CENTRO UNIVERSITÁRIO FEI
GILBERTO BARBOSA DE SOUZA

**USO DE SISTEMA DE CONTROLE FUZZY E INTERNET DAS COISAS PARA A
IRRIGAÇÃO NA AGRICULTURA DE PRECISÃO**

São Bernardo do Campo

2021

GILBERTO BARBOSA DE SOUZA

**USO DE SISTEMA DE CONTROLE FUZZY E INTERNET DAS COISAS PARA A
IRRIGAÇÃO NA AGRICULTURA DE PRECISÃO**

Dissertação de Mestrado, apresentada ao Centro Universitário FEI (FEI) para obtenção do título de Mestre em Engenharia Elétrica. Orientado pelo Prof. Dr. Plínio Thomaz Aquino Junior.

São Bernardo do Campo

2021

Souza, Gilberto Barbosa de.

Uso de sistema de controle fuzzy e internet das coisas para a irrigação na agricultura de precisão / Gilberto Barbosa de Souza. São Bernardo do Campo, 2020.

164 p. : il.

Dissertação - Centro Universitário FEI.

Orientador: Prof. Dr. Plinio Thomaz Aquino Junior.

1. Irrigação de precisão. 2. fuzzy. 3. IoT. I. Aquino Junior, Plinio Thomaz, orient. II. Título.

Aluno: Gilberto Barbosa de Souza

Matrícula: 119108-9

Título do Trabalho: Uso de sistema de controle fuzzy e internet das coisas para irrigação na agricultura de precisão.

Área de Concentração: Inteligência Artificial Aplicada à Automação e Robótica

Orientador: Prof. Dr. Plinio Thomaz Aquino Junior

Data da realização da defesa: 17/12/2020

ORIGINAL ASSINADA

Avaliação da Banca Examinadora:

A banca foi realizada no dia 17 de dezembro com início às 14h00, com apresentação realizada pelo aluno com sucesso. Durante a arguição o aluno respondeu todas as questões de forma adequada demonstrando conhecimento pleno do tema. Comentários foram realizados pela banca para melhoria em alguns pontos do texto. Os membros da banca aprovaram o aluno por unanimidade

São Bernardo do Campo, / / .

MEMBROS DA BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Plinio Thomaz Aquino Junior

Ass.: _____

Prof. Dr. Reinaldo Augusto da Costa Bianchi

Ass.: _____

Profª Drª Camila Pires Cremasco Gabriel

Ass.: _____

A Banca Julgadora acima-assinada atribuiu ao aluno o seguinte resultado:

APROVADO ☒

REPROVADO ☐

VERSÃO FINAL DA DISSERTAÇÃO

**APROVO A VERSÃO FINAL DA DISSERTAÇÃO EM QUE
FORAM INCLUÍDAS AS RECOMENDAÇÕES DA BANCA
EXAMINADORA**

Aprovação do Coordenador do Programa de Pós-graduação

Prof. Dr. Carlos Eduardo Thomaz

Ao meu filho Lorenzo e, de uma forma especial,
aos meus pais Antonio e Floripes cujo o amor e
a saudade estarão para sempre no meu coração.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus pela existência da vida e da natureza.

Agradeço ao professor doutor Plínio T. Aquino Jr. pela orientação e o apoio no planejamento e na execução deste trabalho.

Agradeço ao professor doutor Rodrigo Filev Maia pelo apoio, o convite e a aceitação da minha participação no projeto SWAMP.

À Fundação Educacional Inaciana pela oportunidade da bolsa de estudos concedida e a disponibilidade dos recursos materiais, humanos e didáticos presentes no campus.

À Comissão Europeia e à Rede Nacional de Pesquisa – RNP, pela oportunidade da bolsa de estudos concedida e a participação no projeto SWAMP.

Aos meus pais (in memoriam) pelo incessante esforço, e o consequente sucesso, na minha educação e da minha família.

Ao meu filho Lorenzo, fonte da minha motivação, felicidade e inspiração.

À minha irmã, professora Ilvanita Barbosa, pelo apoio e auxílio na construção textual deste trabalho.

Ao meu irmão, professor Ilvanir Barbosa, pelo apoio e fundamental auxílio nas questões agrícolas deste trabalho.

À minha companheira, Lenice, pelo apoio e resiliência ao longo deste projeto.

À minha irmã, professora Rosalva Barbosa, pelo apoio nos momentos de dúvida ao longo desta jornada.

À minha família, pelo apoio e incentivo nos momentos difíceis pelo qual eu passei durante essa jornada.

À Camila Tavares (UNIFAL), pelo apoio e colaboração nos assuntos agrícolas deste trabalho.

Ao estafe da secretaria de pós graduação strictu sensu, aqui representado pela Adriana Ramos e a Dreyzer Medeiros, pelo apoio e orientação nas questões administrativas durante a jornada deste trabalho.

Aos colaboradores do CLM (Centro de Laboratórios Mecânicos) pela ajuda nos ensaios realizados.

Aos colegas de projeto Rafael Gomes e Brenno Faria, pelo apoio e as incontáveis discussões extremamente produtivas sobre os assuntos pertinentes a este trabalho.

Agradeço também às pessoas que, de maneira direta ou indireta, contribuíram para a realização deste trabalho.

“A ciência é, portanto, uma perversão de si mesma, a menos que tenha como fim último, melhorar a humanidade.”

Nikola Tesla

RESUMO

A agricultura mundial enfrentará o desafio de garantir a segurança alimentar de 9 bilhões de pessoas na década de 2050. Diante disso torna-se essencial o desenvolvimento de novas técnicas de cultivo visando o aumento da produção de alimentos e também a manutenção sustentável dos recursos naturais e do meio ambiente. Para produzir alimentos na quantidade certa, ao tempo certo e a preços acessíveis, os agricultores deverão adotar modelos de agricultura de precisão para elevar o volume de produção de alimentos. A agricultura de precisão emprega técnicas de manejo agrícola baseada na medição e controle de parâmetros da cultura tais como a umidade do solo, a temperatura do ar e o controle da irrigação. Neste contexto, a irrigação agrícola responde pelo maior consumo da água doce disponível para uso no planeta. Adotar técnicas que permitam aumentar a produção agrícola, reduzindo o volume de água irrigada e o desperdício, torna-se crucial e as respostas mais adequadas passam pela implementação de soluções com o uso da Inteligência Artificial (IA). Este trabalho utiliza um modelo de Irrigação de Precisão, tendo a previsão de chuva como complemento ao processo de irrigação, a fim de manter o volume de água do solo em um nível adequado à cultura do pimentão. Um sistema de inferência utilizando controle fuzzy é empregado na prescrição do volume de irrigação, com a aquisição dos dados climáticos feita por meio de dispositivos de Internet das Coisas (IoT) instalados no campo de cultivo, maximizando o molhamento do solo por meio da precipitação pluviométrica e reduzindo o consumo de água irrigada. A redução média de 16% na irrigação, obtida nas simulações e experimentos reais, indica uma boa resposta do modelo frente ao objetivo proposto.

Palavras-chave: Irrigação de Precisão. Fuzzy. IoT.

ABSTRACT

World agriculture will face the challenge of guaranteeing the food security of 9 billion people in the 2050s. Given this, it is essential to develop new farming techniques aimed at increasing food production and also the sustainable maintenance of natural resources and the environment. To produce food in the right quantity, at the right time, and affordable prices, farmers must adopt precision farming models to increase the food production amount. Precision agriculture uses agricultural management techniques based on the measurement and control of crop parameters such as soil moisture, air temperature, and the irrigation control. In this context, agricultural irrigation accounts for the greater consumption of freshwater available for use on the planet. Adopting techniques that allow increasing agricultural production, reducing irrigated water amount and waste, becomes crucial and the most appropriate responses are the implementation of solutions using Artificial Intelligence. This work uses a Precision Irrigation model, with the rain forecast as a complement to the irrigation process, to keep the soil moisture at an appropriate level for the sweet pepper culture. A fuzzy inference system was used in the the irrigation prescription amount, with the climatic data acquisition made through IoT devices installed in the crop field, maximizing soil wetting through rainfall and reducing irrigated water amount. The average reduction of 16% in irrigation, obtained in simulations and real experiments, indicates a good response of the model to the proposed objective.

Keywords: Precision Irrigation. Fuzzy. IoT.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1	– Fotossíntese e respiração vegetal em função da temperatura	38
Figura 2	– Exemplo de Coeficiente de Cultura (Kc) para a cultura do pimentão	40
Figura 3	– Parâmetros físico-hídricos do solo	48
Figura 4	– Arquitetura geral do sistema baseado em conhecimento	51
Figura 5	– Regras de produção aplicadas a um controlador PID	52
Figura 6	– Pertinência clássica	53
Figura 7	– Pertinência fuzzy	53
Figura 8	– Propriedades dos conjuntos fuzzy	54
Figura 9	– Processos de defuzzificação	56
Figura 10	– Controlador fuzzy genérico	58
Figura 11	– Arquitetura IoT genérica	61
Figura 12	– Principais mercados de aplicação da IoT	61
Figura 13	– Diagrama geral do modelo Sistema de Inferência Fuzzy (FIS)	74
Figura 14	– Detalhe do FIS inserido no sistema de irrigação	74
Figura 15	– Distância entre duas estações meteorológicas em uma mesma região	75
Figura 16	– Diagrama geral do FIS	78
Figura 17	– Função de Pertinência - Dias Após Plantio (DAP)	80
Figura 18	– Função de Pertinência - Evapotranspiração da Cultura (ETc)	82
Figura 19	– Função de Pertinência - Ponto de Depleção Crítico (PDC)	83
Figura 20	– Função de Pertinência - Previsão de Chuva	84
Figura 21	– Função de Pertinência - Probabilidade de Chuva	85
Figura 22	– Função de Pertinência - Prescrição da Irrigação	86
Figura 23	– Superfícies de controle e Mapas de contorno - DAP	87
Figura 24	– Superfície de controle e Mapa de contorno - DAP x PDC	88
Figura 25	– Superfícies de controle e Mapas de contorno - PDC	88
Figura 26	– Experimento FEI - Localização e local de plantio	92
Figura 27	– Experimento Nova Petrópolis - Localização e configuração	93
Figura 28	– Experimento Nova Petrópolis - Componentes	94
Figura 29	– Experimento Nova Petrópolis - Arquitetura de software e hardware	95
Figura 30	– Experimento Nova Petrópolis - Fluxo do processo	95
Figura 31	– Experimento Extrema - Localização	96

Figura 32 – Experimento Extrema - Módulo de irrigação e Módulo Central	97
Figura 33 – Experimento Extrema - Probe	98
Figura 34 – Experimento Extrema - Mudanças de plantio	99
Figura 35 – Irrigação total - ciclo de 90 dias - Simulação 3	102
Figura 36 – Irrigação total - ciclo de 90 dias - Simulação 7	102
Figura 37 – Irrigação total - ciclo de 90 dias - Simulação 1	103
Figura 38 – Irrigação total - ciclo de 90 dias - Simulação 5	103
Figura 39 – Irrigação total - ciclo de 90 dias - Simulação 4	104
Figura 40 – Evolução da irrigação pelos modelos - ciclo de 90 dias - Simulação 4 . . .	104
Figura 41 – Evolução da umidade do solo - ciclo de 90 dias - Simulação 11	105
Figura 42 – Evolução da umidade do solo - ciclo de 90 dias - Simulação 3	105
Figura 43 – Evolução da irrigação - ciclo de 90 dias - Simulação 2	106
Figura 44 – Evolução da irrigação - ciclo de 125 dias - Nova Petrópolis	107
Figura 45 – Floração - DAP 82 - Nova Petrópolis	107
Figura 46 – Evolução da umidade do solo - ciclo de 125 dias - Nova Petrópolis	108
Figura 47 – Irrigação total - ciclo de 125 dias - Nova Petrópolis	109
Figura 48 – Frutificação e Colheita - DAP 115 - Nova Petrópolis	109
Figura 49 – Análise do comprimento e diâmetro médio - Nova Petrópolis	110
Figura 50 – Evolução da irrigação - ciclo de 111 dias - Extrema	111
Figura 51 – Evolução da umidade do solo - ciclo de 111 dias - Extrema	112
Figura 52 – Indicação de irrigação - Extrema	113
Figura 53 – Indicação de percolação profunda - Extrema	113
Figura 54 – Desenvolvimento fenológico - Extrema	114
Figura 55 – Danos nos frutos por chuva de granizo - Extrema	114
Figura 56 – Irrigação total - ciclo de 111 dias - Extrema	115
Figura 57 – Seleção dos frutos para análise qualitativa - Extrema	115
Figura 58 – Irrigação total - ciclo de 90 dias - Simulação 1	132
Figura 59 – Evolução da umidade do solo - FIS - ciclo de 90 dias - Simulação 1	132
Figura 60 – Evolução da irrigação - ciclo de 90 dias - Simulação 1	132
Figura 61 – Irrigação total - ciclo de 90 dias - Simulação 2	133
Figura 62 – Evolução da umidade do solo - FIS - ciclo de 90 dias - Simulação 2	133
Figura 63 – Evolução da irrigação - ciclo de 90 dias - Simulação 2	133
Figura 64 – Irrigação total - ciclo de 90 dias - Simulação 3	134

Figura 65 – Evolução da umidade do solo - FIS - ciclo de 90 dias - Simulação 3	134
Figura 66 – Evolução da irrigação - ciclo de 90 dias - Simulação 3	134
Figura 67 – Irrigação total - ciclo de 90 dias - Simulação 4	135
Figura 68 – Evolução da umidade do solo - FIS - ciclo de 90 dias - Simulação 4	135
Figura 69 – Evolução da irrigação - ciclo de 90 dias - Simulação 4	135
Figura 70 – Irrigação total - ciclo de 90 dias - Simulação 5	136
Figura 71 – Evolução da umidade do solo - FIS - ciclo de 90 dias - Simulação 5	136
Figura 72 – Evolução da irrigação - ciclo de 90 dias - Simulação 5	136
Figura 73 – Irrigação total - ciclo de 90 dias - Simulação 6	137
Figura 74 – Evolução da umidade do solo - FIS - ciclo de 90 dias - Simulação 6	137
Figura 75 – Evolução da irrigação - ciclo de 90 dias - Simulação 6	137
Figura 76 – Irrigação total - ciclo de 90 dias - Simulação 7	138
Figura 77 – Evolução da umidade do solo - FIS - ciclo de 90 dias - Simulação 7	138
Figura 78 – Evolução da irrigação - ciclo de 90 dias - Simulação 7	138
Figura 79 – Irrigação total - ciclo de 90 dias - Simulação 8	139
Figura 80 – Evolução da umidade do solo - FIS - ciclo de 90 dias - Simulação 8	139
Figura 81 – Evolução da irrigação - ciclo de 90 dias - Simulação 8	139
Figura 82 – Irrigação total - ciclo de 90 dias - Simulação 9	140
Figura 83 – Evolução da umidade do solo - FIS - ciclo de 90 dias - Simulação 9	140
Figura 84 – Evolução da irrigação - ciclo de 90 dias - Simulação 9	140
Figura 85 – Irrigação total - ciclo de 90 dias - Simulação 10	141
Figura 86 – Evolução da umidade do solo - FIS - ciclo de 90 dias - Simulação 10	141
Figura 87 – Evolução da irrigação - ciclo de 90 dias - Simulação 10	141
Figura 88 – Irrigação total - ciclo de 90 dias - Simulação 11	142
Figura 89 – Evolução da umidade do solo - FIS - ciclo de 90 dias - Simulação 11	142
Figura 90 – Evolução da irrigação - ciclo de 90 dias - Simulação 11	142
Figura 91 – Triângulo de classificação textural	154

LISTA DE TABELAS

Tabela 1	– Elementos essenciais ao desenvolvimento da planta	37
Tabela 2	– Características das linguagens lógicas	51
Tabela 3	– Propriedades das operações entre subconjuntos fuzzy	55
Tabela 4	– Características dos métodos de inferência	56
Tabela 5	– Principais protocolos e padrões da Rede de Sensores Sem Fio (WSN) . . .	63
Tabela 6	– Trabalhos que utilizam IoT e IA aplicadas à otimização da irrigação	72
Tabela 7	– Variação de parâmetros no microclima	75
Tabela 8	– Classificação do pimentão	76
Tabela 9	– Regras da base de conhecimento do FIS	79
Tabela 10	– Descrição das variáveis do FIS	80
Tabela 11	– Variável Linguística DAP	81
Tabela 12	– Variável Linguística ETc	82
Tabela 13	– Variável Linguística PDC	83
Tabela 14	– Variável Linguística PC	84
Tabela 15	– Variável Linguística CP	85
Tabela 16	– Variável Linguística PI	86
Tabela 17	– Granulometria, densidade e saturação do solo	99
Tabela 18	– Recursos - Experimentos Nova Petrópolis e Extrema	100
Tabela 19	– Desempenho do simulador	101
Tabela 20	– Resultados - Nova Petrópolis	110
Tabela 21	– Médias - Nova Petrópolis	110
Tabela 22	– Resultados - Extrema	116
Tabela 23	– Médias - Extrema	116
Tabela 24	– Publicações produzidas	117
Tabela 25	– Descrição do sistema de irrigação	152
Tabela 26	– Classificação do solo pela escala Atterberg	154
Tabela 27	– Sistema Brasileiro de Classificação do solo	155
Tabela 28	– Definições nas etapas de resolução de problemas	159

LISTA DE ABREVIATURAS

AC	Antes de Cristo
AFD	Água Facilmente Disponível
AP	Agricultura de Precisão
ATD	Água Total Disponível
CC	Capacidade de Campo
CRA	Curva de Retenção da Água
DAP	Dias Após Plantio
EMBRAPA	Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária
ETc	Evapotranspiração da Cultura
ETo	Evapotranspiração de Referência
FAO	Organização para a Agricultura e Alimentação
FEI	Centro Universitário FEI
FIS	Sistema de Inferência Fuzzy
GIS	Sistema de Informação Geográfica
GPS	Sistema de Posicionamento Global
IA	Inteligência Artificial
INMET	Instituto Nacional de Meteorologia
IoT	Internet das Coisas
Kc	Coeficiente de Cultura
Kd	Constante de Ganho Derivativo
Ki	Constante de Ganho Integral
Km	Quilômetro
Kp	Constante de Ganho Proporcional
Ks	Coeficiente de Estresse Hídrico
ML	Aprendizado de Máquina
MPa	Mega Pascal
ONU	Organização das Nações Unidas
PDC	Ponto de Depleção Crítico
PID	Proporcional Integral Derivativo
PMP	Ponto de Murcha Permanente
Probe	Sonda com um conjunto de sensores

PWS	Estação Meteorológica Pessoal
RBS	Revisão Bibliográfica Sistemática
RF	Floresta Randômica
RFID	Identificação por Rádio Frequência
RNA	Rede Neural Artificial
SVM	Máquina Vetor de Suporte
SVR	Regressão Vetor de Suporte
TAC	Taxa de Assimilação do Carbono
TDR	Reflectometria no Domínio do Tempo
VBA	Visual Basic para Aplicações
WSN	Rede de Sensores Sem Fio

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	29
1.1	MOTIVAÇÃO	31
1.2	OBJETIVO	31
1.3	JUSTIFICATIVA	31
1.4	ORGANIZAÇÃO DO TEXTO	32
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	33
2.1	AGRICULTURA	33
2.1.1	Origem	33
2.1.2	Evolução	33
2.1.3	Revoluções Agrícolas	34
2.1.4	Agricultura Sustentável	34
2.2	O SISTEMA ATMOSFERA-PLANTA-SOLO	35
2.2.1	A atmosfera	35
2.2.1.1	<i>Umidade relativa do ar</i>	35
2.2.1.2	<i>Radiação Solar</i>	36
2.2.1.3	<i>Vento</i>	36
2.2.2	A planta	37
2.2.2.1	<i>Elementos essenciais</i>	37
2.2.2.2	<i>Fotossíntese</i>	37
2.2.2.3	<i>Consumo de água</i>	38
2.2.2.4	<i>Evapotranspiração</i>	39
2.2.3	O solo	41
2.2.3.1	<i>Fração sólida do solo</i>	41
2.2.3.2	<i>Fração líquida do solo</i>	42
2.2.3.3	<i>Potencial da água no solo</i>	42
2.2.3.4	<i>Fração gasosa do solo</i>	44
2.2.3.5	<i>Propriedades térmicas do solo</i>	44
2.2.4	Movimento da água no solo	45
2.2.4.1	<i>Capacidade de Campo</i>	45
2.2.4.2	<i>Ponto de Murcha Permanente</i>	46
2.2.4.3	<i>Ponto de Depleção Crítico</i>	46

2.2.4.4	<i>Água Total Disponível</i>	46
2.2.4.5	<i>Água Facilmente Disponível</i>	47
2.2.4.6	<i>Condutividade Hidráulica do Solo</i>	47
2.2.4.7	<i>Curva de Retenção de Água</i>	47
2.3	INTELIGÊNCIA ARTIFICIAL	48
2.3.1	Representação do conhecimento	49
2.3.2	Agente lógico	50
2.3.3	Representação do conhecimento por lógica	50
2.3.4	Controladores baseados em conhecimento	51
2.3.4.1	<i>Inferência por regras de produção</i>	51
2.3.4.2	<i>Inferência por lógica fuzzy</i>	52
2.3.4.3	<i>Operações com subconjuntos fuzzy</i>	54
2.3.5	Método de inferência por lógica fuzzy	54
2.3.5.1	<i>Método Mamdani</i>	55
2.3.5.2	<i>Método Sugeno</i>	55
2.3.6	Controlador fuzzy	57
2.4	AGRICULTURA DE PRECISÃO	58
2.4.1	Internet das Coisas	59
2.4.2	Redes de Sensores sem Fio	61
2.4.3	Medição da Umidade do Solo	62
2.4.3.1	<i>Sensor capacitivo de umidade do solo</i>	64
2.5	IRRIGAÇÃO	65
3	PLANEJAMENTO DA REVISÃO BIBLIOGRÁFICA SISTEMÁTICA . .	69
3.1	TRABALHOS RELACIONADOS	70
4	METODOLOGIA	73
4.1	DETERMINAÇÃO DO TIPO DE CULTURA	76
4.2	REFERÊNCIA DE IRRIGAÇÃO FAO	76
4.3	MODELO DE IRRIGAÇÃO FIS	77
4.4	FUNÇÕES DE PERTINÊNCIA	78
4.4.1	Dias Após Plantio - DAP	79
4.4.2	Evapotranspiração da cultura - ETc	81
4.4.3	Ponto de Depleção Crítico - PDC	82
4.4.4	Previsão de Chuva - PC	83

4.4.5	Probabilidade de Chuva - CP	84
4.4.6	Prescrição da Irrigação - PI	85
4.5	SUPERFÍCIES DE CONTROLE	87
5	EXPERIMENTOS	89
5.1	PLANEJAMENTO DO PROJETO	89
5.2	EXECUÇÃO DOS EXPERIMENTOS	89
5.2.1	Simulador	89
5.2.2	Fazendinha FEI	92
5.2.3	Nova Petrópolis	93
5.2.4	Extrema	96
6	ANÁLISE DOS DADOS	101
6.1	SIMULADOR	101
6.2	NOVA PETRÓPOLIS	106
6.3	EXTREMA	110
6.4	PUBLICAÇÕES	116
6.5	REPOSITÓRIO	117
7	CONCLUSÃO	119
	REFERÊNCIAS	121
	APÊNDICE A – Resultados do experimento simulador	131
A.0.1	Simulação 1 - Período: 01/07/2018 à 29/09/2018	132
A.0.2	Simulação 2 - Período: 01/10/2018 à 30/12/2018	133
A.0.3	Simulação 3 - Período: 01/01/2019 à 01/04/2019	134
A.0.4	Simulação 4 - Período: 02/04/2019 à 01/07/2019	135
A.0.5	Simulação 5 - Período: 02/07/2019 à 30/09/2019	136
A.0.6	Simulação 6 - Período: 26/08/2019 à 29/11/2019	137
A.0.7	Simulação 7 - Período: 13/09/2019 à 12/12/2019	138
A.0.8	Simulação 8 - Período: 01/10/2019 à 30/12/2019	139
A.0.9	Simulação 9 - Período: 13/11/2019 à 16/02/2020	140
A.0.10	Simulação 10 - Período: 01/01/2020 à 31/03/2020	141
A.0.11	Simulação 11 - Período: 02/04/2020 à 01/07/2020	142
	APÊNDICE B – Determinação da taxa de infiltração do solo	143
	APÊNDICE C – Calibração do sensor de umidade do solo	147
	APÊNDICE D – Itens e recursos utilizados nos experimentos	151

	ANEXO A – Classificação textural do solo	153
A.0.1	Triângulo de classificação textural	154
A.0.2	Escala Atterberg	154
A.0.3	Sistema Embrapa de classificação textural	154
	ANEXO B – Resolução de Problemas Usando Inteligência Artificial	157
B.0.1	Problemas, espaços de problemas e busca	158
	ÍNDICE	160

1 INTRODUÇÃO

Na década de 2050 há a previsão de uma população mundial em torno de 9 bilhões de pessoas (NATIONS, 2019). Frente ao desafio da segurança alimentar global a agricultura precisará adotar novos métodos de manejo das culturas de modo a aumentar a produção, reduzir as perdas e garantir produtos alimentares na quantidade certa, ao tempo certo e a um preço acessível à sociedade. Uma solução natural para este desafio é fazer uso do avanço tecnológico, já presente em diversos setores da economia e da sociedade, também nos processos agrícolas. Neste contexto, a irrigação ocupa um papel de destaque uma vez que a maior parte das culturas agrícolas são irrigadas.

A irrigação consome a maior parte da água doce disponível para uso no planeta (GOAP *et al.*, 2018). Estima-se que 40% da água usada para irrigação nos países em desenvolvimento seja desperdiçada (PANCHARD *et al.*, 2007). Fatores como a mudança climática, o crescimento populacional e a disputa por recursos hídricos tornam a disponibilidade de água doce um complexo desafio em escala global, principalmente em regiões nas quais há escassez de chuva (GONZÁLEZ PEREA *et al.*, 2019). As principais causas dos desperdícios são os vazamentos em tubulações e o excesso de irrigação. A prática do excesso de irrigação é comum nos modelos tradicionais de manejo agrícola uma vez que os agricultores preferem gastar mais água e recursos adjacentes, como a energia elétrica necessária para alimentar as bombas de irrigação, a correr o risco de perder a safra, ou parte dela, devido a uma irrigação insuficiente. Mesmo a prática da irrigação excessiva não garante um bom rendimento à cultura uma vez que o acúmulo de água na superfície do solo poderá causar a proliferação de fungos ou insetos vetores de pragas agrícolas, e também pelo fato de que um volume de água acima da Capacidade de Campo (CC) do solo resultará em um processo de percolação profunda, lixiviando os nutrientes da zona raiz e impactando negativamente no crescimento da cultura. Desta forma, faz-se necessário utilizar técnicas que permitam elevar o processo de irrigação a patamares mais precisos (BELAY *et al.*, 2019; GARG; WANI; PATIL, 2016; MEERADEVI; MUNDADA; POOJA, 2019).

A Agricultura de Precisão tem como objetivo maximizar a produção agrícola através do emprego de técnicas e dispositivos que permitam gerenciar o manejo agrícola e otimizar processos de semeadura, irrigação, fertilização, combate a doenças, colheita, armazenamento, logística e a disponibilidade do produto ao consumo no tempo certo, na quantidade certa e a um preço acessível à sociedade. Através do uso de dispositivos de Internet das Coisas (IoT) no campo, torna-se possível a aquisição e monitoramento de dados e parâmetros das plantações em tempo real, auxiliando agricultores e especialistas do setor na aplicação de técnicas de manejo adequadas a cada perfil de solo, clima, região e tipo de cultura. O conhecimento sobre as carac-

terísticas do solo e a previsão meteorológica para períodos regulares, associado à capacidade de produção das culturas são elementos fundamentais para a agricultura inteligente (ANTON; MATEI; AVRAM, 2019).

O emprego da Inteligência Artificial (IA) possibilita a otimização dos processos agrícolas. As tecnologias computacionais permitem uma coleta de dados abrangendo todos os parâmetros ambientais da planta, com um alto desempenho e um baixo esforço (ATHANI; TEJESHWAR, 2017). Técnicas de *Análise de Grandes Volumes de Dados*, do inglês *Big Data Analytics*, usando algoritmos de aprendizado de máquina e modelos estatísticos já conseguem otimizar plantações através da classificação de pragas e do estágio de desenvolvimento dos frutos. Estas técnicas também são empregadas na predição do rendimento de safras, da umidade do solo, da precipitação pluviométrica e da irrigação. Diversos algoritmos de Aprendizado de Máquina (ML), como Máquina Vetor de Suporte (SVM), Floresta Randômica (RF) e Rede Neural Artificial (RNA) são utilizados no desenvolvimento de modelos de classificação e predição (SINGH *et al.*, 2016; ZHAO; BODNER; REWALD, 2016).

A irrigação apropriada e a sua consequente medição tem uma importância vital para a produção agrícola, pois culturas subirrigadas ou sobre irrigadas apresentam rendimentos de safras menores (CHARLES; NAMEN; RODRIGUES, 2017). Um modelo de irrigação que possa utilizar a previsão meteorológica de chuvas e desta forma reduzir o volume de água irrigada, e as suas consequentes perdas, associado a dispositivos de medição dos parâmetros do solo e do ambiente que tenham influência direta no desenvolvimento da cultura, poderá tornar o processo de irrigação agrícola mais eficiente, apresentando-se como uma solução ao problema do uso adequado dos recursos hídricos e também do aumento da demanda alimentar mundial.

Neste contexto, este trabalho destina-se a apresentar um modelo de irrigação de precisão, utilizando dados do solo, do ambiente da planta e da previsão de chuvas para o dia seguinte, em que seja possível reduzir a quantidade de água irrigada e mantendo a umidade do solo dentro dos níveis de Água Total Disponível (ATD), e também entre os níveis de Capacidade de Campo (CC) e do Ponto de Depleção Crítico (PDC) da planta. Os parâmetros do solo e do ambiente, tais como a umidade relativa do ar, a temperatura do ar, a umidade do solo em três níveis de profundidade, e a previsão de chuvas, serão coletados mediante a instalação de dispositivos IoT no campo e a prescrição da irrigação será realizada por um sistema de inferência fuzzy, que consumirá dados baseados em regras específicas sobre o manejo agrícola da cultura do pimentão, para otimizar a irrigação da lavoura.

1.1 MOTIVAÇÃO

A crescente preocupação com as mudanças climáticas e os seus desdobramentos nos diversos cenários globais tem chamado a atenção de diversos setores da sociedade. No aspecto da agricultura há uma preocupação com a segurança alimentar da população para as próximas décadas que visa basicamente aumentar a produção de alimentos e reduzir os desperdícios. Neste contexto o emprego de técnicas de IA associado a dispositivos IoT imersos no domínio agrícola, poderá ser um dos elementos principais na mudança dos atuais paradigmas presentes na irrigação agrícola, colocando-a em uma direção para atingir escalas de produção de alimentos adequadas à demanda da população e também oferecer um volume maior de água doce ao consumo humano através da redução do consumo de água irrigada nas culturas.

1.2 OBJETIVO

O objetivo principal deste trabalho é pesquisar e desenvolver um modelo de irrigação de precisão empregando um controle por meio de inferência fuzzy na prescrição da irrigação, visando a redução da quantidade de água irrigada e mantendo o rendimento da cultura.

Pretende-se, como objetivo secundário, avaliar o uso do sensor capacitivo de umidade do solo em três camadas de profundidade para detectar eventos de percolação profunda da água no solo e estimar o parâmetro de Capacidade de Campo (CC), oferecendo um controle mais adequado ao volume de água disponível à planta.

1.3 JUSTIFICATIVA

O desafio de prover segurança alimentar e acesso ao consumo de água doce para uma população estimada em nove bilhões de pessoas na década de 2050 (NATIONS, 2019) torna a agricultura de precisão um dos grandes atores deste cenário. Uma vez que o maior consumo de água doce do planeta é empregado na irrigação agrícola e que dentro dos modelos tradicionais de irrigação, as perdas por excesso e vazamentos chegam a 40% do consumo (PANCHARD *et al.*, 2007), a pesquisa por novos modelos de irrigação ocupa um papel de destaque no intuito de otimizar este domínio. Assim o desenvolvimento de técnicas visando a maximização dos recursos naturais como a chuva, e desta forma reduzir a quantidade de água irrigada nas lavouras, poderá ser um fator de inflexão importante diante deste desafio, inclusive em regiões nas quais há escassez de água doce tanto para a irrigação quanto para o consumo humano (GONZÁLEZ PEREA *et al.*, 2019).

1.4 ORGANIZAÇÃO DO TEXTO

O presente trabalho está organizado da seguinte maneira:

A seção dois apresenta uma fundamentação teórica sobre a agricultura, sua evolução histórica e os principais elementos que compõem o sistema solo-planta-atmosfera. Os conceitos de IA e as técnicas de aplicação dos modelos, inclusive no âmbito da lógica fuzzy, também são apresentados nesta seção, que ainda faz a introdução do paradigma de IoT baseado no sensoriamento através das redes de sensores sem fio visando a sua aplicação na agricultura. A seção encerra-se com a visão da academia acerca do conceito de agricultura de precisão e irrigação empregando as técnicas de IoT e sensoriamento remoto;

A seção três apresenta uma revisão bibliográfica sistemática sobre o uso da IA no domínio da agricultura de precisão com os trabalhos relacionados ao propósito da pesquisa e que contribuíram para o desenvolvimento do assunto;

A seção quatro trata da metodologia para o desenvolvimento de um modelo de irrigação de precisão, controlado por um sistema de inferência fuzzy e uma rede de sensores instalada no campo de cultivo, que visa reduzir o consumo de água irrigada na plantação;

A seção cinco apresenta os detalhes e a execução dos experimentos, com informações sobre a cultura utilizada, a localização, os materiais e as técnicas empregadas;

A seção seis faz uma análise dos dados extraídos nos experimentos comparando-os ao modelo tradicional de irrigação;

A seção sete apresenta uma conclusão sobre os resultados obtidos nos experimentos e a sugestão para trabalhos futuros visando a extensão da pesquisa;

A referência bibliográfica encerra este trabalho na seção oito.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Nesta seção é apresentado o argumento técnico e científico que serviu de base ao desenvolvimento do trabalho, englobando todos os aspectos multidisciplinares relevantes à produção da pesquisa científica.

2.1 AGRICULTURA

Nesta seção a agricultura é apresentada sob o contexto histórico e evolutivo, desde a sua origem até o estabelecimento do conceito de agricultura sustentável, passando pelas revoluções agrícolas ocorridas.

2.1.1 Origem

A agricultura teve o seu início no planeta por volta de dez mil anos, nas regiões norte da África e oeste da Ásia, por povos que decidiram abandonar a caça e a coleta de alimentos e passaram a produzir os seus próprios grãos. Com o surgimento da agricultura, os povos que habitavam a Terra, naquela época, realizaram a transição de um modelo de vida nômade para a fixação de residência em um único local. Entre o período de 6.500 Antes de Cristo (AC) a 4.000 AC, as primeiras plantações agrícolas chegaram à Europa, espalhando-se de maneira lenta desde a Grécia até a Inglaterra. Entretanto, o domínio da agricultura sempre foi um obstáculo para a humanidade naquela época, e raros eram os povos que conseguiam garantir a sua segurança alimentar, muito em razão da precariedade na técnica do manejo agrícola (EHLERS, 2009).

2.1.2 Evolução

A agricultura mundial sofreu um processo lento de evolução desde o seu surgimento. Até o final do século XVII, uma boa parte da população da Europa, por exemplo, sofria de desnutrição. Isso se dava pelo fato de que o homem não conseguia produzir alimentos em escala suficiente para alimentar toda a população. Na idade média a fome, junto com a peste, matou milhares de pessoas na Europa. Este cenário começou a ser modificado devido ao surgimento da agricultura moderna, no século XVIII, que ficou marcada pela junção da atividade agrícola e pecuária, ou seja, os agricultores passaram a cultivar, de maneira alternada, alimentos para os humanos e para o gado. Assim nascia o sistema de rotação de cultura e desta forma houve um

ganho de escala na produção de alimentos. Este movimento ficou conhecido como a primeira revolução agrícola (EHLERS, 2009).

2.1.3 Revoluções Agrícolas

A primeira revolução agrícola nos países industrializados ocorreu por volta dos séculos 18 e 19 e caracterizaram-se pelo desenvolvimento de novos métodos e ferramentas de manejo agrícola. Sistemas mecanizados de semeadura, novos modelos de arados e colheita foram criados e possibilitaram o avanço da agricultura em termos de extensão territorial e também sob o ponto de vista do volume de produção das culturas. Em um período de 150 anos, países como a Inglaterra tiveram um aumento de 3 a 4 vezes na sua produção agropecuária, através do desenvolvimento de novos métodos de cultivo, como a rotação de culturas, novas culturas, novos métodos de fertilização, drenagem e irrigação (PRETTY, 1991).

A segunda revolução agrícola ocorreu ao final do século XIX e estendeu-se durante o século XX. Nesta mesma época, o mundo experimentava a segunda onda de industrialização e o desenvolvimento de novas máquinas, como os motores elétricos e à combustão, e a consequente motorização dos meios de transporte e arados, como caminhões e tratores, possibilitaram o avanço das técnicas de manejo e a integração das zonas agrícolas, outrora afastadas, aos grandes centros de distribuição de insumos e escoamento das safras. Esta possibilidade de aquisição e venda de produtos para locais distantes levou os agricultores a optarem por culturas específicas, geralmente orientada pelo retorno financeiro, resultando em um sistema agrário multirregional, com capacidade de produção em larga escala, devido a mecanização dos processos, e com ganhos de produtividade incomparáveis aos modelos antecessores. Porém, esta capacidade de produção em larga escala, suportada por uma vasta aplicação de adubos químicos e manejo incorreto da terra, levou os governos de diversos países a repensar as estratégias da agricultura por meio do desenvolvimento de políticas que fomentassem a criação de um modelo agrícola sustentável (MAZOYER, 2010).

2.1.4 Agricultura Sustentável

A definição de sustentabilidade não é tão simples ao passo que há ao menos setenta definições distintas, com diferenças sutis, cada uma enfatizando valores diferentes. Alguns autores entendem a sustentabilidade como sinônimo de resiliência e capacidade de retornar a estados anteriores diante de dificuldades inesperadas. Para outros, ela implica em persistência e capacidade de manutenção ao longo do tempo (PRETTY, 1995).

Na década de 1950, surgiram preocupações no cultivo agrícola relacionadas a fatores ambientais. A partir daí adicionou-se a prerrogativa de prover a garantia da segurança alimentar à população, sem deteriorar os recursos naturais e o meio ambiente no qual o processo agrícola é realizado, estabelecendo assim a introdução do conceito da agricultura sustentável (PRETTY; BHARUCHA, 2014). Desta forma compreende-se por agricultura sustentável um modelo produtivo que garanta: a manutenção a longo prazo dos recursos naturais e da produção agrícola e com um mínimo de impacto adverso ao meio ambiente; a otimização das culturas agrícolas com o mínimo de insumos químicos; a garantia da segurança alimentar populacional; e o atendimento social das famílias e comunidades rurais que participam do processo agrícola (EHLERS, 2009).

2.2 O SISTEMA ATMOSFERA-PLANTA-SOLO

O sistema atmosfera-planta-solo, como parte da biosfera, exerce um papel importante no ciclo de vida humano, fornecendo as substâncias inorgânicas, produzindo e decompondo os seus alimentos e as suas matérias orgânicas (REICHARDT; TIMM, 2012). Nesta seção, são apresentados os elementos que constituem este sistema e as suas interações.

2.2.1 A atmosfera

Dentre as grandezas atmosféricas que exercem influência nos processos de desenvolvimento vegetal, e que serão empregadas de maneira direta ou indireta neste trabalho, temos:

2.2.1.1 *Umidade relativa do ar*

Cerca de 80% da massa total dos gases da atmosfera terrestre está localizada na região denominada troposfera, que compreende o espaço entre o nível do solo, ou do mar, e a altitude de dez Quilômetros (Kms). Sob o aspecto termodinâmico, o envoltório gasoso próximo à superfície terrestre pode ser considerado como um gás ideal e assim ser caracterizado pela Equação 1 de estado dos gases ideais, conhecendo-se a massa molecular média do ar atmosférico, definida pela Equação 2 (REICHARDT; TIMM, 2012). O ar atmosférico possui uma componente de pressão formada pela soma das pressões do ar seco e do vapor de água. A razão entre a quantidade real de umidade do ar a uma determinada temperatura e a quantidade máxima de ar naquela temperatura é denominada umidade relativa, com variação entre 0, para o ar seco, e 100% para o ar que não consegue mais reter umidade (saturado) (ÇENGEL; BOLES, 2013).

$$P = \frac{n * R * T}{V} \quad (1)$$

em que:

P = pressão atmosférica local,

V = volume do elemento gasoso em consideração,

n = número de moles de ar no elemento em consideração,

R = constante universal dos gases ideais,

T = temperatura absoluta do elemento em consideração.

$$M_a = \frac{\sum(n_i * M_i)}{\sum n_i} \quad (2)$$

em que:

M_a = massa molecular do ar,

n_i = número de moles,

M_i = massa molecular de cada componente i.

2.2.1.2 Radiação Solar

Uma outra grandeza presente na atmosfera e que exerce influência sobre os processos físicos, químicos e biológicos é a radiação solar, constituída de ondas eletromagnéticas com comprimento entre 0,2 a 20,0 μm (REICHARDT; TIMM, 2012). A intensidade local da radiação é determinada pelo ângulo entre a direção dos raios solares e a força **Normal** para a superfície terrestre, enquanto a constante solar é a radiação incidente perpendicularmente sobre um plano imaginário no topo da atmosfera (ALLEN *et al.*, 1998).

2.2.1.3 Vento

O vento é uma grandeza vetorial representada pelo deslocamento de ar devido a diferença de pressão atmosférica entre os diversos locais do planeta Terra. Ele apresenta uma variação de direção e velocidade conforme a sua altitude, com a ocorrência de ventos com maior intensidade nas camadas superiores da atmosfera e de ventos com menor intensidade nos níveis terrestres (REICHARDT; TIMM, 2012). Para fins de padronização na medição meteorológica, o vento deve ser medido à altitude de dez metros por instrumentos denominados anemômetros, e no caso das medições voltadas à agrometeorologia, uma vez que o vento exerce influência no

processo de evapotranspiração, o módulo da velocidade do vento deverá ser medido à altitude de dois a três metros acima da superfície do solo (ALLEN *et al.*, 1998).

2.2.2 A planta

No aspecto da planta, os principais elementos e processos químico-físicos, necessários ao seu desenvolvimento e que possui relação com este trabalho são apresentados nesta seção.

2.2.2.1 Elementos essenciais

O desenvolvimento fenológico da planta passa pela absorção, na zona raiz, de nutrientes e água. Os macronutrientes são aqueles em escala maior de absorção pelo sistema radicular da planta e dentre eles, destacam-se o nitrogênio, o potássio e o cálcio. Já os micronutrientes, tais como o ferro, o zinco e o cloro também são absorvidos pela planta, porém em quantidades bem menores, mas ainda assim, necessárias ao desenvolvimento pleno do vegetal. A Tabela 1 ilustra os dezesseis elementos essenciais ao ciclo de desenvolvimento da planta. Há ainda o cobalto, o níquel e o silício, que são elementos encontrados no processo fenológico de alguns tipos de vegetais (REICHARDT; TIMM, 2012).

Tabela 1 – Elementos essenciais ao desenvolvimento da planta

Macronutrientes	Micronutrientes	Gases
Enxofre - S	Ferro - Fe	Carbono - C
Fósforo - P	Boro - B	Oxigênio - O
Potássio - K	Molibdênio - Mo	Hidrogênio - H
Cálcio - Ca	Cloro - Cl	Nitrogênio - N
Magnésio - Mg	Zinco - Zn	
	Cobre - Cu	
	Manganês - Mn	

Fonte: Autor "adaptado de "Reichardt e Timm, 2012

2.2.2.2 Fotossíntese

A fotossíntese é o processo físico-químico realizado por vegetais clorofilados, que produz energia química e matéria orgânica na presença de luz solar, dióxido de carbono e água (ASIMOV, 1968). Para que uma planta possa se desenvolver é necessário que a Taxa de Assimilação do Carbono (TAC) proveniente do processo de fotossíntese seja maior que a taxa de

respiração dela, uma vez que no processo de respiração, a planta consome os açúcares (energia) produzidos na fotossíntese. A Figura 1 exemplifica um modelo de fotossíntese versus respiração vegetal em função da temperatura. Para os casos em que a temperatura está abaixo de T_{bi} ou acima de T_{bs} , as taxas de respiração da planta serão maiores que a taxa de assimilação do carbono, e nestes casos, a planta não se desenvolverá, uma vez que ela consumirá a sua própria energia (REICHARDT; TIMM, 2012).

Figura 1 – Fotossíntese e respiração vegetal em função da temperatura

Fonte: Autor "adaptado de "Reichardt e Timm, 2012

2.2.2.3 Consumo de água

Um outro processo necessário ao desenvolvimento fenológico vegetal é o consumo de água. Neste sentido, a maior parte do consumo de água realizado pelas plantas refere-se à:

- a) Transpiração. Perda de água na forma de vapor, através dos estômatos das folhas. É um processo biofísico, pois envolve um organismo vivo e seus tecidos (Verstraeten, 2008), baseado na teoria da coesão formulada por Dixon e Joly no século XIX (DIXON; JOLY, 1894 apud REICHARDT; TIMM, 2012).
- b) Evaporação. Processo físico de transferência de água na forma de vapor, através da superfície do solo, caule e superfícies da folha para a atmosfera (Verstraeten, 2008), que depende de parâmetros como a velocidade do vento, a radiação solar e a condutividade hidráulica do próprio solo (REICHARDT; TIMM, 2012)).

2.2.2.4 Evapotranspiração

A associação dos processos de transpiração e evaporação leva o nome de evapotranspiração, e a arquitetura da planta, com ênfase na área foliar, é um fator importante no ciclo hidrológico dos vegetais. Conceitualmente ele é caracterizado pela passagem da água do estado líquido para o estado gasoso, sob temperaturas abaixo do ponto de ebulição da água. Assim a umidade relativa do ar exerce influência no processo de evapotranspiração, havendo, portanto, um aumento do processo à medida que o ar fique menos úmido, e praticamente cessando quando este está saturado. (REICHARDT; TIMM, 2012).

A evapotranspiração é classificada em:

- a) Evapotranspiração de Referência (ET₀). É a evapotranspiração de uma superfície de referência, coberta por uma cultura de baixo porte, com características específicas, sem deficiência de água, e sofrendo influência apenas dos fatores climáticos. Desta forma, a ET₀ não considera os fatores da cultura e tampouco do solo (ALLEN *et al.*, 1998).
- b) Evapotranspiração da Cultura (ET_c). É o processo que ocorre considerando os parâmetros da cultura, variando conforme o tipo da planta, e que esteja sob condições climáticas ideais, sem deficiência de água no solo, livre de quaisquer tipos de doenças e alcançando o máximo rendimento daquela cultura (ALLEN *et al.*, 1998).
- c) Evapotranspiração da cultura em condição não padrão - ET_{c adj}. É o processo real de evapotranspiração no qual há a incidência de doenças, defensivos agrícolas, escassez ou excesso de água, sais no solo e condições climáticas diferentes daquelas consideradas ideais. A Equação 3 ilustra o cálculo da ET_{c adj} ajustando o Coeficiente de Estresse Hídrico (K_s) e também o Coeficiente de Cultura K_c para as condições mencionadas acima (ALLEN *et al.*, 1998).

$$ET_{c_{adj}} = ET_0 * K_{c_{adj}} * K_s \quad (3)$$

em que:

$ET_{c_{adj}}$ = evapotranspiração real,

ET_0 = evapotranspiração de referência,

$K_{c_{adj}}$ = coeficiente de cultura ajustado às condições reais da planta e do local,

K_s = coeficiente de estresse hídrico.

- d) Coeficiente de cultura - K_c . É a relação entre a ETo e a ETc de uma cultura específica. Este fator varia com os estádios (desenvolvimento) da planta ao longo do seu ciclo fenológico (REICHARDT; TIMM, 2012; ALLEN *et al.*, 1998). A Figura 2 ilustra a variação do K_c para a cultura do pimentão.
- e) Coeficiente de Estresse Hídrico - K_s . É o parâmetro que indica a condição de água no solo e o seu consequente fluxo para a planta, indicando a evapotranspiração real da cultura (REICHARDT; TIMM, 2012; BERNARDO *et al.*, 2019).

Figura 2 – Exemplo de K_c para a cultura do pimentão

Fonte: Autor "adaptado de "Embrapa, 2006

Nos últimos setenta anos, alguns métodos para estimar a evapotranspiração de maneira empírica foram desenvolvidos, porém com validade global limitada. No documento de drenagem e irrigação número 24 da Organização para a Agricultura e Alimentação (FAO), da Organização das Nações Unidas (ONU), foram apresentados quatro métodos para estimar a ETo : o método de Blaney-Criddle, o método da radiação, o método da evaporação em panela e o método Penman modificado (DOORENBOS; PRUITT, 1977). Dentre estes, o Penman modificado ofereceu o melhor resultado para uma cultura de referência baseada em grama viva (ALLEN *et al.*, 1998). Posteriormente, Monteith (1960) propôs uma modificação no método Penman para estimar diretamente a ETc , denominando-o como método Penman-Monteith. Após o congresso da FAO (1990), o termo evapotranspiração de referência ETo proposto por Doorenbos e Pruitt (1977), junto com o método Penman-Monteith foram aceitos como o método oficial para estimar a ETo (ALLEN *et al.*, 1998), sendo esta a equação adotada neste trabalho para o cálculo deste parâmetro.

$$ET_O = \frac{0,408 * \Delta * (Rn - G) + \gamma * \frac{900}{T + 273} * u_2 * (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma (1 + 0,34 * u_2)} \quad (4)$$

em que:

ET_0 = evapotranspiração de referência,

R_n = radiação solar na superfície da cultura,

G = densidade do fluxo de calor no solo,

$(e_s - e_a)$ = diferença do vapor de pressão saturado,

γ = constante psicométrica,

u_2 = velocidade do vento a 2 metros de altitude,

T = temperatura média do ar diária a 2 metros de altitude,

Δ = variação da curva do vapor de pressão.

2.2.3 O solo

O solo é formado pela ação do tempo, do clima, da topografia e dos organismos vivos sobre uma estrutura mineral geralmente rochosa, produzindo camadas em nível vertical denominada perfil do solo. Na composição do solo, há camadas superpostas, e de espessuras variáveis, denominadas horizontes do solo (REICHARDT; TIMM, 2012). Ainda segundo Reichardt e Timm (2012) as principais camadas superpostas são:

- a) O **horizonte A** de eluviação ou camada superficial do solo, que está em contato direto com a atmosfera. Neste horizonte, há a característica de perda dos elementos químicos por lavagens como a água da chuva ou irrigação em excesso;
- b) O **horizonte B** de iluviação, situado imediatamente abaixo da camada superficial e que recebe os elementos químicos provenientes dela;
- c) O **horizonte C**, logo abaixo, é aquele formado pela decomposição do material que deu origem ao solo e;
- d) O último, **horizonte D**, é formado pela rocha matriz.

Reichardt e Timm (2012) também afirmam que o solo é composto por frações nos três estados da matéria e algumas das suas características são:

2.2.3.1 Fração sólida do solo

Constituída de material mineral proveniente da rocha na qual o solo se formou e material orgânico, a parte sólida do solo é caracterizada como primária quando possui a mesma estrutura dos minerais que constituem a rocha matriz, como o quartzo, e secundária quando a matéria é de composição e estrutura diferentes, constituídas durante o processo de formação do solo, como a argila. A textura do solo pode ser dividida em três frações: areia, silte e argila, sendo

a sua determinação conhecida como análise mecânica do solo. Dentre os métodos tradicionais de determinação da textura, há: a classificação textural baseada no tamanho, à qual as frações são determinadas em função do tamanho das partículas; a classificação por meio do Triângulo de Classificação Textural (Moniz, 1972; Lemos & Santos, 1996), na qual as frações são classificadas de acordo com o percentual delas presente na amostra do solo (REICHARDT; TIMM, 2012); e o Sistema Brasileiro de Classificação de Solos (EMBRAPA, 2006) para determinar um tipo de solo. O anexo A apresenta as características de cada um destes métodos.

2.2.3.2 Fração líquida do solo

A parte líquida do solo constitui-se de uma solução de sais minerais e componentes orgânicos, cuja concentração varia com o tipo de solo e o teor de água. A descrição desta concentração é complexa devido à constante interação entre a fração sólida e a fração líquida, permitindo apenas a obtenção de valores médios e aproximados (REICHARDT; TIMM, 2012).

2.2.3.3 Potencial da água no solo

O estudo da água no solo influencia no desenvolvimento e produção das culturas, e a absorção desta pelas plantas ocorre quando a água do solo presente na zona raiz do vegetal chega à atmosfera, por meio do seu sistema vascular. Este processo é dependente da quantidade do fluido, da demanda hídrica da atmosfera, e do desempenho da própria planta no processo de absorção. Descrever o estado de energia da água presente no solo a fim de consolidar o ciclo de depleção pela evapotranspiração tem sido objeto de pesquisas no intuito de compreender como se dá a reposição deste consumo por meio da irrigação e da precipitação (FRIZZONE, 2017). O potencial total da água no solo Ψ pode ser expresso segundo a Equação 5 que ilustra as quatro componentes principais das forças que exercem influência no estado de energia da água no solo (REICHARDT; TIMM, 2012; LIBARDI, 2010):

$$\Psi = \Psi_P + \Psi_g + \Psi_o + \Psi_m \quad (5)$$

em que:

Ψ = potencial total da água no solo,

Ψ_P = componente de pressão externa,

Ψ_g = componente gravitacional,

Ψ_o = componente de pressão osmótica,

Ψ_m = componente de pressão matricial.

A determinação quantitativa da fração líquido do solo, desprezando o soluto, pode ser realizada em função da massa ou do volume. Elas são adimensionais, porém é necessário informar a unidade de medida, kg.kg^{-1} ou $\text{m}^3.\text{m}^3^{-1}$, por exemplo, uma vez que há diferença numérica entre elas. A determinação da umidade do solo em função da massa é realizada por meio de um procedimento denominado gravimetria (ROBINSON *et al.*, 2008) em que uma amostra de qualquer tamanho ou forma do solo e com massa entre 50 e 500 gramas é pesada inicialmente úmida e depois deixada em um forno ou estufa a 105°C por um período entre 24 a 48 horas, ou até que a sua massa fique inalterada (REICHARDT; TIMM, 2012). A Equação 6 representa este método:

$$u = \frac{m_l}{m_s} = \frac{m_T - m_s}{m_s} \quad (6)$$

em que:

u = umidade a base da massa,

m_l = massa da solução do solo,

m_s = massa das partículas sólidas,

m_T = massa total da amostra.

A determinação da umidade em função do volume requer um processo mais complexo uma vez que a medição desse volume implica na não deformação da amostra. Para o cálculo do volume total V_T pode ser empregado o uso de anéis volumétricos idênticos àqueles utilizados para a medida da densidade do solo. A Equação 7 representa este método (REICHARDT; TIMM, 2012):

$$\Theta = \frac{V_l}{V_T} = \frac{m_u - m_s}{V_T} = \frac{m_l}{V_T} \quad (7)$$

em que:

Θ = umidade a base do volume,

V_l = volume ocupado pela água,

V_T = volume total da amostra,

m_u = massa da amostra úmida,

m_s = massa das partículas sólidas,

m_l = massa da solução do solo.

2.2.3.4 Fração gasosa do solo

No aspecto da parte gasosa, o volume de ar existente no solo ocupa aqueles poros nos quais não há água, e as atividades biológicas que ocorrem no solo fazem com que este ar possua uma parcela de CO₂ maior que a parcela de O₂. A Equação 8 determina a porosidade livre de água, que representa a diferença entre todo o espaço poroso do solo e aquele espaço ocupado por água, sendo a variação dinâmica do β chamada de aeração do solo. Um balanceamento adequado da fração gasosa do solo é importante ao desenvolvimento das culturas, uma vez que solos saturados não permitem a utilização do O₂ no desenvolvimento da cultura e os solos muito secos por sua vez não possuem H₂O para as plantas (REICHARDT; TIMM, 2012). Um solo ideal possui uma fração sólida que ocupa 50% do volume, e a porosidade é ocupada igualmente pela água e pelo ar, com $\beta = 25\%$ e $\Theta = 25\%$ (KIEHL, 1979).

$$\beta = \alpha - \Theta \quad m^3 * m^3 \quad (8)$$

em que:

β = porosidade livre de água,

α = espaço poroso do solo,

Θ = umidade a base de volume.

2.2.3.5 Propriedades térmicas do solo

As propriedades térmicas do solo relevantes ao estudo agronômico são o calor específico e a condutividade térmica do solo (REICHARDT; TIMM, 2012). O calor específico de uma substância é a quantidade de calor que deve ser fornecida para uma unidade de massa a fim de aumentar a sua temperatura em 1°C. Ele pode ser definido ao volume ou à pressão constante, quando este ou esta permanecem constantes após o acréscimo de 1°C (LIVI, 2015). No caso do solo, o calor específico é a quantidade de calor sensível cedida ou recebida por uma unidade de massa ou de volume de solo, quando a sua temperatura varia em 1°C (REICHARDT; TIMM, 2012). A Equação 9 define o calor específico do solo, desprezando a capacidade calorífica da fração gasosa:

$$C_s = (1 - \alpha) * C_p + \Theta * C_a \quad (9)$$

em que:

C_s = calor específico do solo, em cal*cm⁻³ * °C⁻¹,

α = espaço poroso do solo,

Θ = umidade a base de volume,

C_p = calor específico da fração sólida, em $\text{cal} \cdot \text{cm}^{-3} \cdot ^\circ\text{C}^{-1}$,

C_a = calor específico da fração sólida, em $1 \text{ cal} \cdot \text{cm}^{-3} \cdot ^\circ\text{C}^{-1}$.

Já a condutividade térmica é uma propriedade que indica a capacidade do material em conduzir calor, sendo representada de maneira geral pela Equação 10 de Fourier. Partindo desta equação a condutividade térmica depende da composição da fração sólida, da umidade e da densidade do solo (REICHARDT; TIMM, 2012). Desta forma, a densidade de fluxo de calor no solo é proporcional ao gradiente de temperatura dT/dx , como mostra a Equação 11 (LIVI, 2015).

$$\vec{q} = -K * \vec{\nabla}T \quad (10)$$

em que:

$\vec{q}$ = densidade de fluxo de calor,

$\vec{\nabla}T$ = gradiente de temperatura,

K = condutividade térmica do material.

$$q = -K * \frac{dT}{dx} \quad (11)$$

em que:

q = densidade de fluxo de calor no solo,

$\frac{dT}{dx}$ = gradiente de temperatura,

K = condutividade térmica do material.

2.2.4 Movimento da água no solo

Nesta seção serão apresentadas as principais interações que compõem a dinâmica do fluxo de água no solo, e que exercem influência no processo fenológico da planta.

2.2.4.1 Capacidade de Campo

O conceito de Capacidade de Campo (CC) foi introduzido por Veihmeyer & Hendrickson (1931, 1949) com o propósito de quantificar o limite máximo no qual o solo pode reter água em seus poros, após a drenagem do excesso ocorrer causando o decréscimo acentuado da taxa de movimento descendente. Desta forma o solo funcionaria como um reservatório de água

para as plantas, mesmo estando aberto para a atmosfera e para os horizontes mais profundos do perfil. Para fins práticos, este conceito é válido desde que não seja universalizado para todos os tipos de solo (AGUIAR NETTO; NACIF; REZENDE, 1999; REICHARDT, 1988), uma vez que a determinação da CC torna-se subjetiva diante do fato de que o processo de redistribuição da água no solo é contínuo, sem apresentar interrupções abruptas ou níveis estáticos (REICHARDT, 1975).

2.2.4.2 Ponto de Murcha Permanente

O Ponto de Murcha Permanente (PMP) é o volume mínimo de água no solo no qual as plantas experimentam perdas de turgescência das folhas, sem possibilidade de recuperação mesmo se colocadas em ambiente saturado, o que representa a condição de umidade do solo mínima para o seu desenvolvimento (BRIGGS; SHANTZ, 1912 apud CARLESSO, 1995). O PMP é uma grandeza física do solo, entretanto ele pode variar com a espécie e o estado fenológico da planta e também devido ao histórico de estresse hídrico e condições ambientais (SLATYER, 1957 apud CARLESSO, 1995); (ROMANO; SANTINI, 2002). A determinação do PMP para um tipo de solo é realizada em laboratório através das câmaras de Richards ou utilizando um psicrômetro. Geralmente é considerado o teor de água retida no potencial mátrico de aproximadamente -1,5 Mega Pascal (MPa) (HILLEL, 1980 apud ROMANO; SANTINI, 2002), porém há plantas que podem experimentar murcha permanente a potenciais entre -0,8 MPa e -3,0 MPa (ROMANO; SANTINI, 2002).

2.2.4.3 Ponto de Depleção Crítico

O Ponto de Depleção Crítico (PDC) é um parâmetro situado entre a CC e o PMP que estabelece o nível mínimo de umidade do solo no qual não haverá estresse hídrico à planta mediante a quantidade de água consumida pela evapotranspiração. Este parâmetro é representado por um coeficiente, com variação entre 0 e 1, sendo menor com o aumento da demanda evaporativa (ALBUQUERQUE, 2007).

2.2.4.4 Água Total Disponível

O volume de Água Total Disponível (ATD) no solo é objeto de controvérsia entre os pesquisadores que se propuseram a conceituá-lo, sobretudo pela ausência de uma definição física para o conceito. Como já dito anteriormente, Veihmeyer & Hendrickson (1949) propuseram que

a ATD é uniforme entre os limites de CC e PMP. Já Richards & Waldleigh (1952) afirmaram que a ATD decresce linearmente conforme há a redução da umidade do solo. Outras escolas dividiram a ATD em dois intervalos, denominados: volume de Água Facilmente Disponível, e volume de Água Decrescentemente Disponível, tendo como elemento de divisão entre estes dois limites o PDC (REICHARDT; TIMM, 2012).

2.2.4.5 Água Facilmente Disponível

Entende-se por volume de Água Facilmente Disponível (AFD) no solo aquela porção de água compreendida entre os limites da CC e o PDC consumida pela planta entre dois períodos de irrigação sucessivos, nos quais não há perda no rendimento da cultura. (FRIZZONE, 2017). O diagrama apresentado na Figura 3 ilustra a relação entre os parâmetros descritos dentro do espectro de um solo seco até a sua saturação. Os valores destes parâmetros variam conforme o tipo de solo e a demanda evaporativa diária da cultura.

2.2.4.6 Condutividade Hidráulica do Solo

É o parâmetro que reflete a rapidez com que um determinado tipo de solo conduz a água nele infiltrada, sendo função da umidade do solo e atingindo o seu valor máximo na saturação. As equações de Darcy-Buckingham (1907) e Richards (1931), quantifica o movimento de água no solo por meio da densidade do fluxo, do gradiente de potencial total da água e da relação funcional com a umidade do solo e com a equação da continuidade (CARVALHO, 2002).

2.2.4.7 Curva de Retenção de Água

Um dos parâmetros físico-hídricos do solo relacionado ao armazenamento de água é a Curva de Retenção da Água (CRA). Ela determina a relação entre o potencial mátrico e a umidade do solo (NASCIMENTO *et al.*, 2016). A CRA permite ao agricultor, ou ao sistema, determinar o volume e o momento adequados de irrigação para o melhor desempenho da cultura. Uma vez que a CRA permite o estudo do balanceamento hídrico, a infiltração e a dinâmica da água no solo, ela permite também a obtenção dos valores de umidade correspondentes à CC e ao PMP do solo (BARRETO *et al.*, 2011).

Os parâmetros e propriedades mencionados nesta seção apresentam uma relação direta ou indireta com a fenologia dos vegetais e também com o manejo da irrigação. O desenvolvimento adequado de uma determinada cultura agrícola passa, necessariamente, pela determi-

nação das propriedades físico-hídricas do solo, o perfil de evapotranspiração e as variáveis climáticas da região (REICHARDT; TIMM, 2012). Estas propriedades e parâmetros também são consumidos, na forma de variáveis, por diversos algoritmos de Inteligência Artificial nos processos que buscam a otimização dos recursos naturais utilizados na agricultura e na irrigação, visando práticas sustentáveis neste domínio (TIAN; ZHANG, 2020; PETKOVI *et al.*, 2020).

Figura 3 – Parâmetros físico-hídricos do solo

Fonte: Autor "adaptado de "Giddings, 2014

2.3 INTELIGÊNCIA ARTIFICIAL

O conceito de Inteligência Artificial (IA) é objeto de várias definições por autores renomados dentro deste domínio. Para Winston (1977) IA é o estudo das ideias que permitem habilitar os computadores a fazerem coisas que tornam as pessoas inteligentes. Segundo Nils-son (1986) a IA é o campo de conhecimentos no qual se estudam sistemas capazes de reproduzir algumas das atividades mentais dos seres humanos. Charniak e McDermott (1985) entendem a IA como o estudo das faculdades mentais por meio do uso de modelos computacionais. Xing, Giger e Min (2021) avança neste propósito elencando tarefas realizadas pela IA como a percepção visual, o reconhecimento de fala, a tomada de decisão e a tradução entre idiomas.

Para Mansi, Passerini e Comaniciu (2020), Eremia, Liu e Edris (2016) e Kayakutlu e Mercier-Laurent (2017) a IA é uma tecnologia central, desenvolvida como técnica complementar aos métodos tradicionais que são baseados em fundamentos matemáticos rigorosos, utilizada para resolver problemas do cotidiano humano usando o conhecimento e experiência que se aplicam nele, por meio da transferência deste conhecimento entre computadores a fim de

criar raciocínio computacional. Visão semelhante é proposta por Jimenez *et al.* (2018) quando afirma que a IA é o ramo da ciência que estuda como inferir comportamento e raciocínio humanos nas máquinas. Esta última definição apresenta-se como a mais adequada ao propósito deste trabalho.

Inicialmente a IA foi desenvolvida por meio da construção de algoritmos para resolver tarefas como jogos ou demonstração de teoremas e na solução de problemas por meio do raciocínio sobre a relação entre os objetos físicos do cotidiano (RICH; KNIGHT, 1994). Posteriormente, a IA permitiu que máquinas com algum recurso computacional realizasse atividades mentais do ser humano por meio de rotinas não necessariamente algorítmicas (NASCIMENTO; YONEYAMA, 1999). A IA avançou para representações sensoriais como visão, fala, tato, audição, compreensão da linguagem natural, raciocínio dedutivo, memória, diagnósticos médicos, análises químicas, permitindo ao ser humano delegar às máquinas atividades complexas, insalubres ou inseguras, proporcionando eficiência, precisão, estabilidade e ganho de escala nos resultados destas atividades (NASCIMENTO; YONEYAMA, 1999; RICH; KNIGHT, 1994; JIMENEZ *et al.*, 2018). Informações adicionais sobre o desempenho de algoritmos na resolução de problemas e estratégias de busca constam no anexo **B**.

2.3.1 Representação do conhecimento

A solução de problemas complexos por meio da IA requer uma grande quantidade de conhecimento e mecanismos para a sua manipulação. (RICH; KNIGHT, 1994). O conhecimento pode ser representado por meio de um sistema de símbolos, permitindo atividades como inferência e memorização, e empregando fórmulas matemáticas, textos e figuras, dentre outros (NASCIMENTO; YONEYAMA, 1999). No processo de abordagem de um problema do mundo por meio da representação do conhecimento, as seguintes propriedades deverão ser aplicadas: **Adequação representacional**. Capacidade de representar todos os tipos de conhecimento necessários àquele domínio; **Adequação inferencial**. Capacidade de derivar novas representações relativas a novos conhecimentos, inferidos a partir de conhecimentos antigos; **Eficácia inferencial**. Capacidade de orientar os mecanismos de inferência na direção de soluções mais promissoras; **Eficácia aquisitiva**. Capacidade de adquirir novas informações de maneira fácil, por exemplo, por meio de inserção direta na base de conhecimento (RICH; KNIGHT, 1994).

2.3.2 Agente lógico

A lógica é a parte da filosofia que trata das formas do pensamento (FERREIRA, 2001). Ela deve definir a semântica da linguagem. Já a semântica é o significado das sentenças e na lógica ela define a verdade de cada sentença com relação a um modelo possível (RUSSELL; NORVIG; DAVIS, 2010). Caracteriza-se um agente lógico pela sua capacidade de formar representações do mundo e através de um processo de inferência derivar novas representações para determinar as suas ações. O componente central de um agente lógico é a base de conhecimento, formada por um conjunto de sentenças expressas na linguagem de representação e que indica alguma afirmação sobre o domínio do problema. Um agente baseado em conhecimento se adapta às descrições no nível deste, com foco nas metas, para mudar o seu comportamento empregando abordagens declarativas ou procedurais (RUSSELL; NORVIG; DAVIS, 2010).

2.3.3 Representação do conhecimento por lógica

O uso de declarações lógicas para representar o conhecimento heurístico permite uma boa maneira de raciocínio sobre este conhecimento (RICH; KNIGHT, 1994). Uma opção para este tipo de representação é o emprego de regras **Se** <condição> **Então** <conclusão> em que as condições deverão ser satisfeitas para que a conclusão seja provada (NASCIMENTO; YONEYAMA, 1999). Dentre os modelos de lógica empregados nas técnicas de IA há: **Lógica Proposicional** que é uma linguagem declarativa com a semântica baseada em uma relação verdade entre sentenças e mundo possíveis; **Lógica de Predicados** que permite o raciocínio sobre os relacionamentos entre os objetos do mundo, expressando fatos sobre alguns ou todos estes objetos; e a **Lógica Fuzzy** que oferece uma alternativa aos fundamentos matemáticos clássicos e à teoria dos conjuntos para representar proposições, que tomam uma definição subjetiva quanto à sua verdade, por meio da pertinência a um determinado conjunto (RICH; KNIGHT, 1994; RUSSELL; NORVIG; DAVIS, 2010). Quando há uma indeterminação nas sentenças de um determinado domínio, emprega-se o raciocínio aproximado para extrair conclusões a partir destas sentenças, reescrevendo-as sob a forma de variáveis linguísticas com atributos, ou proposições fuzzy (BARROS; BASSANEZI, 2006). A Tabela 2 apresenta as principais características das linguagens lógicas quanto ao compromisso ontológico e epistemológico.

Tabela 2 – Características das linguagens lógicas

Linguagem	Compromisso Ontológico	Compromisso Epistemológico
L. Proposicional	Fatos	Verdade / Falso / Desconhecido
L.P. Ordem	Fatos, objetos, relações	Verdade / Falso / Desconhecido
L. Fuzzy	Fatos com grau de pertinência $E[0,1]$	Valor de intervalo conhecido

Fonte: Autor "adaptado de "Russell, Norvig e Davis, 2010

2.3.4 Controladores baseados em conhecimento

Nesta seção são abordados os modelos de controle baseados em conhecimento, empregando sistemas de inferência por regras de produção e lógica fuzzy.

2.3.4.1 Inferência por regras de produção

A arquitetura geral de um sistema baseado em conhecimento por regras de produção é composta conforme a Figura 4. Neste modelo há uma base de conhecimento, na qual as regras do sistema estão armazenadas; um base de dados responsável por armazenar as informações sobre o ambiente (planta) controlado; e uma máquina de inferência que é responsável pela dedução das ações baseada na análise das duas bases mencionadas. As regras da base de conhecimento são escritas sob o conceito **Se** <condição> **Então** <ação> e têm como origem o conhecimento do operador humano, às vezes, desprovido de um modelo matemático, mas com uma experiência heurística capaz de estabelecer regras de controle adequadas ao sistema (NASCIMENTO; YONEYAMA, 1999).

Figura 4 – Arquitetura geral do sistema baseado em conhecimento

Fonte: Autor "adaptado de "Nascimento e Yoneyama, 1999

A Figura 5 ilustra a aplicação de um sistema baseado em regras de produção aplicado a um controlador Proporcional Integral Derivativo (PID) para a sintonização apurada da Constante de Ganho Proporcional (K_p), Constante de Ganho Integral (K_i), Constante de Ganho Derivativo (K_d). Observa-se que o controlador já foi sintonizado inicialmente empregando o método Ziegler-Nichols e regras baseadas na heurística do operador humano possibilitam o ajuste das constantes a fim de minimizar, por exemplo, os picos de sinal de sobrepasso ou subpasso da variável de controle do processo (NASCIMENTO; YONEYAMA, 1999).

Figura 5 – Regras de produção aplicadas a um controlador PID

Fonte: Autor "adaptado de "Nascimento e Yoneyama, 1999

2.3.4.2 Inferência por lógica fuzzy

Existem grandezas no mundo que não podem ser modeladas de maneira exata. Um exemplo geral dessas grandezas é a estatura do ser humano. Não há como afirmar que um indivíduo é alto ou baixo de maneira direta, uma vez que o conceito sobre ser alto ou baixo é puramente subjetivo. Essa situação contrasta com a teoria clássica dos conjuntos na qual a pertinência é definida por um predicado booleano (sim ou não) (RICH; KNIGHT, 1994), conforme a Figura 6. Uma solução adequada a este problema é a aplicação do conjunto fuzzy no qual um objeto possui um grau de pertinência a um determinado conjunto, Figura 7, suavizando as imprecisões que a teoria clássica dos conjuntos impõe sobre algumas grandezas presentes no cotidiano (NASCIMENTO; YONEYAMA, 1999). A abordagem fuzzy sobre a pertinência de conjuntos permite definir sistemas de raciocínio baseados em técnicas de combinação e distribuição, possibilitando a aplicação em sistemas de controle dos mais diversos segmentos como transporte, máquinas, equipamentos e irrigação agrícola (RICH; KNIGHT, 1994).

Figura 6 – Pertinência clássica

Fonte: Autor "adaptado de "Rich e Knight, 1994

Figura 7 – Pertinência fuzzy

Fonte: Autor "adaptado de "Nascimento e Yoneyama, 1999

A teoria da lógica fuzzy, foi introduzida na década de 1960 por Lotfi Zadeh. Posteriormente Mamdani (1975) propôs a aplicação de lógica fuzzy na teoria de controle para a resolução de problemas. Hitachi (1986) aplicou a lógica fuzzy em um sistema de controle de metrô com uma significativa melhora na redução do tempo de parada dos trens e no consumo de energia. Atualmente diversas aplicações comerciais e industriais empregam algum modelo de inferência usando lógica fuzzy nas suas malhas de controle com uma resposta também crescente das pesquisas neste campo no meio acadêmico (MUNAKATA, 2008; ANDRADE; JACQUES, 2008).

O conceito principal da lógica fuzzy reside na modelagem dos estados de uma variável de um domínio qualquer por meio da aplicação de uma transição gradual e contínua representada por um grau de pertinência que varia entre 0 e 1, ao invés de uma mudança binária nítida e abrupta. Ela também permite a aplicação de alguns operadores e propriedades tal qual na lógica clássica, conforme ilustrado pela Tabela 3. A inferência em lógica fuzzy é baseada em regras de produção do tipo **SE** (A & B) **ENTÃO** C. Um conjunto de regras de inferência sobre as funções de pertinência estabelecidas permite modelar o comportamento da variável de um determinado domínio (MUNAKATA, 2008).

2.3.4.3 Operações com subconjuntos fuzzy

Sejam dois subconjuntos fuzzy A e B , de um conjunto clássico U , com funções de pertinência φ_A e φ_B respectivamente, pode-se afirmar que A é subconjunto fuzzy de B , $A \subset B$, se $\varphi_A(x) \leq \varphi_B(x) \forall x \in U$ (BARROS; BASSANEZI, 2006). Ainda segundo Barros e Bassanezi (2006), a Tabela 3 apresenta as principais propriedades entre subconjuntos fuzzy e a Figura 8, as principais operações, detalhadas a seguir:

- União.** É o subconjunto fuzzy de U cuja função de pertinência é dada por $\varphi_{(A \cup B)}(x) = \max\{\varphi_A(x), \varphi_B(x)\}, x \in U$;
- Intersecção.** É o subconjunto fuzzy de U cuja função de pertinência é dada por $\varphi_{(A \cap B)}(x) = \min\{\varphi_A(x), \varphi_B(x)\}, x \in U$;
- Complementar.** É o subconjunto fuzzy A' de U cuja função de pertinência é dada por $\varphi_{A'}(x) = 1 - \varphi_A(x), x \in U$;
- Igualdade.** Os subconjuntos fuzzy A e B de U são iguais se $\varphi_A(x) = \varphi_B(x)$ para todo $x \in U$.

Figura 8 – Propriedades dos conjuntos fuzzy

Fonte: Autor "adaptado de "Barros e Bassanezi, 2006

2.3.5 Método de inferência por lógica fuzzy

No aspecto dos métodos de inferência e controle utilizando lógica fuzzy, Sugeno (1985) propõe a classificação em dois grupos (ANDRADE; JACQUES, 2008):

Tabela 3 – Propriedades das operações entre subconjuntos fuzzy

$A \cup B = B \cup A$	$A \cap (B \cup C) = (A \cap B) \cup (A \cap C)$
$A \cap B = B \cap A$	$A \cap \emptyset = \emptyset$
$A \cup (B \cap C) = (A \cup B) \cap C$	$A \cup \emptyset = A$
$A \cap (B \cup C) = (A \cap B) \cup (A \cap C)$	$A \cap U = A$
$A \cup A = A$	$A \cup U = U$
$A \cap A = A$	$(A \cup B)' = A' \cap B'$
$A \cup (B \cap C) = (A \cup B) \cap (A \cup C)$	$(A \cap B)' = A' \cup B'$

Fonte: Autor "adaptado de"Barros e Bassanezi, 2006

2.3.5.1 Método Mamdani

O método Mamdani baseia-se na composição de inferência max-min em que cada regra da base de conhecimento sofre a aplicação da t-norma $\wedge$ (mínimo) para o conectivo lógico **E**, e da t-conorma $\vee$ (máximo) para o conectivo **OU**, resultando na união entre as saídas de cada uma das regras (BARROS; BASSANEZI, 2006). Neste método, há a aplicação das funções de pertinência e de operadores de composição para a determinação da saída fuzzy do controlador. Um conjunto de regras construídas a partir do conhecimento de especialistas sobre o domínio do problema também é aplicado sobre as variáveis de entrada fuzzificadas produzindo saídas fuzzy para cada regra e tornando o método mais intuitivo. A saída da variável final para o sistema dá-se por meio de um dos seguintes processos de defuzzificação conforme visto na Figura 9 (MATHWORKS, 2019):

- Centroide. Caracterizada pelo ponto central da área sob a curva da função de pertinência da variável de saída;
- Bissetriz. É a reta vertical que separa a área sob a curva da função de pertinência de saída em duas subáreas iguais;
- Máximos, médios e mínimos. Determina a saída por meio da intersecção com o valor máximo, médio ou mínimo do topo (platô) da curva da função de pertinência de saída.

2.3.5.2 Método Sugeno

Proposto por Sugeno e Takagi (1983), este método é uma simplificação do método Mamdani em que a saída de cada regra não será um conjunto fuzzy. Cada regra produz duas saídas, uma representando um valor constante ou uma função linear da variável de entrada; e uma segunda que representa o peso de implicação desta regra na saída, tendo na saída final a razão

Figura 9 – Processos de defuzzificação

Fonte: Autor "adaptado de "Mathworks, 2019

média entre o produto de todas as regras de saída pelo seu peso, Equação 12, dispensando a etapa de defuzzificação (ANDRADE; JACQUES, 2008; MATHWORKS, 2019).

$$V_{out} = \frac{\sum_{k=1}^N W_i * Z_i}{\sum_{k=1}^N W_i} \quad (12)$$

em que:

V_{out} = variável de saída,

W_i = peso da regra i ,

Z_i = valor da regra i .

A definição do método de inferência a ser empregado em um sistema por lógica fuzzy dependerá de características particulares do domínio do problema. A Tabela 4 apresenta algumas vantagens dos métodos Mamdani e Sugeno (MATHWORKS, 2019).

Tabela 4 – Características dos métodos de inferência

Mamdani	Sugeno
Intuitivo	Eficiente computacionalmente
Aceitação fácil	Bom desempenho com técnicas lineares (PID), de otimização e adaptativas
Mais adequado à contribuição especialista humana	Garantia de uma superfície de saída contínua
Base de regras com interpretação simples	Adequado para análise matemática

Fonte: Autor "adaptado de "Mathworks, 2019

2.3.6 Controlador fuzzy

A estrutura de um controlador empregando lógica fuzzy é composta geralmente por sete blocos, Figura 10, em que um sinal de entrada geralmente numérico e representando alguma grandeza de interesse do domínio da aplicação é convertido para variáveis fuzzy (fuzzificador). Este processo de conversão da variável de entrada para um conjunto fuzzy consiste na associação desta informação à variáveis linguísticas ou grau de pertinência, conforme visto na seção 2.3.4.2. Uma vez convertido, o sinal é submetido a um processo de inferência mediante a avaliação sob cada uma das regras existentes na base de conhecimento, sendo então convertido em um valor numérico de uma grandeza de saída (defuzzificador) (NASCIMENTO; YONEYAMA, 1999). Os detalhes desta estrutura, de acordo com Barros e Bassanezi (2006), são:

- a) **Fuzzificador.** Estágio no qual as variáveis de entrada do sistema são modeladas por meio de funções de pertinência construídas a partir do conhecimento de especialistas naquele domínio;
- b) **Base de conhecimento.** Composto pelas proposições fuzzy descritas por meio de regras de produção do tipo **SE A ENTÃO B** refletindo as heurísticas dos especialistas;
- c) **Máquina de inferência.** Neste módulo as proposições fuzzy da base de regras são interpretadas matematicamente a fim de estabelecer relações entre elas e possibilitar a extração de uma saída fuzzy para cada variável fuzzy de entrada;
- d) **Defuzzificador.** É a fase final do controlador na qual há a conversão do conjunto de variáveis fuzzy, produzidas na máquina de inferência, em uma única variável numérica que será a saída do controlador.

Dentre as vantagens do uso de controladores empregando lógica fuzzy há a possibilidade da incorporação do conhecimento heurístico do operador ou especialista humano e a aplicabilidade em sistemas dinâmicos não lineares. Por outro lado, este modelo de controlador é ausente de diretrizes precisas o que implica em eventuais instabilidades e possíveis inconsistências nas regras de inferência (NASCIMENTO; YONEYAMA, 1999).

Existem outras técnicas de IA que também são empregadas na resolução de problemas do mundo real, inclusive no domínio da irrigação agrícola, porém necessitando de uma base de dados (dataset) ao seu processo de treinamento e testes. Este trabalho optou pelo uso do sistema de inferência fuzzy diante da inexistência de uma base de dados inicial que representasse os parâmetros propostos na metodologia e que pudesse ser utilizada nos processos de treinamento e teste de outras técnicas.

Figura 10 – Controlador fuzzy genérico

Fonte: Autor "adaptado de "Gomide, Gudwin e Tanscheit, 1988

2.4 AGRICULTURA DE PRECISÃO

Para atender à demanda global por alimentação, os modelos tradicionais de agricultura nos países desenvolvidos têm como suporte o uso massivo de fertilizantes e outros produtos químicos, bem como a aplicação de irrigação desprovida de controles mais efetivos. Essas práticas, no entanto, causam impactos negativos no meio ambiente como a salinização e erosão dos solos, o declínio da fertilidade do solo e a contaminação das águas pelo uso excessivo de defensivos agrícolas. Uma abordagem orientada a modificar esse modelo de manejo agrícola, implementando novas técnicas a fim de manter a produção de alimentos em larga escala e preservar os recursos naturais nos quais as culturas estão inseridas, faz-se necessário frente ao desafio da garantia da segurança alimentar mundial (LIAGHAT; BALASUNDRAM, 2010).

A Agricultura de Precisão (AP) é uma tecnologia agrícola, baseada em informação, destinada à aplicação espacial de insumos agrícolas, de maneira diferenciada quanto ao local, ao tempo e à quantidade, visando a redução do uso destes insumos e o aumento do rendimento das culturas. Uma das vantagens da AP é o fato dela não se limitar a grandes produtores agrícolas. O uso de técnicas voltadas para a AP, por pequenos produtores agrícolas, têm se tornado cada vez mais comum dado o aumento da disponibilidade para aquisição de tecnologias e dispositivos de baixo custo como sensores e atuadores. Aplicações usando Sistema de Informação Geográfica (GIS), já estão disponíveis aos pequenos produtores agrícolas, tornando a tomada de decisão

nas etapas do cultivo, como o tipo de cultura apropriado à determinada área, muito mais robusta e segura, uma vez que elas são suportadas por um conjunto de informações atualizadas e confiáveis (MONDAL; BASU, 2009; JIMENEZ *et al.*, 2018).

No aspecto da sustentabilidade, o emprego de tecnologias da AP pode contribuir para a redução da emissão dos gases de efeito estufa. A redução da quantidade de adubo nitrogenado nos solos; a redução do consumo de combustível utilizado por máquinas agrícolas devido ao menor número de operações destas; e a consequente redução dos insumos empregados no preparo do solo são exemplos de medidas que colaboram de maneira direta e indireta com a redução das emissões dos gases de efeito estufa. Estas medidas, além de reduzir os impactos da mudança climática provocados pela agricultura, resultam na manutenção ou na melhora do rendimento das culturas, fato este essencial diante do desafio do aumento de produção agrícola para garantir a segurança alimentar dos seres humanos nas próximas décadas (BALAFOUTIS *et al.*, 2017).

A AP utiliza técnicas de Aprendizado de Máquina (ML) e mineração de dados para analisar e extrair valor de grandes volumes de dados oriundos de dispositivos IoT tais como as Redes de Sensores sem Fio, e sistemas de Geo referência, como o Sistema de Posicionamento Global (GPS). Desta forma, ela visa evitar a aplicação da mesma rotina de gestão para uma determinada cultura, otimizando assim o processo agrícola. Na AP, o uso da variabilidade espacial e temporal é comum e geralmente empregado nas etapas de semeadura, adubação, controle de pragas e ervas daninhas, colheita e na irrigação, dentre outras. Por sua vez, as variáveis do solo que determinam o desempenho das culturas e o impacto destas no meio ambiente, também variam no espaço e no tempo, e por esta razão empregar um manejo regionalizado do solo e da cultura torna-se parte integrante às práticas da AP (JIMENEZ *et al.*, 2018; JAWAD *et al.*, 2017; AUERNHAMMER, 2001; CORÁ *et al.*, 2003).

2.4.1 Internet das Coisas

Determinar uma definição única para o paradigma da Internet das Coisas (IoT), torna-se difícil devido ao viés que cada definição traz ao considerar mais relevantes aqueles ativos que fazem parte da entidade proponente (IOT IEEE, 2015). Mas há consenso em afirmar que a IoT é caracterizada como uma tecnologia disruptiva significativa deste século, ao evoluir o conceito de internet tradicional para sistemas embarcados, monitorados por sensores de baixo custo e interligados entre si, permitindo a aquisição de dados em larga escala e com uma característica granular que permita uma análise mais realística sobre o domínio sensorizado, possibilitando a

oferta de serviços e soluções cada vez mais personalizadas aos usuários. (DORRI; KANHERE; JURDAK, 2014).

Um dos dispositivos base da IoT é o de Identificação por Rádio Frequência (RFID) . Este conceito remonta à década de 1940, quando os países envolvidos na segunda guerra mundial utilizavam o radar para determinar a aproximação de aviões, mas ainda sem conseguir distinguir se a aeronave era inimiga ou aliada. Os britânicos, por meio de um projeto secreto denominado Identificação de Inimigo ou Amigo e liderados por Sir Robert Alexander Watson-Watt, evoluíram o radar clássico para um modelo em que, quando as aeronaves aliadas detectavam o sinal emitido pelas antenas dos radares, havia a emissão de um sinal de identificação aos operadores de radar em solo, por um transmissor instalado nelas (RFID JOURNAL, 2005).

Posteriormente, na década de 1970, dispositivos de radiofrequência foram aperfeiçoados e serviram para a localização e o rastreamento de objetos como material nuclear e animais como o gado, e seguiu-se assim avançando para a identificação de veículos em praças de pedágio, de produtos em lojas e supermercados e em diversos setores da sociedade. Uma diferença crucial entre o RFID e a identificação por código de barras, por exemplo, reside no fato de que um produto que contém um código de barras necessita estar ao alcance do leitor para ser identificado, ao passo que etiquetas RFID permitem a identificação remota do objeto em distâncias que variam entre 0,15 e 7 metros e sem a necessidade da observação direta da etiqueta (IOT IEEE, 2015).

Situar a IoT a partir de sistemas ciberfísicos e Redes de Sensores sem Fio, aqui ilustrado pela Figura 11, que possam abranger os domínios da captação de imagens, audição, tato, identificação de objetos, medição de grandezas físicas diversas e a consequente atuação sobre estes domínios ou grandezas através de dispositivos, ou até mesmo materiais ativos, a custos, tamanhos e consumo de energia cada vez menores, apresenta-se como uma visão neutra, quanto à qualquer viés, para definir o conceito da IoT. Atualmente os mercados de aplicação de sistemas baseados em IoT são vastos possibilitando aos seus diversos atores ampliarem os seus serviços, com características cada vez mais customizadas, conforme visto na Figura 12 (IOT IEEE, 2015; YANG *et al.*, 2016).

Porém, um aspecto relevante observado com a granularidade e o volume dos dados coletados pelos sensores IoT diz respeito à privacidade das informações e o seu uso. Apesar da existência de alguns métodos de controle do fluxo de informação sensível através de autenticações, por exemplo, a segurança destas informações ainda não é consenso entre os grandes atores deste cenário uma vez que o emprego destas técnicas ainda apresenta custos elevados e também pelo fato de que não há um entendimento claro sobre a dimensão do benefício proposto pelos

Figura 11 – Arquitetura IoT genérica

Fonte: Autor "adaptado de "IoT IEEE, 2015

serviços baseados em IoT versus o risco de exposição de informações sensíveis dos usuários e/ou sistemas (DORRI; KANHERE; JURDAK, 2014).

Figura 12 – Principais mercados de aplicação da IoT

Fonte: Autor "adaptado de "IoT IEEE, 2015

2.4.2 Redes de Sensores sem Fio

As Redes de Sensores sem Fio (WSNs) são estruturas eletroeletrônicas pequenas, baratas e de baixo consumo de energia, constituídas por sensores, atuadores, concentradores e GPS, dentre outros dispositivos (AQUINO-SANTOS, R.L *et al.*, 2011). A arquitetura básica de uma WSN consiste na instalação espacial destes dispositivos para coletar dados de um fenômeno em particular, a realização de um pré-processamento local destes dados ainda pelo dispositivo, e a transmissão deles por meio de ondas de rádio, utilizando algum protocolo de comunicação, para um outro dispositivo denominado concentrador ou "gateway", e tendo como destino uma estação de processamento para análise e disseminação (AKYILDIZ; VURAN, 2010; AQUINO-SANTOS, R.L *et al.*, 2011).

A definição da arquitetura e o consequente modelo de comunicação empregado em uma WSN passa necessariamente pelo entendimento sobre o tipo e o volume de dados que será trafegado nela. Há que se considerar, também, o tempo de ciclo destas transmissões e a distância entre os módulos interligados aos sensores e atuadores e o módulo concentrador ou "gateway"; o consumo de energia; o raio de alcance da comunicação; e a autonomia do sistema de alimentação elétrica (JAWAD *et al.*, 2017). Características como a escalabilidade e a autoconfiguração estimularam a difusão das WSNs, sendo elas reconhecidas como uma poderosa tecnologia para a coleta e processamento de dados no domínio da agricultura, permitindo a coleta e a análise de dados do campo agrícola em grande escala, em tempo real, a um custo baixo e com um bom desempenho (MIRHOSSEINI; BARANI; NEZAMABADI-POUR, 2017; CORA *et al.*, 2004; BORGIA, 2014). A Tabela 5 ilustra os principais protocolos e padrões de WSNs usados na agricultura.

No contexto da AP, as WSNs possibilitam o monitoramento dos parâmetros da cultura, tais como a umidade, a temperatura e os níveis de sódio e nitrogênio do solo, bem como a temperatura do ar e a luminosidade do ambiente no local de instalação do nó. Estas informações podem ser utilizadas como dados de entrada para softwares de modelagem visando a otimização do processo agrícola. O controle destes parâmetros permite a aplicação das quantidades exatas de insumos agrícolas como irrigação e fertilizantes, e também um acompanhamento mais preciso acerca do desenvolvimento da cultura (SAHOTA; KUMAR; A.KAMAL, 2011).

2.4.3 Medição da Umidade do Solo

Alguns métodos são utilizados para medir a umidade do solo. Dentre os mais importantes há os métodos de termogravimetria, Reflectometria no Domínio do Tempo (TDR) e os métodos eletromagnéticos baseados na medição da impedância (BIRCHER *et al.*, 2016). Um dos métodos de medição direta mais empregado é o termogravimétrico, que requer a remoção de amostras de solo para a determinação do teor de umidade em análise laboratorial. Este método não permite a repetibilidade da medição e, por se tratar de um método laboratorial, tem um consumo de tempo relevante. O modelo por TDR determina a permissividade dielétrica a partir do tempo de propagação de uma onda eletromagnética pulsada com frequência acima de 1 GHz gerada por eletrodos metálicos paralelos. Já as técnicas de reflectometria no domínio da capacitância e frequência oferecem uma excelente alternativa à técnica TDR devido ao menor custo, a possibilidade de aplicação a diversos tipos de solo e ao monitoramento contínuo (BIRCHER *et al.*, 2016; KIZITO *et al.*, 2008; ELLER; DENOTH, 1996).

Tabela 5 – Principais protocolos e padrões da WSN

Nome	Frequência de operação (MHz)	Raio de atuação metros	Aplicações	Características
ZigBee	860 a 2400	100	Supervisão de irrigação, gestão da qualidade da água e controle de fertilizantes	Baixo ciclo de trabalho, baixo consumo de energia
Bluetooth	2400	10	Medição de temperatura do ar, umidade do solo, comando de atuadores de fertilizantes, pesticidas e posição dos sprinklers de irrigação	baixo custo e ampla disponibilidade de aquisição, baixo consumo de energia
WiFi	2400	20 - 100	Transmissão de dados entre o gateway e a estação de processamento local	Suporta altas taxas e volumes de dados, consumo de energia elevado, ampla disponibilidade em smartphones e celulares
GPRS GSM	900 a 1800	Não determinado	Coleta de dados como temperatura e umidade do ar e do solo, iluminância do ambiente, e comandar sistemas de irrigação em áreas isoladas	Utiliza a infraestrutura da telefonia celular, grande área de abrangência
Long Range Radio - LoRa	860 - 915	5000	Transmissão de dados de estações de coleta remotas para o gateway	Baixo consumo de energia, taxas de transmissão de até 1Mbps
SigFox	860 - 915	10000	Coleta de dados de estações remotas, geolocalização de elementos agrícolas	Suporta baixo volume de dados, baixo consumo de energia

Fonte: Autor "adaptado de "Jawad *et al.*, 2017; Boulogeorgos, Diamantoulakis e K., 2016

A impedância no solo, seja ele homogêneo ou heterogêneo, varia em função do seu volume de água e esta relação é específica para cada tipo de solo. Desta forma o uso de sensores de medição de umidade baseado na variação da impedância pode ser empregado com sucesso na medição da umidade do solo no campo agrícola (BRILLANTE *et al.*, 2016, 2014). Assim, as técnicas indiretas de medição do conteúdo de água no solo são mais práticas que as técni-

cas de medição direta, pois permitem automatizar a coleta de dados, inclusive em tempo real (RIKA, 2019). Dentre as técnicas mais populares de medição da umidade do solo "in situ" está o emprego de sensores eletrônicos dos tipos capacitivo, resistivo e de reflectometria, uma vez que estes podem realizar medições contínuas com boa resolução para a maioria dos tipos de solos (BIRCHER *et al.*, 2016).

2.4.3.1 Sensor capacitivo de umidade do solo

Um capacitor é um componente eletroeletrônico, que energizado, armazena esta energia na forma de campo elétrico (Capacitância). O capacitor é constituído por duas superfícies metálicas isoladas por um meio ou material (dielétrico). Quando estas superfícies são atravessadas por uma corrente elétrica durante um tempo (constante de carga), há o acúmulo de cargas elétricas até que elas fiquem com módulo igual, mas com sentidos opostos. A capacitância de um capacitor de placas paralelas, Equação 13, é dependente de fatores geométricos como a área das placas e a distância de separação entre elas (HALLIDAY; RESNICK; WALKER, 1993).

$$C = \epsilon_0 * k * \frac{A}{d} \quad (13)$$

em que:

C = capacitância,

ϵ_0 = permissividade eletrostática do meio,

k = constante dielétrica do meio,

A = área das superfícies metálicas,

d = distância entre as superfícies metálicas.

Faraday (1837) percebeu que a capacitância também variava com a modificação do material introduzido entre as placas ou ao seu redor (HALLIDAY; RESNICK; WALKER, 1993) e, partindo deste princípio, a variação da umidade do solo em que um capacitor de placas paralelas está inserido influenciará no valor da sua capacitância permitindo estabelecer uma relação entre elas. Desta forma torna-se possível uma medição indireta do percentual de umidade daquela porção de solo na qual o capacitor está inserido (DAS, 2014).

Os sensores de umidade do solo capacitivo possuem um baixo custo de aquisição, interfaces de instalação simples e baixo consumo de potência elétrica, podendo ser alimentados a partir de células fotovoltaicas ou do canal de alimentação de microcontroladores (COSTA *et al.*, 2017). Apesar da relevante sensibilidade à temperatura e do campo de detecção pequeno, devido ao princípio de funcionamento baseado na mudança do meio dielétrico, os sensores

de umidade do solo capacitivo encontram boa aceitação por parte de pesquisadores diante da confiabilidade da sua resposta (KOJIMA *et al.*, 2016).

2.5 IRRIGAÇÃO

A irrigação é o processo de aplicação de água no solo visando o crescimento das culturas agrícolas, a revegetação de solos degradados e a manutenção de paisagens. Praticada em quase todos os países, em uma escala que vai desde a agricultura de subsistência até o uso comercial de grande porte, o processo de irrigação é determinado por uma combinação de fatores que incluem o clima, a disponibilidade do recurso hídrico, e os padrões de cultura e conhecimento técnico da região. No manejo agrícola, a irrigação aumenta a eficiência de uso de outros insumos, como os fertilizantes, e garante um volume adequado de água no solo disponível às plantas, principalmente em regiões com características de baixo volume de precipitação pluviométrica. Além disso, o processo de irrigação garante o rendimento da produção agrícola nos períodos de entressafra ou de secas esporádicas que a região venha a sofrer (OZDOGAN *et al.*, 2010; GAVALI; DHUS; VITEKAR, 2016; QUEIROZ; BOTREL; FRIZZONE, 2008).

Grande parte da produção mundial de alimentos é feita sob processos de irrigação. O desafio de produzir alimentos para atender a um aumento de demanda da ordem de 2 bilhões de pessoas, nos próximos 30 anos, faz com que os modelos de agricultura irrigada sejam reavaliados sob uma perspectiva de otimização do uso da água. Isto porque a agricultura concorre com a população no consumo da água doce e diante da inexistência de novas fontes deste recurso, portanto, torna-se necessário o desenvolvimento de técnicas que otimizem o consumo de água irrigada, provendo o volume adequado à cada tipo de cultura e ao tempo certo. Desta forma, o rendimento da cultura será preservado e o desperdício de água, prática comum nos modelos atuais de irrigação, será minimizado, fato este que contribuirá para o aumento da disponibilidade de água para o consumo humano futuro (WARD; PULIDO-VELAZQUEZ, 2008).

O clima desempenha um papel importante no processo de irrigação agrícola, determinando a disponibilidade de umidade natural (precipitação), a demanda do plantio (evapotranspiração) e o cronograma das colheitas. Em regiões com clima predominantemente úmido, a irrigação costuma ser utilizada para atender à demandas excessivas de culturas, cujo ciclo de crescimento não possa ser atendido pela precipitação pluviométrica. Já em climas áridos ou semiáridos, os processos de irrigação costumam ser contínuos visando assegurar o rendimento da cultura. Porém, apesar do clima ser um importante parâmetro no processo de irrigação, é a disponibilidade da água na região que de fato determina a sua existência e sustentabilidade (OZDOGAN *et al.*, 2010).

O volume de irrigação geralmente é determinado utilizando o método de Penman-Monteith, que se aproxima da evapotranspiração líquida (ET), dada a temperatura média diária, a velocidade do vento, a umidade relativa e a radiação solar, conforme definida pela FAO, no documento FAO 56 (ALLEN *et al.*, 1998). Entretanto, este modelo apresenta uma resposta unitária de irrigação para toda a região, e as diferenciações de volume irrigado em função da variação espacial de cada parcela do solo fica sob o critério do profissional de agricultura, de acordo com o seu conhecimento sobre aquela determinada cultura (GOLDSTEIN *et al.*, 2018)).

A seleção do método de irrigação adequado requer um estudo detalhado das condições apresentadas pela cultura, solo e topografia sob risco de ineficiência do sistema, prejuízos ao agricultor ou até a degradação dos recursos naturais (ALBUQUERQUE; DURÃES, 2008). Ainda segundo Albuquerque e Durães (2008), dentre os principais modelos de irrigação, há:

- a) Superfície. Neste modelo, a água é distribuída na superfície do solo por meio da ação da força da gravidade. É um método de baixo custo operacional e requer equipamentos simples;
- b) Aspersão. Neste método, a água irrigada é lançada ao ar e precipita sobre a plantação, conseguindo uma distribuição mais uniforme quando comparada à irrigação de superfície. Permite a instalação em diversos tipos de topografia e a automação do sistema. Dentre as variantes da irrigação por aspersão, há o tipo convencional, o autopropelido e o pivô central;
- c) Localizada. Aqui apenas uma fração do sistema radicular da planta é irrigada por meio de gotejadores, reduzindo o consumo de água. É possível automatizar todo o processo, porém o custo de implantação é elevado em comparação aos outros modelos descritos. Uma variante deste método é a irrigação subsuperficial em que os elementos gotejadores são enterrados ficando mais próximos do sistema radicular da planta e desobstruindo as linhas laterais da superfície do solo.

No processo de irrigação agrícola, apenas uma porção da água distribuída é absorvida pela planta. O restante é perdido no processo de lixiviação, evaporação ou escoamento, dependendo da técnica e da gestão do sistema de irrigação (DÖLL, 2002). Os sistemas de irrigação são importantes na agricultura devido à necessidade de uma operação eficiente, sobretudo devido aos impactos na disponibilidade de água doce causados pela mudança climática (IEEE CONFERENCE ON QUALITY MANAGEMENT... , 2016).

Sistemas de irrigação sob demanda apresentam algumas características que podem resultar em ineficiência operacional, desperdício de água e de nutrientes. Diante disto o sistema de irrigação deve ser capaz de avaliar a demanda de água em relação à disponibilidade real de recursos hídricos e à capacidade de transporte deste. Ele também deve considerar as caracte-

rísticas e os parâmetros do solo, da cultura e da área irrigada para determinar o volume real de água, o momento e o tempo adequado para realizar a irrigação (COPPOLA *et al.*, 2019).

Neste contexto a AP pode ser empregada no processo de irrigação, transformando-o também em uma irrigação de precisão e determinando a exata quantidade de água necessária a manter a umidade do solo em um nível adequado à uma cultura específica, evitando fatores relacionados a irrigação que possam causar estresse na cultura e também proporcionando uma redução no consumo de água irrigada, através da redução do desperdício por excesso de irrigação (PATROO; THACOOREE; MUNGUR, 2019).

3 PLANEJAMENTO DA REVISÃO BIBLIOGRÁFICA SISTEMÁTICA

Com o objetivo de verificar o estado da arte acerca dos modelos de irrigação de precisão, foi conduzida uma Revisão Bibliográfica Sistemática (RBS) (KITCHENHAM, 2004) com as seguintes questões a serem respondidas: Q1) Quais são os principais parâmetros do solo controlados nos sistemas de irrigação de precisão? Q2) Quais são as principais técnicas de medição empregadas nos sistemas de irrigação de precisão? Q3) Quais são os algoritmos de IA mais utilizados nos sistemas de irrigação de precisão?

Os critérios de inclusão (I) e exclusão (E) definidos foram: (I) Apresentar o uso de sensores de medição da umidade do solo em tempo real e usar alguma técnica de IA para a análise dos dados e prescrição da irrigação; (I) Trabalhos publicados e disponíveis integralmente nas bases de dados científicas; (E) Não usar sensores de medição da umidade do solo.

As buscas foram realizadas nas seguintes bases de dados eletrônicas: Springer, ACSESS Digital Library, IEEE Digital Library, Elsevier Digital Library, Nature, Wiley Online Library, Inder Science, MDPI e Scielo. O agregador de bases de pesquisa selecionado foi o SCOPUS e a ferramenta selecionada para a análise dos resultados das buscas foi o VOSviewer (VOS). Também foi escolhido o Microsoft Excel (Excel) com uso do Visual Basic para Aplicações (VBA) para a realização de algumas etapas de filtragem e ordenação dos dados. A revisão foi realizada no período de maio/2019 a julho/2019, e atualizada em setembro/2020.

As “strings” de busca utilizadas nas bases citadas foram: a) (Artificial Intelligence AND Irrigation); b) (Artificial Intelligence AND Soil); c) (Artificial Intelligence AND Soil Moisture); d) (Artificial Intelligence AND Field Capacity); e) (Machine Learning AND Irrigation); f) (Machine Learning AND Soil); g) (Machine Learning AND Soil Moisture); h) (Machine Learning AND Field Capacity). Houve um total de 4.717 publicações retornadas, porém na análise dos resultados, através do VOS, verificou-se que não havia um nível de convergência das “strings” de busca adequado ao tema da pesquisa. Diante disto optou-se pela utilização de uma “string” de busca final que fosse a união de todas as outras mencionadas acima. Desta forma, a “string” padrão utilizada nas bases foi a seguinte: ((Artificial Intelligence OR Machine Learning) AND (Irrigation OR Soil OR Field Capacity OR Soil Moisture)). Com a aplicação desta “string” houve o retorno de 3.609 publicações.

A primeira etapa de filtragem dos documentos foi a data de publicação. Com base na agregação feita pelo VOS, para a “string” padrão de busca, percebeu-se que a maior parte dos documentos teve a sua publicação a partir de 2014. Desta forma, foi aplicado o filtro de data, tendo como critério de seleção as publicações de 2014 ou mais recentes. Este filtro retornou 2.728 resultados. A segunda etapa de filtragem das publicações foi com relação à

área de pesquisa. Neste filtro foram selecionadas as áreas: Computer Science, Agricultural and Biological Science, Engineering e Multidisciplinary. Após a aplicação deste filtro, 1.887 publicações foram selecionadas. Os próximos filtros foram a ocorrência de ao menos uma das palavras chave no título da publicação, e a duplicidade de publicações. Utilizando a ferramenta Excel, a quantidade de publicações foi reduzida, respectivamente, para 691 e 545 artigos.

A partir deste ponto, iniciou-se a leitura dos resumos "abstracts", das publicações. Neste processo foi atribuída uma nota de 0 a 5 referente ao nível de pertinência do assunto com o tema da pesquisa. As publicações com nota 0 ou 1 foram descartadas, enquanto as publicações com nota entre 2 e 3 foram selecionadas para a leitura da conclusão. Já as publicações com nota 4 foram selecionadas para a leitura da introdução e conclusão, ao passo que as publicações com nota 5 foram selecionadas para a leitura completa do documento. Todas as publicações com nota entre 2 e 4, após a leitura dos respectivos trechos descritos acima, sofreram uma reanálise afim de qualificá-las para uma leitura completa ou o seu descarte. Desta forma, o resultado desta etapa foi o seguinte: a) 5 publicações com nota igual a 5; b) 19 publicações com nota igual 4; c) 50 publicações com nota igual a 3 ou 2; d) 471 publicações com nota igual 1 ou 0.

Após a leitura, integral ou parcial, das publicações selecionadas, os principais parâmetros do solo utilizados na irrigação de precisão são a umidade do solo em mais de uma camada; a temperatura do solo, a umidade e a temperatura do ar, a velocidade do vento e a radiação solar. Também foi observado que os principais métodos empregados na medição destes parâmetros foram a medição da permeabilidade dielétrica, a captação de imagens e a espectroscopia por onda de rádio do solo; e a medição da temperatura, da radiação solar e da velocidade do vento através de sensores analógicos ou digitais.

No aspecto da IA, a principal técnica utilizada nas publicações lidas foi a predição para determinar a umidade do solo e o volume de precipitação em um tempo futuro. No uso desta técnica, foram utilizados os algoritmos de SVM, RF, FIS e RNA.

3.1 TRABALHOS RELACIONADOS

Nesta seção são apresentados os trabalhos realizados no âmbito acadêmico e que têm relevância ao propósito da pesquisa.

Jimenez *et al.* (2018) apresenta um modelo de predição de irrigação baseado em um sistema de inferência fuzzy, que propõe manter a umidade do solo próximo da CC e que tem como variáveis de entrada a radiação solar, por meio da medição da iluminância do ambiente, a umidade do solo e a temperatura do ar, e dados de uma estação meteorológica, que são fuzzificadas por meio de funções de pertinência, produzindo como saída o tempo de irrigação. A WSN é

constituída por dispositivos XBee e o processamento da máquina de inferência é realizado por meio de código Python rodando sob um módulo Raspberry.

Patroo, Thacooree e Mungur (2019) desenvolveu um modelo de irrigação baseado em IoT distribuído no campo e processamento de um algoritmo de ML em nuvem privada, com visualização por um aplicativo para "Smartphones". Dois algoritmos de regressão logística são empregados para a predição da probabilidade de chuva a partir de dados coletados por Sondas com um conjunto de sensores (Probes) espalhados no campo e também de uma estação meteorológica. O sistema envia uma notificação ao usuário caso haja uma probabilidade elevada de chuva e também disponibiliza os dados para visualização por meio do aplicativo Power BI. A WSN proposta é constituída de módulos Arduinos, sensores de umidade e temperatura do ar, umidade do solo e os dados são enviados por meio de um protocolo ZigBee.

Goap *et al.* (2018) construiu um sistema de irrigação baseado na predição da umidade do solo por um algoritmo de Regressão Vetor de Suporte (SVR) que utiliza como variáveis de entrada os dados de uma estação meteorológica e informações do ambiente da cultura como a temperatura e a umidade do ar, a radiação ultravioleta, a temperatura e a umidade do solo. O modelo faz uma predição da evolução da umidade do solo para dias futuros e diante de um limite estabelecido pelo usuário, comanda o sistema de irrigação para manter a umidade do solo dentro deste limite. A conexão entre os nós da WSN é feita por uma arquitetura ZigBee ao passo que a transmissão dos dados do concentrador "gateway" para o módulo de processamento, localizado em uma nuvem, é feito por Wi-Fi. O controle do sistema de irrigação é realizado por módulos Raspberry em conjunto com módulos Arduino.

Viani (2016) propôs um sistema de irrigação que utiliza três sensores de umidade do solo em profundidades diferentes como entrada para um sistema de inferência fuzzy. A base de conhecimento foi construída a partir da experiência de fazendeiros e são atualizadas ciclicamente diante dos resultados obtidos pelo modelo. Uma arquitetura Wi-Fi foi empregada na WSN e os atuadores de irrigação foram constituídos por válvulas solenóides de duas posições.

Suruthi *et al.* (2018) utilizou a umidade do solo, a temperatura e a umidade do ar, e a radiação solar como variáveis de entrada de um sistema de inferência fuzzy, sob o método Mamdani, para determinar o volume de irrigação. Li *et al.* (2019) realizou trabalho semelhante, adicionando a altura da planta e dados meteorológicos como variáveis de entrada na predição da irrigação de uma cultura de alfafa. Já Hendrawan *et al.* (2019), Ibrahim, Konditi e Musyoki (2018), Singhal, Medhashree e Singari (2019) e Alomar e Alazzam (2019) utilizaram dispositivos IoT como sensores de umidade e temperatura do ar, umidade do solo e iluminância como variáveis de entrada para um sistema de inferência fuzzy, tendo como saída o acionamento de uma bomba de irrigação.

Ceballos *et al.* (2015) apresentou uma comparação entre um sistema de irrigação para a cultura do pimentão baseado em inferência fuzzy tendo como entrada a temperatura e umidade do ar, e a umidade do solo; e um método tradicional de irrigação baseado na evapotranspiração por um tanque classe A. O sistema usou uma WSN baseada no protocolo ZigBee e os resultados obtidos no consumo de água irrigada foram melhores na comparação com o método tradicional.

Diante dos trabalhos elencados acima, torna-se evidente o movimento da comunidade científica no intuito de desenvolver métodos e boas práticas de otimização dos processos de irrigação visando a redução do consumo de água irrigada. Estes trabalhos, recentes, reforçam a proposta do uso de dispositivos IoT associados à WSNs e algoritmos de IA no intuito de atingir os objetivos de redução do consumo de água propostos. A Tabela 6 resume as principais características dos trabalhos mencionados que têm maior aderência ao proposto neste trabalho.

Tabela 6 – Trabalhos que utilizam IoT e IA aplicadas à otimização da irrigação

Ano	Autor	IA aplicada	Probe	Estação Meteorológica	Predição de Chuva
2015	(CEBALLOS <i>et al.</i> , 2015)	fuzzy	Temperatura do ar, temperatura do solo, umidade do ar, umidade do solo	Não	Não
2016	(VIANI, 2016)	fuzzy	Umidade do solo em 3 níveis, temperatura do solo	Não	Não
2018	(JIMENEZ <i>et al.</i> , 2018)	fuzzy	Luminosidade, temperatura do ar, temperatura do solo, umidade do ar, umidade do solo	Local	Não
2018	(GOAP <i>et al.</i> , 2018)	SVR	Radiação UV, temperatura do ar, temperatura do solo, umidade do ar, umidade do solo	Regional	Sim
2018	(SURUTHI <i>et al.</i> , 2018)	fuzzy	Temperatura e umidade do ar, radiação solar	Não	Não
2019	(PATROO; THACOREE; MUNGUR, 2019)	Regressão Logística	Temperatura do ar, temperatura do solo, umidade do ar, umidade do solo	Regional	Sim
2020	(SOUZA, 2020)	fuzzy	Umidade do solo em 3 níveis, temperatura do solo, umidade do ar, temperatura do ar, luminosidade, GPS	Local	Sim

Fonte: Autor

4 METODOLOGIA

Nesta seção é proposta uma metodologia para otimizar a irrigação agrícola usando como referencial de comparação o método de irrigação proposto nos artigos de irrigação e drenagem número 24 (DOORENBOS; PRUITT, 1977), e número 33 (STEDUTO *et al.*, 1979), do FAO. O modelo proposto realiza a prescrição da irrigação em um dia futuro (D+1), utilizando um sistema de irrigação composto por uma malha de sensores espalhados no campo de cultivo, um sistema de inferência fuzzy, e uma estação meteorológica local, também instalada no campo de cultivo. Uma outra plantação, com área igual e instalada ao lado, será irrigada por meio da prática tradicional, com a lâmina e o turno de irrigação conforme as regras previstas pelo FAO. As duas culturas serão irrigadas de maneira distintas, e desta forma pretende-se observar uma redução na quantidade de água irrigada na cultura controlada pelo sistema de inferência fuzzy, mantendo um mesmo rendimento da safra, quando comparado ao modelo FAO.

Por meio da coleta de dados dos sensores espalhados pelo campo e da estação meteorológica, o sistema de inferência fuzzy estima a lâmina de irrigação em D+1, enviando este valor ao sistema de irrigação que, por sua vez, comandará a bomba de irrigação até que a lâmina prescrita seja irrigada. No sistema tradicional há a determinação da lâmina e do turno de irrigação pelo FAO. Os sistemas operam em regimes independentes, inclusive sob o aspecto dos comandos de irrigação. Os dados do Probe e da estação meteorológica são usados no cálculo da ETo, pelo método Penman-Monteith (ALLEN *et al.*, 1998), e o percentual de umidade do solo é medido em dois ou três níveis por meio de sensores de umidade capacitivo previamente calibrados para o tipo de solo no qual há o cultivo, conforme visto no apêndice C. A Figura 13 detalha as etapas do FIS enquanto a Figura 14 ilustra a inserção do FIS no sistema de irrigação.

A decisão pelo emprego de um sistema de inferência fuzzy, diante de outras técnicas de IA mencionadas anteriormente, deu-se pela inexistência de um "dataset" com os parâmetros de ciclos anteriores das culturas, que poderia ser empregado nas etapas de treinamento e testes de modelos de regressão e redes neurais, por exemplo. Partindo deste princípio, espera-se que os dados obtidos com os ciclos de cultura dos experimentos propostos neste trabalho possam ser consumidos por algoritmos de IA, que utilizem treinamento supervisionado, em trabalhos futuros.

Figura 13 – Diagrama geral do modelo FIS

Fonte: Autor

Figura 14 – Detalhe do FIS inserido no sistema de irrigação

Fonte: Autor

Um dos aspectos relevantes à decisão pelo uso de uma estação meteorológica no local da plantação deu-se em função da variação percebida em parâmetros como a velocidade do vento e a precipitação pluviométrica mesmo em regiões próximas ao local dos experimentos. A Figura 15 ilustra a distância entre duas estações meteorológicas próximas aos experimentos

deste trabalho, com a diferença percebida em alguns parâmetros medidos por elas indicadas na Tabela 7.

Figura 15 – Distância entre duas estações meteorológicas em uma mesma região

Fonte: Autor "adaptado de "Weather Underground, 2020b

Tabela 7 – Variação de parâmetros no microclima

Data	FEI ISO-BER3	FEI ISO-BER3	Centro ISO-BERN3	Centro ISO-BERN3
	Velocidade do vento (km/h)	Precipitação efetiva (mm)	Velocidade do vento (km/h)	Precipitação efetiva (mm)
05/11/2019	10.4	12.7	1.7	17.5
11/11/2019	6.6	2.8	3.0	2.8
14/11/2019	11.3	16.8	1.5	16.3
27/11/2019	9.0	34.8	2.6	23.9
05/12/2019	9.7	10.9	1.5	0.5
09/12/2019	5.1	3.8	1.3	9.9
13/12/2019	4.7	3.8	1.8	0.3

Fonte: Autor "adaptado de "Weather Underground, 2019

A medição da umidade do solo em diferentes níveis de profundidade permite a observação do comportamento deste parâmetro ao longo de todo o desenvolvimento da zona radicular da planta e também de eventual percolação profunda de água servindo, inclusive, para ajustar as regras de inferência da base de conhecimento do FIS, ou alimentar bases de dados para ciclos de cultura futuros.

A determinação do tipo de cultura empregada bem como os elementos de composição dos modelos FIS e FAO, enfatizando as suas características, equações de modelagem, as variáveis de entrada e saída e as suas superfícies de controle são descritos a seguir.

4.1 DETERMINAÇÃO DO TIPO DE CULTURA

O pimentão, de nome científico *Capsicum Annum*, é uma hortaliça utilizada na culinária mundial e cultivada em diversos países. No Brasil, os estados de Minas Gerais e São Paulo são os principais produtores e em 2018 esta hortaliça respondeu por uma produção de 113,8 mil toneladas cultivadas em uma área de 2.560 ha no estado de São Paulo. O faturamento no período 2015-2017 foi de R\$ 574 milhões com um preço médio de R\$ 2,91/kg (SÃO PAULO, 2019). Ele é comercializado nas cores vermelho, amarelo e verde, conforme o grau de maturação na colheita, e é classificado pela sua forma, o seu diâmetro transversal, o seu comprimento e a sua massa líquida, conforme visto na Tabela 8 (LUENGO *et al.*, 1999). O ciclo médio da cultura é em torno de 90 dias, podendo ser cultivado em local protegido ou no campo. Diante da relevância destas informações decidiu-se pela utilização desta hortaliça nos experimentos deste trabalho.

Tabela 8 – Classificação do pimentão

Grupo	Classe	Comprimento
Quadrado	Graúdo	> 100mm
Quadrado	Médio	> 80mm e $\leq$ 100mm
Quadrado	Miúdo	> 50mm e $\leq$ 80mm
Cônico	Graúdo	> 120mm
Cônico	Médio	> 90mm e $\leq$ 120mm
Cônico	Miúdo	> 60mm e $\leq$ 90mm
Cordiforme	Graúdo	> 70mm
Cordiforme	Médio	> 50mm e $\leq$ 70mm
Cordiforme	Miúdo	> 40mm e $\leq$ 50mm

Fonte: Autor "adaptado de "Luengo *et al.*, 1999

4.2 REFERÊNCIA DE IRRIGAÇÃO FAO

O modelo da Organização para Agricultura e Alimentação (FAO) proposto como referência de comparação para o modelo de irrigação pelo Sistema de Inferência Fuzzy (FIS) utiliza o método do turno de irrigação com lâmina de irrigação fixa. Foi determinado um limite mínimo de dois turnos de irrigação. Desta forma, sempre que o turno de irrigação for menor que este limite, um evento de irrigação, equivalente à ETc do dia, será programado para o dia seguinte. Assim, consegue-se reduzir o risco de impacto negativo no desenvolvimento da cultura em casos de paradas não planejadas no sistema. As equações 14 e 15 apresentam o modelo

matemático proposto, enquanto que a Equação 16 demonstra o balanço hídrico empregado para determinar o turno de irrigação.

$$I_{trn} = \frac{AFD * z}{ET_c} \quad (14)$$

em que:

I_{trn} = turno de irrigação,

AFD = água facilmente disponível,

z = profundidade da zona radicular,

ET_c = evapotranspiração da cultura.

$$ARM = AFD * z \quad (15)$$

em que:

ARM = água total disponível à planta,

AFD = água facilmente disponível à planta,

z = profundidade da zona radicular.

$$ARM = ARM_{D-1} + I + C - ET_c \quad (16)$$

em que:

ARM = água total disponível à planta,

ARM_{D-1} = água total disponível à planta no dia anterior,

I = irrigação,

C = chuva efetiva,

ET_c = evapotranspiração da cultura.

4.3 MODELO DE IRRIGAÇÃO FIS

Este modelo de irrigação, visto na Figura 16, utiliza um sistema de inferência fuzzy, desenvolvido em linguagem de programação Python por meio da biblioteca SciKit fuzzy, que recebe cinco variáveis de entrada e produz uma variável de saída. As variáveis de entrada e saída são fuzzificadas em funções de pertinência triangulares, submetidas ao processo de inferência pelo método Mamdani mediante uma base de conhecimento composta por setenta e duas regras especialistas, e o processo de defuzzificação é realizado pelo método do centroide, enviando ao

sistema de irrigação um valor numérico referente à lâmina de irrigação que deverá ser aplicada à cultura.

O método do centroide é definido pelo cálculo do centro de área das inferências sobre cada variável, que leva em conta os seus valores médios. Este método apresenta uma desvantagem de negligenciar a sobreposição de áreas exatamente iguais no processo de inferência. Porém, optou-se pelo seu uso na etapa de defuzzificação uma vez que algumas variáveis de entrada, como a ETc ou o PDC por exemplo, utilizam valores médios na sua composição, como temperatura e umidade média do ar, ou ainda a média entre os sensores de umidade do solo.

A base de regras especialistas foi construída por meio de regras de produção do tipo: **SE** <Antecedente> **ENTÃO** <Consequente>, considerando aspectos do conhecimento existente na irrigação agrícola. As fontes deste conhecimento foram as recomendações do FAO, da Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (EMBRAPA) e de especialistas da área. A Tabela 9 apresenta estas regras observando-se a redução na sua quantidade devido a biblioteca SciKit Fuzzy permitir a utilização das propriedades associativas e distributivas na sua redação. Entretanto, tal recurso não impede que no processo de inferência cada regra seja desmembrada e tratada individualmente.

Figura 16 – Diagrama geral do FIS

Fonte: Autor

4.4 FUNÇÕES DE PERTINÊNCIA

Nesta seção são detalhadas as funções de pertinência empregadas no modelo FIS. A escolha pela função de pertinência triangular deu-se para evitar períodos constantes (platôs) no universo do discurso linguístico, caso das funções trapezoidais, uma vez que algumas variáveis de entrada como o DAP representam o desenvolvimento fenológico da planta, de maneira contí-

Tabela 9 – Regras da base de conhecimento do FIS

Regra	Descrição
1	SE PDC = mínimo ENTÃO Irrigação = elevado
2	SE PDC = elevado E (DAP = frutificação OU DAP = desenvolvimento) ENTÃO Irrigação = mínimo
3	SE PDC = baixo E (PC = baixo OU PC = ideal) E (CP = baixo) E (ETc = alto OU ETc = elevado) ENTÃO Irrigação = elevado
4	SE PDC = baixo E (PC = ideal OU PC = alto) E (CP = ideal OU CP = alto) E (ETc = alto OU ETc = ideal) ENTÃO Irrigação = ideal
5	SE PDC = baixo E PC = alto E (CP = ideal OU CP = alto OU CP = elevado) E (ETc = baixo OU ETc = ideal) ENTÃO Irrigação = baixo
6	SE PDC = ideal E (PC = baixo OU PDC = ideal) E (CP = baixo OU CP = ideal) E (ETc = elevado OU ETc = alto OU ETc = ideal) ENTÃO Irrigação = baixo
7	SE PDC = ideal E (PC = ideal OU PC alto) E (CP = ideal OU CP = alto OU CP = elevado) E (ETc = baixo OU ETc = ideal) ENTÃO Irrigação = baixo
8	SE PDC = alto E PC = baixo E (CP = baixo OU CP = ideal OU CP = alto) ENTÃO Irrigação = ideal
9	SE PDC = alto E (PC = ideal OU PC = alto) E (CP = baixo OU CP = ideal OU CP = alto OU CP = mínimo OU CP = elevado) ENTÃO Irrigação = mínimo
10	SE (DAP = emergência OU DAP = floração) E (PDC = baixo OU PDC = ideal) ENTÃO Irrigação = alto
11	SE PDC = elevado ENTÃO Irrigação = mínimo
12	SE PDC = ideal ENTÃO Irrigação = ideal
13	SE PDC = alto ENTÃO Irrigação = baixo
14	SE PDC = alto E DAP = frutificação ENTÃO Irrigação = baixo

Fonte: Autor

nua e diferenciada para cada dia do período. As variáveis linguísticas foram definidas em cinco espaços. Este número foi determinado pela quantidade de estádios fenológicos da cultura do pimentão que são: **emergência, desenvolvimento, floração, frutificação e maturação**. Desta forma, os espaços para as outras funções de pertinência foram definidos na seguinte ordem: **mínimo, baixo, ideal, alto e elevado**. A Tabela 10 apresenta as variáveis de entrada e saída do modelo FIS, que são detalhadas abaixo.

4.4.1 Dias Após Plantio - DAP

Esta variável de entrada representa o desenvolvimento fenológico da planta, compreendido entre o evento do plantio e o estágio final de maturação dos frutos. A Figura 17 apresenta as funções de pertinência da variável, e o universo de discurso são:

Tabela 10 – Descrição das variáveis do FIS

Variável	Tipo	Universo do discurso	Descrição
DAP	Entrada	emergência, desenvolvimento, floração, frutificação, maturação	Dias Após Plantio representa a quantidade de dias decorrentes desde o plantio das sementes e o seu desenvolvimento fenológico
PC	Entrada	mínimo, ideal, baixo, alto, elevado	Previsão de chuva para o dia seguinte (D+1)
CP	Entrada	mínimo, ideal, baixo, alto, elevado	Probabilidade da ocorrência da chuva prevista para o dia seguinte (D+1)
ETc	Entrada	mínimo, ideal, baixo, alto, elevado	Quantidade de água que a cultura consumiu no dia
PDC	Entrada	mínimo, ideal, baixo, alto, elevado	Representa a umidade do solo na zona radicular da planta.
PI	Saída	mínimo, ideal, baixo, alto, elevado	Lâmina de irrigação que deverá ser aplicada à plantação

Fonte: Autor

Figura 17 – Função de Pertinência - DAP

Fonte: Autor

- Emergência.** Representa o período do plantio das sementes até o início do estágio de desenvolvimento;
- Desenvolvimento.** Representa o desenvolvimento fenológico da planta, com um grau de pertinência maior após 60 dias do plantio (DAP 60);
- Floração.** Representa o estágio de crescimento das flores da cultura, com um grau de pertinência maior em DAP 75;
- Frutificação.** Neste estágio os primeiros frutos começarão a surgir e o processo permanecerá até próximo de DAP 135;

- e) **Maturação.** Este é o último estágio do ciclo fenológico da planta. Nele os frutos já estarão em condição de colheita como maduros. No caso dos experimentos, a colheita será ainda no estágio anterior, com os frutos ainda verdes.

A Tabela 11 apresenta a relação entre os valores numéricos e a pertinência para o universo de discurso fuzzy da variável DAP.

Tabela 11 – Variável Linguística DAP

Valores Linguísticos	Pertinência Mínima Inferior	Pertinência Máxima	Pertinência Mínima Superior
Emergência		DAP 0	DAP 30
Desenvolvimento	DAP 0	DAP 60	DAP 75
Floração	DAP 30	DAP 75	DAP 105
Frutificação	DAP 75	DAP 105	DAP 135
Maturação	DAP 105	DAP 135	

Fonte: Autor

Na modelagem desta variável houve uma dificuldade em estabelecer limites no universo de discurso das variáveis linguísticas dos estádios de floração e frutificação uma vez que no caso do pimentão eles coexistem durante um tempo. Desta forma a definição das funções de pertinência procurou considerar esta característica minimizando possíveis situações de estresse hídrico nos pés de pimentão por conta da irrigação aplicada, frente a ocorrência de dois estádios fenológicos diferentes e simultâneos.

4.4.2 Evapotranspiração da cultura - ETc

A variável ETc possui um universo de discurso linguístico estabelecido conforme a explicação no início desta seção. Adotou-se uma lâmina de água de 4 mm como valor **ideal** de ETc uma vez que este número representa o valor médio da ETo nos locais dos experimentos. A partir disso os outros valores linguísticas foram distribuídos de maneira equidistante, conforme visto na Figura 18

Figura 18 – Função de Pertinência - ETc

Fonte: Autor

A Tabela 12 apresenta a relação entre os valores numéricos e a pertinência para o universo de discurso fuzzy da variável ETc.

Tabela 12 – Variável Linguística ETc

Valores Linguís- ticos	Pertinência Mínima Inferior	Pertinência Máxima	Pertinência Mínima Superior
Mínimo		0 mm	2 mm
Baixo	0 mm	2 mm	4 mm
Ideal	2 mm	4 mm	6 mm
Alto	4 mm	6 mm	8 mm
Elevado	6 mm	8 mm	

Fonte: Autor

4.4.3 Ponto de Depleção Crítico - PDC

A variável de entrada PDC representa o valor percentual de umidade do solo medido pelos sensores capacitivos. Aqui as variáveis linguísticas também foram distribuídas de maneira equidistantes ao longo da ATD como mostra a Figura 19 porém, no caso dos experimentos, estes valores são dinâmicos, variando conforme o **Fator de depleção** da cultura, que por sua vez, dependerá da ETc diária.

Figura 19 – Função de Pertinência - PDC

Fonte: Autor

A Tabela 13 apresenta a relação entre os valores numéricos e a pertinência para o universo de discurso fuzzy da variável PDC.

Tabela 13 – Variável Linguística PDC

Valores Linguís- ticos	Pertinência Mínima Inferior	Pertinência Máxima	Pertinência Mínima Superior
Mínimo		0 %	18 %
Baixo	0 %	18 %	23 %
Ideal	18 %	23 %	28 %
Alto	23 %	28 %	33 %
Elevado	28 %	33 %	

Fonte: Autor

4.4.4 Previsão de Chuva - PC

A variável Previsão de Chuva (PC) representa a quantidade de chuva prevista para ocorrer no dia seguinte (D+1). A determinação do valor linguístico **ideal** seguiu-se a métrica de estabelecer um valor duas vezes maior que aquele determinado na variável de entrada ETc, como visto na Figura 20. Desta forma espera-se garantir uma condição mínima de segurança contra eventuais situações que possam causar estresse hídrico à plantação. Assim como a variável PDC, a PC também terá o seu universo de discurso variando conforme a média histórica de chuvas para o período de desenvolvimento da cultura.

Figura 20 – Função de Pertinência - Previsão de Chuva

Fonte: Autor

A Tabela 14 apresenta a relação entre os valores numéricos e a pertinência para o universo de discurso fuzzy da variável PC.

Tabela 14 – Variável Linguística PC

Valores Linguís- ticos	Pertinência Mínima Inferior	Pertinência Máxima	Pertinência Mínima Superior
Mínimo		0 mm	4 mm
Baixo	0 mm	4 mm	8 mm
Ideal	4 mm	8 mm	12 mm
Alto	8 mm	12 mm	16 mm
Elevado	12 mm	16 mm	

Fonte: Autor

4.4.5 Probabilidade de Chuva - CP

A variável Probabilidade de Chuva (CP) expressa o percentual de chance da ocorrência da quantidade de chuva previsto na variável PC. Com percentuais variando de 0 a 100, os valores linguísticos foram distribuídos de maneira equidistante dentro desta faixa. A Figura 21 ilustra o detalhe desta distribuição.

Figura 21 – Função de Pertinência - Probabilidade de Chuva

Fonte: Autor

A Tabela 15 apresenta a relação entre os valores numéricos e a pertinência para o universo de discurso fuzzy da variável CP.

Tabela 15 – Variável Linguística CP

Valores Linguís- ticos	Pertinência Mínima Inferior	Pertinência Máxima	Pertinência Mínima Superior
Mínimo		0 %	20 %
Baixo	0 %	20 %	40 %
Ideal	20 %	40 %	60 %
Alto	40 %	60 %	80 %
Elevado	60 %	80 %	

Fonte: Autor

4.4.6 Prescrição da Irrigação - PI

A variável de saída que prescreve a irrigação a ser aplicada à cultura foi determinada também seguindo-se à distribuição da variável de entrada ETc. Desta forma pretende-se garantir que as lâminas de irrigação estejam próximas do consumo da planta, deixando a redução do consumo proposta no modelo, para a atuação das variáveis PDC e PC, conforme detalhado na seção 4. Assim, o universo de discurso linguístico desta variável foi distribuído de maneira similar à variável ETc, como mostra a Figura 22.

Figura 22 – Função de Pertinência - Prescrição da Irrigação

Fonte: Autor

A Tabela 16 apresenta a relação entre os valores numéricos e a pertinência para o universo de discurso fuzzy da variável PI.

Tabela 16 – Variável Linguística PI

Valores Linguís- ticos	Pertinência Mínima Inferior	Pertinência Máxima	Pertinência Mínima Superior
Mínimo		0 mm	2 mm
Baixo	0 mm	2 mm	4 mm
Ideal	2 mm	4 mm	6 mm
Alto	4 mm	6 mm	8 mm
Elevado	6 mm	8 mm	

Fonte: Autor

4.5 SUPERFÍCIES DE CONTROLE

Nesta seção são apresentadas as superfícies de controle geradas a partir da inferência das regras especialistas sobre as funções de pertinência de entrada e saída do FIS. As cores mais frias nos gráficos, em tons de azul, indicam volumes de irrigação menores, que vão aumentando conforme há a transição para cores mais quentes, em tons de verde e amarelo. A Figura 23 mostra a evolução da irrigação sob os aspectos do DAP com a ETc, a Previsão de Chuva (PC) e a Probabilidade de Chuva (CP). Nela percebe-se que a irrigação nos estádios de emergência e de floração mantém-se dentro do valor linguístico **ideal**, ou acima dele, mesmo com a modificação das outras variáveis. Tal situação é necessária para que se mantenha o solo adequadamente úmido nestes dois estádios, mesmo que haja uma previsão de chuva para o dia seguinte pois esta informação poderá sofrer alguma modificação. Desta forma, evita-se o estresse hídrico, que poderá causar um impacto negativo sobre o desenvolvimento da cultura.

Figura 23 – Superfícies de controle e Mapas de contorno - DAP

Fonte: Autor

Porém, este comportamento não é observado na relação da variável DAP com a variável PDC uma vez que a umidade do solo é uma situação já ocorrida para um determinado DAP então a prescrição de irrigação poderá ser menor caso a umidade do solo esteja em um valor

linguístico **ideal** ou acima, mesmo nos estádios de emergência e floração. A Figura 24 ilustra esta característica.

Figura 24 – Superfície de controle e Mapa de contorno - DAP x PDC

Fonte: Autor

Na análise das superfícies de controle que relacionam a variável PDC com as variáveis ETc e PC, há a diminuição da prescrição da irrigação quando a umidade do solo ou a probabilidade de chover no dia seguinte está em valores linguísticos iguais ou acima do **ideal**, mesmo com eventos de ETc elevados. Por outro lado, nos casos em que a umidade do solo encontra-se em valores linguísticos **baixo** ou **mínimo**, a prescrição de irrigação será elevada para repor a condição adequada desta variável, ampliando este valor nos casos em que houver ETc diária acima do valor linguístico **ideal** ou Probabilidade de Chuva (CP) com valor linguístico abaixo do **ideal**. Isso demonstra que o modelo de fato considera as condições, favoráveis ou não, de umidade do solo, a probabilidade de chover no dia seguinte e a evapotranspiração para determinar a prescrição de irrigação da cultura, como visto na Figura 25.

Figura 25 – Superfícies de controle e Mapas de contorno - PDC

Fonte: Autor

5 EXPERIMENTOS

Nesta seção encontram-se as informações relativas aos experimentos propostos na pesquisa e à sua execução, que observou o comportamento do modelo de irrigação. Inicialmente foi realizado um experimento em simulador para observar o comportamento e o desempenho do modelo. Após esta etapa dois experimentos reais foram realizados com a aplicação integral do modelo desenvolvido. Um destes experimentos reais foi realizado em um vaso de horticultura doméstica na região metropolitana de São Paulo e o outro foi implementado em uma área rural do interior do estado de Minas Gerais.

5.1 PLANEJAMENTO DO PROJETO

Os experimentos apresentados nesta seção foram executados no decorrer dos trabalhos de pesquisa e construção do texto da dissertação. A execução dos experimentos realizou-se, quando possível, segundo a seguinte ordem:

- a) Desenvolvimento e validação do código;
- b) Montagem dos Probes;
- c) Montagem da malha de irrigação;
- d) Montagem das demais infraestruturas;
- e) Preparo do local de plantio;
- f) Testes do sistema de prescrição da irrigação;
- g) Plantio das sementes ou mudas;
- h) Acompanhamento do desenvolvimento fenológico;
- i) Colheita;
- j) Encerramento.

5.2 EXECUÇÃO DOS EXPERIMENTOS

Nesta seção são apresentados os experimentos conduzidos ao longo deste trabalho, detalhando os seus propósitos, locais de instalação e execução, os materiais utilizados, a estrutura de cada um e os eventos ocorridos durante as execuções.

5.2.1 Simulador

Com o intuito de verificar o desempenho do modelo de irrigação, foi conduzido um ensaio em laboratório simulando ciclos de safra de pimentão de 90 dias. Os parâmetros meteo-

rológicos foram extraídos das bases de dados do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET) e do Probe localizado na FEI . A variável DAP foi constituída a partir destes dados também. Desta forma, as variáveis ficaram formatadas da seguinte maneira:

- a) Data - *DD/MM/AAAA*;
- b) DAP - Dias;
- c) Temperatura mínima diária - °C;
- d) Temperatura máxima diária - °C;
- e) Umidade relativa do ar média diária - %;
- f) Velocidade média diária do vento - km/h;
- g) Precipitação diária acumulada - mm.

Para a determinação dos parâmetros de **Previsão de chuva para o dia seguinte e Confiabilidade da previsão**, que também fazem parte das variáveis de entrada do FIS, foi implementada uma rotina de geração aleatória destes números, com limites estabelecidos da seguinte forma:

- a) **Previsão de chuva para D+1.** Valor aleatório entre 0,85 e 1,15 vezes o valor da precipitação acumulada para a referida data;
- b) **Confiabilidade da previsão.** Valor aleatório entre 45% e 100% para os casos em que a precipitação acumulada para a referida data foi maior que 15 mm, e um valor aleatório entre 0% e 45% para os casos em que a precipitação acumulada para a referida data foi menor que 15 mm.

Os limites atribuídos ao gerador de números aleatório descrito acima teve como referência a observação das previsões meteorológicas obtidas por meio da Estação Meteorológica Pessoal (PWS), porém para períodos atuais, uma vez que as previsões de chuva para as datas exatas não estavam disponíveis nas bases de dados pesquisadas.

O período compreendido pelo conjunto de dados foi de julho de 2018 à julho de 2020, e a razão disso foi abranger dois ciclos de cada estação do ano. Desta forma pôde se verificar o desempenho do modelo em períodos regulares e cíclicos do clima. A divisão deste período em conjuntos de dados regulares de 90 dias cada resultou em um total de 11 conjuntos distintos, que foram submetidos ao simulador. Para o ajuste da umidade do solo foi aplicada a Equação 17 de balanço hídrico e para a conversão, de mm para %, dos valores de irrigação, ETc e precipitação foram utilizadas as equações 18, 19, 21 e 20. O tipo de solo usado nas simulações possui uma ATD de 210cm/m.

$$ATD = ATD_{D-1} + I + C - ETc \quad (17)$$

em que:

ATD = água total disponível,

ATD_{D-1} = água total disponível no dia anterior,

I = irrigação,

C = chuva efetiva,

ETc = evapotranspiração da cultura.

$$CC = z_{rad} * 2,1 \quad (18)$$

em que:

CC = Capacidade de Campo - cm,

z_{rad} = zona radicular da planta - cm.

$$I_{\%} = \frac{I_{mm}}{CC * 10} \quad (19)$$

em que:

$I_{\%}$ = irrigação percentual,

I_{mm} = lâmina de irrigação,

CC = Capacidade de Campo.

$$ET_{c\%} = \frac{ET_{cmm}}{CC * 10} \quad (20)$$

em que:

$ET_{c\%}$ = ETc percentual,

ET_{cmm} = ETc diária,

CC = Capacidade de Campo.

$$C_{\%} = \frac{C_{mm}}{CC * 10} \quad (21)$$

em que:

$C_{\%}$ = chuva percentual,

C_{mm} = lâmina de chuva,

CC = Capacidade de Campo.

Os recursos computacionais empregados neste experimento foram:

- a) **Hardware.** Notebook Lenovo modelo Ideapad com processador core i5-8250U e 8 GB de memória RAM;
- b) **Sistema Operacional.** Microsoft Windows X;
- c) **Sistema de Inferência Fuzzy.** Python versão 2.7 com a biblioteca SciKit Fuzzy;
- d) **Banco de Dados.** MySQL versão 8.0.19;
- e) **Gerador de dados aleatórios.** Microsoft Excel do pacote Office 365.

5.2.2 Fazendinha FEI

O experimento seria realizado no Centro Universitário FEI, campus São Bernardo do Campo, Latitude 23.73 S e Longitude 46.58 W. O terreno onde seria realizado o plantio foi limpo, com a retirada da vegetação (grama e mato), deixando-o na condição de terra nua, conforme ilustrado na Figura 26. A CRA foi extraída utilizando o método de Hills (GUERRA; CUNHA, 1996). O apêndice B detalha o método e os resultados obtidos. A calibração do sensor de umidade do solo foi feita pelo método da secagem em estufa com temperatura constante em 105°C (ROBINSON *et al.*, 2008). O apêndice C contém os resultados deste procedimento e a função de calibração do sensor. A estação meteorológica local e o Probe de medição e coleta de dados foram instalados, testados e deixados disponibilizando os dados, em formato bruto, para o armazenamento. Em função da quarentena imposta pela pandemia do COVID-19, que resultou na restrição de acesso ao campus da FEI, este experimento foi suspenso e a sua execução para este projeto foi cancelada. Entretanto, os recursos produzidos nesta etapa antes da quarentena, tais como a CRA e a função de calibração do sensor de umidade do solo, puderam ser aproveitados no experimento Nova Petrópolis.

Figura 26 – Experimento FEI - Localização e local de plantio

Fonte: Autor

5.2.3 Nova Petrópolis

Este experimento foi realizado no bairro Nova Petrópolis, em São Bernardo do Campo, estado de São Paulo, Latitude 23.42 S e Longitude 46.32 W. Ele foi composto por dois vasos iguais, com 20 cm largura, 20 cm de comprimento e 25 cm de profundidade. Um dos vasos foi irrigado pelo modelo FIS e o outro pelo modelo FAO, com o cultivo do pimentão desde o plantio em sementes, como mostra a Figura 27. Inicialmente foram semeadas 3 sementes em cada uma das 3 covas por vaso. Em DAP 20 foram selecionadas as mudas com maior altura de cada cova e as restantes foram extraídas. O processo de poda das folhas foi realizado abaixo da primeira bifurcação do caule.

O tipo de solo utilizado neste experimento foi extraído do terreno do experimento **Fazendinha FEI** e portanto, a CRA e a curva de calibração do sensor de umidade do solo foram aquelas determinadas naquele experimento. Os sensores de umidade do solo foram instalados nas profundidades de 5 cm e 20 cm, compreendendo a maior faixa de desenvolvimento da zona radicular da cultura, e a estação meteorológica estava a 800 metros do local do experimento. A cada minuto, o sistema fazia a leitura dos sensores de umidade e temperatura do ar, umidade do solo, iluminância do ambiente, a geolocalização e a temperatura do solo, apresentando estes valores no display LCD do módulo. A cada 30 minutos, o sistema enviava uma amostra desta leitura para o banco de dados e às 23:50hs ele calculava a ETc do dia e fazia uma consulta ao serviço de meteorologia para atualizar a previsão de chuva para os próximos cinco dias. Neste horário, também era realizada a inferência do modelo FIS, o cálculo do turno de irrigação pelo modelo FAO e o agendamento da irrigação para as 08:00hs do dia seguinte.

Figura 27 – Experimento Nova Petrópolis - Localização e configuração

Fonte: Autor

A Tabela 18 apresenta os recursos materiais e computacionais utilizados neste experimento. O módulo de processamento foi acondicionado em uma caixa de passagem de cabos elétricos que ficou abrigada. Já os sensores de luminosidade e temperatura do ar e também o conversor *analógico/digital* foram instalados em uma outra caixa de passagem próxima aos

vasos do plantio. No caso do conversor, a instalação mais próxima aos sensores de umidade do solo serviu para evitar atenuação no sinal de leitura. Os sensores de umidade do solo foram montados dentro de tubos de PVC de 32mm de diâmetro com tamanhos adequados às suas profundidade de instalação. A Figura 28 apresenta os detalhes dos componentes mencionados.

Figura 28 – Experimento Nova Petrópolis - Componentes

Fonte: Autor

Neste experimento, a arquitetura de hardware e software vista na Figura 29 foi implementada mediante a relação de materiais e recursos descritos na Tabela 18. O serviço de previsão meteorológica utilizado foi o Weather Underground (WEATHER UNDERGROUND, 2020a). O processo de prescrição da irrigação, visto na Figura 30, têm início com a aquisição dos parâmetros do solo e da cultura na base de dados do sistema. A partir daí, cada variável de entrada do sistema de inferência é constituída por meio da aquisição dos dados dos sensores de umidade do solo e do serviço de previsão meteorológica. O cálculo da ET_c é feito mediante a aquisição dos dados dos sensores de umidade e temperatura do ar, e a velocidade média diária do vento. As equações 4 e 3 foram empregadas para o cálculo da ET_o e da ET_c, respectivamente.

O experimento foi iniciado no dia 20/01/2020 e teve a sua conclusão em 26/05/2020. As irrigações foram realizadas diariamente no período entre 08:00hs e 08:30hs. Ao final do ciclo da cultura foram colhidos 4 frutos de cada vaso dos quais 3 foram selecionados para fins

Figura 29 – Experimento Nova Petrópolis - Arquitetura de software e hardware

Fonte: Autor

de análise e comparação das grandezas de comprimento, largura e massa de cada um e a sua consequente classificação, mediante a Tabela 8.

Figura 30 – Experimento Nova Petrópolis - Fluxo do processo

Fonte: Autor

5.2.4 Extrema

O experimento foi realizado na cidade de Extrema, no estado de Minas Gerais, Latitude 22.78 S e Longitude 46.28 W, como visto na Figura 31. A área de execução foi limpa, com a retirada da vegetação (mato), deixando-a na condição de terra nua. Para este experimento foram utilizados os dados de uma estação meteorológica distante 10 metros do local do plantio.

Figura 31 – Experimento Extrema - Localização

Fonte: Autor

A arquitetura do sistema utilizada neste experimento seguiu-se àquela do experimento **Nova Petrópolis** com o emprego de boa parte dos materiais listados na Tabela 18. A exceção ficou por conta da adição de um módulo de alimentação alternativo, composto por uma bateria de 12V-7Ah e um carregador de baterias. As válvulas solenóides e o sensor de fluxo utilizados neste experimento foram de modelos semelhantes ao do experimento **Nova Petrópolis** porém com diâmetros de 1/2". Também foram utilizadas caixas de passagem elétrica com dimensões maiores para o acondicionamento adequado das válvulas solenóides e dos componentes eletrônicos, como mostra a Figura 32. No caso da bateria instalada, o sistema foi testado com a alimentação somente por ela. Nos testes realizados, a bateria conseguiu prover energia aos componentes do sistema por 5 horas ininterruptamente.

Figura 32 – Experimento Extrema - Módulo de irrigação e Módulo Central

Fonte: Autor

Foram instalados sensores de umidade do solo nas profundidades de 5cm, 12cm e 30cm com o módulo de conversão *analógico/digital* do sinal instalado próximo aos sensores para atenuar a queda de tensão do sinal de leitura do sensor. A Figura 33 apresenta o detalhe da instalação destes componentes e também do sensor de umidade e temperatura do ar, que foi acondicionado dentro de um tubo de PVC de 100mm de diâmetro, para proteger os seus componentes eletrônicos de possíveis danos causados pela exposição ao clima. Todas as caixas de passagem que abrigaram os dispositivos eletrônicos, inclusive o painel central, tiveram os seus orifícios e recortes vedados com silicone para evitar infiltrações causadas por precipitação pluviométrica. No caso do painel central, foram instalados dois ventiladores de 5cm², um deles para insuflar ar para dentro do painel e o outro para exaurir ar de dentro do painel.

A área de plantio ocupou 44 m², em formato triangular, também dividida em duas sub áreas iguais a partir de um dos seus vértices até a metade da base inferior. Uma destas sub áreas foi irrigada sob o modelo FIS e a outra por meio do modelo FAO. Foi adotado o sistema de irrigação por gotejamento neste experimento, com o uso de mangueiras de 1/2" de diâmetro instaladas longitudinalmente ao longo de cada lateral da área, e ramais de irrigação distribuídos a partir destas laterais. Em cada sub área do experimento foram feitas quatorze covas de 20cm de diâmetro por 30cm de profundidade. A terra retirada destas covas foi misturada com esterco orgânico e devolvida às covas.

Figura 33 – Experimento Extrema - Probe

Fonte: Autor

Neste experimento foi escolhido o plantio de 28 mudas de pimentão com vinte dias de desenvolvimento (DAP 20), como visto na Figura 34, divididas em 14 mudas para cada sub área (FIS e FAO). A escolha por mudas já germinadas deu-se por medida de precaução uma vez que o experimento foi realizado em área rural, sem supervisão constante e sujeito a riscos, no seu desenvolvimento, provocados por pragas e pelo clima, dentre outros.

A curva de calibração do sensor de umidade do solo, expressa pela Equação 22, foi realizada pelo método da estufa (ROBINSON *et al.*, 2008), com a porção de terra já misturada ao esterco orgânico.

$$U_s = -0,002489 * V_s + 77,291620 \quad (22)$$

em que:

U_s = umidade do solo - %,

V_s = valor de leitura do sensor capacitivo de umidade do solo - Inteiro.

Figura 34 – Experimento Extrema - Mudas de plantio

Fonte: Autor

O solo do local é do tipo Latossolo Vermelho Distrófico (EXTREMA, 2013), com a Capacidade de Campo (CC) em 39,5% em massa, conforme a Tabela 17. O experimento teve o seu início em 01/08/2020 e a sua conclusão foi na data de 01/11/2020.

Tabela 17 – Granulometria, densidade e saturação do solo

<i>Classe Textura</i>	<i>Argila (%)</i>	<i>Silto (%)</i>	<i>Densidade Mg/m^3</i>	<i>Saturação kg/kg</i>
Argiloso	60	20	1.249	0.395
Silto Argiloso	47	47	1.309	0.362
Arenoso Argiloso	42	7	1.334	0.335
Silto	5	87	1.552	0.243
Arenoso	3	3	1.566	0.226

Fonte: Autor "adaptado de "SOIL PHYSICAL QUALITY..., 2004

Tabela 18 – Recursos - Experimentos Nova Petrópolis e Extrema

Item	Código	Tipo	Descrição	Utilização
1	RPi3B+	Hardware	Microcomputador Raspberry Pi3B+	Processamento de todos os códigos do modelo
2	NEO6MV2	Hardware	Módulo GPS	Aquisição dos dados de localização do Probe
3	SDC32GB	Hardware	Micro cartão SD 32GB	Armazenamento de todos os dados e códigos do modelo
4	SKUv1.2	Hardware	Sensor capacitivo umidade do solo	Leitura do valor da umidade do solo
5	DHT22	Hardware	Sensor de umidade e temperatura	Leitura da umidade e temperatura do ar
6	ADS1115	Hardware	Conversor Analógico Digital	Conversão digital da leitura da umidade do solo
7	LCD16x2	Hardware	LCD 16x2 com interface I_2C	Visualização das leituras dos sensores
8	BH1750	Hardware	Sensor de luminosidade	Leitura da luminosidade do dia para o cálculo da ETo
9	VS1238	Hardware	Válvula solenóide 12VDC 3/8	Comando das irrigações
10	SF201	Hardware	Sensor de fluxo	Leitura do fluxo de água da irrigação
11	JT100	Hardware	Mini bomba d'água	Comando das irrigações
12		Hardware	Shield com 4 relés	Acionamento das válvulas e da bomba d'água
13		Hardware	Conversor de nível lógico	Interface entre a RPi e o Shield de relés
14	PVC32	Hardware	Tubo de PVC 32	Acondicionamento dos sensores de umidade do solo
14		Hardware	Caixa de passagem	Acondicionamento dos dispositivos
15	Raspbian V7	Software	Sistema operacional	Sistema base para todos os processamentos do modelo
16	Idle 2.7	Software	Interface de programação	Escrita do código Python
17	SciKit Fuzzy	Software	Biblioteca Python	Programação do FIS
18	MySQL V8	Software	Banco de dados	Armazenamento de todos os dados do modelo
19	Numpy	Software	Biblioteca Python	Programação numérica do FIS
20	LCD16x2	Hardware	Display LCD	Mostrar os valores de leitura dos sensores do FIS

Fonte: Autor

6 ANÁLISE DOS DADOS

Nesta seção é feita uma análise dos dados obtidos nos experimentos realizados, enfatizando o volume de irrigação consumido e a evolução da umidade do solo nas simulações e nos experimentos reais. Também é realizada uma análise qualitativa dos frutos produzidos nos experimentos reais, além da indicação das publicações produzidas em função da pesquisa, bem como do repositório público para os seus dados.

6.1 SIMULADOR

No processo de análise dos dados obtidos com o experimento descrito na seção 5.2.1, foi necessária uma validação preliminar do simulador de irrigação baseado no modelo FAO com a própria referência de irrigação FAO (DOORENBOS; PRUITT, 1977), esperando-se que ele refletisse o comportamento de consumo de água descrito na referência. Neste aspecto houve uma resposta positiva acerca da quantidade de água consumida para um ciclo médio de 90 dias, com ajuste para a cultura do pimentão e para o solo do tipo silto-argiloso. Quando comparado ao mesmo período da referência FAO, o erro médio ficou em 1,8% e desta forma, estabeleceu-se uma crença em que o simulador do modelo de irrigação tradicional poderia ser empregado como elemento de comparação ao modelo FIS. A partir disto os dados sobre o consumo de água irrigada em um ciclo médio de 90 dias para a cultura do pimentão foram analisados sob a perspectiva dos dois modelos simulados, FAO e FIS. A Tabela 19 apresenta as informações principais sobre os parâmetros de cada simulação e também o desempenho do modelo sob cada uma delas.

Tabela 19 – Desempenho do simulador

Simulação Número	Período	Ciclo Dias	Irrigação FAO - mm	Irrigação FIS - mm	Chuva mm	Desempenho FIS - %
1	Jul 2018 - Set 2018	90	222	236	223	6,3
2	Out 2018 - Dez 2018	90	269	216	503	-19,7
3	Jan 2019 - Abr 2019	95	246	185	1042	-24,8
4	Abr 2019 - Jun 2019	90	161	219	319	36,0
5	Jul 2019 - Set 2019	90	223	218	198	-2,2
6	Ago 2019 - Nov 2019	90	328	247	206	-24,7
7	Set 2019 - Dez 2019	90	270	201	249	-25,6
8	Out 2019 - Dez 2019	90	323	238	253	-26,3
9	Nov 2019 - Fev 2020	90	255	194	553	-23,9
10	Jan 2020 - Mar 2020	90	274	191	640	-30,3
11	Abr 2020 - Jun 2020	90	222	238	124	7,2

Fonte: Autor

Em sete, das onze simulações realizadas, O modelo FIS indicou uma resposta adequada às condições impostas pelas regras de produção, refletindo satisfatoriamente o comportamento previsto por elas e provocando uma redução na irrigação superior a 19%, com média de 25% de economia. Uma característica percebida nestas simulações, como visto na Figura 35, foi que elas ocorreram, na sua maioria, em períodos das estações do verão e da primavera, com os eventos de precipitação distribuídos ao longo do ciclo da cultura.

Figura 35 – Irrigação total - ciclo de 90 dias - Simulação 3

Fonte: Autor

A simulação 7, vista na Figura 36 também ilustra este comportamento.

Figura 36 – Irrigação total - ciclo de 90 dias - Simulação 7

Fonte: Autor

Nas simulações 1, 5 e 11 o modelo FIS apresentou um desempenho ligeiramente pior ou melhor que a referência FAO. Aqui, com simulações realizadas em períodos compreendidos entre outono e inverno, os eventos de precipitação foram mais escassos ao longo do ciclo da cultura, como visto na Figura 37, que trata da simulação 1,

Figura 37 – Irrigação total - ciclo de 90 dias - Simulação 1

Fonte: Autor

e na Figura 38 que trata da simulação de número 5.

Figura 38 – Irrigação total - ciclo de 90 dias - Simulação 5

Fonte: Autor

Na simulação 4, ilustrada pela Figura 39, o modelo FIS teve um desempenho 36% pior em relação à referência FAO. O período desta simulação foi também no outono / inverno, porém o volume de chuvas durante o ciclo foi maior que a média do período. A razão para esse desempenho ruim do modelo FIS reside no fato que uma boa parte das chuvas nesta simulação ocorreram após a metade do ciclo da cultura, situação em que a zona raiz da planta já possui uma profundidade maior e que permite uma ampliação da ATD.

Figura 39 – Irrigação total - ciclo de 90 dias - Simulação 4

Fonte: Autor

Desta forma, a maior parte do volume de precipitação ocorrida nesta fase resultou em um aumento do turno de irrigação e consequentemente uma redução da quantidade de água irrigada pelo modelo FAO, conforme visto na Figura 40,

Figura 40 – Evolução da irrigação pelos modelos - ciclo de 90 dias - Simulação 4

Fonte: Autor

A variação da umidade do solo, conforme visto na simulação 11 representada pela Figura 41, apresentou uma relação principal e direta com a quantidade de chuvas que caiu no período de cada ciclo. Houve um acréscimo da umidade do solo após os eventos de chuva, até o limite da CC para o tipo de solo escolhido, conforme a Equação 17 descrita na seção 5.2.1.

Figura 41 – Evolução da umidade do solo - ciclo de 90 dias - Simulação 11

Fonte: Autor

Situação semelhante ocorreu na simulação 3, vista na Figura 42, com uma variação mais uniforme e sem a ocorrência de grandes platôs uma vez que as chuvas ocorreram de maneira distribuída ao longo do ciclo da cultura.

Figura 42 – Evolução da umidade do solo - ciclo de 90 dias - Simulação 3

Fonte: Autor

Aqui uma ressalva deve ser feita quanto à esta variação do nível de umidade percentual do solo. Nas simulações realizadas a variação respondeu conforme as regras de inferência do modelo FIS, porém como já visto anteriormente na seção 2, a distribuição da água no solo é feita de maneira espacial e de difícil modelagem matemática. Nas simulações propostas houve uma simplificação desta modelagem, levando-se em conta apenas a retenção de água pelo solo na zona radicular da cultura, obedecendo à expansão desta zona conforme o desenvolvimento DAP da planta e tendo ela como elemento relacional entre a umidade percentual na CC do solo e a variação da ATD.

Também foi possível observar que o modelo FAO fez irrigações apenas para repor a ETc ocorrida no dia, como visto na Figura 43, evitando excessos na prescrição da irrigação por este modelo, o que contribuiu para reafirmar a característica de economia de irrigação do modelo FIS. O resultado completo de todas as simulações realizadas, com o desempenho dos modelos e a evolução das curvas de umidade do solo e ETc, encontra-se no apêndice A.

Figura 43 – Evolução da irrigação - ciclo de 90 dias - Simulação 2

Fonte: Autor

Os resultados do experimento **Simulador** possibilitaram a validação do modelo FIS, habilitando-o à execução nos experimentos reais mencionados na seção 5. No aspecto da manutenção do nível de umidade do solo, ainda sob a ressalva da variabilidade espacial da distribuição da água, a análise dos dados dos experimentos reais propostos possibilitou um melhor entendimento desta dinâmica.

6.2 NOVA PETRÓPOLIS

A aplicação do modelo em um experimento real possibilitou a observação do comportamento de algumas das variáveis relevantes ao seu desempenho. No processo de desenvolvimento fenológico dos modelos, pôde-se observar o comportamento das irrigações semelhante aquele percebido no experimento **Simulador**. A Figura 44 ilustra os eventos de irrigação do modelo FAO atuando somente para repor a ETc ocorrida no dia anterior e deixando de atuar quando houve eventos de precipitação que elevaram o turno de irrigação. Isso pode ser verificado em DAP 10 até DAP 25 e também no período entre DAP 30 e DAP 52 da Figura 44.

Figura 44 – Evolução da irrigação - ciclo de 125 dias - Nova Petrópolis

Fonte: Autor

Também é possível verificar, pela Figura 45, que a aparência dos pés de pimentão permite a constatação de um desenvolvimento adequado nas etapas de floração e início da frutificação.

Figura 45 – Floração - DAP 82 - Nova Petrópolis

Fonte: Autor

No aspecto da umidade do solo, o experimento mostrou uma curva de evolução, vista na Figura 46, diferente daquela resultante das simulações sobretudo pelo tipo de abordagem para esta variável. Aqui ela refletiu de fato a variação de umidade medida pelos sensores instalados nos vasos das plantas. Um outro detalhe observado neste aspecto é que o modelo FIS foi capaz de mantê-la dentro dos limites adequados para o desenvolvimento da cultura e da CC do solo, como visto nos períodos entre DAP 0 e DAP 30 e também após DAP 45. Nos casos em que a umidade superou o limite de CC do solo, como em DAP 30 até DAP 45, a razão deu-se por períodos de precipitações elevadas ou sucessivas, fato este completamente alheio ao controle

do modelo. Em DAP 87 houve um problema no sensor de umidade instalado na profundidade de 20 cm. Este problema persistiu até DAP 95, quando ele foi substituído, sem acarretar algum impacto negativo no processo de irrigação do modelo FIS. Em DAP 20 e DAP 40 duas amostras de 100g de solo foram extraídas de cada vaso para uma verificação da função de calibração do sensor, pelo método termogravimétrico (ROBINSON *et al.*, 2008). Após a verificação o erro médio de leitura dos sensores, em umidade percentual do solo, ficou em 2,5%.

Figura 46 – Evolução da umidade do solo - ciclo de 125 dias - Nova Petrópolis

Fonte: Autor

O modelo FIS desempenhou uma quantidade total de irrigação 18% menor em comparação ao modelo FAO. A Figura 47 ilustra esta comparação. Aqui percebe-se que, assim como no experimento **Simulador**, a ocorrência de chuvas no início do ciclo não resulta em um aumento proporcional do turno de irrigação do modelo FAO devido ao tamanho reduzido da zona radicular da planta. Isso pode ser visto do início até DAP 25 do experimento. Por outro lado, o volume de chuvas ocorrido entre DAP 30 e DAP 45 provocaram um aumento no turno de irrigação do modelo FAO fazendo com que os modelos tivessem um desempenho quase idêntico no aspecto da irrigação, pois o modelo FIS continuou aplicando irrigações diárias, em menor quantidade, uma vez que ele não utiliza o método do turno de irrigação. A partir de DAP 52 as chuvas ficaram mais escassas, reduzindo o turno de irrigação do modelo FAO ao limite mínimo configurado. Ainda neste período, o modelo FIS continuou aplicando irrigações menores que a ETc diária, ampliando a diferença no total de irrigação entre os modelos.

Figura 47 – Irrigação total - ciclo de 125 dias - Nova Petrópolis

Fonte: Autor

Ao final do ciclo da cultura pôde-se observar o desenvolvimento adequado dos frutos, como visto na Figura 48.

Figura 48 – Frutificação e Colheita - DAP 115 - Nova Petrópolis

Fonte: Autor

Na análise dos frutos, eles foram classificados como do grupo Quadrado e classe miúda, conforme a Tabela 8 e a Figura 49.

Figura 49 – Análise do comprimento e diâmetro médio - Nova Petrópolis

Fonte: Autor

A Tabela 20 apresenta os valores das grandezas medidas nas amostras,

Tabela 20 – Resultados - Nova Petrópolis

Amostra Número	Modelo	Massa g	Comprimento mm	Diâmetro mm
1	FIS	63	80	50
2	FIS	56	75	55
3	FIS	36	55	45
4	FAO	44	60	50
5	FAO	48	75	45
6	FAO	52	55	55

Fonte: Autor

e a Tabela 21 apresenta o resultado final do experimento.

Tabela 21 – Médias - Nova Petrópolis

Modelo	Massa Média g	Comprimento Médio mm	Diâmetro Médio mm	Irrigação Total mm H_2O
FIS	52	70	50	170
FAO	48	63	48	208

Fonte: Autor

6.3 EXTREMA

O experimento realizado na cidade de Extrema-MG contou com a utilização de uma estação meteorológica local instalada a 10 metros do campo do cultivo, contribuindo para uma

maior precisão das variáveis de precipitação pluviométrica diária ocorrida e de velocidade média diária do vento. Durante a execução do experimento, o sensor de umidade e temperatura do ar, modelo DHT22, teve que ser substituído pelo modelo HTU21D em razão dele apresentar falhas constantes quando o ambiente estava com umidade acima de 95%, mesmo estando abrigado pelo tubo de PVC. Após a substituição, o novo modelo HTU21D não apresentou falhas até o término do experimento. Em 21/08/2020 o local ficou sem alimentação de energia elétrica da concessionária por 2 horas. Durante este período o sistema foi alimentado pelo circuito da bateria e operou de maneira adequada, realizando a leitura dos sensores, mostrando no display LCD e gravando-as no banco de dados a cada 30 minutos.

No aspecto da irrigação, os modelos FIS e FAO tiveram um comportamento semelhante ao experimento **Nova Petrópolis**, com o FAO atuando para repor a ETc ocorrida no dia anterior e o modelo FIS eventualmente aplicando uma lâmina de irrigação menor em razão do aproveitamento da umidade do solo ou da previsão de chuvas para o dia seguinte, como visto na Figura 50. Também na Figura 50 observou-se a inexistência de eventos de irrigação pelo modelo FAO após períodos de chuva que elevaram o turno de irrigação para um valor maior que 2, como visto em DAP 35, DAP 71 e DAP 99.

Figura 50 – Evolução da irrigação - ciclo de 111 dias - Extrema

Fonte: Autor

A umidade do solo neste experimento apresentou uma variação dentro dos limites da CC e do PDC. Este comportamento era esperado uma vez que o modelo FIS aplicou eventos de irrigação para mantê-la dentro destes níveis, como visto na Figura 51. Ainda na Figura 51 é possível verificar que os sensores de umidade do solo responderam adequadamente aos eventos de irrigação ou precipitação pluviométrica. Neste experimento, inicialmente as irrigações foram programadas para ocorrer no período entre as 08:00hs e as 08:30hs. Observações realizadas no local constataram que neste horário já havia uma incidência relevante da luz solar, o que causava a evaporação de parte da lâmina de água aplicada, antes da sua infiltração no solo. Diante disso, a partir de DAP 45 os eventos de irrigação passaram a ocorrer no período entre as 06:00hs e as 06:30hs a fim de minimizar os efeitos de evaporação da água por conta da incidência de luz solar.

Figura 51 – Evolução da umidade do solo - ciclo de 111 dias - Extrema

Fonte: Autor

Com relação à identificação de eventuais fluxos de percolação profunda da água, a disposição esquemática de três sensores instalados em profundidades diferentes foi satisfatória neste propósito. A Figura 52 apresenta um período do experimento referente a dois dias em que é possível observar que a umidade do solo nas profundidades de 5cm e 12cm sofreu um acréscimo por conta dos eventos de irrigação ocorridos às 06:00hs. Neste mesmo período, a umidade do solo na profundidade de 30 cm permaneceu inalterada ou com variação dentro da margem de erro do sensor.

Figura 52 – Indicação de irrigação - Extrema

Fonte: Autor

Em outro período do experimento, ilustrado pela Figura 53, há a variação da umidade do solo nas três profundidades medidas pelos sensores. Esta situação ocorreu por conta da elevada quantidade de água que caiu sobre o solo, proveniente de chuvas ocorridas. Esta variação da umidade no terceiro nível mais profundo do sensoriamento reflete uma situação de percolação profunda uma vez que a quantidade de água infiltrada no solo excedeu os limites da CC para a profundidade efetiva da zona radicular naquele momento.

Figura 53 – Indicação de percolação profunda - Extrema

Fonte: Autor

O desenvolvimento fenológico da cultura sob os dois modelos do experimento ocorreu de maneira adequada e semelhante, como mostra a Figura 54. Algumas das mudas, de ambos os modelos, precisaram ser repostas por conta da ação da praga agrícola denominada lagarta rosca, que cortou alguns dos pés de pimentão na base do caule.

Figura 54 – Desenvolvimento fenológico - Extrema

Fonte: Autor

Houve também, um evento de chuva com granizo em DAP 99 que ocasionou danos em algumas folhas e frutos, como visto na Figura 55. Em DAP 80 foi realizada a poda das folhas abaixo da primeira bifurcação, e no estágio de floração cada pé de pimentão ofereceu 7 flores em média nos dois modelos.

Figura 55 – Danos nos frutos por chuva de granizo - Extrema

Fonte: Autor

O consumo total de água na irrigação, apresentado pela Figura 56, mostra a quantidade do modelo FIS 19% menor em relação ao modelo FAO.

Figura 56 – Irrigação total - ciclo de 111 dias - Extrema

Fonte: Autor

Foram selecionados 6 frutos de cada sub área, vistos na Figura 57, para a análise das grandezas de massa, comprimento e diâmetro. Estes dados, assim como os seus valores médios estão descritos na Tabela 22. Na análise dos frutos produzidos pelos dois modelos de irrigação, eles foram classificados no grupo **Quadrado** e nas classes **Média** e **Miúda**, conforme a Tabela 8.

Figura 57 – Seleção dos frutos para análise qualitativa - Extrema

Fonte: Autor

Diante desta classificação, constatou-se que ambos os modelos produziram frutos semelhantes sob o aspecto da qualidade, assegurando novamente um dos objetivos da pesquisa, tal qual o experimento **Nova Petrópolis**.

Tabela 22 – Resultados - Extrema

Amostra Número	Modelo	Massa g	Comprimento mm	Diâmetro mm
1	FIS	86	80	55
2	FIS	60	75	45
3	FIS	103	90	60
4	FIS	55	65	50
5	FIS	38	60	45
6	FIS	49	60	50
1	FAO	55	70	50
2	FAO	109	70	70
3	FAO	77	75	65
4	FAO	61	65	55
5	FAO	50	65	50
6	FAO	34	55	40

Fonte: Autor

A Tabela 23 apresenta o resultado final do experimento.

Tabela 23 – Médias - Extrema

Modelo	Massa Média g	Comprimento Médio mm	Diâmetro Médio mm	Irrigação Total mm H_2O
FIS	65	72	51	304
FAO	64	67	55	377

Fonte: Autor

6.4 PUBLICAÇÕES

Foram produzidas, ao longo deste trabalho, algumas publicações científicas que contribuíram para aprofundar a discussão acerca de temas relacionados ao uso de dispositivos IoT no campo agrícola e também na abordagem da irrigação de precisão. Um primeiro artigo abordou a metodologia de aquisição dos dados climáticos e do solo por meio de séries temporais, ao passo que um outro artigo apresentou a metodologia empregada na calibração dos sensores capacitivos de umidade do solo, inclusive trazendo a discussão dos processos de checagem aleatória após a extração da curva de calibração. Uma terceira publicação apresentou a aplicação dos modelos FIS e FAO e os resultados obtidos no experimento **Nova Petrópolis**. Todas as publicações foram submetidas, aprovadas, apresentadas e publicadas em congressos internacionais, conforme visto na Tabela 24.

Tabela 24 – Publicações produzidas

Ano	Congresso	Artigo	Status
2019	GHTC	Alves, R. G., Souza, G., Maia, R. F., Kamienski, C., Tran, A., Lima, F., Aquino-Jr, P. and J.-P. Soininen, "A digital twin for smart farming", in IEEE GHTC, São Bernardo do Campo, 2019	Publicado
2020	GHTC	Souza, G., P. Aquino-Jr., Maia, R. F., Kamienski, C. and J.-P. Soininen, "A fuzzy irrigation control system", in IEEE GHTC, São Bernardo do Campo, 2020	Publicado
2020	MetroAgriFor	Souza, G., Faria, B. T., Alves, R. G., Lima, F., Aquino-Jr, P. and J.-P. Soininen, "Calibration equation and field test of a capacitive soil moisture sensor", in IEEE MetroAgriFor, São Bernardo do Campo, 2020	Publicado

Fonte: Autor

6.5 REPOSITÓRIO

Com o intuito de permitir a reprodução dos experimentos realizados nesta pesquisa e a sua consequente expansão, o conjunto de dados produzidos nos experimentos, bem como os códigos de programação do prescritor de irrigação, do sistema de inferência fuzzy, do módulo de irrigação e demais módulos do modelo foram disponibilizados em um repositório na plataforma GitHub. Também neste repositório há informações complementares necessárias à execução dos experimentos realizados. O link para acesso ao repositório, bem como os endereços eletrônicos de e-mail do autor caso haja a necessidade de entrar em contato, são os seguintes:

- a) <https://github.com/iilot-fei>
- b) gsouza@fei.edu.br
- c) gilberto.souza.x@gmail.com

7 CONCLUSÃO

O presente trabalho propôs uma solução empregando técnicas de IA no controle da irrigação agrícola. A pesquisa pretendeu consolidar o paradigma da IA na irrigação de precisão tendo como elementos primários a umidade do solo e o microclima captado pela estação meteorológica local e sensores instalados no campo de cultivo. Observou-se com isso resultados promissores na redução do consumo de água irrigada, maximizando o molhamento do solo pela precipitação e possibilitando o estabelecimento de novas práticas de manejo agrícola. A inclusão de dispositivos IoT à pesquisa também possibilitou um ganho de escala, permitindo o emprego do modelo desenvolvido pelo pequeno produtor e pela agricultura familiar, uma vez que os custos envolvidos no projeto são adequados ao perfil econômico destas classes.

A aplicação da inferência fuzzy ao sistema de irrigação possibilitou abordar esta questão sob o aspecto da IA, mesmo sem a disponibilidade de uma base de dados extraída das culturas e que pudesse ser utilizada no treinamento de outros modelos. A construção heurística das regras da base de conhecimento do modelo FIS permitiu dar clareza ao propósito destas, trazendo a discussão para um domínio mais simples, sob a ótica do especialista em agricultura. Desta forma, realizou-se uma integração natural entre o conhecimento deste especialista e a IA, fato este que poderá possibilitar uma aceitação maior das técnicas de IA na irrigação por parte dos agricultores.

O valor médio da redução do consumo de água irrigada extraído nas simulações ficou próximo daqueles obtidos nos experimentos reais. Tal situação indicou uma modelagem adequada do algoritmo de simulação, habilitando-o a ser empregado em situações recorrentes àquelas propostas neste trabalho, mesmo com a observação da difícil modelagem do comportamento do sensor de umidade do solo. O algoritmo de simulação também provou ser adequado quanto à sua validade para uso como referencial FAO pelo método do turno de irrigação com aplicação de lâmina fixa de irrigação.

Nos experimentos reais realizados houve uma redução significativa da quantidade de água irrigada pelo modelo FIS, com um percentual médio de redução da ordem de 19%. Além desta redução, os frutos produzidos pelo modelo de irrigação FIS foram classificados, quanto ao seu tamanho, massa e diâmetro, dentro da mesma categoria daqueles produzidos pelo modelo de referência FAO. Aqui também houve uma resposta positiva do modelo quanto ao objetivo proposto na pesquisa. No aspecto da utilização do sensor capacitivo de umidade do solo, este mostrou-se adequado à esta função, apresentando um desempenho satisfatório, inclusive confirmado pelas etapas de verificação da sua leitura, ocorridas no experimento **Nova Petrópolis**.

No experimento **Extrema**, o modelo foi submetido às condições de operação em campo de cultivo, tais como situações climáticas e biológicas. Neste experimento, os dispositivos construídos para abrigar os componentes e sensores eletrônicos tiveram um comportamento adequado no aspecto de impermeabilidade e equilíbrio térmico interno, por meio das vedações, ventiladores e exaustores instalados. Também foi validada a condição de operação na falta de alimentação externa, com o uso da bateria instalada neste protótipo, inclusive com o sistema operando a partir da alimentação da bateria durante a execução do experimento, conforme visto na seção 6.3.

As publicações científicas produzidas ao longo do desenvolvimento da pesquisa foram importantes no sentido de indicar metodologias robustas utilizadas e apresentar a relevância do assunto no contexto do emprego da IoT na irrigação de precisão. A partir dos resultados apresentados espera-se consolidar o modelo de irrigação FIS, aplicando-o em outros locais, tipos de cultura e períodos do ano, a fim de avaliar o seu comportamento. Tais aplicações diversificadas servirá para aperfeiçoar a arquitetura de "Hardware" e "Software" do modelo, com ênfase na base de regras especialistas do sistema de inferência fuzzy. Desta forma espera-se avançar no debate sobre a redução do consumo de água irrigada na agricultura mundial, frente aos desafios que o aumento da população nas próximas décadas trará.

Uma sugestão natural para trabalhos futuros relacionados à extensão desta pesquisa diz respeito à verificação do desempenho do sistema de irrigação sob outras técnicas de IA, uma vez que haverá uma base de dados disponível para o treinamento de uma RNA, por exemplo. Há também a possibilidade de verificação do desempenho do modelo desenvolvido quando aplicado em outros tipos de culturas agrícolas. Uma outra linha de pesquisa poderá aprofundar a investigação acerca do uso dos sensores capacitivos na medição da umidade do solo, estabelecendo novas relações entre as grandezas físicas que regem ambos; e uma quarta sugestão reside em aprofundar a pesquisa acerca da distribuição espacial da água no solo, a fim de estabelecer modelagens deste comportamento, na direção da utilização da teoria do controle neste domínio.

REFERÊNCIAS

- AGUIAR NETTO, A. O.; NACIF, P. G. S.; REZENDE, J. O. Avaliação do conceito de capacidade de campo para um latossolo amarelo coeso do estado da Bahia. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 23, n. 3, p. 661–667, 1999. DOI: 10.1590/s0100-06831999000300020.
- AKYILDIZ, I.F.; VURAN, M.C. **Wireless Sensor Networks**. [S. l.]: John Wiley & Sons, 2010. DOI: 10.1002/9780470515181.
- ALBUQUERQUE, P.E.P. Cultivo do milho. **Embrapa Milho e Sorgo**, Sete Lagoas, 2007. ISSN 1679012.
- ALBUQUERQUE, P.E.P.; DURÃES, F.O.M. Uso e manejo de irrigação. **Embrapa Milho e Sorgo**, Sete Lagoas, p. 528, 2008.
- ALLEN, R. G *et al.* Guidelines for computing crop water requirements-FAO Irrigation and drainage paper 56. **Crop Evapotranspiration**, p. 1–15, 1998. ISSN 02545284. DOI: 10.1016/j.eja.2010.12.001. arXiv: arXiv:1011.1669v3.
- ALOMAR, B.; ALAZZAM, A. A Smart Irrigation System Using IoT and Fuzzy Logic Controller. **ITT 2018 - Information Technology Trends: Emerging Technologies for Artificial Intelligence**, n. 2018, p. 175–179, 2019. DOI: 10.1109/CTIT.2018.8649531.
- ANDRADE, M.; JACQUES, M. A. P. Estudo Comparativo de Controladores de Mamdani e Sugeno para Controle do Tráfego em Interseções Isoladas. **Revista Transportes**, São Paulo, dez. 2008. DOI: 10.14295/transportes.v16i2.24.
- ANTON, C.; MATEI, O.; AVRAM, A. Use of multiple data sources in collaborative data mining. *In*. **INTELLIGENT Systems Applications in Software Engineering**. 3ª. [S. l.]: Springer International Publishing, 2019. cap. xviii, p. 502.
- AQUINO-SANTOS, R.L *et al.* Developing a new wireless sensor network platform and its application in precision agriculture. **Sensors**, v. 11, n. 1, p. 1192–1211, 2011. ISSN 14248220. DOI: 10.3390/s110101192.
- ASIMOV, I. **Photosynthesis**. [S. l.]: Basic Books, Incorporated, 1968. (Science and discovery).
- ATHANI, S.; TEJESHWAR, C. H. Proceedings of the International Conference on IoT in Social, Mobile, Analytics and Cloud, I-SMAC 2017. **Proceedings of the International Conference on IoT in Social, Mobile, Analytics and Cloud, I-SMAC 2017**, p. 43–48, 2017.
- AUERNHAMMER, H. Precision farming-the environmental challenge. **Computers and Electronics in Agriculture**, v. 30, p. 41–33, 2001. DOI: 10.1016/S0168-1699(00)00153-8.

BALAFOUTIS, A. *et al.* Precision agriculture technologies positively contributing to ghg emissions mitigation, farm productivity and economics. **Sustainability (Switzerland)**, v. 9, n. 8, p. 1–28, 2017. ISSN 20711050. DOI: 10.3390/su9081339.

BARRETO, H. B. F. *et al.* Análises de indicadores de retenção e armazenamento de água no solo do perímetro irrigado Gorutuba, em Janaúba-MG. **Revista Verde**, Mossoró, v. 6, p. 189–192, 2011.

BARROS, L. C.; BASSANEZI, R. C. **Tópicos de Lógica Fuzzy e Biomatemática**. Campinas: Ed. UNICAMP, 2006. P. 354. ISBN 85-87185-05-5.

BELAY, S. A. *et al.* Conservation Agriculture Saves Irrigation Water in the Dry Monsoon Phase in the Ethiopian Highlands. **Water (Switzerland)**, v. 2103, 2019.

BERNARDO, S. *et al.* **Manual de Irrigação**. 9ª. Viçosa: Ed. UFV, 2019. P. 545.

BIRCHER, S. *et al.* Soil moisture sensor calibration for organic soil surface layers. **Geoscientific Instrumentation, Methods and Data Systems**, v. 5, n. 1, p. 109–125, 2016. ISSN 21930864. DOI: 10.5194/gi-5-109-2016.

BORGIA, E. The Internet of Things vision: key features, applications and open issues. v. 54, p. 1–31, 2014. DOI: 10.1016/j.comcom.2014.09.008.

BOULOGEORGOS, A. A.; DIAMANTOULAKIS, P. D.; K., George K. Low Power Wide Area Networks (LPWANs) for Internet of Things (IoT) Applications: Research Challenges and Future Trends. **ArXiv**, abs/1611.07449, 2016.

BRIGGS, L. J.; SHANTZ, H. L. **The wilting coefficient for different plants and its indirect determination**. Washington DC, 1912. P. 83.

BRILLANTE, L. *et al.* Electrical imaging of soil water availability to grapevine: a benchmark experiment of several machine-learning techniques. **Precision Agriculture**, v. 17, n. 6, p. 637–658, 2016. ISSN 15731618. DOI: 10.1007/s11119-016-9441-1.

BRILLANTE, L. *et al.* Monitoring soil volume wetness in heterogeneous soils by electrical resistivity. A field based pedotransfer function. **Journal of Hydrology**, v. 516, p. 55–66, 2014.

CARLESSO, R. Absorção de água pelas plantas: Água disponível versus extraível e a produtividade das culturas. **Ciência Rural**, Santa Maria, p. 183–188, 1995.

CARVALHO, L. A. de. Condutividade hidráulica do solo no campo: As simplificações do método do perfil instantâneo. **Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz"**, Mestre, n. CDD 631.432, p. 98, 2002.

CEBALLOS, M. R. *et al.* Fuzzy System of Irrigation Applied to the Growth of Habanero Pepper (*Capsicum chinense* Jacq.) under Protected Conditions in Yucatan, Mexico. **International Journal of Distributed Sensor Networks**, v. 2015, 2015. ISSN 15501477. DOI: 10.1155/2015/123543.

ÇENGEL, Y. A.; BOLES, M. A. **Termodinâmica**. 7^a. Porto Alegre: McGraw - Hill, 2013. P. 1018. ISBN 978-85-8055-200-3.

CHARLES, A. C.; NAMEN, A. A.; RODRIGUES, P. P. G. W. Comparison of data mining models applied to a surface meteorological station. **Rbrh**, v. 22, n. 0, 2017. DOI: 10.1590/2318-0331.0217170029.

COPPOLA, A. *et al.* Identifying optimal irrigation water needs at district scale by using a physically based agro-hydrological model. **Water (Switzerland)**, v. 11, n. 4, 2019. ISSN 20734441. DOI: 10.3390/w11040841.

CORA, J. E. *et al.* Manejo e Conservação do Solo e da Água. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 28, n. 4, p. 777–788, 2004. ISSN 0100-0683. DOI: 10.1590/S0100-06832005000500013.

CORÁ, J.E. *et al.* Variabilidade Espacial de Atributos do Solo para a Adoção do Sistema de Agricultura de Precisão na Cultura da Cana-de-açúcar. Jaboticabal, 2003.

COSTA, E. F. *et al.* A Self-Powered and Autonomous Fringing Field Capacitive Sensor Integrated into a Micro Sprinkler Spinner to Measure Soil Water Content. **Sensors**, v. 17, p. 575–591, 2017. DOI: 10.3390/s17030575.

DAS, Subir. A Semi-Cylindrical Capacitive Sensor Used for Soil Moisture Measurement. **International Journal of Electrical, Electronic Science and Engineering**, v. 8, p. 6, mar. 2014.

DIXON, H.H.; JOLY, J. On the ascent of sap. **Philosophical Transactions of the Royal Society London**, v. 3, 1894.

DÖLL, P. Impact of Climate Change and Variability on Irrigation Requirements: A Global Perspective. **Climatic Change**, v. 54, p. 269–293, 2002.

DOORENBOS, J; PRUITT, W.O. Guidelines for predicting crop water requirements. **FAO Irrigation and Drainage Paper**, v. 24, p. 144, 1977.

DORRI, A.; KANHERE, S. S.; JURDAK, R. **Blockchain in Internet of Things: Challenges and Solutions**. Brisbane: [s. n.], 2014.

EHLERS, E. **O que é agricultura sustentável**. 1^a. São Paulo: Ed. Brasiliense, 2009.

ELLER, H.; DENOTH, A. A capacitive soil moisture sensor. **Journal of Hydrology**, v. 185, n. 1-4, p. 137–146, 1996. ISSN 00221694. DOI: 10.1016/0022-1694(95)03003-4.

EMBRAPA. **Brazilian agricultural research corporation: Brazilian system of soil classification**. [S. l.: s. n.], 2006. P. 306. ISBN 85-85864-19-2.

EREMIA, M.; LIU, C.; EDRIS, A. **Advanced Solutions in Power Systems: HVDC, FACTS, and Artificial Intelligence**. [S. l.]: IEEE Press, 2016. P. 1–7. DOI: 10.1002/9781119175391.ch1.

EXTREMA, P. I. O. D. E. Plano Municipal de Recursos Hídricos, 2013.

FERREIRA, A. B. H. **Mini dicionário da língua portuguesa**. 4ª. Rio de Janeiro: Ed. Nova Fronteira, 2001. P. 790. ISBN 85-209-1114-5.

FRIZZONE, J. A. Necessidade de água para irrigação. **Notas de aula da disciplina Irrigação - Eng. Agrônômica. Esalq/USP**, p. 1–56, 2017.

GARG, K.; WANI, S. P.; PATIL, M. D. A simple and farmer-friendly decision support system for enhancing water use efficiency in agriculture: tool development, testing and validation. **Current Science**, v. 109, 2016.

GAVALI, M. S.; DHUS, B. J.; VITEKAR, A. B. A Smart Irrigation System for Agriculture, p. 6893–6899, 2016. DOI: 10.15680/IJIRSET.2016.0505039.

GIDDINGS, J. Determining readily available water to assist with irrigation management. New South Wales, 2014.

GOAP, A. *et al.* An IoT based smart irrigation management system using Machine learning and open source technologies. **Computers and Electronics in Agriculture**, Elsevier, v. 155, October, p. 41–49, 2018. ISSN 01681699. DOI: 10.1016/j.compag.2018.09.040.

GOLDSTEIN, A. *et al.* Applying machine learning on sensor data for irrigation recommendations: revealing the agronomist's tacit knowledge. **Precision Agriculture**, Springer US, v. 19, n. 3, p. 421–444, 2018. ISSN 15731618. DOI: 10.1007/s11119-017-9527-4.

GOMIDE, F. A. C.; GUDWIN, R. R.; TANSCHKEIT, R. **Conceitos Fundamentais da Teoria de Conjuntos Fuzzy: Lógica Fuzzy e Aplicações**. Campinas: Ed. UNICAMP, 1988. P. 38.

GONZÁLEZ PEREA, R. *et al.* Optimisation of water demand forecasting by artificial intelligence with short data sets. **Biosystems Engineering**, v. 177, p. 59–66, 2019. ISSN 15375110. DOI: 10.1016/j.biosystemseng.2018.03.011.

GUERRA, A. J. T.; CUNHA, S.B. Geomorfologia - uma atualização de bases e conceitos. *In. PROCESSOS Erosivos nas Encostas*. 3ª. Rio de Janeiro: Ed. Bertrand Brasil, 1996.

HALLIDAY, D.; RESNICK, R.; WALKER, J. **Fundamentos da Física**. 4ª. Rio de Janeiro: Ed. LTC, 1993. P. 350.

HENDRAWAN, R. *et al.* Fuzzy Based Internet of Things Irrigation System. **2019 1st International Conference on Cybernetics and Intelligent System, ICORIS 2019**, IEEE, v. 1, August, p. 146–150, 2019. DOI: 10.1109/ICORIS.2019.8874900.

HILLEL, D. **Fundamentals of soil physics**. New York: Ed. Academic Press, 1980. P. 413.

IBRAHIM, F. S.; KONDITI, D.; MUSYOKI, S. Smart irrigation system using a fuzzy logic method. **International Journal of Engineering Research and Technology**, v. 11, n. 9, p. 1417–1436, 2018. ISSN 09743154.

IEEE CONFERENCE ON QUALITY MANAGEMENT, TRANSPORT AND INFORMATION SECURITY, INFORMATION TECHNOLOGIES, IT AND MQ AND IS. Nalchik: IEEE, 2016. ISBN 9781509036806.

IOT IEEE. **Towards a definition of the Internet of Things (IoT)**. Piscataway, 2015.

JAWAD, H. M. *et al.* Energy-efficient wireless sensor networks for precision agriculture: A review. **Sensors (Switzerland)**, v. 17, n. 8, 2017. ISSN 14248220. DOI: 10.3390/s17081781.

JIMENEZ, A. F. *et al.* **Advances in Information and Communication Technologies for Adapting Agriculture to Climate Change**. [S. l.]: Springer International Publishing, 2018. v. 687, p. 1–20. ISBN 978-3-319-70186-8. DOI: 10.1007/978-3-319-70187-5.

KAYAKUTLU, G.; MERCIER-LAURENT, E. **Intelligence for Energy**. [S. l.]: Elsevier, 2017. P. 79–116. ISBN 978-1-78548-039-3. DOI: 10.1016/B978-1-78548-039-3.50003-1.

KIEHL, E. J. **Manual de edafologia: relacoes solo-planta**. São Paulo: Agronomica Ceres, 1979. P. 262.

KITCHENHAM, B. **Procedures for Performing Systematic Reviews**. Keele, 2004.

KIZITO, F. *et al.* Frequency, electrical conductivity and temperature analysis of a low-cost capacitance soil moisture sensor. **Journal of Hydrology**, v. 352, n. 3-4, p. 367–378, 2008. ISSN 00221694. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2008.01.021.

KOJIMA, Y. *et al.* Low-Cost Soil Moisture Profile Probe Using Thin-Film Capacitors and a Capacitive Touch Sensor. *In. SENSORS*. [S. l.: s. n.], 2016.

LEMOS, R.C.; SANTOS, R.D. **Manual de descrição e coleta de solo no campo**. 3^a. Campinas: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 1996. P. 83.

LI, M. *et al.* Simulation of cotton growth and soil water content under film-mulched drip irrigation using modified CSM-CROPGRO-cotton model. **Agricultural Water Management**, Elsevier, v. 218, January, p. 124–138, 2019. ISSN 18732283. DOI: 10.1016/j.agwat.2019.03.041.

LIAGHAT, S.; BALASUNDRAM, S.K. A Review: The Role of Remote Sensing in Precision Agriculture S. Liaghat and S.K. Balasundram Department of Agriculture Technology, Faculty of Agriculture, University Putra Malaysia, 43400 Serdang, Selangor, Malaysia. **Agriculture**, v. 5, n. 1, p. 50–55, 2010.

LIBARDI, P. L. **Água no solo**. Viçosa: Ed. Física do solo, 2010. P. 103.

LIVI, C. P. **Fundamentos de fenômenos de transporte**: um texto para cursos básicos. 2^a. Rio de Janeiro: Ed. LTC, 2015. ISBN 978-85-216-2057-0.

LUENGO, R. F. A. C. *et al.* **Classificação de hortaliças**. Brasília: Embrapa Hortaliças, 1999. P. 61.

MANSI, T.; PASSERINI, T.; COMANICIU, D. **Artificial Intelligence for Computational Modeling of the Heart**. [S. l.]: Academic Press, 2020. P. xxiii–xxxi. ISBN 978-0-12-817594-1. DOI: 10.1016/B978-0-12-817594-1.00008-5.

MATHWORKS. **Mamdani and Sugeno Fuzzy Inference Systems**. [S. l.: s. n.], 2019. Disponível em: <https://www.mathworks.com/help/fuzzy/defuzzification-methods.html>. Acesso em: 20 nov. 2019.

MAZOYER, M. **História das agriculturas no mundo**: do neolítico à crise contemporânea. 1^a. São Paulo: Ed. UNESP, 2010. P. 568. ISBN 978-85-7 139-994-5.

MEERADEVI, S. M.A.; MUNDADA, M.R.; POOJA, J.N. Design of a smart water-saving irrigation system for agriculture based on a wireless sensor network for better crop yield. **Lecture Notes in Electrical Engineering**, v. 500, 2019.

MIRHOSSEINI, M.; BARANI, F.; NEZAMABADI-POUR, H. QQIGSA: A quadrivalent quantum-inspired GSA and its application in optimal adaptive design of wireless sensor networks. **Netw. Comput. Appl.**, 2017. DOI: 10.1016/j.jnca.2016.11.001.

MONDAL, P.; BASU, M. Adoption of precision agriculture technologies in India and in some developing countries: Scope, present status and strategies. **Progress in Natural Science**, National Natural Science Foundation of China e Chinese Academy of Sciences, v. 19, n. 6, p. 659–666, 2009. ISSN 10020071. DOI: 10.1016/j.pnsc.2008.07.020.

MUNAKATA, T. **Fundamentals of the new artificial intelligence**. Cleveland: Springer US, 2008. P. 255. ISBN 978-1-84628-838-8. DOI: 10.100/978-1-84628-839-5.

NASCIMENTO, C. L.; YONEYAMA, T. **Inteligência Artificial em Controle e Automação**. 1ª. São Paulo: Ed. Edgard Blucher Ltda., 1999. P. 219.

NASCIMENTO, P. S. *et al.* Estudo comparativo de métodos para a determinação da curva de retenção de água no solo. **Revista Brasileira Agricultura. Irriga**, Fortaleza, v. 10, p. 875–882, 2016.

NATIONS, U. **World Population**. 2019. Disponível em: <https://www.un.org/en/sections/issues-depth/population/index.html>. Acesso em: 18 out. 2019.

OZDOGAN, M. *et al.* Remote sensing of irrigated agriculture: Opportunities and challenges. **Remote Sensing**, v. 2, n. 9, p. 2274–2304, 2010. ISSN 20724292. DOI: 10.3390/rs2092274.

PANCHARD, J. *et al.* Common Sense Net: A Wireless Sensor Network for Resource-Poor Agriculture in the Semi-arid Areas of Developing Countries. **Information Technologies and International Development**, v. 4, p. 51–67, 2007.

PATROO, L.; THACOOREE, K.; MUNGUR, A. **Smart and Sustainable Engineering for Next Generation Applications**. [S. l.]: Springer International Publishing, 2019. v. 561, p. 105–114. ISBN 978-3-030-18239-7. DOI: 10.1007/978-3-030-18240-3.

PETKOVI, B. *et al.* Neuro-fuzzy estimation of reference crop evapotranspiration by neuro fuzzy logic based on weather conditions. **Computers and Electronics in Agriculture**, v. 173, March, 2020. DOI: 10.1016/j.compag.2020.105358.

PRETTY, J. N. Farmers' extension practice and technology adaptation: agricultural revolution in 17–19th century Britain. **Agriculture and Human Values**, v. VII, p. 132–148, 1991.

PRETTY, J. N. Participatory learning for sustainable agriculture. **World Development**, v. 23, n. 8, p. 1247–1263, 1995. ISSN 0305750X. DOI: 10.1016/0305-750X(95)00046-F.

PRETTY, J. N.; BHARUCHA, Z. P. Sustainable intensification in agricultural systems. **Annals of Botany**, v. 114, n. 8, p. 1571–1596, 2014. ISSN 10958290. DOI: 10.1093/aob/mcu205.

QUEIROZ, T. M.; BOTREL, T. A.; FRIZZONE, J. A. Desenvolvimento de Software e Hardware para Irrigação de precisão usando pivô Central. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, mar. 2008.

REICHARDT, K. Capacidade de campo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, p. 211–216, 1988.

REICHARDT, K. **Processos de transferência no sistema solo-planta- atmosfera**. 3^a. Piracicaba: USP / Cargil, 1975. P. 286.

REICHARDT, K.; TIMM, L. C. **Solo, planta e atmosfera: conceitos, processos e aplicações**. 2^a. São Paulo: Ed. Manole, 2012. P. 499. ISBN 978-85-204-3339-3.

RFID JOURNAL, INC. **The History of RFID Technology**. 2005. Disponível em: <https://www.rfidjournal.com/the-history-of-rfid-technology>. Acesso em: 18 dez. 2020.

RICH, E.; KNIGHT, K. **Inteligência Artificial**. 2^a. São Paulo: Ed. Makron Books Ltda, 1994. P. 722.

RIKA, INC. RK520-02 Soil Moisture , Temperature & EC Sensor, p. 1–2, 2019.

ROBINSON, D. A. *et al.* Soil moisture measurement for ecological and hydrological watershed-scale observatories: A review. **Vadose Zone Journal**, v. 7, n. 1, p. 358–389, 2008. ISSN 15391663. DOI: 10.2136/vzj2007.0143.

ROMANO, I.; SANTINI, A. Water retention and storage: Field. In: Dane, J. H ; Topp, C. (Eds.) **Methods of soil analysis. Madison, Soil Science Society of America**, v. 4, p. 721–738, 2002.

RUSSELL, Stuart; NORVIG, Peter; DAVIS, Ernest. **Artificial intelligence: a modern approach**. 3. ed. Upper Saddle River, NJ: Prentice Hall, 2010.

SAHOTA, H.; KUMAR, R.; A.KAMAL. A wireless sensor network for precision agriculture and its performance. **Wireless Communications and Mobile Computing**, v. 11, p. 1628–1645, 2011.

SANTOS, H. G. *et al.* **Sistema Brasileiro de Classificação de Solos**. 5^a. Brasília: Embrapa Solos, 2018. P. 356. ISBN 9788570358004.

SÃO PAULO, S.A.A.E. **Agricultura e abastecimento**. 2019. Disponível em: <https://www.agricultura.sp.gov.br/noticias/de-vilao-a-mocinho-secretaria-fomenta-cultivo-sustentavel-do-pimentao-para-a-natureza-e-o-produtor-sairem-no-lucro/>. Acesso em: 2 set. 2020.

SINGH, A. *et al.* Machine Learning for High-Throughput Stress Phenotyping in Plants. **Trends in Plant Science**, Elsevier Ltd, v. 21, n. 2, p. 110–124, 2016. ISSN 13601385. DOI: 10.1016/j.tplants.2015.10.015.

SINGHAL, K.; MEDHASHREE, R.; SINGARI, R. M. Differentiation of mamdani and sugeno fuzzy inference system in developing automatic plant watering systems for domestic use.

International Journal of Innovative Technology and Exploring Engineering, v. 9, n. 1, p. 5202–5209, 2019. ISSN 22783075. DOI: 10.35940/ijitee.A9232.119119.

SLATYER, R. O. The significance of the permanent wilting percentage in studies of plant and soil water relations. **Botanical Review**, v. 23, p. 585–636, 1957.

SOIL PHYSICAL QUALITY. Theory, effects of soil texture, density, and organic matter, and effects on root growth. **Geoderma**, v. 120, n. 3-4, p. 201–214, jun. 2004. ISSN 00167061. DOI: 10.1016/j.geoderma.2003.09.004.

STEDUTO, P. *et al.* 3.1 AquaCrop: concepts, rationale and operation. **Aquacrop**, p. 17–49, 1979.

SURUTHI, N. *et al.* Managing irrigation in Indian agriculture using fuzzy logic - A decision support system. **International Journal of Engineering and Technology(UAE)**, v. 7, n. 2, p. 321–325, 2018. ISSN 2227524X. DOI: 10.14419/ijet.v7i2.24.12075.

TIAN, F.; ZHANG, Y. Spatiotemporal patterns of evapotranspiration , gross primary productivity , and water use e ffi ciency of cropland in agroecosystems and their relation to the water-saving project in the Shiyang River Basin of Northwestern China. **Computers and Electronics in Agriculture**, Elsevier, v. 172, March, p. 105379, 2020. ISSN 0168-1699. DOI: 10.1016/j.compag.2020.105379.

VIANI, F. Experimental Validation of a Wireless System for the Irrigation Management in Smart Farming Applications. **Microwave and Optical Technology Letters**, v. 58, 2016. DOI: 10.1002/mop.

WARD, F. A.; PULIDO-VELAZQUEZ, M. Water conservation in irrigation can increase water use. **Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America**, v. 105, n. 47, p. 18215–18220, 2008. ISSN 00278424. DOI: 10.1073/pnas.0805554105.

WEATHER UNDERGROUND, INC. **Personal Weather Stations**. 2020. Disponível em: <https://www.wunderground.com/weather/br/nova-petr%7B%5C'%7Bo%7D%7Dpolis/-23.71,-46.54>. Acesso em: 5 fev. 2020.

WEATHER UNDERGROUND, INC. **Variação dos parâmetros do microclima**. 2019. Disponível em: <https://www.wunderground.com/dashboard/pws/ISOBER3/graph/2019-11-18/2019-11-18/monthly>. Acesso em: 5 fev. 2020.

WEATHER UNDERGROUND, INC. **Weather Forecast**. 2020. Disponível em: <https://www.wunderground.com/forecast/br/s%7B%5C~%7Ba%7D%7Do-bernardo%20do%20campo/ISOBERNA3>. Acesso em: 20 jan. 2020.

XING, L.; GIGER, M.L.; MIN, J.K. **Artificial Intelligence in Medicine**. [S. l.]: Academic Press, 2021. P. i–iii. ISBN 978-0-12-821259-2. DOI: 10.1016/B978-0-12-821259-2.00026-0.

YANG, J. *et al.* Analysis of camera arrays applicable to the internet of things. **Sensors (Switzerland)**, v. 16, n. 3, p. 1–12, 2016. ISSN 14248220. DOI: 10.3390/s16030421.

ZHAO, J. S.; BODNER, G.; REWALD, B. Using Machine Learning for Improved Pairwise Genotype Classification Based on Root Traits. **Frontiers in Plant Science**, v. 7, 2016. DOI: ARTN186410.3389/fpls.2016.01864.

APÊNDICE A – RESULTADOS DO EXPERIMENTO SIMULADOR

Neste apêndice estão todos os resultados obtidos nas simulações do experimento.

A.0.1 Simulação 1 - Período: 01/07/2018 à 29/09/2018

Figura 58 – Irrigação total - ciclo de 90 dias - Simulação 1

Fonte: Autor

Figura 59 – Evolução da umidade do solo - FIS - ciclo de 90 dias - Simulação 1

Fonte: Autor

Figura 60 – Evolução da irrigação - ciclo de 90 dias - Simulação 1

Fonte: Autor

A.0.2 Simulação 2 - Período: 01/10/2018 à 30/12/2018

Figura 61 – Irrigação total - ciclo de 90 dias - Simulação 2

Fonte: Autor

Figura 62 – Evolução da umidade do solo - FIS - ciclo de 90 dias - Simulação 2

Fonte: Autor

Figura 63 – Evolução da irrigação - ciclo de 90 dias - Simulação 2

Fonte: Autor

A.0.3 Simulação 3 - Período: 01/01/2019 à 01/04/2019

Figura 64 – Irrigação total - ciclo de 90 dias - Simulação 3

Fonte: Autor

Figura 65 – Evolução da umidade do solo - FIS - ciclo de 90 dias - Simulação 3

Fonte: Autor

Figura 66 – Evolução da irrigação - ciclo de 90 dias - Simulação 3

Fonte: Autor

A.0.4 Simulação 4 - Período: 02/04/2019 à 01/07/2019

Figura 67 – Irrigação total - ciclo de 90 dias - Simulação 4

Fonte: Autor

Figura 68 – Evolução da umidade do solo - FIS - ciclo de 90 dias - Simulação 4

Fonte: Autor

Figura 69 – Evolução da irrigação - ciclo de 90 dias - Simulação 4

Fonte: Autor

A.0.5 Simulação 5 - Período: 02/07/2019 à 30/09/2019

Figura 70 – Irrigação total - ciclo de 90 dias - Simulação 5

Fonte: Autor

Figura 71 – Evolução da umidade do solo - FIS - ciclo de 90 dias - Simulação 5

Fonte: Autor

Figura 72 – Evolução da irrigação - ciclo de 90 dias - Simulação 5

Fonte: Autor

A.0.6 Simulação 6 - Período: 26/08/2019 à 29/11/2019

Figura 73 – Irrigação total - ciclo de 90 dias - Simulação 6

Fonte: Autor

Figura 74 – Evolução da umidade do solo - FIS - ciclo de 90 dias - Simulação 6

Fonte: Autor

Figura 75 – Evolução da irrigação - ciclo de 90 dias - Simulação 6

Fonte: Autor

A.0.7 Simulação 7 - Período: 13/09/2019 à 12/12/2019

Figura 76 – Irrigação total - ciclo de 90 dias - Simulação 7

Fonte: Autor

Figura 77 – Evolução da umidade do solo - FIS - ciclo de 90 dias - Simulação 7

Fonte: Autor

Figura 78 – Evolução da irrigação - ciclo de 90 dias - Simulação 7

Fonte: Autor

A.0.8 Simulação 8 - Período: 01/10/2019 à 30/12/2019

Figura 79 – Irrigação total - ciclo de 90 dias - Simulação 8

Fonte: Autor

Figura 80 – Evolução da umidade do solo - FIS - ciclo de 90 dias - Simulação 8

Fonte: Autor

Figura 81 – Evolução da irrigação - ciclo de 90 dias - Simulação 8

Fonte: Autor

A.0.9 Simulação 9 - Período: 13/11/2019 à 16/02/2020

Figura 82 – Irrigação total - ciclo de 90 dias - Simulação 9

Fonte: Autor

Figura 83 – Evolução da umidade do solo - FIS - ciclo de 90 dias - Simulação 9

Fonte: Autor

Figura 84 – Evolução da irrigação - ciclo de 90 dias - Simulação 9

Fonte: Autor

A.0.10 Simulação 10 - Período: 01/01/2020 à 31/03/2020

Figura 85 – Irrigação total - ciclo de 90 dias - Simulação 10

Fonte: Autor

Figura 86 – Evolução da umidade do solo - FIS - ciclo de 90 dias - Simulação 10

Fonte: Autor

Figura 87 – Evolução da irrigação - ciclo de 90 dias - Simulação 10

Fonte: Autor

A.0.11 Simulação 11 - Período: 02/04/2020 à 01/07/2020

Figura 88 – Irrigação total - ciclo de 90 dias - Simulação 11

Fonte: Autor

Figura 89 – Evolução da umidade do solo - FIS - ciclo de 90 dias - Simulação 11

Fonte: Autor

Figura 90 – Evolução da irrigação - ciclo de 90 dias - Simulação 11

Fonte: Autor

APÊNDICE B – DETERMINAÇÃO DA TAXA DE INFILTRAÇÃO DO SOLO

Determinação da curva de infiltração do solo pelo método do infiltrômetro de Hills.

Materiais

- 1 Tubo PVC 100 mm de diâmetro por 250 mm de comprimento
- 1 Escala graduada de 300 mm de comprimento
- 1 Marreta de 2 kg de massa
- 1 Caibro de madeira de 25 mm por 75 mm por 300 mm (AxLxC)
- 1 Cronômetro
- 1 Planilha em folha de papel
- 1 Caneta esferográfica
- 1 Balde de 4500 ml
- 1 Copo de 400 ml graduado

Método

- 1) Enterrar o tubo de PVC à profundidade de 50 mm no solo, usando a marreta e o caibro como base de apoio à batida da marreta.
- 2) Fixar a escala graduada na parede interna do tubo de PVC.
- 3) Ajustar o cronômetro (zerar).
- 4) Reservar um volume de 1570 ml.
- 5) Disparar o cronômetro simultaneamente à colocação do volume de água reservado.
- 6) Anotar a diferença na coluna de água obtida por meio da escala graduada a cada minuto.
- 7) Repor o volume de água até a marca de 130 mm sempre que o nível de água atingir a marca de 80 mm na escala graduada.
- 8) Encerrar o ensaio após três medições consecutivas e constantes da diferença da coluna de água e após sessenta minutos de ensaio.

Ensaio 1 – Medições

Data: 10/10/2019 Hora: 16:25

Local: Fazendinha - FEI

Dimensões do tubo (Cx D): 250 mm X 100 mm

Relação mm / ml: 7,85

Tabela com os dados coletados

Tempo	Régua	Altura	Volume	Tempo	Régua	Altura	Volume	Tempo	Régua	Altura	Volume
min	posição	mm	infiltrada	min	posição	mm	infiltrada	min	posição	mm	infiltrada
mm	ml	mm	ml	mm	ml	mm	ml	mm	ml	mm	ml
0	200	0	0	30	85	4	31,4	60	94	3	23,6
1	184	16	125,6	31	82	3	23,6	61	91	3	23,6
2	175	9	70,7	32	78	4	31,4	62	89	2	15,7
3	165	10	78,5	33	130	3	23,6	63	86	3	23,6
4	156	9	70,7	34	125	5	39,3	64	83	3	23,6
5	148	8	62,8	35	123	2	15,7	65	80	3	23,6
6	141	7	55,0	36	119	4	31,4	66	78	2	15,7
7	135	6	47,1	37	114	5	39,3	67	75	3	23,6
8	128	7	55,0	38	110	4	31,4	68	72	3	23,6
9	123	5	39,3	39	108	2	15,7	69	69	3	23,6
10	116	7	55,0	40	105	3	23,6				
11	110	6	47,1	41	102	3	23,6				
12	105	5	39,3	42	98	4	31,4				
13	100	5	39,3	43	95	3	23,6				
14	95	5	39,3	44	92	3	23,6				
15	91	5	35,3	45	89	3	23,6				
16	86	5	35,3	46	86	3	23,6				
17	83	3	23,6	47	84	3	19,6				
18	79	4	31,4	48	80	4	27,5				
19	130	4	31,4	49	130	3	23,6				
20	125	5	39,3	50	125	5	39,3				
21	120	5	39,3	51	123	2	15,7				
22	115	5	39,3	52	120	3	23,6				
23	111	4	31,4	53	116	4	31,4				
24	107	4	31,4	54	114	3	19,6				
25	103	4	31,4	55	109	5	35,3				
26	99	4	31,4	56	107	2	15,7				
27	96	3	23,6	57	103	4	31,4				
28	92	4	31,4	58	100	3	23,6				
29	89	3	23,6	59	97	3	23,6				

Curva de infiltração

APÊNDICE C – CALIBRAÇÃO DO SENSOR DE UMIDADE DO SOLO

Calibração do sensor de umidade do solo – método da secagem em estufa com temperatura em 105°C

Materiais

- 1 Estufa
- 1 béquer de 450ml
- 1 Planilha para anotação (papel)
- 1 Caneta esferográfica
- 1 Balança digital com escala de medição entre 0 e 4500g
- 1 Módulo de medição de umidade do solo portátil

Método

- 1) Ajustar a temperatura da estufa para 105°C.
- 2) Medir a massa do béquer vazio e anotar na planilha no campo adequado.
- 3) Colocar uma porção de solo do local desejado até a medida máxima indicada no béquer.
- 4) Medir a massa do béquer com a porção de solo e anotar na planilha no campo adequado.
- 5) Inserir o sensor de umidade, presente no módulo de medição, no béquer.
- 6) Aguardar a estabilização da medição e anotar o valor mostrado no display na planilha de medição.
- 7) Repetir o passo 5 por 3 vezes e extrair a média aritmética das três medições, anotando o valor na planilha no campo adequado.
- 8) Retirar o sensor de umidade do béquer.
- 9) Despejar água no béquer em porções pequenas, aguardando a infiltração no solo até que fique uma lâmina constante de água na superfície do béquer, e sem a formação de bolhas de ar.
- 10) Medir a massa do béquer com a porção de solo saturado e anotar na planilha no campo adequado.
- 11) Inserir o sensor de umidade, presente no módulo de medição, no béquer.
- 12) Aguardar a estabilização da medição e anotar o valor mostrado no display na planilha de medição.
- 13) Repetir o passo 11 por 3 vezes e extrair a média aritmética das três medições, anotando o valor na planilha no campo adequado.
- 14) Retirar o sensor de umidade do béquer.
- 15) Levar o béquer à estufa, anotando o horário inicial do processo.
- 16) Após 12 horas de secagem na estufa, retirar o béquer da estufa e realizar medições periódicas horárias, da massa do béquer a cada 2 horas.
- 17) Repetir o passo 16 até que haja 2 medições de massa do béquer iguais e consecutivas ou que o tempo de secagem seja maior que 24 horas.
- 18) Retirar o béquer da estufa e realizar a última medição de massa da porção do solo seco e anotar na planilha no campo adequado.
- 19) Inserir o sensor de medição de umidade, presente no módulo de medição, no béquer.

- 20) Aguardar a estabilização da medição e anotar na planilha de medição o valor mostrado no display.
- 21) Aguardar o resfriamento completo da temperatura do béquer e da porção do solo seco.
- 22) Adicionar uma porção de água equivalente a 1% da massa de solo seco no béquer.
- 23) Aguardar o processo de infiltração da água no solo por 30 minutos.
- 24) Inserir o sensor de medição de umidade, presente no módulo de medição, no béquer.
- 25) Aguardar a estabilização da medição e anotar na planilha de medição o valor mostrado no display e a massa da solução.
- 26) Repetir os passos 22 a 25 até que a massa total da solução seja novamente igual à massa inicial do procedimento.
- 27) Extrair a função de massa do solo por valor do sensor.
- 28) Extrair a função de % de umidade do solo por valor do sensor.

Planilha de anotações

Data	Hora	Etapa	Massa do béquer (g)	Valor do sensor (int)	Solo
16/10/2019	19:28	Início	465	18574	Saturado
18/10/2019	14:28	Final	380	32767	Seco
Umidade à massa (%)	Valor do sensor	Umidade à massa (%)	Valor do sensor	Umidade à massa (%)	Valor do sensor
0	32767	20	23320	28	21775
1	31508	20	27250	28	21165
5	30408	20	23360	29	21613
5	30767	20	23625	29	19545
10	28483	21	21820	29	19200
10	25750	22	21750	29	21215
10	30103	22	21940	29	21175
12	26424	23	21146	30	21211
15	25520	23	19020	31	20550
15	26700	23	22275	31	20001
15	25820	24	20812	31	19100
16	28875	25	22685	31	20668
16	24761	25	19895	31	20609
17	29620	25	22599	33	19215
18	23932	26	20905	33	19920
19	24428	26	22000	33	19468
19	24290	27	19740	35	18574
19	25690	27	19460		

Curva e regressão

APÊNDICE D – ITENS E RECURSOS UTILIZADOS NOS EXPERIMENTOS

Tabela 25 – Descrição do sistema de irrigação

Parâmetro - Elemento	Uso	Etapa do sistema	Hardware	Software	Instalação
Previsão de chuva	Atenuação da prescrição de irrigação	FIS	WS-2600-1		Estação local
Probabilidade de chuva	Atenuação da prescrição de irrigação	FIS	WS-2600-1		Estação local
Velocidade do vento	Cálculo da ETo	Algoritmo de controle	WS-2600-1		Estação local
Umidade do ar	Cálculo da ETo	Algoritmo de controle	DHT22 HTU21D	-	Probe
Temperatura do ar	Cálculo da ETo	Algoritmo de controle	DHT22 HTU21D	-	Probe
Umidade do solo	Determinação do PDC e percolação profunda	Modelo fuzzy / Algoritmo de controle	Sensor v1.2	-	Probe
GPS	Determinação da geoposição do Probe	Algoritmo de controle	Sparkfun Venus	-	Probe
Fluxômetro	Determinação do volume de irrigação - fuzzy e FAO	Algoritmo de irrigação	YF-S201b	-	Módulo de irrigação
Motobomba	Sistema de irrigação	Algoritmo de irrigação	Intech Machine BFL120	-	Módulo de irrigação
Gotejador	Sistema de irrigação	Módulo de irrigação		-	Módulo de irrigação
Processador	Processamento e armazenamento dos dados e Sistema de comunicação	Módulo principal	Raspberry Pi3 B+	Python3, MySQL	Unidade de controle
Comunicação	Transmissão dos dados entre sistemas	Interface entre módulos	Raspberry Pi3 B+	GPIO, I ₂ C	Probe, Módulo de irrigação, Unidade de controle

Fonte: Autor

ANEXO A – CLASSIFICAÇÃO TEXTURAL DO SOLO

A.0.1 Triângulo de classificação textural

Figura 91 – Triângulo de classificação textural

Fonte: Autor "adaptado de" Lemos e Santos, 1996

A.0.2 Escala Atterberg

Tabela 26 – Classificação do solo pela escala Atterberg

Calhaus	Cascalho	Areia Grossa	Areia Fina	Silte	Argila
200 - 20	20 - 2	2 - 0,2	0,2 - 0,02	0,02 - 0,002	0,002 - 0,001
Tamanho de partículas em mm					

Fonte: Autor "adaptado de" Reichardt e Timm, 2012

A.0.3 Sistema Embrapa de classificação textural

Tabela 27 – Sistema Brasileiro de Classificação do solo

Classe (ordem)	Termos de conotação ou memorização	Origem do nome	Área no Brasil
Argissolos	Solos com acumulação de argila no horizonte B	Do latim argilla (argila)	26%
Cambissolos	Solos que possuem horizonte B em estágio inicial de formação	Do latim cambiare (trocar, mudar), indicando que este solo já é mais desenvolvido que o Neossolo	5.3%
Chernossolos	Solos jovens, com razoável conteúdo de matéria orgânica e alta fertilidade química natural	Do russo chernyy (negro)	0.4%
Espodossolos	Solos com alto teor de areia, que apresentam horizonte B que acumula matéria orgânica	Do grego spodos (cinza vegetal)	2.7%
Gleissolos	Solos com cores acinzentadas	Do russo gley (massa de solo pastosa), devido à usual pegajosidade	4.7%
Latossolos	Solos velhos (muito alterados em relação à rocha de origem), profundos, com grande desenvolvimento do horizonte B	Do latim lat (material muito alterado)	31.6%
Luvissolos	Solos jovens com acumulação de argila no horizonte B e alta fertilidade química natural	Do latim luere (lavar) devido à perda de argila da superfície	2.9%
Neossolos	Solos jovens em início de formação (sem presença de horizonte B)	Do grego neo (novo)	13.2%
Nitossolos	Solos velhos com horizonte B e estrutura desenvolvida com superfícies brilhantes no horizonte B	Do latim nitidus (brilhante)	1.10%
Organossolos	Solos com altos teores de matéria orgânica, mas baixa fertilidade química	Do grego organikós, pertinente ou próprio de compostos de carbono	0.03%
Planossolos	Solos com acúmulo de argila no horizonte B, e geralmente tem cores acinzentadas	Do latim planus (plano)	2.7%
Plintossolos	Solos com acumulação de ferro em algum horizonte causando endurecimento	Do grego plínthos (tijolo)	7.0%
Vertissolos	Solos jovens, que formam fendas pronunciadas quando secos, com elevada fertilidade química. Tem a capacidade de expandir (molhados) ou contrair (secos)	Do grego organikós, pertinente ou próprio de compostos de carbono	0.29%

Fonte: Autor "adaptado de Santos *et al.*, 2018

ANEXO B – RESOLUÇÃO DE PROBLEMAS USANDO INTELIGÊNCIA ARTIFICIAL

B.0.1 Problemas, espaços de problemas e busca

A percepção do mundo real envolve a manipulação de uma grande quantidade de informação em forma de sinais analógicos acompanhados de ruídos, tornando a tarefa por parte das máquinas um tanto quanto difícil. Os sistemas que solucionam problemas específicos requer uma definição precisa do problema, determinando as suas situações iniciais e finais que serão aceitas como soluções adequadas. A definição do problema, como uma busca em um espaço de estados, passa pela explicitação das regras, restrições, condições iniciais e objetivos que possam satisfazer à solução dele (RICH; KNIGHT, 1994). Os agentes de resolução de problemas tomam decisões por meio de sequências de ações que levam a estados desejáveis conforme visto na Tabela 28 (RUSSELL; NORVIG; DAVIS, 2010).

As principais estratégias de busca empregada na resolução de problemas são:

- a) Busca em largura. Neste modelo, o agente começa pelo nó pai e vai explorando todos os nós sucessores em um mesmo nível (horizontalmente), antes de seguir ao próximo nível (RUSSELL; NORVIG; DAVIS, 2010). Ela tem a vantagem de não explorar uma borda ou ramo sem solução durante muito tempo ou até mesmo infinitamente. Porém, ela ocupará um espaço de memória grande uma vez que toda a árvore/gráfo gerado deverá ser armazenado (RICH; KNIGHT, 1994).
- b) Busca em profundidade. Aqui, o agente começa pelo nó pai e explora todo um ramo da árvore ou gráfo até chegar ao último elemento (folha). A partir daí ele retorna ao nó imediatamente anterior e explora todas as outras ramificações dele, antes de subir ao nível acima. Uma vantagem deste tipo de algoritmo é que ele requer menos memória uma vez que apenas os nós do caminho corrente são armazenados (RICH; KNIGHT, 1994).
- c) Busca por aprofundamento iterativo. É a busca em profundidade com limites crescentes até encontrar um objetivo (RUSSELL; NORVIG; DAVIS, 2010).

Ainda segundo Russell, Norvig e Davis (2010) a medição do desempenho dos algoritmos de resolução de problemas dá-se pela análise dos seguintes indicadores:

- a) Completeza. Quando o algoritmo oferece a garantia de encontrar uma solução, se ela existir.
- b) Corretude. Para cada entrada proposta, o algoritmo encontra a solução correta.
- c) Otimização. A estratégia encontra a solução ótima (melhor solução).
- d) Complexidade de tempo. É o tempo gasto para encontrar uma solução.
- e) Complexidade de espaço. É a quantidade de memória necessária para executar a busca.

Tabela 28 – Definições nas etapas de resolução de problemas

Etapas	Definição	Descrição
Definição do objetivo	Estado inicial	Estado no qual o agente de resolução começa
Definição do objetivo	Função sucessor	Uma descrição das ações possíveis que estão disponíveis ao agente
Definição do objetivo	Espaço de estados	O conjunto de todos os estados possíveis acessíveis a partir do estado inicial (grafo)
Definição do objetivo	Caminho	É uma sequência de estados conectados por uma sequência de ações
Definição do objetivo	Teste do objetivo	Determina se um dado estado é um estado objetivo
Definição do objetivo	Custo de caminho	Função que atribui um custo numérico a cada caminho
Definição do objetivo	Custo de passo	Custo numérico para ir de um estado ao outro
Definição do objetivo	Solução ótima	Tem o menor custo de caminho entre todas as soluções
Formulação do problema	Abstração	Processo de remover detalhes de uma ação ou estado
Soluções de busca	Árvores de busca	Gerada pelo estado inicial e pela função sucessor, que juntos definem o espaço de estados
Soluções de busca	Estratégia de busca	Escolha pelo caminho de exploração da árvore, podendo ser em largura, profundidade, aprofundamento iterativo ou bidirecional
Soluções de busca	Nó	Estrutura de dados usada para representar a árvore de busca. Os nós estão em caminhos específicos, definidos pelo nó pai
Soluções de busca	Estado	Corresponde a uma configuração do mundo (domínio do problema). Os estados não estão em caminhos específicos definidos a partir do nó pai
Soluções de busca	Borda	Nós gerados, mas não expandidos
Soluções de busca	Folha	cada elemento da borda

Fonte: Autor "adaptado de "Russell, Norvig e Davis, 2010

ÍNDICE

A

Água Total Disponível, 46
 Agente Lógico, 50
 Agricultura, 33
 Agricultura de Precisão, 58, 62
 Agricultura Sustentável, 35
 Ar Atmosférico, 35
 Arduino, 71
 Areia, 41
 Argila, 41
 ATD, 30

B

Base de Conhecimento, 50
 Base de Regras, 57, 78

C

Calor Específico, 44
 Capacidade de Campo, 29–31, 45, 47
 Capacitância, 64
 Capacitor, 64
 Coeficiente da Cultura, 40
 Coeficiente de Estresse Hídrico, 40
 Condutividade Térmica, 45
 Constante de Carga, 64
 Curva de Retenção da Água, 47

D

Defuzzificador, 55, 57
 Dielétrico, 64

E

Equação de Darcy-Buckingham, 47
 Evaporação, 38
 Evapotranspiração, 37, 39, 40, 46

Evapotranspiração da Cultura em Condição
 não Padrão, 39

Evapotranspiração da Cultura em Condição
 Padrão, 39

Evapotranspiração de Referência, 39

EXCEL, 69

Experimentos, 89

Extrema, 96

F

FAO, 40, 66, 73
 Fazendinha, 92
 FEI, 1, 75, 90, 92
 Fotossíntese, 37
 Fuzzificador, 57
 Fuzzy, 30–32, 50, 53, 55, 57, 70, 71, 73
 fuzzy, 117, 120

G

Gravimetria, 43
 Gravitacional, 42

H

Hardware, 91
 Horizontes do Solo, 41

I

Inteligência Artificial, 32, 48, 49, 57
 IoT, 13, 29–32, 59–61
 Irrigação, 11, 29–31, 65

K

Kc, 40
 Ks, 40

L

Lógica, 50

Lógica de Predicados, 50

Lógica fuzzy, 50

Lógica Proposicional, 50

Luminosidade do Ambiente, 62

M

Machine Learning, 30

Macronutrientes, 37

Mamdani, 53, 55

Matricial, 43

Micronutrientes, 37

N

Nova Petrópolis, 93

O

ONU, 40

Osmótica, 42

P

Pecuária, 33

Pimentão, 76

Ponto de Depleção Crítico, 30, 46, 47

Ponto de Murcha Permanente, 46, 47

Pressão, 42

R

Radiação Solar, 36, 70

Raspberry, 71

RBS, 69

Reflectometria, 62

RF, 30, 70

RFID, 60

RNA, 30, 70

Rotação de Cultura, 33, 34

S

SCOPUS, 69

Semântica, 50

Sensor de Umidade do Solo Capacitivo, 64

Silte, 41

Simulador, 89

Solo, 41

Sugeno, 54, 55

Superfícies de Controle, 87

Sustentabilidade, 34

SVM, 30, 70

SVR, 71

T

Temperatura do Ar, 11, 30, 62, 70

Temperatura do Solo, 70

Termogravimetria, 62

Transpiração, 38

U

Umidade do Solo, 70

Umidade Relativa do Ar, 30, 35, 39, 70

Universo do Discurso, 78, 79, 81, 83, 85

V

VBA, 69

Velocidade do Vento, 70

Vento, 36

VOSviewer, 69

W

Weather Underground, 94

World Agriculture, 13

WSN, 59, 61

X

XBee, 71

Z

ZigBee, 71