

Universidade de São Paulo
Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”

**Manejo da irrigação via inteligência artificial na cultura do pimentão
vermelho (*Capsicum annuum* L.)**

Brenda Cristina Pinheiro da Silva

Dissertação apresentada para obtenção do título de
Mestra em Ciências. Área de concentração: Engenharia
de Sistemas Agrícolas

Piracicaba
2022

Brenda Cristina Pinheiro da Silva
Engenheira Agrônoma

Manejo da irrigação via inteligência artificial na cultura do pimentão vermelho
(*Capsicum annuum* L.)

versão revisada de acordo com a Resolução CoPGr 6018 de 2011

Orientadora:

Prof.^a Dr.^a **PATRICIA ANGÉLICA ALVES MARQUES**

Dissertação apresentada para obtenção do título de Mestra
em Ciências. Área de concentração: Engenharia de
Sistemas Agrícolas

Piracicaba
2022

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação
DIVISÃO DE BIBLIOTECA – DIBD/ESALQ/USP

Silva, Brenda Cristina Pinheiro da

Manejo da irrigação via inteligência artificial na cultura do pimentão vermelho (*Capsicum annuum* L.) / Brenda Cristina Pinheiro da Silva - - versão revisada de acordo com a Resolução CoPGr 6018 de 2011. - - Piracicaba, 2022.

69 p.

Dissertação (Mestrado) - - USP / Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz".

1. Automação 2. Evapotranspiração 3. Inteligência artificial 4. Análise econômica I. Título

Aos meus pais Cícero José da Silva e Samantha Pinheiro dos Santos Silva por não medirem esforços para que eu alcançasse patamares os quais nem imaginávamos e aos meus irmãos Brauner, Breno e Maria Clara que me ensinam tanto sobre o amor.

DEDICO

OFEREÇO

À Deus, ao qual nada é impossível.

AGRADECIMENTOS

Agradeço aos meus pais, Cícero e Samantha, por me ensinar a caminhada, pelos seus esforços sem fim e pelo incentivo em todos os momentos e, aos meus irmãos Brauner, Breno e Maria Clara, que sempre foram exemplo para mim de esforço, dedicação, compromisso, amor ao trabalho, autonomia e responsabilidade.

À minha professora e orientadora, Patrícia Angélica Alves Marques, pela oportunidade do trabalho, paciência, apoio e que acompanhou por muito tempo meus estudos e trabalhos.

À minha grande amiga, Juliana Bezerra Martins, por todo incentivo, paciência, parceria do começo ao fim do meu mestrado.

Aos amigos da pós-graduação da área de irrigação, José Eustáquio Junior, Diego, Rogério, Hugo, Danielly, Débora, Tibério, Aílson, Ângelo, Carlos, Thaís, Rubmara, Larissa, Luciano, Tércio, Martiliana, que fizeram parte desse período importante, obrigada por compartilhar tanto aprendizado, pelo apoio nos experimentos, pelas experiências compartilhadas e pelos bons momentos de descontração.

Aos estagiários Wellington, Stella, Eduardo, Samara, Amanda, Maria e Suzane por todo apoio durante o experimento.

As minhas colegas da casa quatro da vila da pós-graduação, Mariana, Diana, Yajahaira, e também aos outros colegas da vila, que enriqueceram esse período da pós com tanta cultura Caio, Antonio Neto, Lucas, Rafael, Lucas, Matheus e em especial ao Marcos, por aceitar o primeiro pedido de ajuda no experimento e por seguir ajudando até o final.

À Dietech e ao Thiago Alberto Cabral da Cruz pelo desenvolvimento do projeto e por todo apoio durante esse período.

À FAPESP, pelo apoio ao desenvolvimento do projeto e pela concessão da bolsa de treinamento técnico.

À FEALQ, pelo apoio à continuidade do mestrado por meio de bolsa de estudos.

Ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Sistemas Agrícolas, professores, técnicos-administrativos e alunos.

Enfim, a todos que me auxiliaram desde o início do mestrado até a conclusão deste trabalho,

Muito Obrigada!

“Fazei tudo por Amor.

- Assim não há coisas pequenas:

tudo é grande.

- A perseverança nas pequenas coisas,

por Amor, é heroísmo.”

São Josemaria Escrivá

SUMÁRIO

RESUMO	8
ABSTRACT	9
LISTA DE TABELAS	10
LISTA DE FIGURAS	11
1. INTRODUÇÃO	13
2. REVISÃO DE LITERATURA	15
2.1. Importância da irrigação	15
2.2. Manejo da irrigação	15
2.3. Irrigação de precisão	17
2.4. A cultura do pimentão	20
3. OBJETIVOS	21
4. MATERIAL E MÉTODOS	23
4.1. Localização e caracterização do ambiente experimental	23
4.2 sistema de irrigação	23
4.3. Unidades experimentais e cultura de referência	24
4.4. Manejo da irrigação	24
4.4.1. Manejo da irrigação inteligência artificial (mia) via cálculo da ETo e acionamento das válvulas por sistema inteligente	24
4.4.2. Manejo da irrigação manual (mm) via cálculo da ETo com a estação Campbell Scientific	28
4.5. Condução do experimento e manejo da cultura	29
4.6. Adubação	32
4.7. Avaliações biométricas do pimentão	33
4.8. Eficiência do uso da água (EUA)	33
4.9. Análise econômica	34
4.10. Custo fixo anual	35
4.11. Custos variáveis	36
4.12. Custo de mão de obra	36
4.13. Custo de manutenção	37
4.14. Custo de bombeamento	37
4.14.1 Motor a diesel	38
4.14.2 Motor elétrico	38

4.14.2.1 Tarifa de demanda.....	41
4.14.2.2 Tarifa de consumo.....	41
4.15. Custo da água.....	41
4.16. Custo total.....	42
4.17. Análise estatística.....	42
5. RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	43
5.1. Dados meteorológicos.....	43
5.2. Altura de plantas.....	44
5.3. Lâminas de irrigação.....	45
5.4 produção e produtividade.....	47
5.5. Características qualitativas.....	49
5.6. Eficiência do uso da água e produtividade acumulada.....	50
5.7. Análise econômica.....	51
6. CONCLUSÕES.....	61
REFERÊNCIAS.....	63

RESUMO

Manejo da irrigação via inteligência artificial na cultura do pimentão vermelho (*Capsicum annuum* L.)

Em cultivos agrícolas que visam qualidade e alta produtividade tem crescido a aplicação de água por meio de sistemas de irrigação com inteligência artificial de modo a atender as necessidades hídricas das culturas de maneira eficiente e automatizada. Este tipo de sistema dispõe de mecanismos mais precisos para quantificação da água que deve ser aplicada, sendo mais eficiente e sustentável que sistemas manuais. Mesmo com essa tecnologia, estes sistemas ainda possuem baixa acessibilidade, devido aos altos custos dos equipamentos utilizados na implantação e a falta de suporte disponível caso venha a ocorrer alguma eventualidade. Diante do exposto, o objetivo do presente trabalho foi avaliar um equipamento de manejo de irrigação aplicado ao cultivo da cultura do pimentão vermelho, via inteligência artificial de baixo custo e que confere assistência técnica ao produtor, nos aspectos produtivos e econômicos. O experimento foi conduzido em ambiente protegido (estufa agrícola) localizada no Departamento de Engenharia de Biosistemas da Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz” da Universidade de São Paulo (ESALQ/USP), sendo avaliados dois manejos de irrigação (MIA - Manejo da irrigação via inteligência artificial para cálculo da ETo com a micro estação meteorológica e para acionamento do sistema de irrigação e MM - Manejo da irrigação via cálculo da ETo com uso da estação meteorológica padrão e operação manual do sistema de irrigação). Nos aspectos produtivos foram avaliados número de frutos (NF), massa fresca total dos frutos (MFT), massa fresca de frutos comerciais (MFC), massa fresca de frutos não comerciais (MFNC) e produtividade (P). Nos aspectos qualitativos foram avaliados largura, comprimento dos frutos, pH e Brix. Na análise econômica, foram considerados quatro cenários de manejo de irrigação via clima (1: ETo via estação meteorológica padrão e operação manual, 2: ETo via estação meteorológica comercial e operação manual; 3: Cálculo automático de ETo com dados da estação meteorológica comercial e operação manual; 4: ETo via microestação meteorológica e operação via inteligência artificial). O manejo da irrigação via inteligência artificial foi equivalente ao manejo de irrigação via manual para as variáveis de produção e de qualidade dos frutos e ainda resultou em menor custo total anual quando comparado aos cenários com uso de outras estações meteorológicas e operação manual do sistema, demonstrando ser uma opção economicamente acessível aos produtores rurais.

Palavras-chave: Automação, Evapotranspiração, Manejo inteligência artificial, Análise econômica

ABSTRACT

Irrigation management artificial intelligence in the red pepper crop (*Capsicum annuum* L.)

In agricultural crops that aim at quality and high productivity, the application of water through irrigation systems with artificial intelligence has grown to meet the water needs of crops in an efficient and automated way. This type of system has more precise mechanisms for quantifying the water that must be applied, being more efficient and sustainable than manual systems. Even with this technology, these systems still have low accessibility, due to the high costs of the equipment used in the implementation and the lack of available support in case of any eventuality. In view of the above, the objective of the present work was to evaluate an irrigation management equipment applied to the cultivation of red pepper, via low-cost artificial intelligence that provides technical assistance to the producer, in the productive and economic aspects. The experiment was carried out in a protected environment (agricultural greenhouse) located in the Department of Biosystems Engineering of the Luiz de Queiroz College of Agriculture from the University of São Paulo (ESALQ/USP) on the Piracicaba campus at the state of São Paulo. Two irrigation managements for red pepper crop were evaluated, the first one (AIM - Artificial Intelligence Management) to reference evapotranspiration (ET_o) calculation with the micrometeorological station and activation by way of artificial intelligence of the irrigation system and the second one (MM – Manual Management) to ET_o calculation using Campbell Scientific weather station and manual override for system operation. In the productive aspects were evaluated the fruits number (FN), total fresh matter (TFM), fresh matter of commercial fruits (FMC), fresh matter of noncommercial fruits (FMNC) and productivity (P), in the qualitative aspects were evaluated width, fruit length, pH and °Brix. In the economic analysis, four irrigation management scenarios were considered by climate (1: ET_o by standard weather station and manual operation, 2: ET_o by commercial weather station and manual operation; 3: Automatic calculation of ET_o with data from the commercial weather station and manual operation; 4: ET_o by micro meteorological station and operation via artificial intelligence). Irrigation management by artificial intelligence was equivalent to irrigation management by manual for the variables of production and fruit quality and also resulted in a lower total annual cost when compared to scenarios using other meteorological stations and manual operation of the system, demonstrating be an affordable option for rural producers.

Keywords: Automation, Evapotranspiration, Artificial intelligence management, Economic analysis

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Análise da qualidade da água.....	24
Tabela 2. Custo por componente para construção do MEM.....	26
Tabela 3. Custo por componente do servidor de irrigação	27
Tabela 4. Quantidade aplicada via fertirrigação de pimentão vermelho de acordo com o ciclo da cultura.....	32
Tabela 5. Fatores analisados em cada cenário de manejo da irrigação.....	34
Tabela 6. Tarifas vigentes para cada subgrupo tarifário	39
Tabela 7. Número de frutos por planta (NFP), Massa dos frutos total (MFT), Massa dos frutos comercial (MFC), Massa dos frutos não comercial (MFNC) e produtividade (P) de pimentão vermelho Atlantis em dois manejos de irrigação.	47
Tabela 8. Variáveis qualitativas na produção de pimentão vermelho Atlantis.....	49
Tabela 9. Produtividade total acumulada (PA) e eficiência do uso da água (EUA) em 12 colheitas de cultivo do pimentão vermelho.....	51
Tabela 10. Custos totais no manejo de irrigação com ETo via estação meteorológica padrão e operação manual	52
Tabela 11. Custos totais de manejo de irrigação com ETo via estação meteorológica comercial e operação manual.....	53
Tabela 12. Custos totais de manejo de irrigação com cálculo automático de ETo com dados de estação meteorológica comercial e operação manual	54
Tabela 13. Custos totais de manejo de irrigação com ETo via microestação meteorológica e operação via inteligência artificial	55
Tabela 14. Participação do custo total de cada cenário de manejo de irrigação utilizando motor elétrico tarifa verde e azul.....	58
Tabela 15. Participação do custo total de cada cenário de manejo de irrigação utilizando motor elétrico tarifa convencional.....	58
Tabela 16. Participação do custo total de de cada cenário de manejo de irrigação utilizando motor elétrico grupo B rural.....	59
Tabela 17. Participação do custo total de irrigação de cada cenário de manejo de irrigação utilizando motor diesel.....	59

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Equipamentos do sistema de manejo via inteligência artificial instalados na casa de vegetação: micro estação meteorológica (MEM) e servidor local (SL)	25
Figura 2. Cultura de pimentão vermelho Atlantis instalada e tutoramento na casa de vegetação.	30
Figura 3. Desenvolvimento da cultura do pimentão vermelho durante condução do experimento. (A) Planta com a primeira flor aberta e (B) Planta com primeiro fruto.	31
Figura 4. Frutos de Pimentão vermelho na época de colheita. (A) Fruto com 80% de coloração vermelha, (B) fruto danificado, (C) frutos pós-colheita, (D) plantas com frutos em ponto de colheita durante experimento.....	32
Figura 5. Temperaturas máxima, média e mínima na casa de vegetação durante o ensaio. ..	43
Figura 6. Umidade relativa do ar máxima, média e mínima na casa de vegetação durante o ensaio.	44
Figura 7. Altura das plantas de pimentão vermelho em dois tipos de manejo da irrigação. ..	45
Figura 8. Lâmina de irrigação acumulada durante o ciclo de cultivo do pimentão.....	46
Figura 9. Custos variáveis anuais em diferentes cenários	57

1. INTRODUÇÃO

A água é um dos recursos naturais mais valiosos em nosso planeta e, em razão do crescimento populacional a disponibilidade de água e sua qualidade têm diminuído e causado preocupação nas gerações atuais. A quantidade de água utilizada na irrigação é determinada pela necessidade hídrica das culturas, para determinação podem ser utilizados dados climáticos, características da cultura e do solo a fim de calcular a lâmina que deverá ser aplicada para o suprimento de água adequado, caso contrário, a irrigação pode ter baixa eficiência devido a desperdícios de água mediante perdas por percolação, lixiviação ou deriva.

Dentre os métodos utilizados para o manejo da irrigação, os mais precisos e de alta confiabilidade necessitam de equipamentos para coleta e monitoramento das variáveis que influenciam o cálculo da necessidade hídrica. Entretanto, os equipamentos que obtêm os dados climáticos possuem alto custo e nem todas as regiões possuem fontes de dados confiáveis. Também são poucas as propriedades rurais que possuem pessoas com conhecimentos técnicos especializados para operá-los (LOPES et al., 2004).

Visando facilitar o gerenciamento das atividades cotidianas do pequeno produtor com auxílio da tecnologia, a inteligência artificial também vem sendo empregada na agricultura com o propósito de otimizar as operações necessárias ao manejo das culturas, dentre elas, o uso eficiente da irrigação. Nessa temática, a inteligência artificial aplicada à gestão dos recursos hídricos pode proporcionar melhor custo-benefício nas produções agrícolas.

Um dos setores mais exigentes no suprimento de água é o de horticultura, responsável por 2,8% do valor da produção agropecuária (IBGE, 2017). A produção desse grupo no setor produtivo é de R\$10,6 bilhões e representa 84% do total (AGRIANUAL, 2016). Para o cultivo das plantas desse setor é indispensável a utilização adequada da irrigação, para obter maiores produtividades e produtos de qualidade superior, entretanto, o manejo da irrigação em hortaliças é uma prática pouco utilizada devido à falta de assistência técnica (VILAS BOAS, 2006).

No Brasil já existem incentivos para implantação da inteligência artificial na agricultura (KAMIENSKI & VISOLI, 2018). Espera-se que com o passar dos anos esta tecnologia seja difundida entre os produtores e proporcione um impacto positivo na agricultura. Diante do exposto, o objetivo deste trabalho foi avaliar um sistema de manejo de irrigação constituído de micro estação meteorológica com sensores de baixo custo, que obtêm as variáveis meteorológicas e estima a evapotranspiração de referência por meio de sistemas inteligentes, ou inteligência artificial, e realiza o acionamento das válvulas de irrigação de forma automática.

2. REVISÃO DE LITERATURA

2.1. Importância da irrigação

De acordo com a FAO (2016), a agricultura irrigada representa apenas 20% das terras cultivadas, mas contribui com 40% dos alimentos produzidos no mundo. A China é o país com maior área irrigada do mundo com 65 milhões de hectares, seguida da Índia com 62 milhões e dos EUA com 26 milhões de hectares (ICID, 2018). No Brasil ainda há muito para avançar na área de irrigação, atualmente são 5,3 milhões de hectares equipados para irrigação, no entanto, estima-se uma área de 55,85 Mha adicional irrigável (ANA, 2021).

A irrigação atende as necessidades hídricas das culturas, distribuindo água durante todo o ciclo de cultivo, considerando a lâmina para cada fase e tornando a atividade mais eficiente para aumento na produção de alimentos e economia de recursos hídricos. Um aspecto importante em torno da irrigação é garantir a segurança alimentar viabilizando a produção de alimentos e matérias primas em períodos de escassez hídrica e em regiões com chuvas irregulares. Além disso, o correto manejo de irrigação pode levar a melhorias na qualidade do produto Queiroga (2019) encontrou relações do pH de frutos de pimentão vermelho em diferentes lâminas de irrigação, com frutos menos ácidos quando as plantas foram submetidas a um certo déficit hídrico, adquirindo a característica desejável para o produto comercializável.

Os benefícios da irrigação na produção e rendimentos das culturas já são conhecidos mediante a variedade de estudos nessa temática, por isso, os desafios atuais deverão ser relacionados a avanços na gestão das fontes de água disponíveis, eficiência dos sistemas e análises custo-benefício (SCHOENGOLD & ZILBERMAN, 2014).

Tecnologias que utilizam a eletrônica e automação permitem a manutenção dos benefícios da irrigação com redução de uso da água contudo, na maioria dos casos não são acessíveis ao pequeno produtor devido necessidade de mão de obra técnica e alto custo para implementação (BASSOI et al., 2019). Sendo assim, é necessário o estudo de novas tecnologias que permitam obter produtividade adequada das culturas e que estejam ao alcance do produtor.

2.2. Manejo da irrigação

O manejo da irrigação pode ser definido como o uso eficiente das ferramentas disponíveis, visando máxima produção vegetal com o menor uso de água possível agregado a um menor impacto econômico e ambiental. O manejo, assim definido, objetiva a eficiência e sustentabilidade de um sistema produtivo, mas de maneira simples visa aplicar exatamente a

água necessária no momento adequado para o consumo das plantas (MORENO PIZANI, 2017).

Existem vários métodos de manejo podem ser via planta, solo ou clima, geralmente baseados no conhecimento das características físico-hídricas do solo, na fisiologia da planta e dos dados climáticos (MAROUELLI & SILVA, 2011).

O manejo da irrigação via clima é baseado principalmente na determinação da evapotranspiração da cultura (ET_c) que representa a perda por evaporação do solo e transpiração das plantas (GOMES & TESTEZLAF, 2015). A estimativa de ET_c feita com o coeficiente de cultura (k_c) e evapotranspiração de referência (ET_o), pode ser estimada por vários métodos. Dentre eles, o mais preciso o método de Penman-Monteith modificado, adotado pela FAO (ALLEN et al., 1998). A obtenção das variáveis meteorológicas utilizadas no cálculo de ET_o requer sensores que respondem ao ambiente e ao qual estão inseridos e transformam o resultado de seus estímulos em uma grandeza física que pode ser medida, o conjunto destes sensores compõe a estação meteorológica (FINHOLDT, 2008).

As estações meteorológicas são muito utilizadas na agricultura, pois com a aquisição dos dados por elas medidos pode-se acompanhar, controlar ou prever o comportamento das culturas. Essas estações podem ser automáticas, caracterizadas por bom desempenho, praticidade e confiabilidade, mas tem alto custo econômico, com valores variando de R\$ 19.000,00 a R\$ 85.000,00, o que muitas vezes inviabiliza sua aquisição por pequenos e médios produtores rurais (TORRES et al., 2015). Na ausência destes equipamentos, recorre-se a bancos de dados climáticos da região, mas nem sempre os dados são representativos para as condições microclimáticas do cultivo (RADIN & MATZENAUER, 2015). Em algumas regiões, a aquisição dos dados é comercializada tornando-se um custo extra.

Para o manejo da irrigação via solo é considerado o monitoramento de água no solo e determinando os pontos máximo e mínimo umidade do solo (capacidade de campo e murcha permanente). Com esses pontos estabelecidos consegue-se regularizar a água disponível para as plantas, utilizando instrumentos que medem diretamente a umidade do solo (FREITAS, 2019). Os instrumentos mais utilizados para este manejo são do tipo TDR (Time-Domain-Reflectometry), FDR (Frequency-Domain-Reflectometry) e tensiômetros.

O método de TDR é baseado na emissão de pulsos eletromagnéticos; utiliza o tempo de propagação das ondas eletromagnéticas para determinar a permissividade elétrica, podendo inferir indiretamente o conteúdo de água no solo (COSTA, 2017). É um equipamento que vem sendo bastante utilizado no manejo da irrigação por ser de fácil manuseio, no entanto,

possui um custo elevado para aquisição, por exemplo, o TDR 100 tem custo em torno de U\$ 3,650.00 (SILVA et al., 2020).

Por mais simples que seja o método de manejo de irrigação adotado pelo produtor, pode-se obter de 15 a 30% de ganho na produtividade e redução da quantidade de água aplicada. Entretanto, nem sempre o método de manejo adotado é de fácil utilização, mesmo para produtores experientes e com conhecimento, podendo acarretar redução de produtividade, maior severidade de doenças e menor eficiência no uso da água e dos nutrientes pelas plantas (MAROUELLI & SILVA, 2011). Os métodos que envolvem cálculos ou equipamentos para o monitoramento dependem de pessoas qualificadas para execução, o que por vezes desencoraja a adoção pelos agricultores que não constatarem o custo-benefício, devido ao alto custo do equipamento no mercado e ausência de mão de obra especializada, com conhecimentos técnicos necessários para aplicação do manejo (TORRES et al., 2015; MAROUELLI & SILVA, 2011).

A partir de um levantamento realizado em dez países da Europa, em relação aos métodos e ferramentas disponíveis e em relação ao desenvolvimento para otimizar o manejo da irrigação em cultivos de casa de vegetação Incrocci et al. (2020) verificaram que apesar de já existir diversas ferramentas, 70 a 90% do manejo da irrigação é realizado pela experiência dos agricultores e/ou conselhos de técnicos; 0 a 20% é baseado em tensiômetros ou outros sensores de solo e 0 a 10% do manejo é baseado na evapotranspiração. Em Portugal, por exemplo, 30% do manejo é baseado na ETo. Os mesmos autores concluíram que equações de ETo aliadas a tecnologias de informação e comunicação podem ser aplicadas às práticas comerciais para os agricultores determinarem a necessidade hídrica das plantas cultivadas. Esses resultados mostram a necessidade de estudos nesta área para promover a implementação do manejo de irrigação.

2.3. Irrigação de precisão

A irrigação de precisão é uma área dentro da agricultura de precisão que tem como objetivos coletar, monitorar e gerenciar as variáveis de produção agrícola com aplicação de tecnologia para melhorar o desempenho dos cultivos e a qualidade ambiental. Os principais fatores do rendimento agrícola variam no espaço e no tempo, e é justamente nessa variabilidade que se encontra a maior dificuldade dos produtores. A variabilidade depende das condições ambientais e características intrínsecas de solo, declividade entre outras e interfere diretamente na produtividade (BASSOI et al., 2019). A medição dessas condições é

fundamental para a aplicação da agricultura de precisão, dessa forma pode se otimizar a utilização de insumos baseados no local e momento adequado, de tal forma que atenda aos requisitos do cultivo, garantindo eficiência no uso de recursos naturais e insumos e prevenindo riscos ambientais (KUBICEK et al., 2013; SILVA et al., 2020).

Muitos sistemas inteligentes já foram desenvolvidos e tiveram comprovada sua eficiência para diferentes aplicações na agricultura, tais como identificação de diferentes plantas daninhas, detecção de danos de insetos ou de doenças nas plantas cultivadas, avaliação de produção e rendimento dos cultivos, previsões de cultivo, programação de irrigação, sistemas de alerta, determinação de evapotranspiração, estimativa da umidade do solo (DORNELLES et al., 2018; TSANG & JIM, 2016; JHA et al., 2019; ZULKIFLI & NOOR, 2017).

A irrigação de precisão tem por objetivo realizar o manejo sustentável, aplicando água em quantidade, hora e local corretos, conhecendo as necessidades específicas das plantas (JIMENEZ et al., 2020). Os benefícios da aplicação da irrigação de precisão são: economia de recursos hídricos, redução de custos, redução dos impactos ambientais, otimização do valor econômico da água e da produção agrícola (SMITH; BAILLIE; FUTURES, 2009).

As ferramentas tecnológicas aplicadas na irrigação de precisão são Internet das coisas (IoT), sensores remotos (SR), wireless sensor networks (WSN) e redes neurais artificiais (RNA's). Essas tecnologias permitem a entrada de múltiplos parâmetros e programação da irrigação em tempo real, além de mesclar informações de diferentes fontes, sendo base para a tomada de decisão na irrigação (ZINKERNAGEL et al., 2020).

Devido ao importante papel do uso das tecnologias de informação na irrigação, diversos pesquisadores têm desenvolvido estudos de redes de sensores sem fio para otimizar o manejo da irrigação, com diversas aplicações em sistemas agrícolas que melhoram a eficiência e a eficácia das instalações (DUARTE, 2010; JIMENEZ et al., 2020; NAM et al., 2017; SAVITHA et al., 2018; SHEKHAR et al., 2018).

Essa tecnologia aplicada ao manejo da irrigação vem para superar as desvantagens do manejo manual, que geralmente é caro, demorado e propenso a erros (NAM et al., 2017).

A inteligência artificial (IA) surgiu da tentativa humana de criar um cérebro artificial, pois consegue interpretar o meio que está inserida e tomar decisões, isto pode ser realizado através de aprendizagem da máquina, conhecidos por profunda, Redes Neurais Artificiais (RNA's) e "Machine learning" que melhoram a aprendizagem da máquina. Esta é uma área que vem adentrando também na irrigação, para se realizar o manejo correto onde vários fatores devem ser levados em consideração na tomada de decisão, dentre outros sistemas

propostos para a melhoria na agricultura da análise de dados a tomada de decisão, a IA se mostrou a mais viável (JHA et al., 2019).

Avanços estão sendo realizados com sistemas de IA na agricultura utilizando RNAs, algoritmos computacionais que apresentam um modelo matemático com um processamento capaz de armazenar aprendizagem e utilizá-lo para uma determinada aplicação, assim toma decisões baseado em seu próprio aprendizado (FLECK et al., 2016). As RNAs estão sendo empregados para cálculos da ETo (ZANETTI et al., 2008; CRUZ, 2018) e para estimativa de outros parâmetros, como estimativa de curva de retenção de água no solo (SOARES et al., 2014), em todos eles têm-se obtido sucesso e até maior precisão que outros métodos.

Estudos com IA em manejo de irrigação tem a vantagem de reduzir o problema de mão de obra qualificada e os custos totais com irrigação, evitando desperdício de recursos hídricos e financeiros. Tsang e Jim (2016) estudaram a integração de algoritmos computacionais para determinar o tempo e a lâmina de irrigação utilizando RNA's e Lógica Fuzzy, que modelavam as condições do tempo e umidade do solo e as comparavam com a irrigação convencional, obtendo redução de 20% da água aplicada.

Um sistema autônomo e inteligente foi desenvolvido por Cruz et al. (2018) por meio da criação de uma rede de micro estações meteorológicas (MEM) que automaticamente calculam a ETo, a partir de dados provenientes de sensores de baixo custo.

A IA integra a chamada Internet das coisas, em inglês “Internet of things” (IoT), uma nova tecnologia formada por uma rede de dispositivos que visa transferir informações sem interferência humana. Possui três objetivos: comunicação, automação e economia dos custos que com eles é possível reduzir tempo, custo e a intervenção humana, proporcionando eficiência e ganhos em produtividade (JHA et al., 2019).

A IoT é uma poderosa ferramenta para ser aplicada no agronegócio, pois favorece o gerenciamento e auxilia a tomada de decisão, evitando desperdícios, otimizando operações e suprimindo a carência de mão de obra no campo (COSTA et al., 2018).

Como afirmado por Padrón (2016) o manejo adequado da água na irrigação é fundamental para obter alta produtividade, qualidade, rentabilidade e uso racional da água, principalmente em épocas que os produtores têm investido em novas formas de agricultura e em produtos com alto valor agregado. Ainda há escassez de trabalhos sobre o manejo de irrigação com sistemas automatizados e principalmente com o emprego de inteligência artificial, e que comprovem sua influência na produção e no rendimento das culturas, na economia dos recursos hídricos e praticabilidade na aplicação da irrigação.

2.4. A cultura do pimentão

O pimentão (*Capsicum annuum* L.) é uma solanácea de origem americana e está entre as principais hortaliças cultivadas no Brasil, por ser de origem tropical, desenvolve-se melhor em temperaturas amenas, é intolerante a baixas temperaturas e independente do fotoperíodo, ocorrendo florescimento e frutificação em qualquer fotoperíodo. Seu fruto, quando maduro, apresenta diversas colorações: vermelha, amarela, laranja e marrom. A maioria dos frutos comerciais são os colhidos verdes, porém a demanda por frutos vermelhos tem aumentado (FILGUEIRA, 2008). No estado de São Paulo, em 2017, a produção foi de 39,7 t.ha⁻¹ (IEA, 2017).

O produtor deve levar o fator de qualidade do fruto em consideração além da produtividade, já que houve mudança no perfil do consumidor, que exige mais qualidade nos produtos. Em hortaliças, a qualidade se dá por características como aparência, textura, sabor e valor nutritivo (CHITARRA, 1998), sendo importante avaliar as práticas de manejo que influenciem na produtividade e qualidade do produto (PADRÓN, 2016).

A água é um fator importante para o manejo da cultura do pimentão, uma cultura sensível tanto ao excesso quanto escassez hídrica. O déficit hídrico pode causar queda das flores, que prejudica diretamente a produtividade da cultura e o excesso pode favorecer doenças no colo da planta (CARVALHO et al., 2011; FILGUEIRA, 2008).

As necessidades hídricas da cultura giram em torno de 450 a 650 mm, quando submetidos a períodos longos de crescimento a demanda de água pode ser superior (MAROUELLI & SILVA, 2011). Apresenta Kc (coeficiente de cultivo) de 0,4 após o transplântio, 0,95 a 1,1 no período de cobertura plena 0,8 a 0,9 na colheita (DOORENBOS & KASSAM, 1994).

Resultados dos benefícios da irrigação em termos produtivos e econômicos na cultura do pimentão têm sido demonstrados em diversos estudos. Carvalho et al. (2011) obtiveram maiores retornos econômicos na cultura do pimentão quando houve reposição total do consumo de água pelas plantas, Padrón et al. (2016) verificaram aumento na eficiência do uso da água na cultura de pimentão quando realizada a irrigação diária.

3. OBJETIVOS

- Avaliar o manejo da irrigação com inteligência artificial em comparação ao manejo manual nos parâmetros produtivos da cultura;
- Verificar a eficiência do uso da água na produção de plantas hortícolas utilizando distintos manejos da irrigação;
- Determinar os custos da utilização de tecnologia no manejo da irrigação e comparar ao sistema manual.

4. MATERIAL E MÉTODOS

4.1. Localização e caracterização do ambiente experimental

O experimento foi realizado em ambiente protegido localizada no Departamento de Engenharia de Biosistemas da Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz” da Universidade de São Paulo (ESALQ/USP) no campus de Piracicaba – SP (22°42’40,67”S, 47°37’46,19”O, 546 m). O clima local é Cwa, de acordo com a classificação de Köppen (KOTTEK et al., 2006).

A estufa agrícola possui 6 metros de largura por 18 metros de comprimento, com pé direito de 4 metros. É coberta por uma lona de polietileno transparente com 150 micrômetros de espessura e tratada com proteção de raios ultravioletas. As laterais da estufa são revestidas por tela anti-afídeos. No centro da casa de vegetação está instalada a estação meteorológica automática da Campbell Scientific, as variáveis obtidas pela estação e salvas no datalogger (CR23X-Campbell Scientific) são: radiação global, temperatura do ar, umidade relativa, pressão de vapor de saturação, pressão de vapor atual, velocidade e direção do vento, através dos sensores de umidade relativa e temperatura do ar (HMP45C-L), do piranômetro de silício (CM3) e do anemômetro de 3 copos (014A-L).

4.2 Sistema de irrigação

Foi utilizado o sistema de irrigação por gotejamento, composto de uma linha lateral de tubos de polietileno DN 16 mm em cada canteiro com dois emissores por planta. Os emissores são do tipo autocompensante com vazão de 2 L.h⁻¹. Além disso, o sistema é composto por uma bomba centrífuga, com potência de ½ cv, um filtro de tela, um manômetro, um tubo de passagem DN 100 mm para fertirrigação, registros e válvulas solenoides. Para análise do sistema de irrigação foram realizados testes de uniformidade de distribuição de água conforme Frizzone et al. (2012), chegando ao resultado de 97% de uniformidade.

O ambiente experimental dispõe de sistema de captação de água de chuva composto por duas calhas nas extremidades maiores acopladas a tubos de PVC DN 100 mm, que possuem filtros de tela na sua saída e são ligadas às caixas d’água de 500 L, estas caixas d’água instaladas fora da casa de vegetação abastecem o reservatório de 1.000 litros, interno à casa de vegetação. Na ausência de chuva, era utilizada a água fornecida pelo serviço de abastecimento de água da ESALQ/USP. Análises químicas da água da chuva e da água de abastecimento da ESALQ são apresentadas na Tabela 1.

Tabela 1. Análise da qualidade da água

Fonte	CE dS/m	pH	Potássio (ppm)	Sódio (ppm)	Nitrato (ppm)
Chuva	0,0059	7,16	0,0	0,0	0,0
ESALQ	0,2870	7,16	4,0	28,0	5,3

4.3. Unidades experimentais e cultura de referência

Foram comparados dois manejos de irrigação (MIA - manejo de irrigação via sistema de inteligência artificial utilizando dados da micro estação meteorológica (MEM) e MM - manejo de irrigação manual utilizando dados da estação meteorológica Campbell).

A cultura de referência é o pimentão vermelho cultivar Atlantis, as parcelas de cultivo possuem dimensões de 5,0 x 3,5, m; com espaçamento de 0,5 m entre plantas e 1,0 m entre canteiros, contendo no total 35 plantas em cada parcela experimental. A cultivar Atlantis possui a característica de ser uma planta vigorosa, com ciclo médio de 115 dias, seus frutos são firmes, grandes, de formato retangular e com parede grossa, com peso médio de 320g e tamanho médio 16 x 8 cm, pode ser colhido verde ou vermelho (TOPSEED, 2020).

4.4. Manejo da irrigação

4.4.1. Manejo da irrigação inteligência artificial (mia) via cálculo da ETo e acionamento das válvulas por sistema inteligente

O sistema avaliado de manejo de irrigação via inteligência artificial é um sistema que foi desenvolvido na ESALQ/USP e conforme descrito por Cruz (2018), este sistema é composto de micro estação meteorológica (MEM), servidor local (SL) e servidor em nuvem (SN) (Figura 1).



Figura 1. Equipamentos do sistema de manejo via inteligência artificial instalados na casa de vegetação: micro estação meteorológica (MEM) e servidor local (SL) .

A composição de cada parte do sistema de manejo de irrigação via inteligência artificial está descrita abaixo conforme Cruz (2018):

Micro estação meteorológica (MEM): Cada MEM possui sensores que medem a temperatura, umidade relativa do ar, radiação solar, umidade e temperatura do solo, além de sensores de temperatura do circuito eletrônico da MEM e de tensão da bateria. Possui também um painel solar e baterias, um rádio XBee, um microcontrolador de baixo consumo energético e três placas de circuito impresso (PCI). Foram utilizados componentes de baixo custo para a construção da MEM, que orçados em 2018, resultaram num custo total de \$71.63. O valor de cada componente é detalhado na Tabela 2.

Tabela 2. Custo por componente para construção do MEM.

Componente	Quantidade	Valor unitário (U\$)	Total (U\$)
Resistores	10	0,15	1,50
Capacitores	26	0,11	2,82
Indutores	1	0,20	0,20
Bateria	1	3,72	3,72
Oscilador	1	0,33	0,33
Diodos	2	0,14	0,28
Conectores	4	0,30	1,20
			Continua...
Microcontrolador	1	4,91	4,91
Amp. Op	1	1,67	1,67
Reg. Tensão	2	1,31	2,61
Rádio	1	19,00	19,00
Sensor de Temperatura	2	5,83	11,76
Painel solar	1	6,00	6,00
Sensor de Luminosidade	1	1,12	1,12
PCI	3	4,87	14,61
Total			71,63

Fonte: Cruz (2018)

Servidor Local de irrigação (SL): O servidor de irrigação tem a função de receber os dados de todas as redes e controlar as eletroválvulas e a motobomba do sistema de irrigação. É constituído de um microcomputador e um rádio XBee. O hardware do servidor da irrigação utiliza uma Raspberry Pi2, que é um microcomputador de pequeno porte. O Raspberry Pi é composto por quatro entradas USB, uma entrada micro-USB, dedicada à alimentação da placa, uma saída de vídeo HDMI, uma saída de áudio P2, um módulo de Wi-Fi, um módulo de Bluetooth, uma interface de Ethernet, uma interface serial para display, uma interface serial para câmera e 40 pinos de entrada e saída. Além destas portas, ela abriga um processador Broadcom BCM2837B0 quad-core A53 (ARMv8) 64-bit de 4 GHz, um processador gráfico GPU Broadcom Videocore-IV, 1GB de memória RAM e inclui um slot para cartões de memória do tipo micro SD.

Também foram utilizados componentes de baixo custo para constituição do servidor de irrigação. O custo de cada componente está descrito na Tabela 3 resultando em um custo total de U\$ 271.76.

Tabela 3. Custo por componente do servidor de irrigação

Componente	Quantidade	Valor unitário (U\$)	Total (U\$)
Raspberry Pi 3 B+	1	40,00	40,00
Câmera	1	29,90	29,90
Cabo p/ câmera	1	3,95	3,95
Cartão de Memória	1	48,64	48,64
TouchScreen 7"	1	79,00	79,00
Invólucro p/ Touch	1	17,00	17,00
Invólucro p/ Câmera	1	2,95	2,95
Invólucro p/ Raspberry	1	8,00	8,00
Fonte	1	14,37	14,37
Rádio	1	19,00	19,00
Mecânicos			8,95
Total			271,76

Fonte: Cruz (2018)

Assim, o custo total do sistema de inteligência artificial para manejo de irrigação, somados aos impostos e custos de frete, e considerando o dólar no ano de 2020, teria um custo equivalente a R\$ 3868,76.

Rádio XBee: Foi utilizado o padrão ZigBee de comunicação de rede, pois esta tecnologia possibilita a criação de dispositivos de controle remoto providos de sensores e alimentados com baterias e células fotovoltaicas. Foi utilizada a topologia de rede Malha, a qual é composta por um ZigBee Coordenador (ZC) e diversos ZigBee Roteador (ZR). Esse tipo de topologia de rede adotado permite que todos os dispositivos possam comunicar entre si.

Softwares: Para cada componente do sistema foi utilizada o software adequado para atingir sua função específica. Assim no desenvolvimento do sistema de aquisição dos dados e de interação com o usuário via interface gráfica, a linguagem utilizada foi a Python. Para a interação com os rádios XBee, uma API (Application Programming Interface) de

comunicação serial foi utilizada, fornecida pela própria ZigBee Alliance, permitindo assim, acessar os recursos dos rádios de maneira fácil e rápida. Para a produção e construção da interface gráfica, a API PyQt foi utilizada e é homologada pela comunidade Python5. A PyQt, é um conjunto de bibliotecas de C++ que acessa diversos aspectos dos modelos em sistemas desktop e móveis.

Para a programação do microcontrolador da MEM foram utilizadas as linguagens C e Assembly. A linguagem Assembly é utilizada em tarefas críticas, cujo tempo de execução é fundamental. O funcionamento ocorre da seguinte maneira: ao ser iniciada, cada MEM se comunica com o Servidor Local (SL) e faz o sincronismo da data e do horário. Assim, a cada intervalo de cinco minutos, todos os sensores são amostrados e os valores são corrigidos e armazenados. A cada hora completa, a média dos valores, dos últimos 60 minutos, dos sensores é realizada, armazenada e os valores originais são descartados. A cada período de 12 horas as estações enviam os dados para o SL. A transmissão de dados das MEM para o SL se dá apenas duas vezes ao dia, para a economia de energia. O SL é o responsável por armazenar os dados das MEM, assim como por acionar as bombas e eletroválvulas de irrigação. De acordo com os dados enviados pelas MEM, a lâmina de irrigação necessária é calculada e aplicada.

O sistema utilizado no MIA baseia a lâmina de irrigação no cálculo da ETo e avalia também o conteúdo de água no solo, realizando uma correção na lâmina de irrigação caso a lâmina estimada por variáveis climáticas não fosse suficiente para atingir à umidade desejada.

4.4.2. Manejo da irrigação manual (mm) via cálculo da ETo com a estação Campbell Scientific

Para o MM, diariamente foram coletados manualmente os dados da estação meteorológica Campbell Scientific (estação meteorológica padrão) e enviados para planilha Excel, com a qual se calculou a lâmina de irrigação, sendo o cálculo de evapotranspiração de referência (ETo) via Penman-Monteith modificado (equação 1). Após a estimativa da ETo diária, utilizou-se um ajuste do coeficiente de cultura (Kc) de acordo com o estágio de desenvolvimento das plantas para estimar a evapotranspiração de cultura (ETc, equação 2). Foi adotado o coeficiente de cultura recomendado pela FAO para as quatro fases fenológicas distintas, sendo Fase I – 0,4; Fase II – 0,70; Fase III – 1,10; e Fase IV – 0,85. O tempo de funcionamento do sistema para atender necessidade de irrigação diariamente foi definido pela equação 3. Dessa forma, o sistema foi aberto manualmente conforme o tempo determinado.

$$ET_o = \frac{0,408.s.(Rn-G) + \gamma \cdot \frac{900}{T_d + 273} \cdot U_2 \cdot [e_s - e_a]}{s + \gamma \cdot (1 + 0,34 \cdot U_2)} \quad (1)$$

$$ET_c = ET_o \times K_c \quad (2)$$

$$T_i = 60 \cdot \frac{(ET_c \cdot S_g \cdot S_l)}{E_a \cdot q_e} \quad (3)$$

Em que: ET_o - evapotranspiração de referência (mm dia^{-1}); s - taxa de variação da pressão de vapor em relação à temperatura ($\text{kPa}^\circ\text{C}^{-1}$); Rn - radiação líquida total ($\text{MJ m}^{-2} \text{dia}^{-1}$); G - fluxo total de calor no solo ($\text{MJ m}^{-2} \text{dia}^{-1}$); γ - constante psicométrica ($0,063 \text{kPa}^\circ\text{C}^{-1}$); T_d - temperatura média diária ($^\circ\text{C}$); U_2 - velocidade do vento a 2 m do solo (m s^{-1}); e_s - pressão de saturação de vapor (kPa); e_a - pressão parcial de vapor (kPa); ET_c - evapotranspiração da cultura (mm dia^{-1}); K_c - coeficiente de cultura (Allen et al., 1998); T_i - Tempo de irrigação (min); S_g - espaçamento entre gotejadores (m); S_l - espaçamento entre linhas laterais de gotejadores (m); E_a - eficiência de aplicação de água (adimensional); q_e - vazão do gotejador (L h^{-1}).

Com o somatório da necessidade de irrigação diária obteve-se a lâmina líquida de irrigação total aplicada no ciclo da cultura (equação 4).

$$LL_t = \sum_{i=1}^n (ET_c) \quad (4)$$

Em que: ET_c - Evapotranspiração da cultura (mm dia^{-1}); LL_t - Lâmina líquida total aplicada (mm ciclo^{-1}).

Para ambos os sistemas adotados, foi aplicada a mesma lâmina de irrigação até os 15 dias após o transplântio para garantir o estabelecimento das mudas no solo e após esse período os diferentes tipos de manejo de irrigação foram aplicados.

4.5. Condução do experimento e manejo da cultura

As mudas foram transplantadas no solo no dia 13 de maio de 2020, quando estas já possuíam seis folhas definitivas, sendo transplantada uma planta por cova. As mudas foram adquiridas de uma empresa especializada em mudas, IBS Mudas, localizada em Rio Claro-SP.

A condução da cultura foi feita em espaldeira simples, sendo conduzidas quatro hastes de cada planta. Foram colocados mourões de bambus, nas extremidades e no meio das linhas de plantio que sustentavam os fitilhos plásticos horizontais. Cada haste da planta foi amarrada nos fitilhos horizontais que estavam dispostos nas linhas de plantio (Figura 2). O tutoramento

da cultura permite a longevidade e produtividade, além de facilitar os tratos culturais e a colheita.



Figura 2. Cultura de pimentão vermelho Atlantis instalada e tutoramento na casa de vegetação.

Os brotos que se formaram abaixo da primeira bifurcação foram removidos com tesoura devidamente desinfetada. À medida que a planta se desenvolvia, novas hastes eram formadas, por isso foram realizadas podas das hastes adicionais para manter a condução de quatro hastes conforme o programado. No 15 DAT (dias após transplante) foram eliminadas as flores que surgiram na primeira bifurcação (Figura 3), para permitir que os frutos nascessem nas hastes conduzidas e obter maior desenvolvimento destes. Sempre que necessário e com intervalo máximo de quinze dias, foi feito o desbaste das folhas da parte basal, para garantir a luminosidade, ventilação e eliminar as fontes de inóculo de doenças.



(A)



(B)

Figura 3. Desenvolvimento da cultura do pimentão vermelho durante condução do experimento. (A) Planta com a primeira flor aberta e (B) Planta com primeiro fruto.

As colheitas foram realizadas sempre que os frutos atingiam 80% da coloração externa vermelha (Figura 4). A primeira colheita ocorreu no dia 11 de setembro de 2020, aos 121 DAT, e a última aos 210 DAT, ao todo foram realizadas 12 colheitas no período experimental. Os frutos que apresentaram defeitos graves, como podridão, murcho, queimado e dano não cicatrizado foram considerados frutos não comerciais (FNC) e os demais foram considerados frutos comerciais (FC).

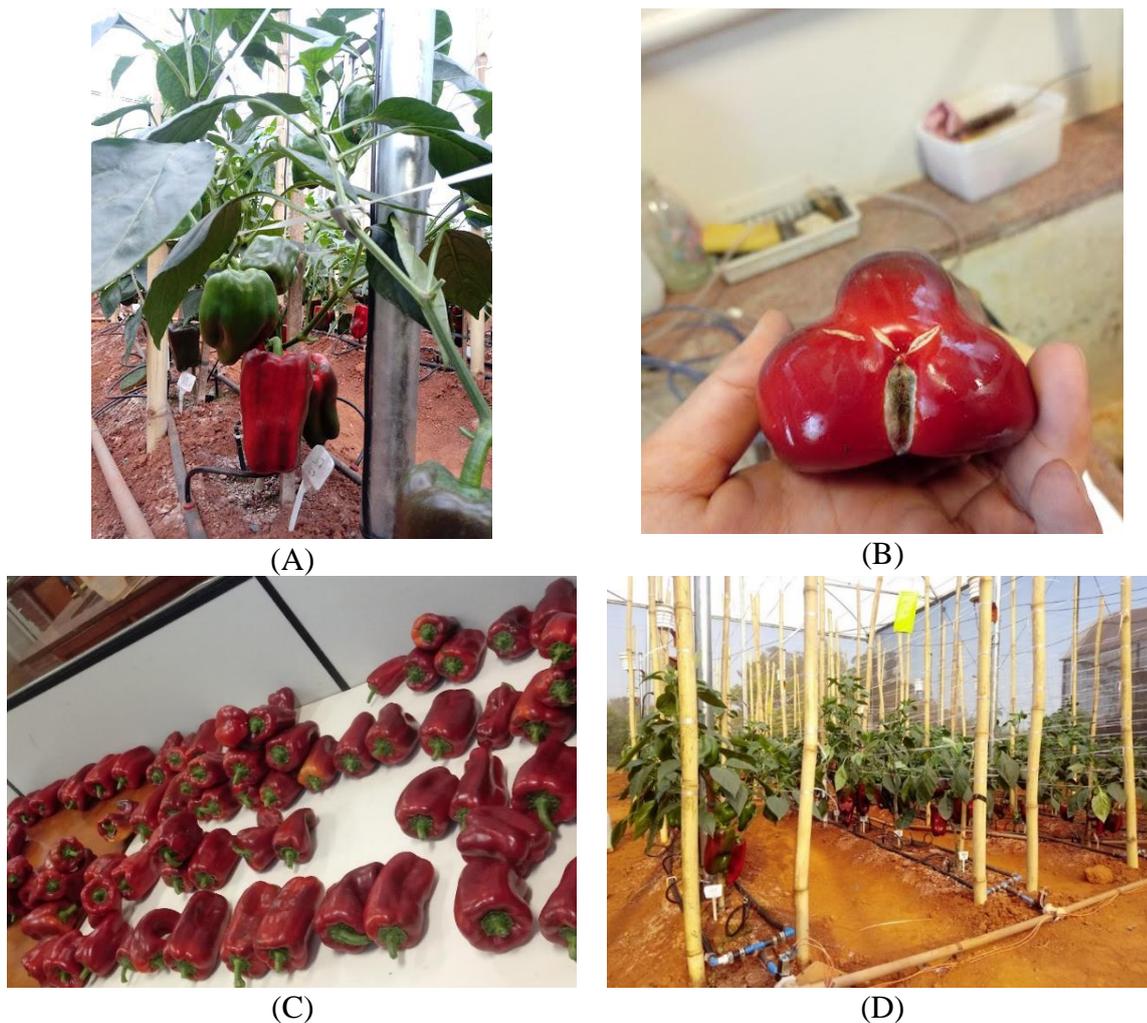


Figura 4. Frutos de Pimentão vermelho na época de colheita. (A) Fruto com 80% de coloração vermelha, (B) fruto danificado, (C) frutos pós-colheita, (D) plantas com frutos em ponto de colheita durante experimento.

4.6. Adubação

A aplicação dos fertilizantes foi realizada via água de irrigação, sendo utilizada a mesma adubação para as duas parcelas de manejo de irrigação. O manejo da fertirrigação foi realizado de quatro em quatro dias, de acordo com as necessidades da cultura (Tabela 4) conforme recomendação para a cultura.

Tabela 4. Quantidade aplicada via fertirrigação de pimentão vermelho de acordo com o ciclo da cultura.

Fase (DAT)	Nutrientes recomendados ($\text{kg ha}^{-1} \text{ dia}^{-1}$)				
	N	P	K	Ca	Mg
até 30	4,1	1	3,28	1,9	0,38
31-70	3,9	0,68	4,06	2,7	0,68
71-150	3	0,67	3,02	2	0,5

Os fertilizantes foram adicionados na caixa d'água de fertirrigação e a solução foi monitorada de forma que a condutividade elétrica (CE) da solução não ultrapassasse 3,0 dS m⁻¹ (SILVA, 2002). Também foi realizado o monitoramento da CE do solo a cada 21 dias, nos casos que ultrapassaram o valor de 3,0 dS m⁻¹, foi realizada somente a irrigação com água limpa, para evitar a salinização do solo. Adicionalmente foram aplicados pela solução micronutrientes e ácido bórico, devido à constatação de deficiência nutricional nas plantas.

4.7. Avaliações biométricas do pimentão

Semanalmente foi determinada a altura de cada planta, medindo-se a partir da superfície do solo até a extremidade da folha mais alta, com régua graduada em cm.

Em cada colheita dos frutos, foram determinados por planta: o número de frutos (NF) por contagem manual; massa fresca total de frutos (MFT), de frutos comerciais (MFC) e de frutos não comerciais (MFNC), por meio de pesagem em balança de precisão. Com a utilização de um paquímetro digital foram obtidos largura e comprimento dos frutos. Após terem sido medidos, foi retirada uma amostra da polpa dos frutos, macerada, coada e com o líquido obtido utilizou-se pHmetro digital (AK90) para obtenção do pH e refratômetro para obtenção do teor de sólidos solúveis (°Brix). Com a soma de MFT de todas as colheitas foi obtida a produtividade por planta (kg ha⁻¹).

Os frutos foram classificados pelas suas características conforme o padrão comercial seguindo as normas de classificação determinadas pela Secretaria de Agricultura e Abastecimento do Estado de São Paulo (SÃO PAULO, 2009), sendo os frutos murchos, queimados, com dano não cicatrizado e com podridão classificados como frutos não comerciais.

4.8. Eficiência do uso da água (EUA)

O cálculo de eficiência do uso da água foi obtido pelo peso de frutos produzidos por m³ de água aplicada na irrigação em cada manejo, de acordo com a equação 5.

$$EUA = \frac{Y}{I} \quad (5)$$

Em que: EUA - Eficiência do uso da água (kg m⁻³); Y - Produção de frutos pelas plantas (kg); I - Lâmina de água aplicada (m³).

4.9. Análise econômica

Foi realizada a análise econômica dos dois manejos de irrigação utilizados e comparados em relação à viabilidade do uso. Foram analisados quatro cenários de manejo de irrigação, considerando o cálculo de ETo e o modo de operação do sistema: 1) ETo via estação meteorológica padrão e operação manual; 2) ETo via estação meteorológica comercial e operação manual; 3) Cálculo automático de ETo com dados de estação meteorológica comercial e operação manual; 4) ETo via microestação meteorológica e operação via inteligência artificial (Tabela 5).

Tabela 5. Fatores analisados em cada cenário de manejo da irrigação

Cenários	Estação Meteorológica	Profissional para cálculo do manejo da irrigação	Profissional para operação do sistema de irrigação
1	Campbell Scientific	Sim	Sim
2	Comercial	Sim	Sim
3	Comercial	Não	Sim
4	MEM	Não	Não

No cenário 1 a estação meteorológica para aquisição de dados é a estação Campbell Scientific, utilizada como padrão, principalmente em áreas experimentais, devido à precisão de seus dados, porém possui um alto custo de aquisição, com valor aproximado de R\$ 54.200,00, abrangência para 50 hectares e vida útil de 20 anos. Neste cenário os dados foram coletados da estação meteorológica e posteriormente transferidos para uma planilha para cálculo da lâmina e tempo de irrigação. Após obter os valores o sistema de irrigação foi acionado manualmente. Para criação da planilha de cálculo da lâmina de irrigação é necessário a contratação de um profissional de nível superior que tenha os conhecimentos necessários para realizar o manejo adequado da lâmina de irrigação.

No cenário 2 o procedimento seria semelhante ao cenário 1, mas utilizando uma estação meteorológica comercial, que produtores de pequenas propriedades rurais poderiam adquirir. Para isso foi realizado um orçamento com as estações meteorológicas disponíveis no mercado e foi adotada aquela que possuía componentes similares mais precisos e com preço mais

acessível. As estações meteorológicas orçadas contêm os sensores de variáveis climáticas, datalogger e conexão à internet. O valor da estação adotada no mercado é de R\$ 23.047,56, considerando vida útil de 15 anos e uma área de 50 ha de cobertura. Neste cenário o manejo da irrigação seria realizado por um profissional de nível superior e o acionamento manual do sistema de irrigação por um técnico, como no cenário 1.

Como no mercado são encontrados serviços que calculam o manejo da irrigação, no cenário 3 foi considerada a aquisição da plataforma de assessoria para manejo de irrigação ofertada pela mesma empresa, esse software possui um custo anual de R\$ 2.900,00 para ser utilizado. Com a aquisição do software para manejo da irrigação, não é necessário a contratação de mão de obra para realizar esta função, porém ainda é necessária a mão de obra para o acionamento do sistema de irrigação.

No cenário 4 seria utilizada a micro estação meteorológica (MEM) em estudo neste estudo. Todo trabalho de coleta dos dados, cálculo da lâmina de irrigação e acionamento do sistema de irrigação realizado pelo sistema de IA, por meio de um servidor local, não necessitando de mão de obra para realizar o manejo da irrigação e nem o acionamento das válvulas de irrigação.

Para a análise econômica utilizou-se o Modelo Computacional para Determinação do Risco Econômico em Culturas Irrigadas (Marques & Frizzone, 2005) descrito em sequência.

4.10. Custo fixo anual

Os custos fixos são aqueles que independem do número de horas de operação e considera o valor residual do sistema, dessa forma é considerado a variabilidade da vida útil que depende do nível de reparos e manutenção. Para o cálculo do custo fixo anual (equação 6), utilizou-se o fator de recuperação de capital (equação 7).

Para custo fixo do sistema de irrigação, foi considerado o preço de aquisição de um gotejamento automatizado de R\$ 12.000,00 ha⁻¹ com base em valores comerciais da região e com vida útil de 12 anos.

$$CFa = FRC \times PS - \frac{VR \cdot i}{(i + 1)^n - 1} \quad (6)$$

$$FRC = \frac{i \cdot (i + 1)^n}{(i + 1)^n - 1} \quad (7)$$

Em que: CFa – Custo fixo anual (R\$ ha ano⁻¹); FRC - Fator de recuperação de capital (adimensional); i - taxa anual de juros (0,12 a.a.); n - vida útil do bem estudado (anos); PS – Preço de aquisição do sistema (R\$ ha⁻¹); VR – valor residual do sistema (R\$ ha⁻¹).

Para o preço de aquisição da estação meteorológica, em 2020, foram orçadas estações meteorológicas no mercado brasileiro que possuem características semelhantes e os valores obtidos variaram entre R\$ 23.047,56 e R\$85.475,00. Todas incluem os sensores climáticos para determinar ETo e dattalogger, algumas possuem plataforma online para acesso aos dados registrados e incluem um plano anual para acesso a essa plataforma com um custo adicional variando de R\$ 720,00 ao ano a R\$ 2.900,00 ao ano.

4.11. Custos variáveis

Os custos variáveis (equação 8) consideram os custos que variam conforme a utilização do sistema: manutenção, energia, água e mão de obra.

$$CVa = Cam + Cab + Caw + Camo \quad (8)$$

Em que: Cab – Custo anual de bombeamento (R\$ ha ano⁻¹); Cam – Custo anual de manutenção (R\$ ha ano⁻¹); Camo – Custo anual da mão de obra (R\$ ha ano⁻¹); Caw – Custo anual da água (R\$ ha ano⁻¹); CVa – Custo variável anual (R\$ ha ano⁻¹).

4.12. Custo de mão de obra

Para o cálculo do custo anual da mão de obra (equação 9) foi calculado as horas necessárias para realizar o manejo manual, o salário médio pago ao trabalhador rural e os encargos pagos sobre o salário.

$$Camo = \sum_{\text{dias irrigados}=1}^n \left\{ \frac{S}{240} \cdot \left[1 + \left(\frac{\text{Férias} + T + \text{INSS} + \text{IT}}{100} \right) \right] \cdot \text{HI} \right\} \quad (9)$$

Em que: Camo – Custo anual da mão de obra (R\$ ha⁻¹ ano⁻¹); S – Salário mensal (R\$ mês⁻¹); F – Encargo pago relativo a férias em porcentagem do salário (%); T - Encargo pago relativo ao 13º em porcentagem do salário (%); INSS - Encargo pago relativo ao INSS em porcentagem do salário (%); IT - Encargo pago relativo ao INSS do 13º salário em porcentagem do salário; HI – horas de trabalho necessárias por hectare por irrigação realizada (horas ha⁻¹ irrigação).

O cálculo de custo da mão de obra para acionamento da irrigação foi utilizado em todos os cenários exceto no cenário 4, já que neste cenário o acionamento é realizado via sistema de inteligência artificial. Para a irrigação realizada manualmente, adotou-se o salário mensal utilizado para trabalhador de campo de R\$ 1.195,61 mês⁻¹ (média para Piracicaba-SP), considerando 7,5h mês⁻¹ devido ao cálculo recomendado por Marouelli & Silva (2011) de 0,25h dia⁻¹. Para os cenários 1 e 2, foi incluso no cálculo o salário para técnico agrícola, de R\$ 2.552,12 mês⁻¹ (SALÁRIO, 2020) para leitura da estação meteorológica, criação de planilha e cálculos da lâmina de irrigação, acrescido dos encargos legais. Considerou-se 60h no primeiro mês, que demanda maior tempo de trabalho para construção das planilhas e, 12h nos outros meses para leitura e manutenção da planilha. Esses dados horários de trabalho foram obtidos em campo durante o ensaio.

Para o MIA o custo de mão de obra será igual a zero, porque o sistema inteligente funciona de forma autônoma.

4.13. Custo de manutenção

O custo de manutenção é relacionado ao custo para garantir o bom funcionamento do sistema e suas condições de uso, obtido pela equação 10. Tanto para o sistema de irrigação quanto para a estação meteorológica, em condições adequadas de uso, geralmente utiliza-se uma porcentagem do preço de aquisição. Neste trabalho foi considerado o valor de 4% (Marouelli; Silva, 2011). Para o cenário 4, o custo de manutenção da MEM possui um custo fixo de R\$ 254,81 ano⁻¹ fornecido pela empresa.

$$Cam = \frac{Tm.Ps}{100} \quad (10)$$

Em que: PS – Preço de aquisição do sistema (R\$ ha⁻¹) e Tm – Taxa anual de manutenção (%).

4.14. Custo de bombeamento

Para o cálculo de bombeamento foi considerado o tipo de motor, comparando o motor de combustão a diesel e o motor elétrico. Para a energia elétrica ainda foram consideradas as modalidades tarifárias para o grupo B (rural) e para o grupo A (tarifa verde, tarifa azul e tarifa convencional).

4.14.1 Motor a diesel

No motor a diesel para o cálculo do bombeamento, admitiu-se o valor de venda do óleo diesel de R\$ 3,614 litro^{-1} e consumo específico de 0,350 $\text{L cv}^{-1} \text{h}^{-1}$ (CNT, 2020). O cálculo para o custo anual de bombeamento à diesel é demonstrado a seguir (equação 11):

$$\text{Cab} = \text{Co. Pot. Cs. } 0,00125 * \text{H} \quad (11)$$

Em que: Cab – Custo anual do bombeamento ($\text{R\$ ha}^{-1} \text{ano}$); Co – Custo do óleo diesel na propriedade ($\text{R\$ L}^{-1}$); Pot – Potência do motor (cv ha); Cs – Consumo específico do motor diesel ($\text{g cv}^{-1} \text{h}^{-1}$); H – horas de funcionamento mensal ($\text{h ha}^{-1} \text{mês}^{-1}$).

4.14.2 Motor elétrico

O custo anual do bombeamento para o motor elétrico foi calculado pela soma do faturamento anual da demanda com o faturamento anual do consumo. A tarifa de energia é estabelecida pela Agência Nacional de energia elétrica (ANEEL), que determina o preço final a ser pago pelo consumidor. A estruturação tarifária da ANEEL define, para uso da energia elétrica, separação de grupos, subgrupos e modalidades tarifárias de acordo com as horas de uso, nível de tensão e localização (SILVA, 2020).

De acordo com a Resolução Normativa 418/2010 da Aneel (ANEEL, 2010), os consumidores são divididos em dois grandes grupos, A e B. No grupo A os consumidores são atendidos por redes trifásicas e devem contratar demanda de potência (kW), possuem tarifas binômias (consumo e demanda) e são divididos em subgrupos de acordo com a tensão de atendimento: A1 (tensão maior ou igual a 230 kV); A2 (tensão de 88kV até 138 kV); A3 (tensão de 69 kV); A3a (de 30 até 44 kV); A4 (de 2,3 até 35kV) e AS (subterrâneo). O grupo B são consumidores atendidos por tensão inferior a 2,3 kV, a tarifa é monômnia (consumo) e os subgrupos são: B1 – residencial; B2 – rural; B3 – demais classes; B4 – iluminação pública.

As modalidades tarifárias são diferentes para os grupos, para o Grupo B foi considerada a tarifa convencional monômnia e para os consumidores do grupo A, a tarifa convencional Binômnia, tarifa verde (horo-sazonal verde) e tarifa azul (horo-sazonal azul). A tarifa convencional é aplicada sem distinguir a hora de utilização da rede elétrica, sendo a forma monômnia com tarifa única aplicada ao consumo de energia e a forma binômnia com tarifa única da demanda de potência e tarifa única para consumo de energia. Já a tarifa verde e a tarifa azul são modalidades horárias, possuem tarifas diferenciadas de acordo com as horas de utilização do dia (SENAR, 2019).

As tarifas estabelecidas conforme o horário e a estação do ano (seca ou chuvosa) horas dos dias são conhecidas como tarifas horo-sazonais, sendo divididas em horário de ponta, três horas consecutivas entre as 18h e às 21h e horário fora de ponta, as 21 horas diárias complementares ao horário de ponta. No horário fora de ponta, também há um horário com desconto especial, das 21h30 às 6h00, reservado para as atividades de irrigação e aquicultura. Esse desconto no estado de São Paulo é de 70% para o grupo A e 60% para o grupo B (CPFL, 2020a e 2020b; ELEKTRO, 2020).

A tarifa de consumo é composta da TE – tarifa de energia - valor da energia consumida mensalmente em R\$/MWh, e da TUSD – tarifa de uso do sistema de distribuição - um valor único referente ao sistema de distribuição de energia elétrica pelo uso do sistema, também em R\$/MWh. É importante ressaltar que mesmo nos meses em que não há irrigação é cobrado 10% do valor da demanda (SENAR, 2019).

Para todos os grupos as contas de energia são faturadas de acordo com o Sistema de Bandeiras Tarifárias (SIT), incluso em 2015. As bandeiras apontam se haverá acréscimo na tarifa de acordo com as condições de geração de eletricidade no país (SILVA, 2020). A bandeira verde indica que não haverá acréscimo na tarifa; bandeira amarela haverá acréscimo na tarifa de R\$ 0,01874 por kWh consumido e bandeira vermelha indica um acréscimo de R\$ 0,14200 por kWh consumido (CPFL, 2020).

A bandeiras tarifárias acionadas em 2020 foram bandeira amarela em janeiro, bandeira verde de fevereiro a novembro e bandeira vermelha em dezembro (ANEEL, 2021). Utilizou-se as tarifas elétricas vigentes em 2020 em Piracicaba, SP (Tabela 6) pela distribuidora de energia CPFL Paulista e os impostos – PIS/COFINS, ICMS e a CIP.

Tabela 6. Tarifas vigentes para cada subgrupo tarifário

Subgrupo	Demanda (R\$ kW ⁻¹)		Consumo (R\$ kWh ⁻¹)			
	Ponta	Fora de Ponta	Ponta		Fora de Ponta	
			TUSD	TE	TUSD	TE
B2 rural	-	-	-	-	0,242	0,239
A3a rural convencional	-	30,96	-	-	0,047	0,380
A3a rural azul	30,91	11,70	0,082	0,443	0,082	0,266
A3a verde	-	11,70	0,795	0,443	0,082	0,266

Fontes: CPFL (2020a); CPFL (2020b).

O faturamento mensal da demanda é calculado pela potência da motobomba (equação 12) e posteriormente calculado o faturamento anual da demanda. A quantidade de água aplicada na área, a energia hidráulica exigida pelo sistema de irrigação e a eficiência total de bombeamento determinará o consumo de energia elétrica. Sendo o faturamento anual do consumo calculado conforme as tarifas de energia e número de horas de bombeamento (equação 13).

$$Dem = 0,736 \cdot Pot \quad (12)$$

Em que: Dem – Demanda contratada (kW ha⁻¹); Pot – Potência do motor (cv ha⁻¹);

$$H = \frac{(LBm \cdot 10)}{Q} \quad (13)$$

Em que: H - horas de funcionamento mensal (h ha⁻¹ mês⁻¹); Q – Vazão da motobomba (m³ ha⁻¹ h⁻¹); LBm – Lâmina bruta mensal (mm mês).

As tarifas seguiram as adotadas pela Aneel (Agência Nacional de Energia Elétrica), sendo o custo anual de energia (equação 14) calculado pela soma do faturamento anual da demanda e o faturamento anual de consumo ajustados pelo fator de potência conforme a tarifa horosazonal utilizada.

$$Cae = (FDa + FCa) \cdot \frac{(0,92)}{\cos \varphi} \cdot (1 + t) \quad (14)$$

Cae – Custo anual de energia (R\$ ha ano⁻¹); FCa – Faturamento anual do consumo (R\$ há ano⁻¹); FDa – Faturamento anual da demanda (R\$ ha ano⁻¹); t – alíquota dos tributos (ICMS=18%, PIS/ PASEP=0,83%, COFINS=3,84%), decimal; cos φ – fator de potência.

A irrigação foi programada para ocorrer nos horários de desconto para irrigantes, de acordo com a Resolução Normativa nº414 da Aneel (ANEEL, 2010). Em média, a potência requerida por área irrigada é por volta de 1,6 cv ha⁻¹ e em relação ao consumo de energia, na irrigação localizada, está em torno de 0,1 a 0,4 kWh m⁻³ (Silva, 2020).

4.14.2.1 Tarifa de demanda

O cálculo para a tarifa de demanda é demonstrado a seguir (equação 15). Não há faturamento da demanda para o subgrupo B2 rural, para os subgrupos A3 a rural convencional e A3a rural verde o faturamento da demanda é considerado apenas como fora de ponta. Quando não há uso do sistema de irrigação no mês deve ser considerado 10% do valor de demanda contratada.

$$FD_m = (TD_{hp} * Dem_{hp} + TD_{fp} * Dem_{fp}) \quad (15)$$

Em que: FD_m – faturamento mensal de demanda (R\$ ha⁻¹ mês⁻¹); TD_{hp} – tarifa de demanda em horário de ponta (R\$ kW⁻¹); Dem_{hp} – demanda ocorrida no horário de ponta (kW ha⁻¹); TD_{fp} – tarifa de demanda em horário fora de ponta (R\$ kW⁻¹); Dem_{fp} – demanda ocorrida no horário fora de ponta (kW ha⁻¹).

4.14.2.2 Tarifa de consumo

Para o cálculo do faturamento de consumo mensal (equação 16), nos subgrupos B2 rural e A3a convencional não será considerado a tarifa de consumo de ponta, mas nos subgrupos A3a azul e verde serão consideradas o horário de funcionamento e as respectivas tarifas para horário de ponta e horário fora de ponta.

$$FC_m = \{TC_{fp} \cdot [H_d \cdot (1 - f_d) + H_{sd}] + TC_p \cdot H_p\} \cdot 0,736 \cdot Pot \quad (16)$$

FC_m - faturamento mensal de consumo (R\$ ha⁻¹ mês⁻¹); TC_{fp} – tarifa de consumo horário fora de ponta (R\$ kW⁻¹); H_d – horas de funcionamento com desconto (h ha⁻¹ mês⁻¹); f_d – fator de desconto; H_{sd} – horas de funcionamento sem desconto (h ha⁻¹ mês⁻¹); TC_p – tarifa de consumo horário de ponta (R\$ kW⁻¹); H_p – horas de funcionamento horário de ponta (h ha⁻¹ mês⁻¹);

4.15. Custo da água

Os irrigantes também devem computar os custos para o uso da água, segundo a agência das bacias PCJ o valor de consumo de água bruta no estado de SP é R\$ 0,0255 m⁻³. O custo anual da água (equação 16) foi calculado conforme a lâmina bruta necessária e o preço fixo da água.

$$Caw = \sum_{mês=1}^{12} (LB_m \cdot Pa \cdot 10) \quad (16)$$

Em que: C_{aw} - Custo anual da água ($R\$ \text{ ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$); L_{Bm} – Lâmina bruta mensal (mm mês^{-1});
 P_a – Preço da água ($R\$ \text{ m}^{-3}$).

4.16. Custo total

Determinados os custos fixos e variáveis, o custo total anual da irrigação será o somatório destes (equação 17):

$$CTa = CFa + CVa \quad (17)$$

Em que:

CTa - Custo total anual da irrigação ($R\$ \text{ ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$).

4.17. Análise estatística

Foi realizada a avaliação da normalidade dos dados e após, submetidos ao teste t de comparação de médias a 5% de probabilidade pelo programa R.

5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1. Dados meteorológicos

Durante a condução do experimento, as plantas passaram por condições climáticas variáveis do início ao final do ciclo. No início do transplante, a temperatura média na casa de vegetação foi de 20° C, mas foram registradas temperaturas mínimas abaixo de 15°C nesse período (Figura 5).

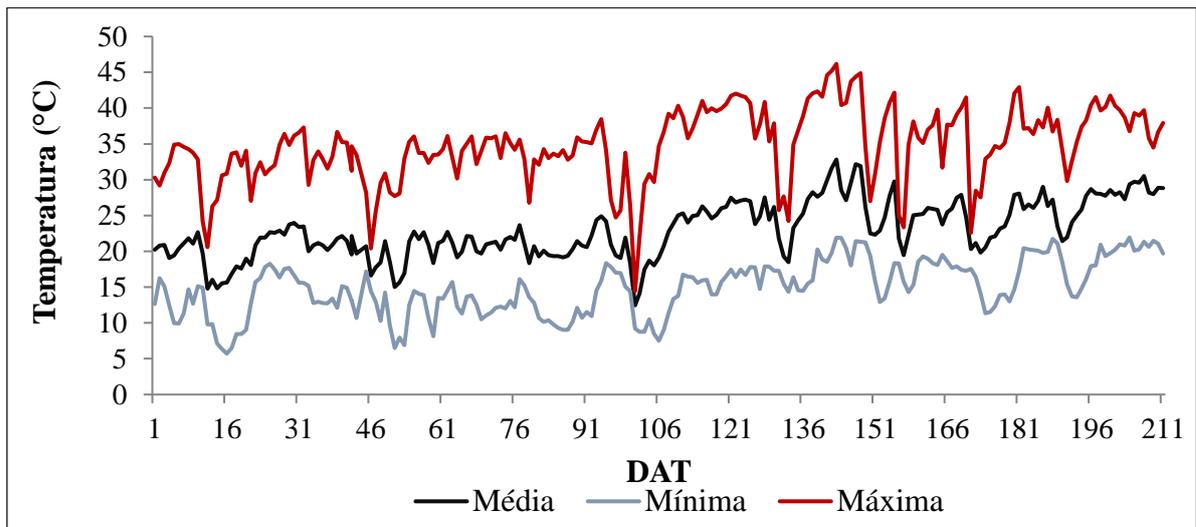


Figura 5. Temperaturas máxima, média e mínima na casa de vegetação durante o ensaio.

As maiores temperaturas foram registradas durante 115 DAT a 170 DAT, com média de 30°C durante o dia e temperaturas máximas acima de 40°C. Além da alta temperatura também foram registrados umidade relativa do ar média de 50% (Figura 6).

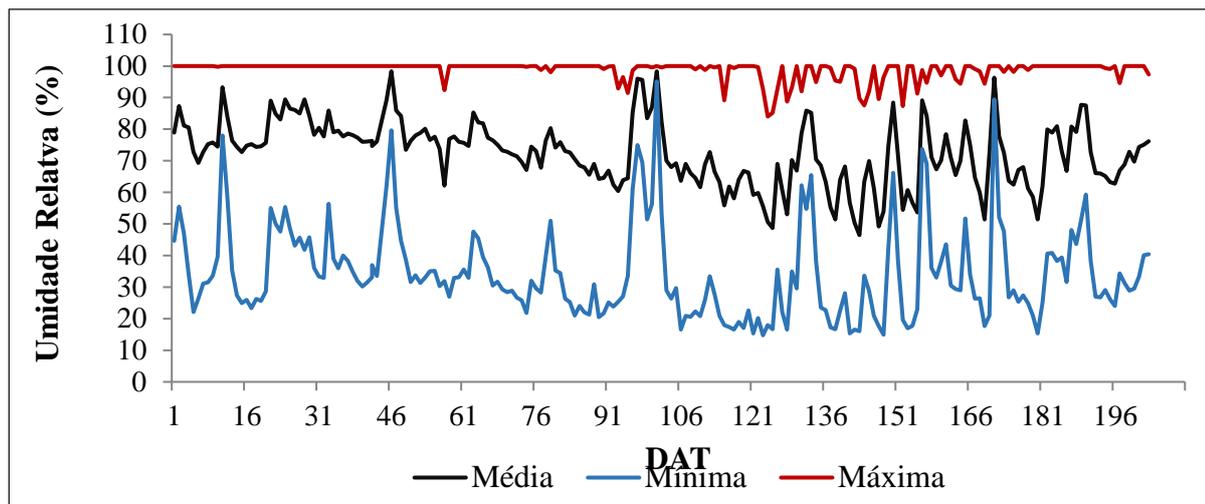


Figura 6. Umidade relativa do ar máxima, média e mínima na casa de vegetação durante o ensaio.

Neste período foi constatado um aumento do abortamento de flores em ambos os manejos de irrigação e abortamento dos frutos, que não havia sido constatado até então, frutos deformados e com queimaduras e aumento da incidência de oídio nas folhas, dentre outras pragas e doenças.

5.2. Altura de plantas

Analisando o comportamento da altura das plantas ao longo do experimento (Figura 7), nota-se que em ambos os manejos houve o mesmo padrão de crescimento, as plantas iniciaram seu desenvolvimento vegetativo de forma lenta, apresentando um crescimento médio de 18,7 cm no MIA e 19,1 cm no MM, dos 20 DAT aos 48 DAT, sendo este o período que antecede a frutificação. Nos 82 DAT, as plantas do MM apresentaram altura média maior que as plantas do MIA (67,8 e 59,4 cm, respectivamente). Após esse período, em ambos os manejos ocorreu uma leve estagnação do crescimento até os 126 DAT. Após os 126 DAT o crescimento foi retomado e no final, o MIA apresentou altura média superior ao MM (133,1 e 120,8 cm, respectivamente).

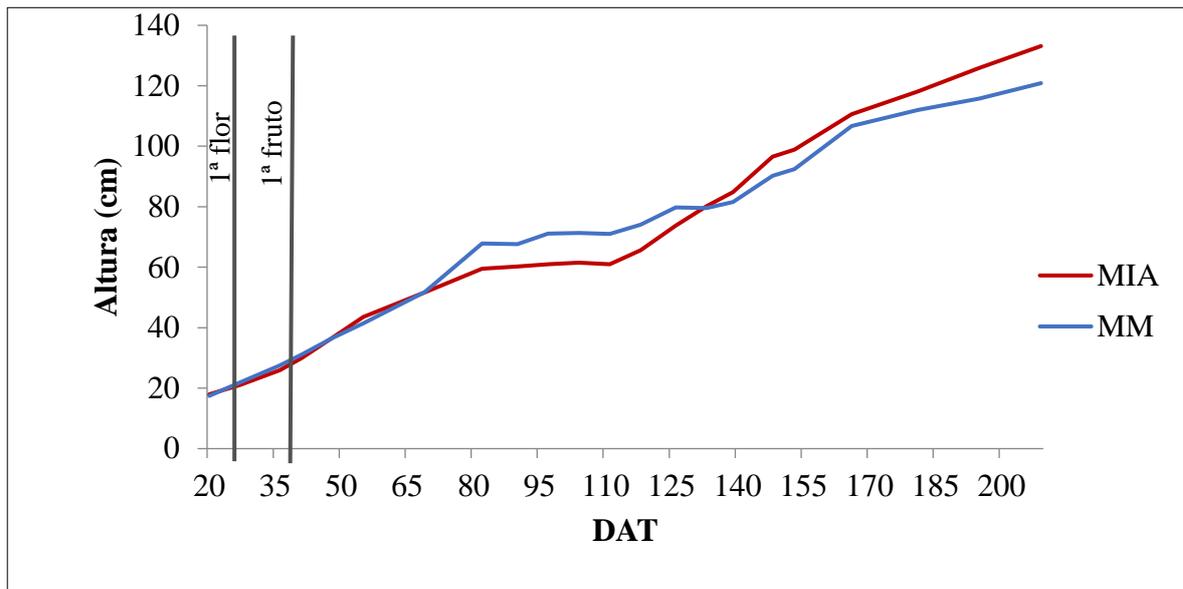


Figura 7. Altura das plantas de pimentão vermelho em dois tipos de manejo da irrigação.

O pimentão possui esta característica de crescimento inicial lento. Autores como Brandão Filho et. al. (2018), afirmam que o pimentão possui velocidade de crescimento inicial mais lenta que outras espécies hortícolas devido à baixa produção de área foliar. No entanto, a temperatura pode ter sido um fator que contribuiu para o baixo desenvolvimento vegetativo inicial. A cultura do pimentão tem seu máximo desenvolvimento em temperaturas de 18 a 23°C, e temperaturas inferiores ao valor mínimo podem diminuir ou até paralisar o crescimento das plantas (BRANDÃO FILHO et. al., 2018).

No final do ciclo houve um crescimento rápido das plantas nos dois manejos de irrigação após os 126 DAT, sendo que no MIA houve um crescimento de 59,4 cm e no MM, um crescimento de 41,1 cm. Nesse período a temperatura média de 25° C e a umidade relativa a 70% favoreceram o desenvolvimento das plantas em ambos os manejos.

5.3. Lâminas de irrigação

As lâminas totais aplicadas durante todo o experimento foram 357,7 mm no manejo manual (MM) e 402,6 mm no manejo via inteligência artificial (MIA), este maior valor no MIA se dá pela correção através do conteúdo de água no solo, que ocorreu no manejo automático e não ocorreu no manual, por isso houve uma diferença de 11,16 % ou 45,34 mm entre as lâminas aplicadas. Logo, não houve redução do consumo de água utilizando o sistema de inteligência artificial quando comparado ao manejo manual adotado (Figura 8).

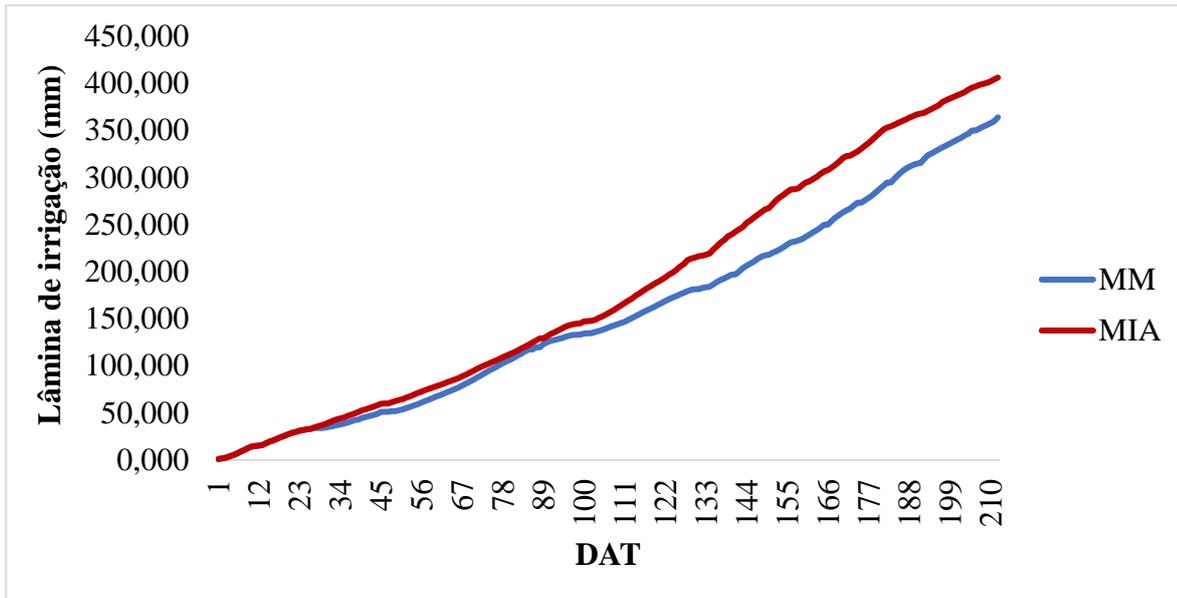


Figura 8. Lâmina de irrigação acumulada durante o ciclo de cultivo do pimentão.

Os valores das lâminas de irrigação se aproximaram dos utilizados na cultura do pimentão em alguns trabalhos realizados, como observado por Carvalho et al. (2011) com a aplicação de 428 mm sob 100% de reposição de água utilizando a cultivar Konan R, e por Santos et al. (2018), com 325 mm de demanda hídrica considerando 100% ETC sob o cultivo do híbrido Rubia.

Quando comparados os sistemas, as lâminas de irrigação obtidas neste trabalho coincidem com as encontradas por Lemos (2021) na cultura da rúcula, que também obtiveram lâminas de irrigação maiores no manejo automático do que o manejo manual. No entanto, para confirmar se há vantagem em maiores lâminas de irrigação é necessário utilizar critérios, como aumento de produção e produtividade.

Com o emprego de sistemas inteligentes pode-se associar mais de um método de manejo de irrigação, proporcionando maior precisão na lâmina de irrigação, assim como comprovado por Jimenez et al. (2020) empregando um sistema inteligente de irrigação que prevê e escolhe, entre os métodos de irrigação, o de melhor performance na cultura da cebola. Os autores relataram menores lâminas de irrigação quando comparado ao método de irrigação via solo e comparado ao método de 100% e 150% da ETC, além de garantir maior conservação de água também obtiveram melhores rendimentos.

5.4 Produção e produtividade

Pelas médias dos valores totais de produção considerando todas as colheitas, podemos observar que não houve diferenças estatísticas em nenhum dos componentes de produção, quando foi realizado o manejo manual ou manejo por inteligência artificial (Tabela 7).

Tabela 7. Número de frutos por planta (NFP), Massa dos frutos total (MFT), Massa dos frutos comercial (MFC), Massa dos frutos não comercial (MFNC) e produtividade (P) de pimentão vermelho Atlantis em dois manejos de irrigação.

Manejo da Irrigação	Variáveis Quantitativas				P (kg ha ⁻¹)
	NFP	MFT	MFC	MFNC	
	kg planta ⁻¹				
MIA	12,1a	2,10a	1,82a	0,273a	42.076a
MM	11,4a	1,87a	1,66a	0,203a	37.438a
CV%	26,77%	26,14%	31,29%	65%	26,14%

Médias seguidas de mesma letra não diferem entre si estatisticamente a 5% de probabilidade.

Foram obtidas produtividades de 42.076 kg ha⁻¹ no MIA e 37.440 kg ha⁻¹ no MM, dados similares a este trabalho foram encontrados por Coelho et al. (2013) com a cultivar Atlantis, em que encontraram valores máximos de 38.410,00 kg ha⁻¹ no sistema de plantio direto sem capina.

Outros autores encontraram dados de produtividades distintos, como Carvalho et al. (2016), que cultivaram pimentão vermelho cv. Konan R, obtiveram produtividade total máxima de 14.140,50 kg ha⁻¹ irrigadas sob a tensão de água no solo de 15 kPa, já Albuquerque et al. (2011) estimou máxima produtividade de 23.190,00 kg ha⁻¹ na lâmina ótima de 97,68% da ETc com pimentão híbrido Máximo F1 e Oliveira et al. (2016) estudando diferentes manejos de fertirrigação com a cultivar Atlantis e estimaram produtividade média de 16.300,00 kg ha⁻¹. As diferenças de produtividade encontradas nestes trabalhos podem ser devido a diferentes cultivares utilizadas, clima do local, cultivo em solo ou substrato, e ao número de colheitas realizadas.

Avaliando manejos de irrigação automatizados e manual por tensiometria, Queiroz et al. (2005) também não encontraram diferenças estatísticas na produtividade de grãos de feijão, o que comprova que manejo de automático de irrigação pode substituir o manejo manual sem comprometer a produção.

Neste estudo obteve-se, número médio de frutos por planta (NFP) de 12,1 no MIA e 11,4 no MM; trabalhando com a cultivar All Big e realizando cinco colheitas, Albuquerque (2011) obteve média de 6,5 frutos por planta sob lâminas de irrigação baseadas na ETo, enquanto também com cinco colheitas Carvalho et al. (2011) obtiveram média de 16,49 frutos por planta, trabalhando com diferentes níveis de reposição de água, e Lorenzoni (2016) que estudando níveis de adubação encontrou 16,3 frutos por planta no híbrido Magali R para uma dose de 147 kg ha⁻¹ de K, estes valores acima de 16 frutos por planta podem ter ocorrido devido ao cultivo nestes trabalhos terem iniciado no verão, com temperaturas do local acima de 18°C, proporcionando melhor desenvolvimento inicial das plantas com temperaturas favoráveis.

A quantidade de frutos por planta influencia no tamanho destes, menor número de frutos por plantas proporcionam frutos maiores e isto pode ser favorável, pois no mercado há a classificação dos frutos por tamanho sendo que frutos maiores pertencem a classes de maior valor. Quando os frutos são colhidos maduros a tendência é que haja menor número de frutos por planta, nesse caso, devido ao tempo que o fruto tem que ficar na planta (Brandão Filho et al., 2018).

Para MFT foram obtidos 2,10 kg.planta⁻¹ no MIA, sendo em média 1,82 kg planta⁻¹ de frutos comerciais e 0,273 kg.planta⁻¹ de frutos não comerciais, e para o MM temos 1,87 kg.planta⁻¹ de MFT, sendo 1,66 kg.planta⁻¹ de frutos comerciais e 0,203 kg.planta⁻¹ de frutos não comerciais, os valores estão abaixo dos encontrados por Freitas (2009) que obteve 3,2 kg.planta⁻¹ no espaçamento de 0,50 m entre plantas também com a cultivar Atlantis e por Silva (2020) que obteve produção por planta de 5,26 a 6,01 kg.planta⁻¹ estudando suplementação luminosa no pimentão vermelho cultivar Taurus.

Essas menores produções no experimento podem ter ocorrido devido ao cultivo ter iniciado no outono-inverno, com clima desfavorável ao desenvolvimento inicial das plantas, à incidência de pragas, as altas temperaturas e umidade relativa baixa que se deu ao decorrer do experimento quando a planta já estava em produção, o que afetou em baixo desenvolvimento dos frutos.

Apesar de não haver diferenças estatísticas, os parâmetros de produção foram maiores no MIA e, isto pode estar correlacionado com a maior lâmina de irrigação, uma vez que, de acordo com Lima et al. (2016) há melhor desenvolvimento dos frutos sob maior disponibilidade de água no solo.

5.5. Características qualitativas

Quanto as variáveis qualitativas, foi encontrada diferença estatística entre os manejos apenas para o °Brix (Tabela 8).

Tabela 8. Variáveis qualitativas na produção de pimentão vermelho Atlantis

Manejo da Irrigação	Variáveis Qualitativas			
	Largura dos frutos (cm)	Comprimento dos frutos (cm)	°Brix	pH
MIA	6,72a	11,48a	5,24b	4,92a
MM	6,39a	11,50a	5,66a	4,97a
CV%	11,24%	12,46%	11,93%	3,21%

Médias seguidas das mesmas letras não diferem estatisticamente entre si.

A média de comprimentos e largura de frutos foram de 11,48 cm no MIA e 11,50 cm no MM e a largura de 6,72 cm no MIA e 6,39 cm no MM, respectivamente. De acordo com a classificação do CEAGESP (2020), estes frutos estariam classificados como Extra A, com um preço intermediário entre as classes no mercado, vendido em atacado por R\$ 5,31 a 6,56 kg⁻¹ no ano de 2020. Ao comparar diferentes lâminas de irrigação em pimentão híbrido Rubia, Santos et al (2018) obteve comprimento máximo do fruto de 11,36 cm utilizando a lâmina de 100% da ETc, valor semelhante ao encontrado neste trabalho.

Para o °Brix obteve-se um valor de 5,66 no MM e 5,24 no MIA, o valor é próximo ao encontrado por Charlo et al. (2009) que obteve 5,85 °Brix com o pimentão amarelo Eppo cultivado em fibra da casca de coco e é superior ao encontrado por Oliveira et al. (2015) também com a cultivar Atlantis, que encontrou valor médio de 4,80 °Brix.

A concentração de sólidos solúveis totais (°Brix) foi maior no manejo com menor lâmina de água (MM), pois as plantas que recebem menor quantidade de água tendem a concentrar mais solutos em suas células por possuir um potencial osmótico maior (Damasceno et al., 2020), no entanto, os valores foram bem próximos aos observados no MIA.

O pH obtido foi de 4,92 no MIA e 4,97 no MM, os valores também são próximos ao encontrado por Queiroga (2019) ao estudar diferentes lâminas de irrigação obteve influência pela lâmina de irrigação aplicada com pH de 4,78 na lâmina de 75% ETo e 4,37 na lâmina de 120% da ETo, semelhante também ao encontrado por Factor (2008) que obteve pH na faixa de 4,95 a 5,04 estudando diferentes substratos e soluções nutritivas. Valores superiores foram

encontrados por Oliveira et al. (2015) com valores médios de pH 6,14 estudando a influência de diferentes manejos de fertirrigação e doses de nitrogênio e potássio utilizando a mesma cultivar Atlantis.

Assim podemos considerar que o teor de pH encontrado foi adequado, uma vez que segundo Cochran (1964) frutos vermelhos podem atingir pH de 5,02 e possuem mais acidez do que frutos colhidos verdes que atingem pH de 6,52.

5.6. Eficiência do uso da água e produtividade acumulada

Para os dados de eficiência do uso da água (EUA) encontramos valores maiores no manejo manual, a máxima EUA ocorreu na 7ª colheita com 10,03 kg m⁻³ no MM e na 12ª colheita com 8,96 kg m⁻³ no MIA, nas últimas colheitas a EUA dos dois manejos foram próximas (Tabela 9).

Os valores obtidos de EUA correspondem aos encontrados por Souza et al. (2011) em pimentão cultivar Magali-R com um máximo de 10,8 kg m⁻³ e 8,5 kg m⁻³ no cultivo em plantio direto e convencional, respectivamente, utilizando o manejo da irrigação por meio do balanço de água no solo; enquanto Coelho et al. (2013) encontraram EUA máxima de 11,96 kg m⁻³ em cultivo com plantio direto do híbrido Atlantis.

A produtividade acumulada variou entre os manejos durante as colheitas, em algumas o MM teve produtividade maior que MIA e em outras menor, porém a produtividade acumulada no final do experimento foi superior no MIA com um total de 36.065,66 kg ha⁻¹, enquanto no MM foi obtido 32.089,83 kg ha⁻¹. Os dados de produtividade acumulada total são similares aos também encontrados por Souza et al. (2011) que obteve 38.326,00 kg ha⁻¹ no plantio convencional e no plantio direto 34.077,00 kg ha⁻¹ com a cultivar Magali-R.

Tabela 9. Produtividade total acumulada (PA) e eficiência do uso da água (EUA) em 12 colheitas de cultivo do pimentão vermelho

Colheita	DAT	PA (kg ha ⁻¹)		EUA (Kg m ⁻³)	
		MIA	MM	MIA	MM
1	121	1900,57	2024,29	0,99	1,21
Continua...					
2	127	3169,58	3675,74	1,52	2,07
3	133	5396,53	5780,93	2,47	3,15
4	140	13345,51	12519,86	5,57	6,35
5	147	17487,23	17614,42	6,71	8,24
6	154	20080,79	21254,86	7,13	9,39
7	163	22036,97	24469,48	7,31	10,03
8	170	22461,30	25002,50	7,00	9,53
9	177	23126,58	25327,86	6,86	9,11
10	189	27083,71	25926,17	7,40	8,29
11	201	33651,72	28601,74	8,67	8,42
12	210	36065,55	32089,83	8,96	8,98

Analisando a diferença de manejos de irrigação manual e automático na cultura da rúcula, Rolim (2021) também obteve resultados de produção superiores no manejo de irrigação via sistema automático, neste estudo o manejo manual via clima obteve menor resultado em área foliar. A precisão dos sistemas automáticos e sistemas inteligentes permite que a água esteja disponível em teor adequado no momento de maior necessidade favorecendo o desenvolvimento das culturas.

Apesar de um maior consumo de água, a produtividade acumulada no MIA foi superior ao do MM, isto pode ser atribuído que a lâmina de irrigação maior atenderia a demanda hídrica da planta ocasionando em maiores produções assim como constatado por Lima et al. (2012), que estudando diferentes lâminas de irrigação obteve produção máxima de pimentão Konan R utilizando a maior lâmina de irrigação de 1,25 ET.

5.7. Análise econômica

As Tabelas 10, 11, 12 e 13 apresentam os valores obtidos dos custos de irrigação nos devidos cenários de manejo da irrigação, para o tipo de motor a diesel e para o motor elétrico em cada subgrupo tarifário.

Tabela 10. Custos totais no manejo de irrigação com ETo via estação meteorológica padrão e operação manual

Cenário 1	Motor elétrico			Diesel	
	A3a rural verde	A3a rural azul	A3a rural convencional	B2 rural	
Custos fixos anuais (R\$ ha ⁻¹)					
Estação meteorológica	144,92	144,92	144,92	144,92	144,92
Irrigação	1895,80	1895,80	1895,80	1895,80	1895,80
Custos variáveis anuais (R\$ ha ⁻¹)					
Manutenção	2644,98	2644,98	2644,98	2644,98	2644,98
Energia	159,92	159,92	384,99	49,12	214,42
Água	91,13	91,13	91,13	91,13	91,13
Mão de obra	4880,47	4880,47	4880,47	4880,47	4880,47
Custo total anual (R\$ ha ⁻¹)					
	9817,22	9817,22	10042,29	9706,42	9871,72

Tabela 11. Custos totais de manejo de irrigação com ETo via estação meteorológica comercial e operação manual

Cenário 2	Motor elétrico			Diesel	
	A3a rural verde	A3a rural azul	A3a rural convencional	B2 rural	
Custos fixos anuais (R\$ ha ⁻¹)					
Estação meteorológica	67,68	67,68	67,68	67,68	67,68
Irrigação	1895,80	1895,80	1895,80	1895,80	1895,80
Custos variáveis anuais (R\$ ha ⁻¹)					
Manutenção	1401,90	1401,90	1401,90	1401,90	1401,90
Energia	159,92	159,92	384,99	49,12	214,42
Água	91,13	91,13	91,13	91,13	91,13
Mão de obra	4880,47	4880,47	4880,47	4880,47	4880,47
Custo total anual (R\$ ha ⁻¹)					
	8496,90	8496,90	8721,97	8386,10	8551,40

Tabela 12. Custos totais de manejo de irrigação com cálculo automático de ETo com dados de estação meteorológica comercial e operação manual

Cenário 3	Motor elétrico			Diesel	
	A3a rural verde	A3a rural azul	A3a rural convencional	B2 rural	
Custos fixos anuais (R\$ ha ⁻¹)					
Estação meteorológica	67,68	67,68	67,68	67,68	67,68
Irrigação	1895,80	1895,80	1895,80	1895,80	1895,80
Custos variáveis anuais (R\$ ha ⁻¹)					
Manutenção	1401,90	1401,90	1401,90	1401,90	1401,90
Energia	159,92	159,92	384,99	49,12	214,42
Água	91,13	91,13	91,13	91,13	91,13
Mão de obra	3697,07	3697,07	3697,07	3697,07	3697,07
Custo total anual (R\$ ha ⁻¹)					
	7313,51	7313,51	7538,11	7202,71	7368,01

Tabela 13. Custos totais de manejo de irrigação com ETo via microestação meteorológica e operação via inteligência artificial

Cenário 4	Motor elétrico			Diesel	
	A3a rural verde	A3a rural azul	A3a rural convencional	B2 rural	
Custos fixos anuais (R\$ ha ⁻¹)					
Estação meteorológica	21,46	21,46	21,46	21,46	21,46
Irrigação	1895,80	1895,80	1895,80	1895,80	1895,80
Custos variáveis anuais (R\$ ha ⁻¹)					
Manutenção	734,81	734,81	734,81	734,81	734,81
Energia	163,18	163,18	388,61	55,16	241,56
Água	102,67	102,67	102,67	102,67	102,67
Mão de obra	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Custo total anual (R\$ ha ⁻¹)					
	2917,92	2917,92	3143,36	2809,91	2996,30

Analisando os custos em cada cenário, temos que o cenário 4 foi o que obteve menor custo total anual do sistema de irrigação e de manejo da irrigação independentemente do tipo de motor ou tarifa de energia elétrica utilizada, com o menor custo de R\$ 2.809,91 ha⁻¹ ano⁻¹ na modalidade tarifária grupo B rural (Tabela 13).

O maior custo anual foi obtido no cenário 1 com R\$ 10.042,29 ha⁻¹ ano⁻¹ na modalidade tarifária de energia elétrica convencional (Tabela 10), como já era esperado devido ao alto valor de aquisição da estação meteorológica Campbell. Valores intermediários de custo foram obtidos no cenário 2 com média de R\$ 8530,65 ha⁻¹ ano⁻¹ e média de R\$ 7347,17 ha⁻¹ ano⁻¹ no cenário 3 (Tabelas 11 e 12), utilizando uma estação vendida no mercado brasileiro para a agricultura, mas ainda assim com um valor superior ao cenário 4.

Dentre os custos fixos, o custo fixo anual do sistema de irrigação R\$ 1895,80 ha, sendo o mesmo em todos os cenários, pois o sistema de irrigação utilizado é o mesmo e independe da estação meteorológica e tipo de manejo adotado.

Já o custo fixo anual das estações meteorológicas, o custo mais alto seria do cenário 1 utilizando a estação Campbell com R\$ 144,92 ha⁻¹ ano⁻¹, seguido do cenário 2 e 3 com custo de R\$ 67,68 ha⁻¹ ano⁻¹ e a de menor valor, a estação do cenário 4, com custo de apenas R\$ 21,46 ha⁻¹ ano⁻¹.

A redução do custo de uma estação meteorológica com dados confiáveis permite que mais produtores rurais as adquiram, principalmente em produtores que utilizam casas de vegetação, já que o ideal seria instalar uma estação meteorológica por casa de vegetação devido ao microclima que é criado, e assim propiciar a adoção de manejos de irrigação mais eficientes com redução de custos operacionais e maior rentabilidade (FINHOLDT, 2008).

Na composição dos custos variáveis, os custos de energia, água foram os mesmo para o cenário 1, 2 e 3, pois a lâmina de irrigação utilizada foi a obtida por cálculos do MM, como a lâmina no MIA foi maior os custos de energia e água foram ligeiramente maiores que nos outros cenários.

Nos custos com energia, o mais custoso em todos os cenários seria optar pelo motor elétrico na tarifa convencional, seguido do motor diesel, tarifa verde, tarifa azul e grupo B rural (Figura 9). Os resultados estão de acordo com outros autores que constataram que a tarifa convencional possui maior custo que as tarifas azul e verde (ALEMAN & MARQUES, 2016; TURCO; RIZATTI; PAVANI, 2009).

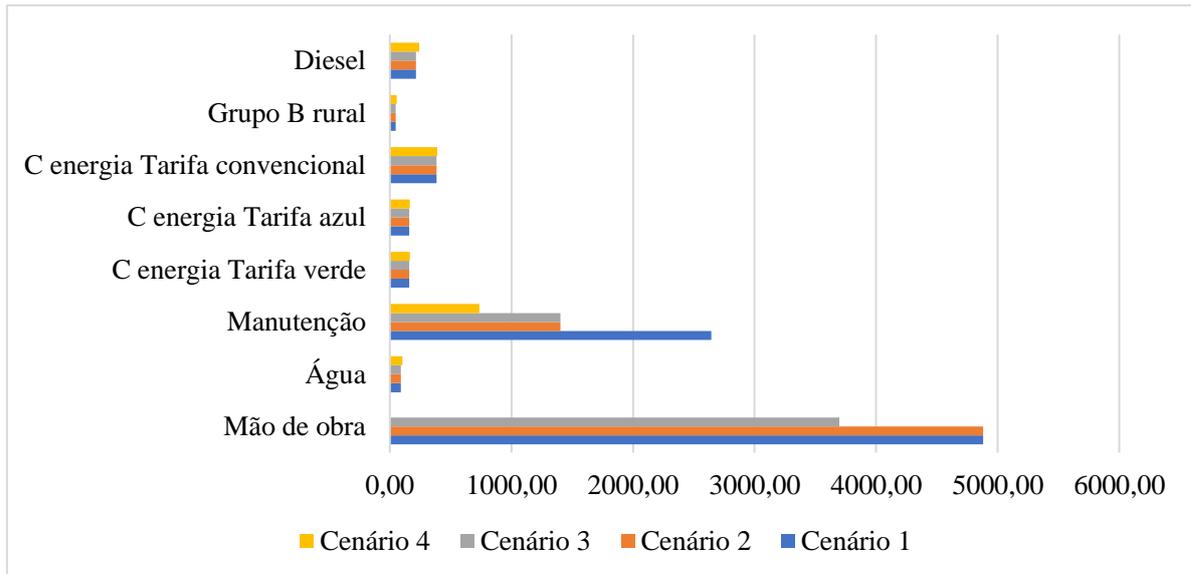


Figura 9. Custos variáveis anuais em diferentes cenários

Os custos de mão de obra são os maiores dentre os custos variáveis (Figura 9), estes custos diminuem conforme é adotado sistemas automatizados, como no cenário 3 que apesar de ser necessário pagar um plano anual para o serviço de cálculo de manejo da irrigação, ainda assim tem menor que outros cenários, e quando temos o cenário 4 que todo o manejo e inclusive o acionamento do sistema de irrigação é realizado automaticamente, esse custo de mão de obra se iguala a zero.

O custo de manutenção no cenário 1 é superior aos outros cenários já que depende do custo de aquisição da estação meteorológica, a estação meteorológica da Campbell por ter custo de aquisição maior implica em maiores custo de manutenção. No cenário 4, o custo de manutenção da estação meteorológica possui um valor fixo pelo fabricante, para as manutenções elétricas e computacionais necessárias, como não depende do preço de aquisição do sistema o custo de manutenção resultante é inferior.

Quanto a participação dos custos dentro do custo total da irrigação há pouca diferença na participação dos custos quando o motor é elétrico (Tabelas 14, 15 e 16) e de combustão a diesel, tendo o custo de bombeamento maior participação quando é utilizado motor elétrico na tarifa convencional. Nota-se que a mão de obra compõe a maior parte dos custos anuais nos cenários 1, 2 e 3, na segunda posição temos o custo de manutenção no cenário 1, no cenário 2 e 3 os custos de manutenção ocupam a terceira posição seguido do custo fixo de irrigação. Realizando uma análise financeira para a cana-de-açúcar, Campos (2019) obteve 30% dos custos totais de irrigação com mão de obra, sendo o segundo mais significativo posterior aos custos com energia elétrica.

No cenário 4, com o sistema autônomo é possível eliminar o custo da mão de obra, assim o custo de maior participação neste cenário seria o custo fixo do sistema de irrigação, essa redução na mão de obra acarreta redução aproximada de 30% nos custos variáveis ou custos operacionais. Dentre estes custos variáveis, a manutenção do sistema passaria a ter maior participação dos custos, mesmo assim com um valor mais baixo comparado aos outros sistemas.

Tabela 14. Participação do custo total de cada cenário de manejo de irrigação utilizando motor elétrico tarifa verde e azul

	Participação no custo total (%)			
	Cenário 1	Cenário 2	Cenário 3	Cenário 4
Custos fixos	20,79	23,11	26,85	65,71
Estação Meteorológica	1,48	0,80	0,93	0,74
Irrigação	19,31	22,31	25,92	64,97
Custos variáveis	79,21	76,89	73,15	34,29
Mão de obra	49,71	57,44	50,55	0,00
Água	0,93	1,07	1,25	3,52
Manutenção	26,94	16,50	19,17	25,18
Bombeamento	1,63	1,88	2,19	5,59

Tabela 15. Participação do custo total de cada cenário de manejo de irrigação utilizando motor elétrico tarifa convencional

	Participação dos custos sobre o custo total (%)			
	Cenário 1	Cenário 2	Cenário 3	Cenário 4
Custos fixos	20,32	22,51	26,05	60,99
Estação Meteorológica	1,44	0,78	0,90	0,68
Irrigação	18,88	21,74	25,15	60,31
Custos variáveis	79,68	77,49	73,95	39,01
Mão de obra	48,60	55,96	49,05	0,00
Água	0,91	1,04	1,21	3,27
Manutenção	26,34	16,07	18,60	23,38
Bombeamento	3,83	4,41	5,10	12,36

Tabela 16. Participação do custo total de de cada cenário de manejo de irrigação utilizando motor elétrico grupo B rural

	Participação dos custos sobre o custo total (%)			
	Cenário 1	Cenário 2	Cenário 3	Cenário 4
Custos fixos	21,02	23,41	27,26	68,23
Estação Meteorológica	1,49	0,81	0,94	0,76
Irrigação	19,53	22,61	26,32	67,47
Custos variáveis	78,98	76,59	72,74	31,77
Mão de obra	50,28	58,20	51,33	0,00
Água	0,94	1,09	1,27	3,65
Manutenção	27,25	16,72	19,46	26,15
Bombeamento	0,51	0,59	0,68	1,96

Tabela 17. Participação do custo total de irrigação de cada cenário de manejo de irrigação utilizando motor diesel

	Participação dos custos sobre o custo total (%)			
	Cenário 1	Cenário 2	Cenário 3	Cenário 4
Custos fixos	20,67	22,96	26,65	63,99
Estação Meteorológica	1,47	0,79	0,92	0,72
Irrigação	19,20	22,17	25,73	63,27
Custos variáveis	79,33	77,04	73,35	36,01
Mão de obra	49,44	57,07	50,18	0,00
Água	0,92	1,07	1,24	3,43
Manutenção	26,79	16,39	19,03	24,52
Bombeamento	2,17	2,51	2,91	8,06

6. CONCLUSÕES

O manejo de irrigação via inteligência artificial utilizando a MEM não apresentou diferenças nas variáveis de produção (MFT, MFC, MFNC, NF e P) e nas variáveis de qualidade do fruto (pH, Brix, comprimento e largura) quando comparado ao manejo de irrigação via manual, demonstrando atender as necessidades hídricas da cultura do Pimentão vermelho cultivar Atlantis.

A utilização de manejo de irrigação via inteligência artificial permite a associação de mais de um método de manejo de irrigação permitindo assim obter lâminas de irrigação mais precisas.

O cenário de manejo de irrigação via inteligência artificial utilizando a MEM apresentou menor custo total anual quando comparado à cenários de manejo da irrigação com operação manual e utilizando outras estações meteorológicas disponíveis no mercado, reduzindo um dos fatores de maior custo no manejo que é o custo de mão de obra, sendo assim uma opção economicamente acessível para os produtores rurais.

REFERÊNCIAS

AGRIANUAL. Anuário da Agricultura Brasileira. São Paulo: Instituto FNP. 502 p. 2016.

ALBUQUERQUE, F. DA S.; SILVA, Ê. F. DE F. E; FILHO, J. A. C. DE A.; NUNES, M. F. F. N. Crescimento e Rendimento de Pimentão Fertigado Sob Diferentes Lâminas de Irrigação e Doses de Potássio. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, v. 15, n. 81, p. 686–694, 2011.

ALEMAN, C. C.; MARQUES, P. A. A. Manejo e Viabilidade Econômica da Irrigação no Cultivo de *Calendula Officinalis* L. *Irriga & INOVAGRI*, v. 1, p. 29–37, 2016.

ALEMAN, C. C.; MARQUES, P. A. A. Soil irrigation management: the effect on production and water productivity in the marigold. *Revista Ciencia Agronomica*, v. 52, n. 1, p. 6, 2021.

ALLEN, R. G.; PEREIRA, L. S.; RAES, D.; SMITH, MA. Crop Evapotranspiration. *Applied Ocean Research*, v. 56, n. 3, p. 281, 1998.

ANA, A. N. DE Á. Atlas Irrigação. Uso da água na agricultura irrigada. 2 ed. 2021.

ANEEL, A. N. DE E. E. Cálculo das Tarifas de Uso do Sistema de Distribuição. , 2018.

ANEEL, A. N. DE E. E. Direitos e Deveres do Consumidos de Energia Elétrica - Resolução no. 414/2010, Condições Gerais de Fornecimento de Energia Elétrica. , 2012.

ASSIS, M.; NOGUEIRA, H.; RAMOS, R.; et al. Agricultura 4.0: O mundo digital revoluciona o campo. *Marli Assis Herika Nogueira*, v. 20, p. 110, 2018.

BASSOI, L. H.; INAMASU, R. Y.; BERNARDI, A. C. DE C.; et al. Agricultura de Precisão e Agricultura Digital. *Revista Digital de Tecnologias Cognitivas*, , n. 20, p. 17–36, 2019.

BRANDÃO FILHO, J. U. T.; FREITAS, P. S. .; BERIAN, L. O. .; GOTO, R. Hortaliças-Fruto. Maringá, 2018.

CAMPOS, F. H. Ferramenta de Avaliação Financeira para Sistemas de Irrigação: Estudos de Caso para Cana-de-Açúcar e Consórcio Soja-Milho, 2019. Universidade de São Paulo Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”.

CANATA, T. F. Sistema de Mensuração Baseado em Tecnologia LiDAR para a Estimativa de Parâmetros de Produção de Cana-de-Açúcar, 2017.

CARVALHO, J. DE A.; REZENDE, F. C.; AQUINO, R. F.; FREITAS, W. A. DE; OLIVEIRA, E. C. Análise Produtiva e Econômica do Pimentão-Vermelho Irrigado com Diferentes Lâminas, Cultivado em Ambiente Protegido. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, v. 15, n. 6, p. 569–574, 2011.

CARVALHO, J. DE A.; REZENDE, F. C.; OLIVEIRA, E. C.; AQUINO, R. F. Pimentão Cultivado em Ambiente Protegido Sob Diferentes Tensões de Água no Solo. *Engenharia na Agricultura*, v. 23, n. 3, p. 236–245, 2016.

CAVALCANTI, A. J. F. N.; CORREIA, F. P.; BRITO, J. A. Validação de Uma Rede de Sensores Sem Fio Aplicada à Fruticultura Irrigada do Vale do São Francisco. *Brazilian Applied Science Review*, v. 4, n. 5, p. 2763–2780, 2020.

CEAGESP. Guia de Identificação. Disponível em: <<https://ceagesp.gov.br/hortiescolha/hortipedia/pimentao/>>. Acesso em: 21/5/2022.

CHARLO, H. C. DE O.; CASTOLDI, R.; FERNANDES, C.; VARGAS, P. F.; BRAZ, L. T. Cultivo de Híbridos de Pimentão Amarelo em Fibra da Casca de Coco. *Horticultura Brasileira*, v. 27, n. 2, p. 155–159, 2009.

CNT, C. N. DO T. Preço do diesel começou 2020 em queda, mas termina ano com tendência de elevação. Disponível em: <<https://cnt.org.br/agencia-cnt/diesel-comecou-2020-queda-termina-ano-elevacao>>. Acesso em: 21/5/2022.

COCHRAN, H. L. Changes in pH of the pimiento during maturation. *Proceedings of the American Society for Horticultural Science*, v.84, p. 70-2, 1964

COELHO, M E H; FREITAS, F. C. L.; CUNHA, J. L. X. L.; et al. Coberturas do Solo Sobre a Amplitude Térmica e a Produtividade de Pimentão. *Planta Daninha*, v. 31, n. 2, p. 369–378, 2013.

COELHO, MARIA ELIANI HOLANDA; FREITAS, F. C. L. DE; CUNHA, J. L. X. L.; MEDEIROS, J. F. DE; SILVA, M. G. O. DA. Production and efficiency of water usage in capsicum crops under no-tillage and conventional planting systems. *Revista Ciencia Agronomica*, v. 44, n. 4, p. 741–749, 2013.

COSTA, B. F. D. DA. Domínio do Tempo (TDR) para determinação do conteúdo de água em solos tropicais do Distrito Federal, 2017. Universidade de Brasília.

COSTA, C.; OLIVEIRA, L.; MÓTA, L. M. S. Internet das Coisas (IOT): Um Estudo Exploratório em Agronegócios Internet of Things (IOT): Na Exploratory Study in Agribusiness. VI Simpósio da Ciência do Agronegócio, 2018. Disponível em: <<https://www.ufrgs.br/cienagro/wp-content/uploads/2018/10/Internet-das-coisas-IOT-um-estudo-exploratorio-em-agronegocios.docx-Cainã-Lima-Costa.pdf>>. .

CPFL. CPFL Empresas|Portal Corporativo para Clientes. Disponível em: <<https://www.cpflempresas.com.br/ValidaUsuario.aspx?ReturnUrl=%2FInstitucional%2Ftarifas.aspx%3Femp%3DCPFL%253E%2520Acesso%2520em%252020%2520jun%25202020a&emp=CPFL%3E>>. Acesso em: 21/5/2022a.

CPFL. CPFL Energia - Serviços OnLine. Disponível em: <<https://servicosonline.cpf.com.br/agencia-webapp/#/taxas-tarifas>>. Acesso em: 21/5/2022b.

CRUZ, T. A. C. DA. Desenvolvimento de Uma Rede Sem Fio de Micro Estações Meteorológicas para o Manejo de Irrigação, 2018. Universidade de São Paulo Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”.

DAMASCENO, F. A.; SILVA, D. S.; COSTA, K. C. DA; et al. Índice SPAD E Grau BRIX da Cultura do Rabanete Sob Lâminas de Água e Doses de Adubação Nitrogeada. *Ciência Agrícola*, v. 18, n. 3, p. 13–17, 2020.

DOORENBOS, J.; KASSAM, A. . Efeito da Água no Rendimento das Culturas. *Estudos FAO: Irrigação e Drenagem*. p.306, 1994. Campina Grande.

DORNELLES, E. F.; KRAISIG, A. R.; SILVA, J. A. G.; et al. Artificial Intelligence in Seeding Density Optimization and Yield Simulation for Oat | Inteligência Artificial na Otimização da Densidade de Semeadura e Simulação da Produtividade da Aveia. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, v. 22, n. 3, p. 183–188, 2018.

ELEKTRO. Diferença entre tarifa TE e tarifa TUSD. Disponível em: <<https://www.neoenergiaelektro.com.br/sua-casa/diferenca-entre-tarifa-te-e-tarifa-tusd>>. Acesso em: 21/5/2022.

FACTOR, T. L.; ARAÚJO, J. A. C. DE; VILELLA JÚNIOR, L. V. E. Produção de Pimentão em Substratos e Fertirrigação com Efluente de Biodigestor. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, v. 12, n. 2, p. 143–149, 2008.

FAO, O. DAS N. U. PARA A A. E A A. Agricultura Irrigada Sustentável no Brasil: Identificação de Áreas Prioritárias. 2017.

FILGUEIRA, F. A. R. Novo Manual de Olericultura: Agrotecnologia Moderna na Produção e Comercialização de Hortaliças. 3o ed. Viçosa, 2013.

FINHOLDT, G. Desenvolvimento e Avaliação de uma Estação Meteorológica Automática para Manejo de Irrigação. *Orton.Catie.Ac.Cr*, 2008. Disponível em: <<http://orton.catie.ac.cr/reprodoc/A2242E/A2242E.PDF>>. .

FLECK, L.; TAVARES, M. H. F.; EYNG, E.; HELMANN, A. C.; ANDRADE, M. A. DE M. Redes Neurais Artificiais: Princípios Básicos. *Revista Eletrônica Científica Inovação e Tecnologia*, v. 1, n. 13, p. 47–56, 2016.

FREITAS, F. T. O. de. Critérios para o Manejo da Irrigação Via Solo no Cultivo de Maracujazeiro, 2019. UNIVERSIDADE FEDERAL DO RECÔNCAVO BAIANO.

GARCÍA, L.; PARRA, L.; JIMENEZ, J. M.; LLORET, J.; LORENZ, P. IoT-Based Smart Irrigation Systems: An Overview on the Recent Trends on Sensors and IoT Systems for Irrigation in Precision Agriculture. *Sensors (Switzerland)*, v. 20, n. 4, p. 48, 2020.

GOMES, E. P.; TESTEZLAF, R. DESEMPENHO DA IRRIGAÇÃO POR SULCOS NA TOMATICULTURA-DE-MESA DA REGIÃO DE CAMPINAS-SP. *Irriga*, v. 14, n. 3, p. 289–298, 2009.

ICID, I. C. ON I. AND D. World Irrigated Área. *ICID*, , n. Icid, p. 6, 2018. Disponível em: <<https://www.icid.org/world-irrigated-area.pdf>>. .

IEA, I. DE E. A. IEA - Instituto de Economia Agrícola. Disponível em: <<http://www.iea.agricultura.sp.gov.br/out/index.php>>. Acesso em: 15/5/2022.

INCROCCI, L.; THOMPSON, R. B.; FERNANDEZ-FERNANDEZ, M. D.; et al. Irrigation management of European greenhouse vegetable crops. *Agricultural Water Management*, v. 242, n. July, 2020. Elsevier. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.agwat.2020.106393>>.

JHA, K.; DOSHI, A.; PATEL, P.; SHAH, M. A Comprehensive Review on Automation in Agriculture Using Artificial Intelligence. *Artificial Intelligence in Agriculture*, v. 2, p. 1–12, 2019. Elsevier B.V. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.aiaa.2019.05.004>>.

JIMENEZ, A. F.; CARDENAS, P. F.; JIMENEZ, F.; RUIZ-CANALES, A.; LÓPEZ, A. A cyber-physical intelligent agent for irrigation scheduling in horticultural crops. *Computers and Electronics in Agriculture*, v. 178, n. July, p. 105777, 2020. Elsevier.

KAMIENSKI, C.; VISOLI, M. C. Swamp: Uma Plataforma para Irrigação de Precisão Baseada na Internet das Coisas. *Fonte*, v. 15, n. 20, p. 76–84, 2018. Disponível em: <<https://www.embrapa.br/busca-de-publicacoes/-/publicacao/1105001/swamp-uma-plataforma-para-irrigacao-de-precisao-baseada-na-internet-das-coisas>>.

KOTTEK, M.; GRIESER, J.; BECK, C.; RUDOLF, B.; RUBEL, F. World Map of the Köppen-Geiger Climate Classification Updated. *Meteorologische Zeitschrift*, v. 15, n. 3, p. 259–263, 2006.

KUBICEK, P.; KOZEL, J.; STAMPACH, R.; LUKAS, V. Prototyping the visualization of geographic and sensor data for agriculture. *Computers and Electronics in Agriculture*, v. 97, p. 83–91, 2013. Elsevier B.V. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.compag.2013.07.007>>.

LEITE, C. V.; JÚNIOR, J. A.; VICENTE, M. R.; EVANGELISTA, A. W. P.; CASAROLI, D. Jornada Diária De Trabalho Como Critério De Dimensionamento Econômico Para Sistemas De Irrigação Por Pivô Central. *Revista Engenharia Na Agricultura - Reveng*, v. 26, n. 6, p. 526–540, 2018.

LEMOS, J. G. DE A. Análise Econômica de Unidade Semiautomática para Irrigação Irrigação de Baixo Custo Controlada Via Aplicativo para Produção de Rúcula, 2021. Universidade Federal do Ceará.

LIMA, E. M. C.; MARTIOLLI, W.; THEBALDI, M. S.; REZENDE, F. C.; FARIA, M. A. DE. Produção de Pimentão Cultivado em Ambiente Protegido e Submetido a Diferentes Lâminas de Irrigação. *Revista Agrotecnologia*, v. 3, n. 1, p. 40–56, 2012.

LIMA, G. S.; BROETTO, F.; SOUSA, A. D. P.; CORREIA, J. D. S.; SILVA, A. O. Impactos Nutricionais e Produção de Pimentão Submetido à Deficiência Hídrica. *Irriga*, v. 21, n. 4, p. 724–735, 2016.

LOPES, A. S.; PAVANI, L. C.; CORÁ, J. E.; ZANINI, J. R.; MIRANDA, H. A. Manejo da Irrigação (Tensiometria e Balanço Hídrico Climatológico) para a Cultura do Feijoeiro em Sistemas de Cultivo Direto e Convencional. *Engenharia Agrícola*, v. 24, n. 1, p. 89–100, 2004.

LORENZONI, M. Z.; REZENDE, R.; SOUZA, Á. H. C. DE; et al. Response of Bell Pepper Crop Fertigated with Nitrogen and Potassium Doses in Protected Environment. *Agrotechnology*, v. 05, n. 02, p. 5, 2016.

MARQUELLI, W. A.; SILVA, W. L. C. Seleção de Sistemas de Irrigação para Hortaliças. Embrapa, v. 2, p. 22, 2011. Disponível em: <<https://www.embrapa.br/busca-de-publicacoes/-/publicacao/916702/selecao-de-sistemas-de-irrigacao-para-hortalicas>>. .

MARQUES, P. A. A.; FRIZZONE, J. A. Modelo Computacional para Determinação do Risco Econômico em Culturas Irrigadas. *Acta Scientiarum. Agronomy*, v. 27, n. 4, p. 719–727, 2005.

MARTINS, J. D.; PETRY, M. T.; RODRIGUES, G. C.; CARLESSO, R. Viabilidade Econômica da Irrigação em Milho Irrigado por Gotejamento. *Irriga*, p. 150–165, 2016.

MORETTI, C. L. Manual de Processamento Mínimo de Frutas e Hortaliças. 2007.

NAM, W. H.; KIM, T.; HONG, E. M.; CHOI, J. Y.; KIM, J. T. A Wireless Sensor Network (WSN) application for irrigation facilities management based on Information and Communication Technologies (ICTs). *Computers and Electronics in Agriculture*, v. 143, n. November, p. 185–192, 2017. Elsevier.

OLIVEIRA, A. D. DE; CARVALHO, D. F. DE; PEREIRA, J. B. A.; PEREIRA, V. D. C. Crescimento e Produtividade do Pimentão em dois Sistemas de Cultivo. *Revista Caatinga*, v. 28, n. 1, p. 78–89, 2015.

OLIVEIRA, F. DE A. DE; DUARTE, S. N.; MEDEIROS, J. F. DE; et al. Eficiência da Fertirrigação Nitrogenada e Potássica na Produção de Pimentão Cultivado em Ambiente Protegido. *Amazonian Journal of Agricultural and Environmental Sciences*, v. 59, n. 3, p. 293–301, 2016.

PADRÓN, R. A. R. Manejo da Irrigação e Eficiência do Uso da Água no Cultivo do Pimentão Com e Sem Sombreamento, 2016. UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA MARIA.

PEREIRA, M. E. M.; JUNIOR, J. A. DE L.; LIMA, V. M.; et al. Viabilidade Econômica da Produção de Couve-flor irrigada por Gotejamento no Nordeste Paraense. *Amazonian Journal*, v. 61, p. 1–8, 2018.

PIMENTA, S.; MENEZES, D.; NEDER, D. G.; et al. Adaptability and Stability of Pepper Hybrids Under Conventional and Organic Production System. *Horticultura Brasileira*, v. 34, n. 2, p. 168–174, 2016.

PIZANI, M. A. M. Manejo da Irrigação e Produtividade da Água na Cultura da Carqueja (*Baccharis crispa* Spreng.), 2017. Universidade de São Paulo Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”.

QUEIROGA, T. B. DE. Fisiologia do Cultivo e da Qualidade de Pimentão Vermelho Submetido a Lâminas de Irrigação e Adubações, 2019. UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE.

QUEIROZ, T. M. DE; CARVALHO, J. DE A.; RABELO, G. F.; ANDRADE, M. J. B. Avaliação de Sistema Alternativo de Automação da Irrigação do Feijoeiro em Casa de Vegetação. *Engenharia Agrícola*, v. 25, n. 3, p. 632–641, 2005.

RADIN, B.; MATZENAUER, R. Uso das Informações Meteorológicas na Agricultura do Rio Grande do Sul. *Agrometeoros*, v. 24, n. 1, p. 41–54, 2016.

ROLIM, T. W. R. Unidade Anatômica de Manejo da Irrigação de Baixo Custo Controlado Via Aplicativo para Cultivos em Ambientes Protegidos Paper Knowledge . Toward a Media History of Documents, 2021. Universidade Federal do Ceará.

SALÁRIO. Técnico Agrícola: Salário, piso salarial, o que faz. Disponível em: <<https://www.salario.com.br/profissao/tecnico-agricola-cbo-321105/>>. Acesso em: 21/5/2022.

SANTOS, E. S. DOS; SILVA, Ê. F. DE F.; MONTENEGRO, A. A. DE A.; et al. Produtividades do Pimentão Sob Diferentes Lâminas de Irrigação e Doses de Potássio em Região Semiárida. *Irriga*, v. 23, n. 3, p. 518–534, 2018.

SAVITHA, M. C. A.; SCHOLAR, M. P. Smart Crop Field Irrigation in IoT Architecture Using Sensors. , v. 9, n. 1, p. 302–306, 2018.

SCHOENGOLD, K.; ZILBERMAN, D. Water and Development: The Importance of Irrigation in Developing Countries. Presentation, Berkeley.[Online] Available at http://are.berkeley.edu/courses/ARE253/2004/handouts/Bretton_Woods.pdf (accessed 19 October 2010), n. September, 2004. Disponível em: <http://are.berkeley.edu/courses/ARE253/2004/handouts/Bretton_Woods.pdf>.

SENAR. Irrigação: Gestão de Água e Energia Elétrica. Serviço Na ed. Brasília, 2019.

SHEKHAR, Y.; DAGUR, E.; MISHRA, S.; et al. Intelligent IoT Based Automated Irrigation System. *International Journal of Applied Engineering Research*, v. 12, n. 18, p. 7306–7320, 2017.

SILVA, A. O. DA; SILVA, B. A. DA; SOUZA, C. F.; et al. Irrigation in The Age of Agriculture 4.0: Management, Monitoring and Precision. *Revista Ciencia Agronomica*, v. 51, n. 5, p. 1–17, 2020.

SILVA, A. S. DA. Aspectos Produtivos, Qualitativos e Fisiológicos do Pimentão Submetido à Aplicação Foliar de Extrato de *Ascophyllum nodosum* e Suplementação Luminosa, 2020. Universidade de São Paulo Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”.

SILVA, C. S. DA. Custo do Bombeamento de Água em Sistema de Irrigação Sob Diferentes Modalidades Tarifárias, 2020. Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia Goiano.

SILVA, E. F. F. Manejo da fertirrigação e controle da salinidade na cultura do pimentão utilizando extratores de solução do solo. Piracicaba: ESALQ/USP, 2002. 136p. Tese Doutorado.

SMITH, R. J.; BAILLIE, J. N. Defining Precision Irrigation: A New Approach to Irrigation Management. *Irrigation and Drainage Conference*, p. 1–6, 2009.

SOARES, F. C.; ROBAINA, A. D.; PEITER, M. X.; RUSSI, J. L.; VIVAN, G. A. Redes Neurais Artificiais na Estimativa da Retenção de Água do Solo. *Ciencia Rural*, v. 44, n. 2, p. 293–300, 2014.

SOUZA, A. P. DE; PEREIRA, J. B. A.; SILVA, L. D. B. DA; GUERRA, J. G. M.; CARVALHO, D. F. DE. Evapotranspiração, Coeficientes de Cultivo e Eficiência do Uso da Água da Cultura do Pimentão em Diferentes Sistemas de Cultivo. *Acta Scientiarum - Agronomy*, v. 33, n. 1, p. 15–22, 2011.

TOPSEED. Catálogo de Produtos., 2020. Disponível em: <<https://agristar.com.br/upload/pageflip/TopSeed-Premium2019/Catalogo-TP-PT.pdf>>. .

TORRES, J. D.; MONTEIRO, I. O.; SANTOS, J. R. DOS; ORTIZ, M. S. Aquisição de Dados Meteorológicos Através da Plataforma Arduino: Construção de Baixo Custo e Análise de Dados. *Scientia Plena*, v. 11, n. 2, p. 13, 2015. Disponível em: <<https://scientiaplena.org.br/sp/article/view/1742/1130>>. .

TSANG, S. W.; JIM, C. Y. Applying Artificial Intelligence Modeling to Optimize Green Roof Irrigation. *Energy and Buildings*, v. 127, p. 360–369, 2016.

TURCO, J. E. P.; RIZZATTI, G. DOS S.; PAVANI, L. C. Custo de Energia Elétrica em Cultura do Feijoeiro Irrigado por Pivô Central, Afetado Pelo Manejo da Irrigação e Sistemas de Cultivo. *Engenharia Agrícola*, v. 29, n. 2, p. 311–320, 2009.

VILAS-BOAS, R. C. Cultivo de Alface Crespa em Ambiente Protegido Sob Diferentes Lâminas de Irrigação, 2006. Universidade Federal de Lavras.

ZANETTI, S. S.; SOUSA, E. F.; CARVALHO, D. F. DE; BERNARDO, S. Estimação da Evapotranspiração de Referência no Estado do Rio de Janeiro Usando Redes Neurais Artificiais. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, v. 12, n. 2, p. 174–180, 2008.

ZINKERNAGEL, J.; MAESTRE-VALERO, J. F.; SERESTI, S. Y.; INTRIGLIOLO, D. S. New technologies and practical approaches to improve irrigation management of open field vegetable crops. *Agricultural Water Management*, v. 242, n. July, p. 106404, 2020. Elsevier.

ZULKIFLI, C. Z.; NOOR, N. N. Wireless sensor network and internet of things (IoT) solution in agriculture. *Pertanika Journal of Science and Technology*, v. 25, n. 1, p. 91–100, 2017.