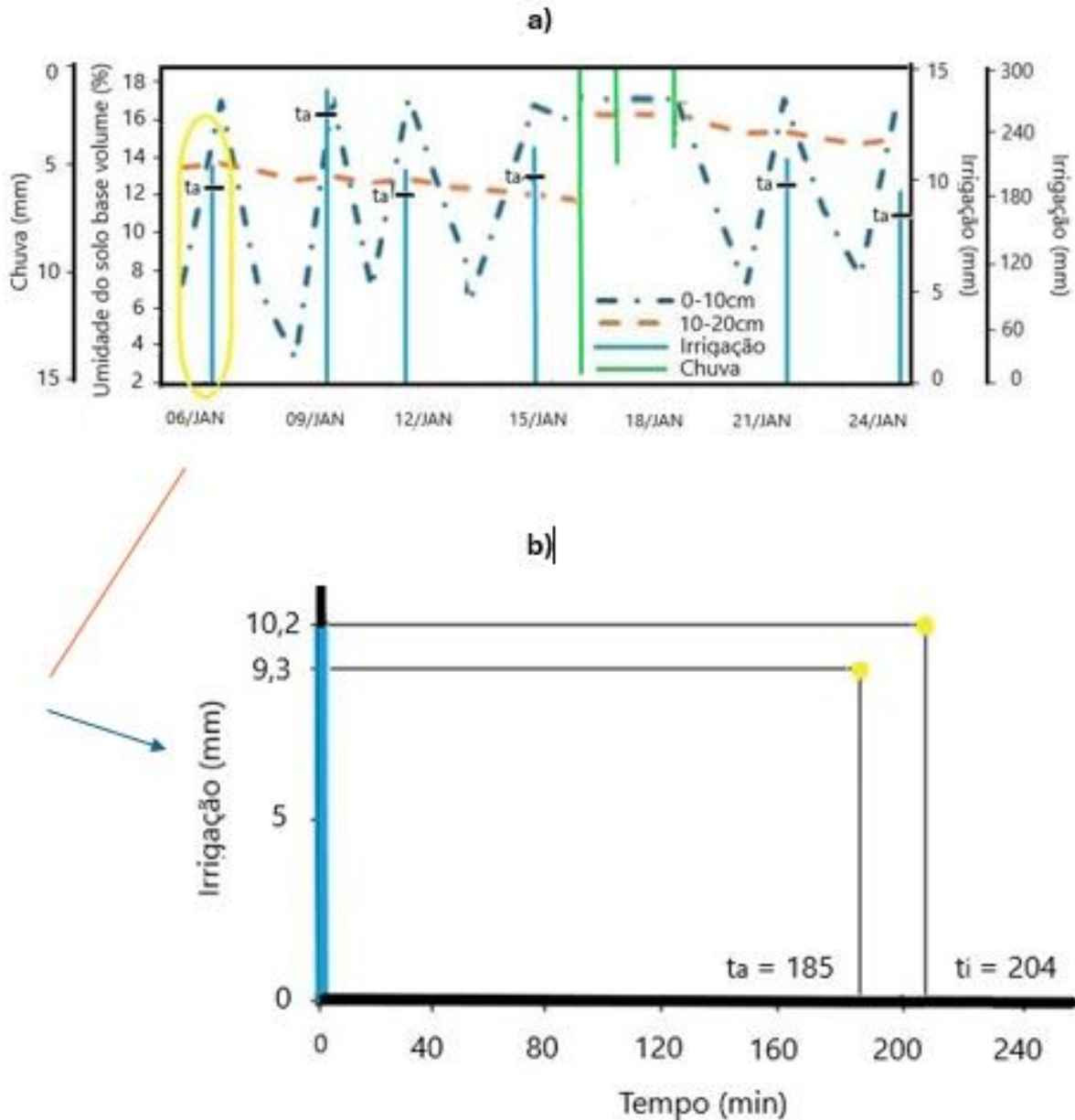
5.3.3 Avaliação do sistema de manejo de irrigação com base na detecção da frente de umedecimento de água no solo

Para avaliação do sistema, foi realizado o manejo de irrigação utilizando como base o SAAPD. Essa etapa teve dois objetivos principais: i. avaliar o comportamento do SAAPD em uma situação real de manejo de irrigação; e ii. avaliar a influência do déficit de umidade no deslocamento da frente de umedecimento.

Para atender principalmente ao segundo objetivo, foi utilizado um turno de rega variável, embora, nesse sistema, o mais adequado seja a utilização de um turno de rega fixo, pois o sistema não informa o déficit de umidade de água no solo. Isso é, ele não informa quando irrigar.

Na figura 14a apresenta-se a variação da umidade do solo nas profundidades de 0-10 cm e 10-20 cm e as ocorrências de chuva e irrigação.

Figura 14 - Variação da umidade do solo nas profundidades de 0-10 cm e 10-20 cm e as ocorrências de chuva e irrigação (a), com destaque para um evento de irrigação ocorrido no dia 6 de janeiro (b). Os traços horizontais (ta) indicam o momento de chegada da frente de umedecimento no sensor de alerta.



Fonte: O autor.

A umidade no solo na camada de 0-10 cm, em 6 de janeiro, apresentava 7% de umidade em volume. Em 9 de janeiro apresentou seu menor valor, 3,2% de umidade em volume.

Analisando a Figura 14 observa-se a ocorrência de três eventos de chuva, nos dias 16 de janeiro (15 mm), 17 de janeiro (5 mm) e 19 de janeiro (4,4 mm). Foram realizados seis eventos de irrigação nos dias 6 de janeiro (10,2 mm), 9 de janeiro (14,1

mm), 11 de janeiro (10,2 mm), 15 de janeiro (11 mm), 21 de janeiro (10,3 mm) e 25 de janeiro (9 mm).

Na profundidade de 10-20 cm a umidade variou de 13,5% a 12% em volume, no período de 6 a 14 de janeiro e, após três eventos de chuva, variou de 16% a 14,7% em volume, no período de 19 a 24 de janeiro.

Na Figura 14a, nota-se que não houve aumento de umidade na profundidade de 10-20 cm após os eventos de irrigação, indicando a não ocorrência de perdas por percolação profunda.

Os traços horizontais, em cor preta, colocados junto com a barra de irrigação, indicam o tempo de alerta.

Analisando a figura, pode-se notar que, com a segunda estratégia, a umidade do solo, após a irrigação, apresentou valores próximos a 17%. O número de dias entre irrigações variou de 2 a 4 dias. Observa-se que quando o intervalo entre irrigações é maior, o solo fica mais seco, o deslocamento da frente de umedecimento é mais lento e a lâmina de irrigação aplicada é maior. A lâmina de irrigação variou de 9 mm, em 24 de janeiro, a 14,1 mm, em 9 de janeiro.

Esse comportamento da umidade do solo na camada de 10-20 cm indica que não houve perda por percolação da camada de 0-10 cm devido às irrigações. Isso indica que a estratégia de manejo da irrigação funcionou adequadamente.

Na Figura 14a, pode-se observar pequenos traços horizontais nos eventos de irrigação. Esses traços indicam o momento de chegada da frente de umedecimento no sensor de alerta, t_a . Observa-se que o t_a variou de 163 min a 256 min, sendo o maior tempo indicativo do solo mais seco.

Na Figura 14b, é destacado o evento de irrigação ocorrido no dia 6 de janeiro, com a indicação dos tempos t_a (chegada da frente no sensor de alerta) e t_i (tempo total de irrigação). Este evento de irrigação está indicado em amarelo na Figura 14a.

6 CONCLUSÕES

O sistema de aquisição, armazenamento e processamento de dados (SAAPD) possibilitou a automação da aquisição de dados dos sensores de campo, eliminando o trabalho manual de leitura dos sensores. A implementação da automação foi de baixo custo, proporcionando o monitoramento e operação de um sistema de irrigação. Mesmo estando exposto ao tempo, altas temperaturas, poeira e umidade, o SAAPD não apresentou nenhuma anomalia, mostrando ser robusto e resistente, mesmo em condições severas de operação.

O SAAPD pode ser utilizado para a criação de rotinas de manejo, apresentando diversas opções de configuração e operação sistema, sendo que a versão analógica foi a versão avaliada neste trabalho.

O SAAPD consome, em média, 212 W por dia, o que representa menos de 9W de consumo de energia elétrica por hora. O baixo consumo de energia proporciona a oportunidade de aumento no número de sensores, e a oportunidade de novas aplicações, sem impactar o desempenho.

Foram avaliados três sensores de solo, um capacitivo e outros dois resistivos. O sensor HL-69 foi escolhido por apresentar a melhor resposta para a detecção da chegada da frente de umedecimento.

Para as condições avaliadas neste trabalho, a melhor estratégia para reduzir as perdas por percolação consistiu em utilizar dois sensores, um sensor de alerta e um sensor de controle, colocados em profundidades distintas.

O desenvolvimento futuro do SAAPD focará na:

- busca da redução dos custos e maior compactação do sistema;
- avaliação do SAAPD em outras condições de clima e de solo;
- avaliação de diferentes estratégias de manejo de irrigação, baseadas em condições reais de campo e
- avaliação de alternativas de operacionalizar o cálculo do tempo de irrigação.

REFERÊNCIAS

- ALFONSI, R.R.; PEDRO JR., M.J.; ARRUDA, F.B.; ORTOLANI, A.A.; CAMARGO, M.B.P.; BRUNINI, O. **Métodos agrometeorológicos para controle da irrigação**. Campinas, Instituto Agronômico, 1990.
- ALLEN, R. G.; PEREIRA, L. S.; RAES, D., SMITH, M. **Crop Evapotranspiration-Guidelines for computing crop water requirements**-FAO Irrigation and drainage paper 56. FAO, Roma, v. 300, n. 9, p. D05109, 1998.
- ANDRADE-SÁNCHEZ, P.; UPADHYAYA, S. K.; AGÜERA-VEGA, J.; JENKINS, B. M. **Evaluation of a capacitance-based soil moisture sensor for real-time applications**. Transactions of the ASAE, v. 47, n. 4, 2004.
- BARBOSA, A. M.; CAVALCANTI, A. R. **Estimativa da evapotranspiração de referência para Presidente Prudente, SP**. Agrometeoros, 32. 2024.
- BOGENA, H.R.; HUISMAN, J.A.; SCHILLING, B.; WEUTHEN, A.; VEREECKEN, H. **Effective calibration of low-cost soil water content sensors**. 2017.
- BOLTON, W. **Programmable logic controllers**. Newnes, 2015.
- BS. BRITISH STANDARD, **BS EN 61131-1**, 1994.
- CARVALHO, D.F. de; ROCHA, H.S. da; BONOMO, R.; SOUZA, A.P. de. **Estimativa da evapotranspiração de referência a partir de dados meteorológicos limitados**. Pesquisa Agropecuária Brasileira, v.50, p.1-11, 2015.
- CECÍLIO, R. A.; MARTINEZ, M. A.; PRUSKI, F. F.; SILVA, D. D. D.; ATAÍDE, W. F. **Substituição dos parâmetros do modelo de Green-Ampt-Mein-Larson para estimativa da infiltração em alguns solos do Brasil**. Revista Brasileira de Ciência do Solo, 31, 2007.
- CHAPIN, F. S.; MATSON, P. A.; VITOUSEK, P. M. **Principles of Terrestrial Ecosystem Ecology**, Springer-Verlag, New York, 2012.
- CHAUDHARY, S.; GHIMIRE, P.; THOGERSEN, P. B.; DE PLACE RIMMEN, P. **Field Data logger prototype for power converters**, in Power Electronics, Drives and Energy Systems (PEDES), 2014 IEEE International Conference on, 2014.
- COLBACK, R.; NAGAYETS, O. **Impact of Efficient Irrigation Technology on Small Farmers**. Recuperado el, v. 3, 2018.
- COOPMANS, C., C.; YANGQUAN, C. **A general-purpose low-cost compact spatial-temporal data logger and its applications**, in AUTOTESTCON, 2008 IEEE, 2008.

DAS NEVES, E.; SANTOS, T. M.; CAMPOS, J. C. **A importância do manejo sustentável na irrigação**. OBSERVATÓRIO DE LA ECONOMÍA LATINOAMERICANA, v. 22, n. 11, 2024.

DE ALBUQUERQUE, P. E. P. **Estratégias de manejo de irrigação: exemplos de cálculo**, 2010.

DEMENTYEV, N. **Commissioning a Fatigue Testing Unit**. 2017.

DE OLIVEIRA FEITOSA, E.; ALBIERO, D.; FERNANDES, F. R. B.; SANTOS, P. R. A.; CHIODEROLI, C. A. (2015). **Estimativa econômica da utilização do biogás para geração de energia elétrica no Perímetro Irrigado Quixabinha-Mauriti-CE**. Revista Engenharia na Agricultura-REVENG. 2015.

DOCKHORN, W. D. A. **Modelos de infiltração da água no solo em uma área de cultivo de arroz**. 2014.

EMBRAPA. **Manual de métodos de análise de solo**. Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. 2ª ed., Rio de Janeiro: Centro Nacional de Pesquisa de Solos (CNPS). 1997.

FEITOSA, W. S. **SISTEMA DE IRRIGAÇÃO AUTOMATIZADO PARA PEQUENOS AGRICULTORES, HORTAS E JARDINS**. Revista Ceará Científico, v. 2, 2023.

FERNANDES, M. A. **Condutividade hidráulica não saturada de um solo arenoso: aplicação do infiltrômetro de disco** (Doctoral dissertation, Dissertação de mestrado, Programa de Pós-Graduação em Geotecnia, Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo). 2011.

FREEZE, R. A.; CHERRY, J. A. **Groundwater**. Englewood Cliffs: Prentice Hall, 1979.

GARDNER, W.; KIRKHAM D. **Determination of soil moisture by neutron scattering**. Soil Sci, 1952.

GNECCHI, J. A. G.; LOBIT, P.; PARAMO, F. L.; ANGUIANO, A. T.; PATINO, A. M. **Automated wetting front detector**. In 2011 IEEE Electronics, Robotics and Automotive Mechanics Conference. IEEE. 2011.

GOYAL, M.; MALHOTRA, P. **Data logger system: a survey**. International Journal of Advanced Research in IT and Engineering, 2012.

GUIMARÃES, D. P.; LANDAU, E. C. **Agricultura irrigada por pivôs centrais no Brasil em 2024**, 2024.

HALEVY, A. H.; MAYAK, S. **Transport and conditioning of cut flowers**. In: Symposium on Cultivation of Flowers under Protection in the Mediterranean Regions. 1973.

HASNAIN, S.; SINGH, A. Development of Electronic Wetting Front Detector for irrigation scheduling. *Agricultural Water Management*. 2022.

HILLEL, D. **Environmental Soil Physics**. Academic press, San Diego, 1998.

HOLDRIDGE, L.R. **Simple method for determining potential evapotranspiration from temperature data**. *Science*, v.130, p.572, 1959.

IBGE, **Censo Agropecuário 2017**. Rio de Janeiro: IBGE. 2017.

IBRAGIMOV, N.; AVLIYAKULOV, M.; DURDIEV, N.; EVETT, S. R.; GOPPOROV, F.; YAKHYOEVA, N. **Cotton irrigation scheduling improvements using wetting front detectors in Uzbekistan**. *Agricultural Water Management*. 2021.

IEC. **IEC 61131-1: Programmable controllers**. IEC, 2003.

JOHNSON, M.; FABREGAS, A.; ZHENYU, W.; KATKOORi, S.; L. PEI-SUNG, L. **Embedded system design of an advanced illumination measurement system for highways**, in *Systems Conference (SysCon)*, 2014 8th Annual IEEE, 2014.

KARGAS, G.; SOULIS, K.X. **Performance analysis and calibration of a new low-cost capacitance soil moisture sensor**. *J. Irrig. Drain. Eng.* 2012.

KEMIS, H.; BRUCE, N.; WANG, P.; ANTONIO, T.; LEE BYUNG, G. HOON JAE, L. **Healthcare monitoring application in ubiquitous sensor network: Design and implementation based on pulse sensor with arduino**, in *Information Science and Service Science and Data Mining (ISSDM)*, 2012 6th International Conference on New Trends in, 2012.

KHAN, M. I.; MUKHERJEE, K.; SHOUKAT, R.; DONG, H. **A review on pH sensitive materials for sensors and detection methods**. *Microsystem Technologies*, 2017.

KIOUMARS, A. H.; TANG, L. **ATmega and XBee-based wireless sensing**, in *Automation, Robotics and Applications (ICARA)*, 2011 5th International Conference on, 2011.

KÖPPEN, W. **Climatologia**. México. Fundo de Cultura Econômica, 9. 1948.

KRAMER, P.J.; BOYER, J.S. **Soil and water**. In *Water Relations of Plants and Soils*; Academic Press: San Diego, CA, USA, 1995.

KRON. **Multimedidor de Energia para CC**. acesso: <https://kron.com.br/produto/dc-96-plus/>. 2024.

LAKHIAR, I. A.; YAN, H.; ZHANG, C.; WANG, G.; HE, B.; HAO, B.; RAKIBUZZAMAN, M. **A review of precision irrigation water-saving technology under changing climate for enhancing water use efficiency, crop yield, and environmental footprints**. *Agriculture*. 2024.

MAHZAN, N. N.; OMAR, A. M.; MOHAMMAD NOOR, S. Z.; MOHD RODZI, M. Z. **Design of data logger with multiple SD cards**, in 2013 IEEE International Conference on Clean Energy & Technologies, Langkawi, Malaysia, 2013.

MARTINI, E.; WOLLSCHLAGER, U.; KOGLER, S.; BEHRENS, T.; DIETRICH, P.; REINSTORF, F.; SCHMIDT, K.; WEILER, M.; WERBAN, U.; ZACHARIAS, S. **Spatial and temporal dynamics of hillslope-scale soil moisture patterns: Characteristic states and transition mechanisms**. *Vadose Zone J.* 2015.

McGEE, T. D., **Principles and Methods of Temperature Measurement**, Wiley, New York 1988.

MENGISTU, D. T. **Evaluation of wetting front detector to determine water demand, water and crop productivity of selected fodder varieties under supplemental irrigation** (case studies in lemo and angeacha areas of SNNP region). 2015.

MILLER, J. D.; GASKIN, G. J.; ANDERSON, H. A. **From drought to flood: Catchment responses revealed using novel soil water probes**. *Hydrological processes*, v. 11, n. 5, 1997.

MONCEF, H.; HEDI, D.; JELLOUL, B.; MOHAMED, M. **Approach for predicting the wetting front depth beneath a surface point source: Theory and numerical aspect**. *Irrigation and Drainage: The Journal of the International Commission on Irrigation and Drainage*. 2002.

MUZDRIKAH, F. S.; NUHA, M. S.; RIZQI, F. A. **Calibration of capacitive soil moisture sensor (SKU: SEN0193)**. In 2018 4th International Conference on Science and Technology (ICST) (pp. 1-6). IEEE. 2018.

NIELSEN, S. S. **Food Analysis**, 4th ed., Springer Science and Business Media, New York, 2010.

NING, L.; S. ZHONG, S. **Research and implementation of new type multi-channel data logger**, in Computer Application and System Modeling (ICASM), 2010 International Conference on, 2010.

NKOM, B.; MUSA, H. **Development of a Novel Microcontrollerbased data logger**, in Adaptive Science & Technology, 2009. ICAST 2009. 2nd International Conference on, 2009.

OGDEN, F. L.; SAGHAFIAN, B. **Green and Ampt infiltration with redistribution**. *Journal of irrigation and drainage engineering*, v. 123, n. 5, 1997.

OLIVÉRIO, G. L.; BONINI, C. D. S. B.; MARCOS, A.; OLIVEIRA, M.; PRADO, E. P.; FONTANETTI, M. G.; NETO, B. **Characterization of Highly Weathered Soils**. 2020.

LOUDIN, L.; HERVIEU, F.; MICHEL, C.; PERRIN, C.; ANDRÉASSIAN, V.; ANCTIL, F.; LOUMAGNE, C. **Which potential evapotranspiration input for a lumped**

rainfall-runoff model?: Part 2 – towards a simple and efficient potential evapotranspiration model for rainfall-runoff modeling. *Journal of Hydrology*, v.303, p.290-306, 2005.

PALAPARTHY, V. S.; BAGHINI, M. S.; SINGH, D. N. **Review of polymer-based sensors for agriculture-related applications.** *Emerging Materials Research*, v. 2, n. 4, 2013.

PARR, E. A. **Programmable controllers: an engineer's guide.** Newnes, 2003.

PEQUENO, P. D. L.; LEONIDAS, F. D. C.; MENDES, A. M.; VIEIRA, A. H.; MARTINS, E. P.; VASCONCELOS, L. P. **Água disponível do solo: algumas características físicas do solo importantes para quantificação,** 2002.

PEREIRA, A.R.; VILLA NOVA, N.A.; SEDIYAMA, G.C. **Evapotranspiração.** Piracicaba: FEALQ, 1997

PEREIRA, C. N.; DE CASTRO, C. N. **Expansão da produção agrícola, novas tecnologias de produção, aumento de produtividade e o desnível tecnológico no meio rural.** 2022.

PHOENIX CONTACT. **ILC 131 ETH – Controlador,** acesso: <https://www.phoenixcontact.com/br/produtos/2700973>, 2024.

PINHEIRO, A. L. A.; FIGUEIREDO, A. E. S.; FEITOSA, F. C. D. C.; ESMERALDO, G. Á. R. M.; DOS SANTOS, F. G. B.; SOUSA, F. R. R.; FEITOSA, R. G. F. **Analisando a Confiabilidade com Ênfase no Desempenho de Sensores de Um Sistema IoT para o Gerenciamento Remoto da Irrigação.** *Revista de Sistemas e Computação-RSC*, 12. 2022.

RAFIQUE, M. U. **A Novel Wireless Data Logging and Retrieving System for Industrial Applications,** in *Bahria University Journal of Information & Communication Technologies*, Pakistan, 2014.

RAJMOND, J., Pitica, D., "8 channel configurable data logger for reliability testing and quality assurance," in *Electronics Technology (ISSE)*, 2010 33rd International Spring Seminar on, 2010.

REICHARDT, K. **Processos de transferência no sistema solo-planta-atmosfera.** 1985.

REICHARDT, K. **A água em sistemas agrícolas.** São Paulo, Manole. 1990.

RICHARDS, L.A.; NEAL, O.R. **Some field observations with tensiometers.** *Soil Science Society of American Proceedings*, Madison, v.1, p.71-91, 1936.

RICHARDS, L. A. **Physical condition of water in soil.** In: BLACK, C.A. *Methods of soil analysis.* Madison: America Society of Agronomy. 1965.

ROBINSON, D. A.; CAMPBELL, S.; HOPMANS, J. W.; HORNBuckle, B. K.; JONES, S. B.; KNIGHT, R.; OGDEN, F.; SELKER, J.; WENDROTH, O. **Soil moisture measurement for ecological and hydrological watershed-scale observatories: A review.** Vadose zone journal, v. 7, n. 1, 2008.

RODRIGUES, L. N.; PRUSKI, F. F. **Otimização do desempenho de sistemas de irrigação do tipo pivô central com o uso da equação de GREEN.** In: Congresso Brasileiro de Engenharia Agrícola, 26, Campina Grande: Sociedade Brasileira de Engenharia Agrícola, 1997.

RODRIGUES, L. N.; DOMINGUES, F. D.; Christofidis, D. **Agricultura irrigada e produção sustentável de alimento. Agricultura irrigada: desafios e oportunidades para o desenvolvimento sustentável.** 1ed. Fortaleza: INOVAGRI. 2017.

RODRIGUES, L. N. (Org.). **Agricultura Irrigada e Produção Sustentável de Alimento.** Brasília: Embrapa, 2020.

RODRIGUEZ-ORTEGA, W. M. et al. **Use of a smart irrigation system to study the effects of irrigation management on the agronomic and physiological responses of tomato plants grown under different temperatures regimes.** Agricultural Water Management, v. 183, p.158-168, 2017.

ROSA, C.; FREITAS, P. S. L.; GONÇALVES, A. C.; REZENDE, R.; BERTONHA, A.; TRINTINALHA, M. A. **Dimensões de bulbo molhado no solo, a partir de fonte pontual de água, para manejo de água na cultura da pupunha (Bactris gasipaes, Kunth).** Acta Scientiarum. Agronomy, 26. 2004.

ROSEGRANT, M. W.; CAI, X.; CLINE, S. A. **Água e alimentos no mundo até 2025: lidando com a escassez.** Washington: Instituto Internacional de Pesquisa sobre Políticas Alimentares, 2010.

ROSIEK, S.; BATLLES, F. J. **A microcontroller-based data-acquisition system for meteorological station monitoring.** Energy Conversion and Management, v. 49, n. 12, p. 3746-3754, 2008.

SALEH, M.; ELHAJJ, I.H.; ASMAR, D.; BASHOUR, I.; KIDESS, S. **Experimental evaluation of low-cost resistive soil moisture sensors.** In Proceedings of the 2016 IEEE International Multidisciplinary Conference on Engineering Technology (IMCET), Beirut, Lebanon, 2–4 November 2016.

SANTOS, M. R.; DONATO, S. L. R.; JUNIOR, P. R. F. C. **Irrigação na palma forrageira.** Revista Agrotecnologia-Agrotec, 2020.

SCHMITTER, P. S.; HAILESLASSIE, A.; DESSALEGN, Y.; CHALI, A.; LANGAN, S. J.; BARRON, J. **Improving on-farm water management by introducing wetting-front detector tools to smallholder farms in Ethiopia.** International Livestock Research Institute. 2017.

SCHWAMBACK, D.; PERSSON, M.; BERNDTSSON, R.; BERTOTTO, L. E.; KOBAYASHI, A. N. A.; WENDLAND, E. C. **Automated low-cost soil moisture sensors: Trade-off between cost and accuracy**. *Sensors*, 2023.

SKAGGS, R. W.; HUGGINS, L. E.; MONKE, E. J.; FASTER, G. R. **Experimental evaluation of infiltration equations**. *Transactions of the ASAE*, 1969.

SKAGGS, R. W.; KHALEEL, R.; HAAN, C. T.; JOHNSON, H. P.; BRAKENSIEK, D. L. **Hydrologic modeling of small watersheds**. ASAE Monograph 5, 1982.

SUI, Y.; KREIDER, L. P.; BOGIE, K. E.; ZORMAN, C. A. **IEEE Sensor Letters**, vol. 3, 2019.

SULAIMAN, S.; MANUT, A.; FIRDAUS, A. R. N. **International Conference on Information and Multimedia Technology**, IEEE, Piscataway, NJ, USA 2009.

SUREEPHONG, P.; WIANGNAK, P.; WICHA, S. **The comparison of soil sensors for integrated creation of IOT-based Wetting front detector (WFD) with an efficient irrigation system to support precision farming**. In 2017 International Conference on Digital Arts, Media and Technology (ICDAMT). IEEE. 2017.

SUZDALENKO, A., A.; LAZDANS, A.; GALKIN, I. **Development of multichannel analogue signal data logger based on MSP430**, in Education and Research Conference (EDERC), 2012.

SCHWAMBACK, D.; PERSSON, M.; BERNDTSSON, R.; BERTOTTO, L. E.; KOBAYASHI, A.; WENDLAND, E. C. **Automated Low-Cost Soil Moisture Sensors: Trade-Off between Cost and Accuracy**. *Sensors*, v. 23, n. 5, p. 2451, 2023.

TAN, W.Y.; THEN, Y.L.; LEW, Y.L.; TAY, F.S. **Newly calibrated analytical models for soil moisture content and pH value by low-cost HL-69 hygrometer sensor**. *Measurement*, v.134, p. 166-178, 2019.

TIRUYE, A. E.; ASRES BELAY, S.; SCHMITTER, P.; TEGEGNE, D.; ZIMALE, F. A.; TILAHUN, S. A. **Yield, water productivity and nutrient balances under different water management technologies of irrigated wheat in Ethiopia**. *PLoS Water*. 2022.

VENTER, G. **Successful Hydroponics: 21st Century Technology for Commercial and Home Applications: A Comprehensive Practical Guide to Scientifically Based Hydroponic Crop Production**, Xlibris Corporation, Bloomington, IN, USA, 2010.

VIETS, F. G. **Agriculture. Ecosystems. Environment**, 1990.

VOUTOS, Y.; MYLONAS, P.; KATHENIOTIS, J.; SOFOU, A. **A Survey on Intelligent Agricultural Information Handling Methodologies**, *Sustainability*, 2019.

WHITE, I.; ZEGELIN, S. J. **Electric and dielectric methods for monitoring soil-water content**. In: Wilson LG, Everett LG, Cullen SJ (eds) *Handbook of vadose zone characterization and monitoring*. Lewis, London, 1995.

WITHERS, P. **Irrigação: projeto e prática**. Nobel, 1986.

YANG, X.; L. ZHAO, L.; BRUSE, M.; MENG, Q. **Evaluation of a microclimate model for predicting the thermal behavior of different ground surfaces**, Building and Environment, 2013.

YIN, H.; CAO, Y.; MARELLI, B.; Zeng, X.; MASON, A. J.; CAO, C. **Soil sensors and plant wearables for smart and precision agriculture**. Advanced Materials, v. 33, 2021.

YOLCUBAL, I.; BRUSSEAU, M. I.; ARTIOLA, J. F.; WIERENGA, P.; WILSON, L. G. **Environmental Monitoring and Characterization**, Elsevier Inc., New York, 2003.

YU, L.; GAO, W.; SHAMSHIRI, R. R.; TAO, S.; REN, Y.; ZHANG, Y.; SU, G. **Review of research progress on soil moisture sensor technology**. International Journal of Agricultural and Biological Engineering. 2021.

ZAZUETA, F. S., XIN, J., **Soil Moisture Sensors**, Florida Cooperative Extension Service, Bulletin 292, Inst. Food and Agricultural Sciences, University of Florida, Gainesville, 1994.