CENTRO UNIVERSITÁRIO FEI
SERGIO MONTELEONE

EXPLORAÇÃO DA ADOÇÃO DA AGRICULTURA DE PRECISÃO NO CONTEXTO DA AGRICULTURA 4.0: proposta de um modelo de gestão das operações de irrigação

São Paulo
2022

SERGIO MONTELEONE

EXPLORAÇÃO DA ADOÇÃO DA AGRICULTURA DE PRECISÃO NO CONTEXTO DA AGRICULTURA 4.0: proposta de um modelo de gestão das operações de irrigação

Tese apresentado ao Centro Universitário FEI, como parte dos requisitos necessários para obtenção do título de Doutor em Administração. Orientado pelo Prof. Dr. Edmilson Alves de Moraes.

São Paulo

2022

Monteleone, Sergio.
EXPLORAÇÃO DA ADOÇÃO DA AGRICULTURA DE PRECISÃO NO CONTEXTO DA AGRICULTURA 4.0: proposta de um modelo de gestão das operações de irrigação / Sergio Monteleone. São Paulo, 2022.
277 p. : il.

Tese - Centro Universitário FEI.
Orientador: Prof. Dr. Edmilson Alves de Moraes.

1. Agricultura de Precisão. 2. Agricultura 4.0. 3. Irrigação. 4. Comportamento do agricultor. 5. Gestão das operações. I. Alves de Moraes, Edmilson , orient. II. Título.

Elaborada pelo sistema de geração automática de ficha catalográfica da FEI com os dados fornecidos pelo(a) autor(a).

centro universitário FEI

APRESENTAÇÃO DE TESE
ATA DA BANCA JULGADORA

Programa de Pós-Graduação Stricto Sensu em Administração

DOUTORADO PPGA-10

Aluno: Sergio Monteleone **Matrícula:** 711802-9

Título do Trabalho: Exploração da adoção de Agricultura de Precisão no contexto da Agricultura 4.0: proposta de um modelo de gestão das operações de irrigação

Área de Concentração: Gestão da Inovação

Orientador: Prof. Dr. Edmilson Alves de Moraes

Data da realização da defesa: 21/02/2022

Avaliação da Banca Examinadora:

ORIGINAL ASSINADA

São Paulo, 21/02/2022

MEMBROS DA BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Edmilson Alves de Moraes Ass.: _____

Prof. Dr. Roberto Max Protil Ass.: _____

Prof. Dr. Rodrigo Filev Maia Ass.: _____

Prof. Dr. Ely Laureano Paiva Ass.: _____

Prof. Dr. Ricardo Yassushi Inamasu Ass.: _____

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

APROVADO ☐ REPROVADO ☐

VERSÃO FINAL DA TESE

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

_____

Aprovação do Coordenador do Programa de Pós-graduação

_____

Profª. Dra. Maria Tereza Saraiva de Souza

Dedico este trabalho aos meus amados pais pelo imenso amor e valores que me ensinaram e à minha doce Kênia pelo amor, compreensão, paciência, serenidade e companheirismo.

AGRADECIMENTOS

Aos meus pais que estão sempre perto de mim apesar da distância. À minha doce Kênia pelo apoio, pela inspiração e pelas sugestões preciosas.

Aos meus amigos e aos amigos de amigos, o que fizeram e fazem me deixa sem palavras.

Ao Professor Dr. Edmilson Alves De Moraes, meu orientador, por me aceitar no Programa de Pós-Graduação e por estar sempre disponível. Muito obrigado pela orientação e pelos conselhos preciosos, a nível professional mas sobretudo humano.

Ao Professor Dr. Rodrigo Filev Maia pela proposta de participar do projeto SWAMP e da oferta da bolsa. Muito obrigado mais uma vez desde o Mestrado, pela continua troca de ideias e disponibilidade para conversar.

Ao Professor Dr. Roberto Max Protil, pela coorientação na aproximação ao agronegócio e pela ajuda com alguns contatos fundamentais para realizar as entrevistas. Agradeço muito também as sugestões e recomendações.

Ao amigo Brenno Tondato de Faria, pela parceria desde o Mestrado, pelas longas trocas de opiniões, pelo apoio mais uma vez para a realização de simulações e pelas futuras colaborações.

À Rede Nacional de Ensino e Pesquisa e ao Centro Universitário FEI, muito obrigado pela bolsa de estudos.

Ao Professor Dr. Everardo Mantovani, pela gentileza e disponibilidade em relação ao contato com a "Empresa agrícola Bahia". Ao Dr. André Torre Neto pela apoio no contato com o piloto MATOPIBA. Ao proprietário da "Empresa agrícola Bahia", agradeço muito o interesse em participar desta pesquisa e o apoio fornecido. Aos gerentes das duas empresas agrícolas, muito obrigado pela gentileza, disponibilidade e colaboração.

Aos especialistas entrevistados, muito obrigado pelas preciosas conversas, pelos dados coletados e pela gentileza na aplicação da abordagem "bola de neve".

Aos Professores membros das bancas de qualificação e de defesa por aceitar meu convite e pelas valiosas discussões e sugestões.

Aos pesquisadores envolvidos no projeto SWAMP com que tive o prazer de trabalhar, obrigado pela colaboração.

Aos demais professores do Programa de Pós-Graduação, pela atenção e ensinamentos recebidos. Aos colegas do Doutorado, obrigado pela amizade e pela troca de ideias.

Ao pessoal da Secretaria do Programa de Pós-Graduação, da Biblioteca, da Coordenadoria Geral de Informática e da Portaria, obrigado pela cortesia e apoio.

Noi parliamo italiano
Il bambino e le stelle marine

"*Per cambiare il mondo basterebbe che qualcuno, anche piccolo, avesse il coraggio di incominciare*".

RESUMO

A agricultura está passando por uma nova revolução tecnológica, promovida pela quarta revolução industrial, e, ao mesmo tempo, está vivendo uma transformação tecnológica em razão da adoção da Agricultura de Precisão. Contudo, essa adoção está ocorrendo a um ritmo menor do que o esperado, como confirmado pela abundante literatura sobre os fatores que afetam a adoção. Apesar desta literatura, fatores relacionados ao comportamento do agricultor e à gestão das operações agrícolas são pouco explorados. Ainda, poucas pesquisas foram realizadas sobre a Agricultura 4.0, dando pouca atenção às pessoas e impactos sociais das novas tecnologias. Porém, alguns pesquisadores sugerem o comportamento do agricultor e a gestão das operações agrícolas como áreas potenciais de investigação. Portanto, esse trabalho propõe de explorar os fatores concernentes o comportamento do agricultor e a gestão das operações agrícolas para explicar a adoção de Agricultura de Precisão no contexto da Agricultura 4.0, e de aplicar a abordagem comportamental e a Teoria do Comportamento Planejado. Considerando a incipiente base teórica sobre a Agricultura 4.0 e a natureza exploratória das perguntas de pesquisa, neste trabalho é adotada uma metodologia multimétodos, que combina uma abordagem indutiva com uma dedutiva. Como resultado de uma revisão sistemática da literatura, entrevistas com especialistas e estudos de caso, os fatores que explicam a adoção e um modelo de gestão das operações de irrigação são propostos. O modelo fornece uma estrutura conceitual para estudar os fatores identificados, as relações entre eles, as proposições teóricas geradas como resultado da abordagem indutiva, e, consequentemente, a adoção. Em contraste com pesquisas anteriores, o modelo distingue entre planejamento e programação da irrigação. Um modelo de simulação de Dinâmica de Sistemas é construído para estudar as relações entre os fatores. Dois cenários de simulação são elaborados, considerando o sistema de irrigação de pivô central, para estudar as relações de causa e efeito entre os fatores envolvidos no planejamento da irrigação e a adoção da tecnologia de sensoriamento do satélite e o utilizo da tecnologia da estação meteorológica. Os resultados das simulações sugerem políticas para direcionar a adoção e destacam o papel dos insumos, água e energia, na gestão operacional. Uma análise de sensibilidade, ao variar do custo unitário de água, sugere uma mudança no modelo mental do agricultor no planejamento da irrigação. Ainda, os resultados dos estudos de caso permitem explorar as relações entre a adoção, o nível educacional e a capacitação do agricultor. Os fatores identificados contribuem a ampliar o entendimento dos determinantes da adoção de Agricultura de Precisão na era 4.0, acrescentando o comportamento do agricultor e a gestão das operações a literatura e explicando o potencial ainda inexplorado para as operações

de irrigação. Como resultado de pesquisa empírica uma definição de Agricultura 4.0 é proposta, que destaca o papel fundamental das tecnologias de sensoriamento IoT na evolução da Agricultura de Precisão para a Agricultura 4.0. Enfim, uma agenda de pesquisa futura é formulada, destacando a proposta de um modelo de gestão integrada das operações agrícolas fundamentada nos três pilares agronômicos, cultura, clima e solo.

Palavras-chave: Agricultura de Precisão. Agricultura 4.0. Irrigação. Comportamento do agricultor. Gestão das operações.

ABSTRACT

Agriculture is undergoing a new technological revolution, promoted by the fourth industrial revolution, and, at the same time, it is experiencing a technological transformation due to the adoption of Precision Agriculture. However, this adoption is occurring at a slower pace than expected, as confirmed by the abundant literature on the factors affecting the adoption. Despite this literature, the factors related to farmer behaviour and agricultural operations management are little explored. Furthermore, little research has been carried out on Agriculture 4.0, paying little attention to people and social impacts of new technologies. However, some researchers suggest the farmer behaviour and the agricultural operations management as potential areas of investigation. Therefore, this work proposes to explore the factors related to farmer behaviour and the agricultural operations management to explain the Precision Agriculture adoption in the context of Agriculture 4.0, and to apply the behavioural approach and the Theory of Planned Behavior. Considering the incipient theoretical basis on Agriculture 4.0 and the exploratory nature of the research questions, in this work a multi-method methodology is adopted, combining an inductive and a deductive approach. As a result of a systematic literature review, expert interviews and case studies, the factors explaining the adoption and a model of irrigation operations management are proposed. This model provides a conceptual framework to study the identified factors, the relationships between them, the theoretical propositions generated as a result of the inductive approach, and, consequently, the adoption. In contrast to previous literature, this model distinguishes between irrigation planning and irrigation scheduling. A System Dynamics simulation model is built to study the relationships between the factors. Two simulation scenarios are developed, considering the irrigation system of center pivot, to study the causal relationships between the factors involved in irrigation planning and the adoption of satellite sensing technology and the use of weather station technology. Simulation results suggest policies to drive the adoption and highlight the role of inputs, water and energy, in operations management. A sensitivity analysis, varying the unit cost of water, suggests a change in the farmer mental model regarding the irrigation planning. Furthermore, the results of the case studies make it possible to explore the relationships between the adoption, educational level and farmer training. The factors identified contribute to broadening the understanding of the determinants of Precision Agriculture adoption in the 4.0 era, adding farmer behaviour and operations management to the literature and explaining the still untapped potential for irrigation operations. As a result of empirical research, a definition of Agriculture 4.0 is proposed, highlighting the key role of IoT sensing

technologies in the evolution from Precision Agriculture to Agriculture 4.0. Finally, a future research agenda is formulated, highlighting the proposal for an integrated management model of agricultural operations based on the three agronomic pillars, culture, climate and soil.

Keywords: Precision Agriculture. Agriculture 4.0. Irrigation. Farmer behavior. Operations Management.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Quadro 1 - Escopo do projeto de tese 29
Figura 1 - Mapa da fundamentação teórica 33
Quadro 2 - Parâmetros medidos por meio das tecnologias de sensoriamento IoT 41
Quadro 3 - Vantagens e desafios relacionados à inspiração para a Industria 4.0 48
Figura 2 - Modelo de gestão das operações de máquinas agrícolas 50
Quadro 4 - Decisões no planejamento e programação das operações agrícolas 52
Quadro 5 - Características das teorias utilizadas para explicar a adoção de inovações 58
Figura 3 - Teoria do Comportamento Planejado 61
Figura 4 - Abordagem multimétodos 66
Figura 5 - Percentual de estabelecimentos caracterizados como de agricultura familiar 72
Figura 6 - Consumo de energia na irrigação no Brasil em 2019 74
Figura 7 - Área irrigada por pivôs centrais no Brasil em 2019 74
Figura 8 - Estrutura do livro dos códigos utilizada nesse projeto de tese 78
Quadro 6 - Técnicas de coleta de dados aplicadas 82
Figura 9 - Caixa e setas de interface de uma função IDEF0 85
Quadro 7 - Resumo das características das técnicas de simulação 87
Figura 10 - Elementos básicos de um modelo de Dinâmica de Sistemas 93
Figura 11 - Processo de aprendizagem baseado no feedback 94
Quadro 8 - Exemplo do processo de codificação para identificar as categorias e os fatores 98
Quadro 9 - Fatores e categorias que podem afetar a adoção resultantes das entrevistas com os especialistas 106
Quadro 10 - Fatores que podem afetar a adoção resultantes dos estudos de caso 119
Figura 12 - Diagrama de contexto da gestão das operações de irrigação 130
Figura 13 - Diagrama IDEF0 da gestão das operações de irrigação 130
Figura 14 - Diagrama IDEF0 do planejamento da irrigação dos cenários de simulação 140
Quadro 11 - Técnicas de coleta e análise de dados para a construção do modelo de simulação 145
Quadro 12 - Lista dos componentes endógenos e exógenos 145
Figura 15 - Diagrama dos ciclos causais dos mecanismos básicos 149
Figura 16 - Diagrama dos estoques e fluxos dos cenário de simulação - Uso de água planejado 153
Quadro 13 - Resumo dos dados meteorológicos 154

Figura 17 - Geometria e características do sistema de irrigação do pivô central 156
Figura 18 - Diagrama dos estoques e fluxos dos cenário de simulação - Uso de energia elétrica planejado (bomba) 157
Figura 19 - Diagrama dos estoques e fluxos dos cenário de simulação - Uso de energia elétrica planejado (motor) 159
Quadro 14 - Resultados dos cenários de simulação 160
Figura 20 - Resultados dos cenários de simulação - Necessidade de água de irrigação planejada na safra 160
Figura 21 - Resultados dos cenários de simulação - Uso de água planejado, Uso de energia elétrica planejado e relativos custos planejados 162
Figura 22 - Análise de sensibilidade do custo de uso de água planejado na safra ao variar do custo unitário de uso de água 169
Figura 23 - Análise de sensibilidade do custo de uso de água planejado na safra ao variar do custo unitário de uso de água - Ponto de equilíbrio 170
Quadro 15 - Estudo das relações entre os fatores nos dois estudos de caso 178
Quadro 16 - Definições de Agricultura de Precisão, de IoT e de Agricultura 4.0 186
Quadro 17 - Agenda de pesquisa futura 188
Figura 24 - Modelo de gestão integrada das operações agrícolas 192
Figura 25 - Fatores relacionados ao desenvolvimento sustentável resultantes das entrevistas 195
Figura 26 - Modelo conceitual - Ecossistema de uma empresa agrícola como escopo 232
Figura 27 - Modelo de simulação para a análise de políticas de difusão da Agricultura de Precisão no contexto da Agricultura 4.0 234
Quadro 18 - Questionário a ser utilizado nas entrevistas com os especialistas 236
Quadro 19 - Questionário a ser utilizado nas entrevistas com os gerentes das empresas agrícolas 238
Figura 28 - Procedimento utilizado para conduzir a revisão sistemática da literatura 244
Figura 29 - Número de documentos publicados por ano 248
Figura 30 - Número de documentos publicados por fonte 248
Figura 31 - Número de documentos por método de pesquisa 250
Quadro 20 - Perfis dos especialistas entrevistados 254
Quadro 21 - Fatores e categorias que afetam a adoção resultantes das entrevistas com os especialistas - Seleção de citações 257

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Análise dos fatores determinantes da adoção de AP 99
Tabela 2 - Número de documentos identificados nas bases de dados para cada termo de pesquisa usado 242

LISTA DE ABREVIAÇÕES

ABM - Simulação Baseada em Agentes (*Agent Based Simulation*).

AC - Atitude em relação ao comportamento (*Attitude*).

ANA - Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico.

AP - Agricultura de Precisão (*Precision Agriculture*).

CBHSF - Comitê da Bacia Hidrográfica do Rio São Francisco.

CONAB - Companhia Nacional de Abastecimento.

CPM - Método do Caminho Crítico (*Critical Path Method*).

CPS - Sistema Ciber-Físico (*Cyber-Physical System*).

CSIRO - Organização de Pesquisa Científica e Industrial da Commonwealth (*Commonwealth Scientific and Industrial Research Organisation*).

DES - Simulação de Eventos Discretos (*Discrete Event Simulation*).

DOI - Difusão da Inovação (*Diffusion of Innovation*).

EMBRAPA - Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária.

ERP - Planejamento de Recursos Empresariais (*Enterprise Resource Planning*).

FMIS - Sistemas de Informação de Gestão Agrícola (*Farm Management Information Systems*).

GDD - Graus-dia de Crescimento (*Growing Degree Days*).

GIS - Sistema de Informação Geográfica (*Geographical Information System*).

GNSS - Sistemas de Navegação Global por Satélite (*Global Navigation Satellite Systems*).

GPS - Sistema de Posicionamento Global (*Global Positioning System*).

IBGE - Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística.

ICAM - Manufatura Integrada Auxiliada por Computador (*Integrated Computer-Aided Manufacturing*).

ICOM - Entrada-Controle-Saída-Mecanismo (*Input-Control-Output-Mechanism*).

IDEF0 - Definição de Integração para Modelo de Função (*Integration Definition for Function Modeling*).

IoS - Internet dos Serviços (*Internet of Services*).

IoT - Internet das Coisas (*Internet of Things*).

ISPA - Sociedade Internacional de Agricultura de Precisão (*International Society for Precision Agriculture*).

JIT - No tempo certo (*Just-in-Time* - JIT).

LAI - Índice de Área Foliar (*Leaf Area Index*).

MDDDII - Modelo de Determinantes de Difusão, Disseminação e Implementação de Inovações (*Model of Determinants of Diffusion, Dissemination, and Implementation of Innovations*).

NDVI - Índice de Vegetação de Diferença Normalizada (*Normalized Difference Vegetation Index*).

NIST - Instituto Nacional de Padrões e Tecnologia (*National Institute of Standards and Technology*).

PEOU - Facilidade de Uso Percebida (*Perceived Ease of Use*).

PERT - Técnica de Avaliação e Revisão de Programas (*Program Evaluation and Review Technique*).

PI - Irrigação de Precisão (*Precision Irrigation*).

PBC - Controle Comportamental Percebido (*Perceived Behavioral Control*).

PPC - Planejamento e Controle da Produção (*Production Planning and Control*).

PU - Utilidade Percebida (*Perceived Utility*).

RFID - Identificação por Radiofrequência (*Radio-Frequency IDentification*).

SD - Dinâmica de Sistemas (*System Dynamics*).

S&OP - Planejamento de Vendas e Operações (*Sales and Operations Planning*).

SN - Norma Subjetiva (*Subjective Norm*).

SWAMP - *Smart Water Management Platform*.

SWOT - Análise das Forças, Fraquezas, Oportunidades e Ameaças (*Strengths, Weaknesses, Opportunities and Threats analysis*).

TAM - Modelo de Aceitação da Tecnologia (*Technology Acceptance Model*).

TPB - Teoria do Comportamento Planejado (*Theory of Planned Behavior*).

TRA - Teoria da Ação Racional (*Theory of Reasoned Action*).

UAV - Veículos Aéreos Não Tripulados (*Unmanned Aerial Vehicles*).

UM - Maximização da utilidade (*Utility Maximization*).

UML - Linguagem de Modelagem Unificada (*Unified Modeling Language*).

UTAUT - Teoria Unificada de Aceitação e Uso de Tecnologia (*Unified Theory of Acceptance and Usage of Technology*).

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO 20
2 ESCOPO DO PROJETO DE TESE 29
3 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA 32
3.1 AGRICULTURA DE PRECISÃO E FATORES QUE AFETAM A ADOÇÃO 33
3.1.1 Agricultura de Precisão: definição e tecnologias 34
3.1.2 Agricultura de Precisão e irrigação 35
3.1.3 Fatores que afetam a adoção de Agricultura de Precisão 38
3.2 INTERNET DAS COISAS E TECNOLOGIAS DE SENSORIAMENTO NA AGRICULTURA DE PRECISÃO 39
3.3 AGRICULTURA 4.0 E FATORES RELACIONADOS COM A INDÚSTRIA 4.0 E A GESTÃO DAS OPERAÇÕES 42
3.3.1 Definição de Agricultura 4.0 42
3.3.2 Fatores relacionados à Industria 4.0 44
3.3.3 Fatores relacionados à gestão das operações 49
3.4 COMPORTAMENTO DO AGRICULTOR E FATORES QUE AFETAM A ADOÇÃO 53
3.4.1 Teorias utilizadas para explicar a adoção de inovações 53
3.4.2 Teoria do Comportamento Planejado 60
3.4.3 Fatores que afetam a adoção de inovações na agricultura 64
4 METODOLOGIA 66
4.1 ABORDAGEM MULTIMÉTODOS 66
4.2 CONTEXTO DE PESQUISA: PROJETO SWAMP, MERCADO DE PRODUÇÃO AGROPECUÁRIO E AGRICULTURA IRRIGADA NO BRASIL 70
4.2.1 Projeto SWAMP 70
4.2.2 Mercado de produção agropecuário no Brasil 71
4.2.3 Agricultura irrigada no Brasil 73
4.3 ENTREVISTAS COM ESPECIALISTAS 75
4.4 ESTUDOS DE CASO 79
4.5 TÉCNICAS DE MODELAGEM E IDEF0 82

4.6 TÉCNICAS DE SIMULAÇÃO E DINÂMICA DE SISTEMAS 86
4.6.1 Técnicas de simulação 86
4.6.2 Dinâmica de Sistemas 92
5 RESULTADOS 97
5.1 RESULTADOS DA REVISÃO SISTEMÁTICA DA LITERATURA 98
5.2 FATORES QUE PODEM AFETAR A ADOÇÃO RESULTANTES DAS ENTREVISTAS COM ESPECIALISTAS 105
5.3 FATORES QUE PODEM AFETAR A ADOÇÃO RESULTANTES DOS ESTUDOS DE CASO 118
5.4 RESULTADOS DA ABORDAGEM INDUTIVA: PROPOSIÇÕES TEÓRICAS 125
5.5 MODELAGEM DA GESTÃO DAS OPERAÇÕES DE IRRIGAÇÃO 129
5.6 RELAÇÕES ENTRE FATORES - SIMULAÇÃO DE DINÂMICA DE SISTEMAS 139
5.6.1 Construção do modelo de simulação da Dinâmica de Sistemas 143
5.6.2 Mecanismos básicos e diagrama dos ciclos causais 148
5.6.3 Diagrama de estoques e fluxos 151
5.6.4 Resultados dos cenários de simulação 160
5.6.5 Teste 164
6 DISCUSSÃO 172
6.1 FATORES QUE PODEM AFETAR A ADOÇÃO DE AGRICULTURA DE PRECISÃO NO CONTEXTO DA AGRICULTURA 4.0 172
6.2 MODELO PROPOSTO DE GESTÃO DAS OPERAÇÕES DE IRRIGAÇÃO 174
6.3 RELAÇÕES ENTRE OS FATORES IDENTIFICADOS NO MODELO PROPOSTO - RESULTADOS DOS ESTUDOS DE CASO 176
6.4 RELAÇÕES ENTRE OS FATORES IDENTIFICADOS NO MODELO PROPOSTO - RESULTADOS DOS CENÁRIOS DE SIMULAÇÃO 180
6.5 PROPOSTA DE UMA DEFINIÇÃO DO CONCEITO DE AGRICULTURA 4.0 185
7 LIMITAÇÕES E AGENDA DE PESQUISA FUTURA 188
8 CONCLUSÕES 197
REFERÊNCIAS 200
GLOSSÁRIO 227
APÊNDICE A - Modelo conceitual - Ecossistema de uma empresa agrícola como escopo 231

APÊNDICE B - Modelo de simulação para a análise de políticas de difusão da agricultura de precisão no contexto da agricultura 4.0 233
APÊNDICE C - Questionário utilizado nas entrevistas com os especialistas 235
APÊNDICE D - Protocolo e questionário utilizados nos estudos de caso 237
APÊNDICE E - Resultados da revisão sistemática da literatura 239
E.1 ETAPAS DA REVISÃO SISTEMÁTICA 240
E.2 CRITÉRIOS DE INCLUSÃO E EXCLUSÃO 241
E.3 EXTRAÇÃO DOS DADOS 244
E.4 ANÁLISE DOS DADOS 247
APÊNDICE F - Perfis dos especialistas entrevistados 253
APÊNDICE G - Fatores e categorias que afetam a adoção resultantes das entrevistas com os especialistas 256
APÊNDICE H - Construção do modelo de simulação – documentação 270

1 INTRODUÇÃO

A agricultura está passando por uma nova revolução tecnológica (BERNHARDT et al., 2021; ROSE; CHILVERS, 2018), em razão do emprego de tecnologias como Internet das Coisas (*Internet of Things* - IoT), big data, inteligência artificial, computação em nuvem, sensoriamento remoto (ZHAI et al., 2020). A agricultura é afetada pela quarta revolução industrial (BARRETT; ROSE, 2020; YAHYA, 2018), e, como a indústria, é forçada a modernizar suas metodologias de trabalho (GUILLÉN-NAVARRO; PEREÑÍGUEZ-GARCÍA; MARTÍNEZ-ESPAÑA, 2017). Espera-se que a quarta revolução industrial (Indústria 4.0) reformule o setor agrícola mais uma vez e promova a quarta revolução agrícola. As três revoluções anteriores transformaram profundamente esse setor, da agricultura indígena para a agricultura mecanizada e a Agricultura de Precisão (*Precision Agriculture*) (LIU et al., 2021).

A agricultura está vivendo também uma transformação tecnológica relacionada com a adoção da Agricultura de Precisão (AP), que, após 20 anos de pesquisa, não se pode afirmar que esteja consolidada (WELTZIEN, 2016). A AP utiliza tecnologia da informação para adicionar exatidão à quantidade, qualidade, tempo e localização na aplicação e utilização de insumos na produção agrícola. Apesar dos ganhos econômicos esperados (BARNES et al., 2019b) e de ter um enorme potencial, após duas décadas de pesquisa em AP, a capacidade de capitalizar essa tecnologia está muito aquém das expectativas (MINTERT et al., 2016). Há uma percepção de que a adoção da AP esteja ocorrendo a um ritmo menor do que o esperado (LOWENBERG-DEBOER; ERICKSON, 2019). Este é especialmente o caso de práticas mais complexas, como aplicação a taxa variável de insumos acionada por sensores (FINGER; SWINTON; BENNI, 2019) e a adoção de aspersores de irrigação a taxa variável em sistemas de irrigação como pivô central (O'SHAUGHNESSY et al., 2019). Essa lenta adoção se deve a vários fatores, entre os quais a falta de conhecimento por parte dos agricultores sobre o uso das tecnologias de AP desempenha um papel importante (CISTERNAS et al., 2020).

Uma confirmação dessa percepção pode ser encontrada na abundante literatura que aborda o tema dos fatores que afetam a adoção da AP, como os recentes estudos de Barnes et al. (2019b), Groher et al. (2020), Pathak, Brown e Best (2019) e Tey e Brindal (2022). Os estudos na literatura identificam um extenso conjunto de fatores que influenciam a adoção de AP, como idade do agricultor, educação, anos de experiência, tamanho da empresa agrícola, lucratividade percebida da AP e uso de computador (LOWENBERG-DEBOER; ERICKSON, 2019). Compreender o fenômeno da adoção/ não adoção e identificar os determinantes da

adoção das tecnologias de AP nas empresas agrícolas continuam a ser de interesse fundamental para os pesquisadores (OFORI; GRIFFIN; YEAGER, 2020).

Apesar desta literatura abundante, fatores relacionados ao comportamento do agricultor e à gestão das operações agrícolas são pouco explorados para explicar a adoção de AP pelo agricultor. Alguns autores consideram os fatores relacionados ao comportamento do agricultor (BARNES et al., 2019a; LI et al., 2020; MICHELS; VON HOBE; MUSSHOFF, 2020; PAUSTIAN; THEUVSEN, 2017; VECCHIO et al., 2020a). No entanto, nesses trabalhos o foco não se encontra no estudo do comportamento do agricultor. Além disso, teorias para o estudo do comportamento humano, como a Teoria do Comportamento Planejado (*Theory of Planned Behavior* - TPB) (AJZEN, 1991), são aplicadas em casos raros, como nos trabalhos de Hüttel; Leuchten e Leyer (2020) e Reichardt et al. (2009). Pesquisas que incluem fatores relativos à gestão das operações agrícolas também são muito raras.

Verifica-se, entretanto, que na literatura ainda é dada pouca atenção aos fatores relacionados ao comportamento do agricultor e à gestão das operações agrícolas para explicar a adoção de AP pelo agricultor.

No contexto dessa revolução tecnológica, o conceito de Agricultura 4.0 aparece no início do século 21, como uma evolução da AP através da difusão da IoT (PIVOTO, 2018). Poucas pesquisas foram realizadas sobre a Agricultura 4.0, sendo estas de cunho mais teórico e limitadas a algumas empresas pioneiras (ZAMBON et al., 2019). Ainda, as definições propostas são baseadas em revisões da literatura (BERTOGLIO et al., 2021; SILVEIRA; LERMEN; AMARAL, 2021; SPONCHIONI et al., 2019), sem contribuições de resultados de pesquisa empírica. Isso significa que é necessária uma análise mais aprofundada para entender o que é a Agricultura 4.0 (SPONCHIONI et al., 2019) e mais contribuições são necessárias para determinar sua definição e limites claramente (BERTOGLIO et al., 2021).

Além disso, ênfase exagerada em soluções emergentes de alta tecnologia é colocada, o que tem um efeito potencial de inclusão e exclusão (KLERKX; ROSE, 2020). Pouca atenção é dada aos impactos sociais das novas tecnologias nos debates em torno da quarta revolução agrícola. Até agora, as narrativas da Agricultura 4.0 são predominantemente enquadradas em termos de benefícios para a produtividade e o meio ambiente, com pouca atenção colocada nas "pessoas" e na inclusão delas em sistemas de inovação agrícola (BARRETT; ROSE, 2020; FABREGAS; KREMER; SCHILBACH, 2019; ROSE et al., 2021).

Vários estudos destacam o potencial da Agricultura 4.0, como melhorias no planejamento e controle (BRAUN; COLANGELO; STECKEL, 2018), uso inteligente de dados coletados por meio de tecnologias avançadas montadas a bordo de tratores, robôs terrestres

móveis, veículos aéreos não tripulados e satélites (MANCINI; FRONTONI; ZINGARETTI, 2019b), capacidade para impulsionar o processo de tomada de decisões do agricultor (SPONCHIONI et al., 2019), aprimorar a AP, melhorar o desempenho do sistema agrícola e a tomada de decisões em resposta às incertezas operacionais (KONG et al., 2019). Outros autores destacam os desafios a serem resolvidos, por exemplo complexidade da gestão dos dados tanto em termos de tamanho quanto de análise a ser realizada (MANCINI; FRONTONI; ZINGARETTI, 2019a). Embora poucos mencionem os fatores relacionados à gestão das operações agrícolas, como a incompatibilidade de equipamentos com as operações agrícolas existentes na investigação da adoção de aplicação de fertilizante a taxa variável (ROBERTSON et al., 2012), a mobilidade das instalações de produção e a cobertura do campo agrícola (BRAUN; COLANGELO; STECKEL, 2018; GUILLÉN-NAVARRO; PEREÑÍGUEZ-GARCÍA; MARTÍNEZ-ESPAÑA, 2017).

Dentre estes trabalhos, alguns pesquisadores sugerem áreas potenciais de investigação para o estudo da AP na era 4.0. Pivoto (2018), para ampliar o entendimento dos fatores determinantes da adoção, recomenda estudar o comportamento do agricultor. Um estudo baseado na abordagem comportamental, ou seja, aquela que se concentra nos motivos, valores e atitudes que determinam os processos de tomada de decisões dos agricultores (BURTON, 2004; OCA MUNGUIA; LLEWELLYN, 2020; MORRIS; POTTER, 1995), poderia ampliar a compreensão dos fatores determinantes da adoção da AP na era 4.0 (PIVOTO, 2018). Mesmo porque, os agricultores nem sempre tomam decisões com base puramente em uma motivação economicamente racional, mas podem otimizar objetivos sociais (como ganhar reconhecimento ou prestígio como agricultor, pertencer à uma comunidade agrícola) e intrínsecos (como prazer nas tarefas de trabalho, preferência por uma vida saudável e ao ar livre) da agricultura (GASSON, 1973). No contexto dos estudos baseados na abordagem comportamental, a Teoria do Comportamento Planejado de Ajzen (1991) fornece uma estrutura conceitual (BURTON, 2004) sólida para estruturar a pesquisa, particularmente útil para identificar os múltiplos objetivos subjacentes à tomada de decisões agrícolas, e que é amplamente usada em estudos do comportamento dos agricultores (SUTHERLAND, 2011). A TPB é aplicada, por exemplo, para compreender o uso de previsões pelos agricultores (HUH; LALL, 2013), para estudar os fatores determinantes da adoção de medidas de economia de água para a irrigação (PINO et al., 2017), para compreender o comportamento dos agricultores em relação às tecnologias de irrigação pressurizada (LANZA CASTILLO; ENGLER; WOLLNI, 2021). Contudo, a TPB ainda não é aplicada no contexto da Agricultura 4.0.

Entre os pesquisadores que sugerem áreas potenciais de investigação para o estudo da AP na era 4.0 destaca-se também o trabalho de Jørgensen (2018), que procura verificar se a inspiração para o conceito da Indústria 4.0 pode facilitar o estabelecimento de soluções operacionais, a fim de explicar o potencial ainda inexplorado da AP para as operações agrícolas como semeadura, fertilização e colheita.

Verifica-se também, que na literatura ainda é dada pouca atenção aos fatores relacionados ao comportamento do agricultor e à gestão das operações agrícolas para explicar a adoção de AP pelo agricultor no contexto da Agricultura 4.0.

Portanto, esse projeto de tese propõe de:

a) explorar os fatores relacionados ao comportamento do agricultor para explicar a adoção de AP no contexto da Agricultura 4.0;
b) explorar os fatores relacionados à gestão das operações de irrigação para explicar a adoção de AP no contexto da Agricultura 4.0 (a irrigação é a operação de referência do projeto SWAMP - *Smart Water Management Platform* -, do qual esta tese faz parte (KAMIENSKI et al., 2019));
c) aplicar a abordagem comportamental e a TPB no contexto da Agricultura 4.0 para explorar esses fatores.

Considerando essas proposições, o presente trabalho pretende contribuir ao progresso do conhecimento para identificar os fatores determinantes da adoção de AP e para definir o que é a Agricultura 4.0. O resultado esperado é um avanço teórico respeito a literatura sobre a adoção de AP (CISTERNAS et al., 2020; JØRGENSEN, 2018; LOWENBERG-DEBOER; ERICKSON, 2019; OFORI; GRIFFIN; YEAGER, 2020; PIVOTO, 2018; WELTZIEN, 2016) e também sobre a Agricultura 4.0 (BERTOGLIO et al., 2021; SILVEIRA; LERMEN; AMARAL, 2021; JØRGENSEN, 2018; KLERKX; ROSE, 2020; PIVOTO, 2018; ROSE et al., 2021; SPONCHIONI et al., 2019; ZAMBON et al., 2019).

Logo, esta pesquisa busca contribuir para preencher as lacunas identificadas, respondendo às seguintes perguntas de pesquisa:

a) O que direciona a adoção da Agricultura de Precisão no contexto da Agricultura 4.0, com foco no comportamento do agricultor e na gestão das operações de irrigação?
b) O que é a Agricultura 4.0 no contexto pesquisado?

Para responder a essas perguntas, este trabalho visa alcançar os seguintes objetivos:

a) explorar os fatores relacionados ao comportamento do agricultor e à gestão das operações de irrigação que podem afetar a adoção da Agricultura de Precisão no contexto da Agricultura 4.0;

b) propor um modelo de gestão das operações de irrigação para entender e formalizar as relações entre a adoção em estudo e os fatores identificados;
c) construir um modelo de simulação para estudar as relações entre os fatores identificados;
d) com base nos resultados empíricos, propor uma definição do conceito de Agricultura 4.0 no escopo do projeto.

Esta pesquisa caracteriza-se como exploratória, pois segundo Hair, Page e Brunsveld (2016) parte da condição de que os pesquisadores têm pouca teoria disponível para orientar o desenvolvimento de hipóteses, por se tratar de um tema recente e com tecnologias em constante mudança. A pesquisa exploratória é usada para desenvolver uma melhor compreensão sobre um tópico de interesse e destina-se a descobrir novos temas, ideias, relacionamentos e padrões. A pesquisa exploratória é mais dependente de métodos qualitativos, como entrevistas em profundidade e estudos de caso, para identificar ou refinar problemas de pesquisa, o que pode ajudar a formular e testar estruturas conceituais. Além disso, conforme relatado por Bogner, Littig e Menz (2009), conversar com especialistas na fase exploratória de um projeto é um método mais eficiente e concentrado de coleta de dados do que, por exemplo, levantamentos (*survey*) quantitativos sistemáticos.

Considerando também a incipiente base teórica sobre a Agricultura 4.0, esta pesquisa adota uma abordagem exploratória multimétodos, composta por uma revisão sistemática da literatura, entrevistas com especialistas, estudos de caso, modelagem da gestão das operações de irrigação e simulação (BARRATT; KULL; SODERO, 2018; HAIR; PAGE; BRUNSVELD, 2016; KIM et al., 2003). A metodologia proposta combina uma abordagem indutiva com uma dedutiva (HAIR; PAGE; BRUNSVELD, 2016). Entrevistas semiestruturadas com especialistas (FLICK, 2009) e estudos de caso (EISENHARDT, 1989; VOSS; TSIKRIKTSIS; FROHLICH, 2002) são realizados para explorar os fatores que podem afetar a adoção investigada.

Os resultados empíricos de 36 entrevistas com especialistas e de 2 estudos de caso em empresas agrícolas no Brasil são usados para fundamentar o modelo de gestão das operações de irrigação e o modelo de simulação (KUSIAK; NICK LARSON; WANG, 1994; STERMAN, 2000), que orientam no desenvolvimento de teoria sobre a adoção da AP no contexto da Agricultura 4.0. A simulação permite a elaboração de teorias e a realização de trabalhos exploratórios (DAVIS; EISENHARDT; BINGHAM, 2007) e fornece uma metodologia poderosa para o avanço da teoria sobre comportamentos e sistemas complexos (HARRISON; CARROLL; CARLEY, 2007). A simulação é uma das ferramentas mais amplamente utilizadas e aceitas para explorar novos procedimentos organizacionais, regras de decisão e fluxos de

informações sem interromper as operações em andamento do sistema real. Além disso, um novo sistema, que pode ainda não existir, ser apenas na forma hipotética ou em estágio de projeto, pode ser testado sem comprometer recursos para sua aquisição (BANKS et al., 2004), como no caso da Agricultura 4.0. Em uma época em que mais dados são disponíveis, é possível criar modelos de simulação com base em dados reais coletados por meio de dispositivos IoT (GUNAL, 2019).

Para modelar a gestão das operações de irrigação é utilizada a técnica de modelagem IDEF0 (*Integration Definition for Function Modeling* - IDEF0), que oferece uma abordagem padrão e amplamente usada para desenvolver modelos conceituais de sistemas complexos (KIM et al., 2003). As empresas agrícolas são sistemas complexos que precisam ser modelados para facilitar a capitalização de conhecimento. A técnica IDEF0 permite que controles, restrições, produtos e informações de recursos sejam representados no mesmo diagrama (ABT; VIGIER; SCHNEIDER, 2009). A IDEF0 é usada para identificar os componentes do sistema, os requisitos de dados, o fluxo de informações e objetos entre os componentes (VENKATESWARAN; SON, 2005). A modelagem da gestão das operações, em particular planejamento, programação e controle, através da IDEF0, é aplicada por vários pesquisadores da indústria (CIURANA et al., 2008; HASSAN ZADEH; AFSHARI; RAMAZANI KHORSHID-DOUST, 2014; MACKULAK, 1984). No entanto, a IDEF0 raramente é usada no setor agrícola. Exemplos de aplicação são os estudos de Abt, Vigier e Schneider (2009) para elaborar modelos para entender e formalizar a produção de beterraba sacarina; de Purwandoko et al. (2019) para projetar a estrutura de um sistema de rastreabilidade na cadeia de suprimento de arroz.

Como os modelos IDEF0 tentam capturar os componentes funcionais de uma empresa ou sistema, ao invés de restrições temporais (KUSIAK; NICK LARSON; WANG, 1994), a técnica IDEF0, como modelo estático, pode ser usada para gerar simulações para análises dinâmicas. Começar com uma representação estática de uma empresa ou sistema pode reduzir o tempo necessário para criar uma simulação (WHITMAN; HUFF; PRESLEY, 1997). Exemplos de aplicação que combinam a metodologia IDEF0 e modelos de simulação são os trabalhos de Perera e Liyanage (2000), para a identificação rápida e a coleta de dados de entrada na simulação de sistemas de fabricação, e de Venkateswaran e Son (2005), para propor uma arquitetura para o planejamento e a programação da produção.

Várias abordagens de simulação são usadas para o desenvolvimento de teorias, entre elas a Dinâmica de Sistemas (*System Dynamics* - SD) (DAVIS; EISENHARDT; BINGHAM, 2007). A SD é uma técnica de modelagem rigorosa, recomendada para entender melhor o

comportamento de um sistema, para projetar regras de decisão e organizações mais eficazes (STERMAN, 2000), e apropriada para a análise de decisões gerenciais e em nível estratégico de negócios (GREASLEY, 2009; VENKATESWARAN; SON, 2004). Portanto, para construir o modelo de simulação é utilizada a SD, que é aplicada para estudar a adoção de tecnologias para a agricultura por alguns pesquisadores (FERREIRA; BATALHA; DOMINGOS, 2016; FISHER et al., 2000; GRABOWSKI et al., 2019; JUMMAN, 2016; SIMÕES, 2018).

As operações de irrigação são o objeto de estudo desta pesquisa, de acordo com o projeto internacional SWAMP (*Smart Water Management Platform*), do qual este trabalho faz parte. O projeto SWAMP, que envolve pilotos no Brasil, na Itália e na Espanha com foco em diferentes tipos de culturas e técnicas de irrigação, pretende levar o conceito de IoT para a irrigação de precisão e desenvolver sistemas de irrigação inteligentes para otimizar o uso de água com base na necessidade agrícola (KAMIENSKI et al., 2019). Alinhado ao objetivo de disseminar os resultados desse projeto, esta tese inclui dois estudos de caso: o primeiro no piloto MATOPIBA (localizado no Estado de Bahia), o segundo em uma empresa agrícola não envolvida no projeto SWAMP, também localizada no Estado de Bahia. Para preservar e garantir a confidencialidade esta empresa na tese é nomeada “Empresa agrícola Bahia”. Para construir o modelo de simulação, dados são coletados sobre o cultivo de milho irrigado com sistema de irrigação de pivô central na “Empresa agrícola Bahia”.

Na agricultura irrigada o recurso fundamental é a água (HOWELL, 2001), que está se tornando limitada para a agricultura, por causa do aumento da demanda devido ao crescimento da população, bem como ao aumento da urbanização e industrialização. Por esses motivos, a estimativa precisa da necessidade de água de irrigação é muito importante e problemas de irrigação excessiva ou insuficiente são minimizados se essa necessidade for estimada com precisão (SUBEDI; CHÁVEZ, 2015). No Brasil, a agricultura irrigada é o principal setor de uso de água, responsável por cerca de 50% da captação de água em mananciais superficiais e subterrâneos (o abastecimento urbano, por exemplo, responde por 24% da retirada total) e por 67% do uso. O Brasil, que está entre os 10 países com maior área equipada para irrigação do mundo, totaliza 8,2 milhões de hectares equipados para irrigação. O crescimento tem sido forte e persistente nas últimas décadas, intensificando-se ainda mais nos últimos anos. Porém, a irrigação no Brasil é considerada modesta frente ao potencial estimado, à área agrícola total, à extensão territorial e ao conjunto de fatores físico-climáticos favoráveis, inclusive a boa disponibilidade hídrica (AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS E SANEAMENTO BÁSICO, 2021).

Os objetivos desta tese são ambiciosos, pois, em contraste com pesquisas anteriores sobre a Agricultura de Precisão e a Agricultura 4.0, os resultados atingidos contribuem a ampliar o entendimento dos fatores determinantes da adoção da AP no contexto da Agricultura 4.0, acrescentando o comportamento do agricultor e a gestão das operações à literatura. As categorias e fatores relativos à gestão das operações de irrigação facilitam também o estabelecimento de soluções operacionais, graças a proposta de adotar o modelo de gestão das operações de irrigação e contribuem a explicar o potencial ainda inexplorado da AP para as operações de irrigação.

Ainda, o conjunto de fatores, classificados com base nos construtos da TPB, respondem também à agenda de pesquisa sugerida por Silveira, Lermen e Amaral (2021) a respeito dos fatores sociológicos e psicológicos que influenciam a adoção das tecnologias associadas ao conceito de Agricultura 4.0 e dos fatores necessários para fomentar o uso destas tecnologias nas empresas agrícolas.

A organização dos fatores identificados em um modelo, utilizando a técnica IDEF0, contribui a representar a gestão das operações de irrigação e as relações entre os fatores em forma estruturada. Considerando a falta de teoria sobre a Agricultura 4.0 e as lacunas identificadas na literatura, este modelo contribui para o conhecimento sobre a adoção de Agricultura de Precisão e sobre a Agricultura 4.0 ao propor relações entre esses fatores a fim de explicar a adoção. Em contraste com pesquisas anteriores sobre a irrigação, este modelo distingue entre planejamento e programação.

Os resultados dos estudos de caso exploram também as relações entre a adoção e os fatores nível educacional, capacitação, acesso à dados e recursos - consultores, na gestão das operações, área que no Brasil não evoluí na mesma velocidade da gestão agronômica. Os resultados das simulações permitem estudar as relações de causa-efeito entre os fatores envolvidos no planejamento do tempo de irrigação, planejamento do uso de água e planejamento do uso de energia elétrica. Os resultados sugerem políticas para direcionar a adoção, que implicam também uma mudança no modelo mental do agricultor no planejamento da irrigação e a adoção de modelos de gestão das operações inspirados à indústria.

Os resultados atingidos nesta tese são significativos em razão da abordagem multidisciplinar aplicada. Ao combinar competências de AP, IoT e gestão das operações, este trabalho permite avançar no conhecimento da Agricultura 4.0, reunindo diferentes perspectivas. Essas perspectivas, com base os resultados empíricos, levam a propor uma definição de Agricultura 4.0 que destaca o papel fundamental das tecnologias de sensoriamento IoT na evolução da Agricultura de Precisão para a Agricultura 4.0 e na transformação do modelo

tradicional das operações de irrigação, muitas vezes baseado na experiência, em um modelo digital de uso intensivo de dados mais organizados.

Considerando a natureza exploratória desse projeto de tese, uma agenda de pesquisa futura é formulada como resultado da discussão das limitações desse estudo e fundamentada nos dados coletados nas entrevistas e nos resultados dos cenários de simulação.

Além de contribuições teóricas, esta tese apresenta também uma contribuição prática. O modelo de gestão das operações de irrigação proposto pode ser útil para apoiar o processo de tomada de decisões do agricultor na gestão das operações. De acordo com a literatura, o modelo proposto pode ser utilizado também para o desenvolvimento de um sistema de gestão da irrigação que integre a gestão agronômica de uma cultura e as operações de planejamento, programação, execução e controle da irrigação.

Esse trabalho é organizado da seguinte forma. A seção 2 apresenta o escopo desse projeto de tese. Na seção 3, a fundamentação teórica é analisada. A seção 4 descreve a metodologia adotada neste estudo. A seção 5 apresenta os resultados. Na seção 6 os resultados são discutidos para responder as perguntas de pesquisa e atingir os objetivos de pesquisa. Na seção 7 as limitações do trabalho são analisadas para formular propostas de pesquisa futura. A seção 8 apresenta as conclusões. Por se tratar de uma pesquisa multidisciplinar, as definições dos conceitos principais são reunidas na seção Glossário.

2 ESCOPO DO PROJETO DE TESE

Esta seção descreve o escopo do projeto de tese, ilustrado no Quadro 1, e destaca os principais componentes considerados fora do escopo.

Quadro 1 - Escopo do projeto de tese

Componentes	Em escopo	Fora de escopo
Unidade de análise	Empresa agrícola	Grupo de empresas agrícolas (ecossistema de uma empresa, bacia hidrográfica, perímetro irrigado)
	Especialistas e empresas agrícolas no Brasil	Especialistas e empresas agrícolas na Itália
Comportamento	Adoção	Adoção (atores de grupo de empresas agrícolas - ecossistema de uma empresa, bacia hidrográfica, perímetro irrigado), difusão, tomada de decisões na gestão das operações agrícolas
Construtos da TPB	Atitude, Controle Comportamental Percebido	Controle Comportamental Percebido (atores de grupo de empresas agrícolas - ecossistema de uma empresa, bacia hidrográfica, perímetro irrigado), Norma Subjetiva
Tipo de agricultura	Agricultura arável	Pecuária, agricultura leiteira, cultivo em estufa, agricultura ornamental, piscicultura
Definição de Agricultura 4.0	Impacto social da Agricultura 4.0, evolução da AP através IoT, inspiração para a Industria 4.0	Impacto tecnológico, desenvolvimento sustentável, encaixe à Agricultura Digital
Modelos inspirados à indústria	Modelos de gestão das operações	Modelo de negócios
Complexidade	Interações entre os componentes (visão comportamental)	Número de componentes (visão estrutural)
Simulação	Nível de agregação de pivô central	Nível de agregação de cada aspersor e torre de um pivô central
	Tecnologias de sensoriamento IoT - estação meteorológica e satélite	Tecnologias de sensoriamento IoT - sonda de solo e drone
	Estimativa da necessidade de água da cultura - Modelo FAO e balanço hídrico	Estimativa da necessidade de água da cultura - Outros modelos

Fonte: Autor

O comportamento que esse projeto pretende estudar é a adoção da Agricultura de Precisão no contexto da Agricultura 4.0. A adoção distingue-se da difusão como sendo um processo individual, enquanto a difusão é o processo pelo qual uma inovação é disseminada entre vários indivíduos (FISHER et al., 2000). Uma inovação é uma ideia, prática ou objeto que é percebido como novo por um indivíduo (ROGERS, 1983). Uma inovação altera a função de produção da empresa agrícola e comporta alguma incerteza, que diminui ao longo do tempo através da aquisição de experiência e informações (FEDER; UMALI, 1993). Na agricultura, exemplos de inovações são a adoção de tecnologias de AP (PATHAK; BROWN; BEST, 2019), a adoção de práticas de gestão agrícola e práticas de conservação de água (BORGES; OUDE

LANSINK; EMVALOMATIS, 2019), a adoção de medidas de economia de água de irrigação (PINO et al., 2017). A adoção de uma inovação tecnológica na agricultura depende de muitos fatores, como as características sociodemográficas do agricultor, características da empresa agrícola, características da inovação, ambiente externo, experiência e compartilhamento de informações entre agricultores e profissionais, fontes de financiamento público, políticas agrícolas e condições de mercado (PIGNATTI; CARLI; CANAVARI, 2015).

Seguindo os resultados das primeiras entrevistas exploratórias com especialistas (iniciadas no Brasil em novembro de 2019 e completadas em agosto de 2021), duas linhas potenciais de pesquisa surgiram para responder às perguntas de pesquisa e atingir os objetivos de pesquisa, aplicando a mesma teoria TPB (AJZEN, 1991) e o mesmo questionário: a primeira focada na empresa agrícola como unidade de análise e a segunda direcionada a um grupo de empresas agrícolas (ecossistema de uma empresa, bacia hidrográfica, perímetro irrigado). No primeiro caso, o construto Norma Subjetiva e os fatores relacionados ao construto Controle Comportamental Percebido, que envolvem os atores que operam em um ecossistema (por exemplo acesso ao mercado de tecnologias, de financiamentos e de educação), foram classificados fora do escopo. Considerando a incipiente base teórica sobre a Agricultura 4.0, os tempos de trabalho de cada linha e uma abordagem pragmática, o autor optou por focar este projeto de tese na empresa agrícola e adiar o estudo do grupo de empresas agrícolas para futuras pesquisas.

O escopo deste trabalho enfatiza a importância do construto Atitude, relacionado aos benefícios associados à adoção e percebidos pelo agricultor (BUSSE et al., 2014; EDWARDS-JONES, 2006; THOMPSON et al., 2019). Uma tecnologia de AP pode ser abandonada se o produtor perceber que os benefícios produzidos são menores do que os custos associados. Por outro lado, é possível que outras tecnologias sejam abandonadas em favor de tecnologias mais novas e/ ou mais eficientes (WALTON et al., 2010).

O ator central é o principal tomador de decisões na empresa agrícola: agricultor ou gerente da empresa, dependendo de sua estrutura empresarial e organizacional (CIRANI; MORAES, 2010; MCBRATNEY et al., 2005; SILVA; MORAES; MOLIN, 2011).

Parte dos dados coletados durante as entrevistas é relevante para este trabalho (REIMER; THOMPSON; PROKOPY, 2012). Contudo, o autor optou também por utilizar os ricos dados coletados para preparar artigos, voltados para a segunda linha de pesquisa, a ser submetidos à congressos. Um primeiro resultado foi a apresentação no congresso SemeAD 2020 de um artigo com o objetivo de propor um modelo conceitual para estudar a adoção de AP no contexto da Agricultura 4.0 considerando o ecossistema de uma empresa agrícola como

escopo (MONTELEONE et al., 2020a). Esse modelo conceitual é ilustrado no Apêndice A. Um segundo resultado foi um modelo de simulação para a análise de políticas de difusão da Agricultura de Precisão no contexto da Agricultura 4.0, apresentado no congresso SOBER 2021 e ilustrado no Apêndice B (MONTELEONE et al., 2021).

Na fundamentação teórica e nos resultados das entrevistas com os especialistas e dos estudos de caso é possível identificar fatores em comum entre adoção e tomada de decisões na gestão das operações de irrigação. Esses fatores, alguns dos quais são ilustrados no Quadro 4, são levados em consideração na investigação empírica desta tese como fatores que podem afetar a adoção de tecnologias de AP no contexto da Agricultura 4.0, além de influenciar as decisões no planejamento e programação das operações agrícolas. Contudo, de acordo com as perguntas e os objetivos de pesquisa, o comportamento "tomada de decisões na gestão das operações agrícolas" é considerado fora de escopo dessa tese, assim como o estudo das relações entre os mencionados fatores e o processo de tomada de decisões. Uma proposta de pesquisa concernente este tópico é incluída na seção 7.

Em relação à proposta no documento de qualificação de realizar 15 entrevistas com especialistas na Itália, para complementar o estudo de caso realizado no piloto na Itália e permitir a generalização dos resultados em outros contextos (FLICK, 2009; HOME et al., 2014), 9 entrevistas com especialistas na Itália foram realizadas até o momento. Uma proposta de pesquisa para completar estas entrevistas é incluída na seção 7.

Portanto, com base os componentes em escopo e fora de escopo desse projeto, esta tese é parte de uma iniciativa maior que busca compreender e modelar as decisões do agricultor sobre a adoção (WILLOCK et al., 1999) de tecnologias de Agricultura de Precisão no contexto da Agricultura 4.0.

3 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

A adoção de tecnologias de AP ganhou considerável atenção nas últimas duas décadas. Antes de decidir adotar uma tecnologia específica, um indivíduo deve avaliar as razões para sua adoção (PAUDEL et al., 2020). Vários fatores demográficos, socioeconômicos e financeiros, como educação, idade, acesso à informação, percepção sobre custo e retorno da tecnologia, podem determinar as decisões de um adotante (KHANAL et al., 2019).

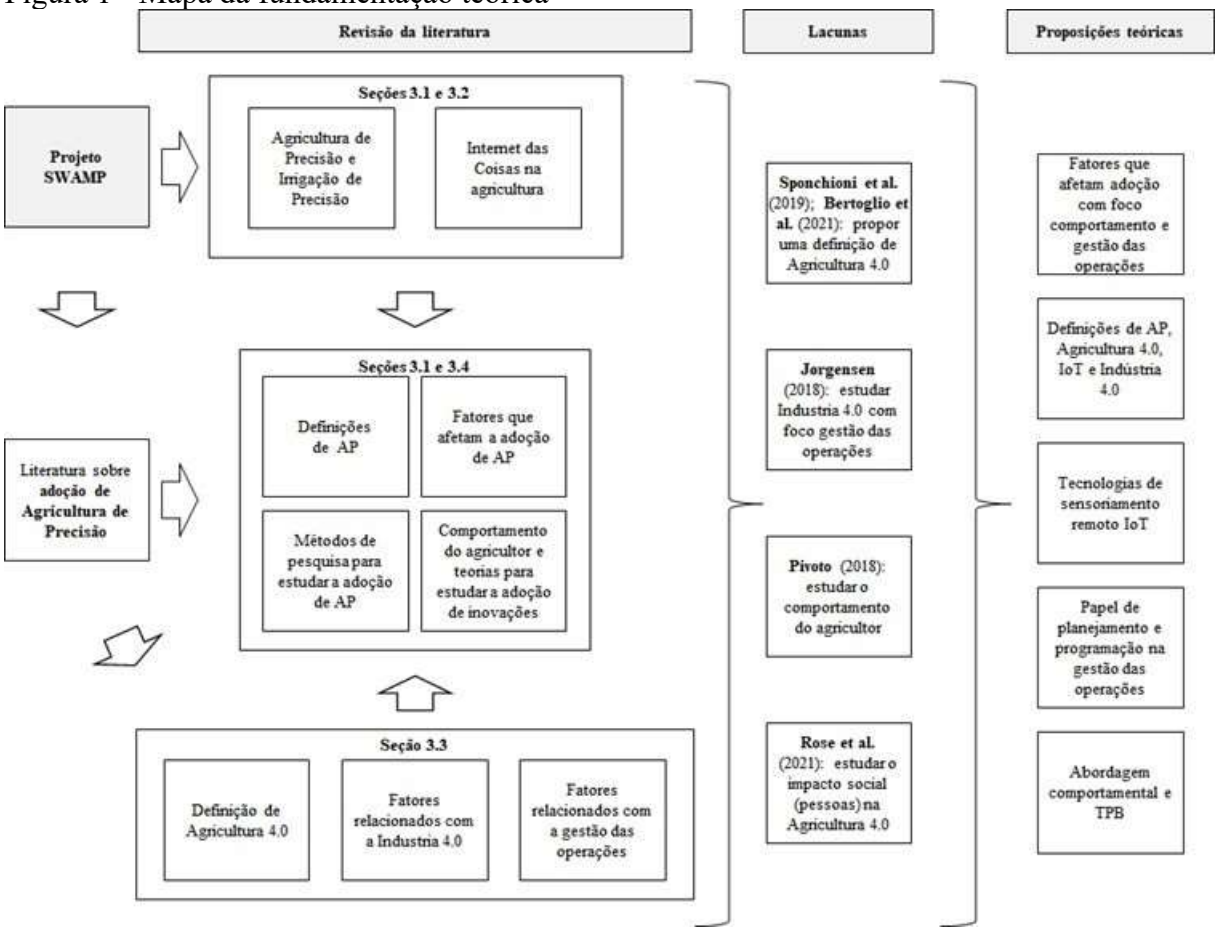
Modelar o processo pelo qual os agricultores decidem adotar novas tecnologias requer a modelagem de seu comportamento. Embora as considerações de lucro sejam claramente importantes, especialmente nas fases posteriores do processo decisório, elas precisam ser complementadas com outras considerações sociais e cognitivas, especialmente nos estágios iniciais (WEERSINK; FULTON, 2020). A adoção é baseada em percepções ou expectativas subjetivas, e não na verdade objetiva. A adoção ocorre quando o agricultor percebe que a inovação em questão aumenta o alcance de seus objetivos pessoais (PANNELL et al., 2006).

Nesta seção os trabalhos da fundamentação teórica são analisados para explorar os fatores determinantes da adoção de AP no contexto da Agricultura 4.0. As definições de Agricultura de Precisão, Internet das Coisas, Agricultura 4.0 e Industria 4.0 usadas nesse trabalho são incluídas.

A literatura sobre a Agricultura de Precisão, os fatores que afetam a adoção e a IoT é apresentada nas seções 3.1 e 3.2, para fornecer um quadro teórico do contexto dessa tese e do projeto SWAMP. Os trabalhos que abordam o conceito de Agricultura 4.0 são analisados na seção 3.3, para responder as sugestões de Sponchioni et al. (2019) e de Bertoglio et al. (2021). Também os trabalhos que estudam os temas da Industria 4.0, da Industria 4.0 na agricultura e da gestão das operações na agricultura são examinados, para responder a sugestão de Jørgensen (2018). Enfim, a seção 3.4 trata da literatura sobre o comportamento do agricultor, as teorias utilizadas para explicar a adoção de inovações na agricultura e a literatura que aplica a TPB na agricultura, para responder a sugestão de Pivoto (2018).

A Figura 1 ilustra o mapa da fundamentação teórica, que é um resumo visual da literatura utilizada e que explica como este trabalho propõe de contribuir para o avanço do conhecimento na área estudada (CRESWELL, J. W.; CRESWELL, J. D., 2014).

Figura 1 - Mapa da fundamentação teórica



Fonte: Autor

3.1 AGRICULTURA DE PRECISÃO E FATORES QUE AFETAM A ADOÇÃO

Esta seção trata das tecnologias de AP, com o objetivo de explorar os fatores que afetam a adoção de AP pelos agricultores (VECCHIO et al., 2020b). A Agricultura de Precisão (*Precision Agriculture* ou *Precision Farming*) (PAUDEL et al., 2020; PAUSTIAN; THEUVSEN, 2017; ROBERT, 2002) geralmente se refere a um sistema que mede a variabilidade dentro do campo. Os dados coletados nessas medições são usados para desenvolver práticas de manejo específicas do local (PAXTON et al., 2011). A AP permite que as decisões da gestão agrícola sejam adaptadas espacialmente e temporalmente e que os agricultores tratem um campo como uma entidade heterogênea (FINGER; SWINTON; BENNI, 2019).

3.1.1 Agricultura de Precisão: definição e tecnologias

Na literatura não há consenso sobre a definição de Agricultura de Precisão, visto que é possível encontrar mais que 20 definições (LLEIDA UNIVERSITY, 2020). Essa falta de uma definição clara e compartilhada dificulta o estudo da adoção (LOWENBERG-DEBOER; ERICKSON, 2019). Além disso, os fatores que influenciam as taxas de adoção dependem do tipo de tecnologias (GROHER et al., 2020), que são várias, como monitoramento e mapeamento de rendimento, tecnologia de aplicação a taxa variável, amostragem de solo em grade ou zona, sensoriamento remoto (incluindo sensoriamento de solo, sensoriamento por satélite e de proximidade) (LOWENBERG-DEBOER; ERICKSON, 2019; MULLA, 2013). Contudo, a Sociedade Internacional de Agricultura de Precisão (*International Society for Precision Agriculture* - ISPA) recentemente reconheceu a seguinte como a definição oficial:

> A Agricultura de Precisão é uma estratégia de gerenciamento que reúne, processa e analisa dados temporais, espaciais e individuais e os combina com outras informações para apoiar as decisões de gerenciamento de acordo com a variabilidade estimada para melhorar a eficiência no uso de recursos, produtividade, qualidade, rentabilidade e sustentabilidade da produção agrícola" (INTERNATIONAL SOCIETY FOR PRECISION AGRICULTURE, 2019, p. 1).

As tecnologias de AP podem ser divididas em duas categorias: tecnologias de "conhecimento incorporado" (por exemplo, controle automático de seção, orientação automatizada) e tecnologias "intensivas em informações" (por exemplo, aplicação a taxa variável de nutrientes, monitoramento de rendimento, amostragem de precisão de solo). Em relação às tecnologias do primeiro grupo, o usuário não precisa ter habilidades especializadas para fazer uso total da tecnologia, ou seja, o valor da tecnologia está "incorporado" nela. Pelo contrário, as tecnologias "intensivas em informações", que fornecem informações adicionais úteis na tomada de decisões, requerem que os usuários invistam tempo e recursos adicionais para desenvolver habilidades especializadas (GRIFFIN et al., 2017; MILLER et al., 2019). Logo, a adoção de uma tecnologia de AP demanda um envolvimento diferente para o usuário, com base no nível de interação e investimento de aprendizagem necessário da categoria de tecnologia (BARNES et al., 2019a).

As tecnologias de AP são complementares, visto que as informações geradas por uma tecnologia complementam idealmente os dados registrados por outras tecnologias. As tecnologias de AP podem ser adotadas aos poucos ou em pacotes, combinando tecnologias e práticas. Os agricultores podem ajustar o uso de uma tecnologia à medida que novas

informações sobre práticas complementares se tornam disponíveis (LAMBERT; PAUDEL; LARSON, 2015). Por exemplo, no caso da aplicação a taxa variável, dado que normalmente requer conhecimento prévio das características do campo, esta tecnologia muitas vezes se baseia em dados de amostragem da precisão do solo ou dados de monitoramento do rendimento específico do local, que requerem Sistemas de Navegação Global por Satélite (*Global Navigation Satellite Systems* - GNSS). Além disso, devido às complementaridades existentes entre a tecnologia a taxa variável, tecnologias de conhecimento incorporado e tecnologias intensivas em informação, ao longo do tempo a tecnologia a taxa variável quase nunca foi adotada por si só (MILLER et al., 2019).

Portanto, a AP representa um grupo de tecnologias, a partir do qual o agricultor escolhe o que precisa e que ajuda a melhorar as suas operações agrícolas (AYERDI GOTOR et al., 2020; LOWENBERG-DEBOER; ERICKSON, 2019).

3.1.2 Agricultura de Precisão e irrigação

O conceito de Agricultura de Precisão também abrange a Irrigação de Precisão (*Precision Irrigation* - PI), que é incluída no espectro das tecnologias de AP que podem otimizar as respostas da planta para cada unidade de água aplicada em diferentes áreas do campo. Também pode incluir aplicações específicas do local de agroquímicos solúveis em água, como fertilizantes (EVANS et al., 2013). A PI pode se referir à irrigação planejada com precisão ou irrigação que é ajustada espacialmente, ou ambos (GALIOTO; RAGGI; VIAGGI, 2017). Portanto, a PI refere-se tanto à variabilidade temporal (relacionada às diferenças na necessidade de água de irrigação nos estágios de desenvolvimento da cultura, mudanças de temperatura durante a safra, variações nas quantidades anuais de precipitação) quanto à variabilidade espacial (relacionada à diferenças no solo, topografia, microclima) dentro do campo agrícola (EVANS et al., 2013; GALIOTO; RAGGI; VIAGGI, 2017).

Os tipo de tecnologias de AP adotadas para a PI são tecnologias à taxa variável e sensoriamento remoto (GALIOTO; RAGGI; VIAGGI, 2017; MULLA, 2013).

Os sistemas de irrigação comumente usados nas empresas agrícolas podem ser classificados como sistemas de aspersão (*sprinkler*), de superfície e por gotejamento (*drip or trickle*). Em sistemas de aspersão (por exemplo pivô central), a água é distribuída na forma de spray usando aspersores suspensos. Em sistemas por gotejamento, a água é fornecida em pequenas quantidades por meio de pequenos bicos instalados em tubos ou fitas, que podem estar acima do solo ou subterrâneos. Os sistemas de aspersão e por gotejamento também são

chamados de sistemas pressurizados, pois operam sob baixa pressão, o que frequentemente envolve alguma forma de bombeamento. Em sistemas de superfície (por exemplo, sulco e bacia), a água é transportada sobre a superfície do campo pela força gravitacional (KOECH; LANGAT, 2018). No projeto SWAMP são estudados os sistemas de pivô central e por gotejamento (KAMIENSKI et al., 2019).

O sistema de pivô central aplica água à taxas diferenciais, conforme as máquinas se movem pelo campo, para ajustar a variação temporal e as condições do solo e da planta (EVANS; KING, 2010). Este sistema de irrigação é amplamente difundido em todo o mundo por causa de suas vantagens em relação à outros sistemas de irrigação, tais como: alto potencial para aplicações de água uniformes e eficientes (quando o sistema é adequadamente projetado e gerenciado mais do que 90% da água aplicada pode ser aproveitada pela cultura); alto grau de automação, que permite práticas de agricultura de precisão incluindo aplicação a taxa variável; capacidade de aplicar água e nutrientes em uma ampla variedade de solo, cultura e condições topográficas. A principal desvantagem é a alta taxa de aplicação de água, o que pode causar escoamento, principalmente em áreas de terra onduladas (VALÍN et al., 2012). Os sistemas de PI incluem também gotejamento e micro aspersão (MORENO; SUNDING, 2005).

Um sistema de PI de referência consiste em estações meteorológicas, sensores móveis, redes de sensores de solo, ambientais e/ ou térmicos distribuídos no campo, integrados em um sistema de apoio às decisões em tempo real e automatizado (EVANS; KING, 2010).

Qualquer que seja o sistema de irrigação adotado pelo agricultor, é muito importante estimar com precisão a necessidade de água da cultura (SUBEDI; CHÁVEZ, 2015), que varia espacialmente e temporalmente (O'SHAUGHNESSY et al., 2019).

Vários conceitos são disponíveis na literatura para definir e medir a necessidade de água da cultura. A necessidade de água da cultura, definida a quantidade de água necessária para compensar a perda de evapotranspiração do campo cultivado, se refere à quantidade de água que precisa ser fornecida, enquanto a evapotranspiração da cultura se refere à quantidade de água perdida por meio da evapotranspiração. Ao contrário, a necessidade de água de irrigação representa basicamente a diferença entre a necessidade de água da cultura e a precipitação efetiva. Quanto à evapotranspiração, existem três definições: evapotranspiração (ET) (combinação de dois processos separados em que a água é perdida por um lado da superfície do solo por evaporação e por outro lado por transpiração), evapotranspiração de referência (ET_0) (evapotranspiração da cultura referida a uma superfície vegetada padronizada), evapotranspiração da cultura (ET_C) (evapotranspiração da cultura livre de doenças, bem fertilizada, cultivada em grandes campos, sob condições ideais de água no solo e atingindo a

produção total sob as condições climáticas dadas). A ET_C é calculada multiplicando a ET_0 pelo coeficiente da cultura em função do seu estágio de desenvolvimento. A evapotranspiração é influenciada por vários fatores, como parâmetros climáticos (radiação, temperatura do ar, umidade e velocidade do vento), características da cultura (tipo de cultura, estágios de desenvolvimento, altura da cultura, rugosidade da cultura, cobertura do solo e características de enraizamento da cultura), manejo (aplicação de fertilizantes, ausência de controle de doenças e pragas) e aspectos ambientais (salinidade do solo, fertilidade do solo, cobertura do solo, densidade da planta, solo duro ou impenetrável). A evaporação e a transpiração ocorrem simultaneamente e não há maneira fácil de distinguir entre os dois processos. Quando a cultura é pequena, a água é principalmente perdida pela evaporação do solo, mas uma vez que a cultura está bem desenvolvida e cobre completamente o solo, a transpiração se torna o processo principal (ALLEN et al., 1998).

Para estimar a evapotranspiração de referência ET_0 existem vários modelos. Entre esses, o modelo de Penman Monteith é considerado mais consistente em uma ampla gama de condições climáticas (SUBEDI; CHÁVEZ, 2015). Esse modelo, que se tornou um padrão internacional aplicável globalmente, facilitou o desenvolvimento de modelos computacionais para a gestão da água que podem ser aplicados com uma quantidade razoavelmente limitada de informações locais e que permitem a simulação e avaliação da resposta da cultura sob uma variedade de condições e práticas (PEREIRA et al., 2015). A versão da FAO do modelo de Penman Monteith foi estabelecida pela FAO como modelo de referência para a estimativa da ET_0 e pode ser calculada usando a Equação 1:

$$ET_o = \frac{0.408\,\Delta\,(R_n - G) + \gamma\,\frac{900}{T+273}\,u_2\,(e_s - e_a)}{\Delta + \gamma(1 + 0.34\ \ _2)} \qquad ...(1)$$

onde ET_o é a evapotranspiração de referência em mm/ dia; Δ representa a inclinação da pressão de vapor expressa em kPa/℃; R_n é a radiação líquida da cultura hipotética de grama verde, expressa em MJ m^{-2} d^{-1}; γ é a constante psicrométrica expressa em kPa/℃ ; T é a temperatura média diária do ar a 2 m de altura em ℃; u_2 é a velocidade do vento a 2 m de altura em m/s; e_S é a pressão de vapor de saturação a 2 m de altura, e e_a é a pressão de vapor real a 2 m de altura expressa em kPa (ALLEN et al., 1998).

Uma vez estimadas a ET_0 e a ET_C, calculada multiplicando a ET_0 pelo coeficiente da cultura em função do seu estágio de desenvolvimento, como ilustrado na Equação 2:

$$ET_c = ET_o * k_c \quad ...(2)$$

é possível calcular a necessidade de água de irrigação. A necessidade de água de irrigação é determinada usando a abordagem baseada no balanço hídrico, ilustrada na Equação 3:

$$IR = ET_c + SAT + PERC + WL - P_e \quad ...(3)$$

onde IR é a necessidade de água de irrigação, ET_c é a necessidade de água da cultura, SAT é a água usada para saturar o solo antes do plantio, $PERC$ representa as perdas por percolação ou infiltração, WL representa a camada de água a ser mantida durante a estação de crescimento, P_e é a precipitação efetiva. Todos os componentes do balanço hídrico são em milímetros (BROUWER; HEIBLOEM, 1986; BROUWER; PRINS; HEIBLOEM, 1989).

De acordo com a pesquisa realizada no projeto SWAMP (TOSCANO et al., 2019), nesse trabalho a versão da FAO do modelo de Penman Monteith e a abordagem baseada no balanço hídrico são aplicados para estimar a necessidade de água de irrigação.

3.1.3 Fatores que afetam a adoção de Agricultura de Precisão

A literatura sobre a adoção de tecnologia agrícola fornece uma miríade de fatores que podem influenciar a adoção pelos agricultores (OFORI; GRIFFIN; YEAGER, 2020). A abundante literatura que aborda o estudo dos fatores, que afetam a adoção da AP, se concentra na análise das características do agricultor (por exemplo idade, nível de educação e uso de computador) e da empresa agrícola (por exemplo tamanho, localização e renda da empresa agrícola), dos benefícios (por exemplo redução do uso de água, redução dos investimentos em sementes, fertilizantes e pesticidas) e das barreiras (por exemplo custo de software e aquisição de equipamentos, custo com pessoal, fontes de financiamento adequadas) (BORGHI et al., 2016; OFORI; GRIFFIN; YEAGER, 2020; PATHAK; BROWN; BEST, 2019; PAUSTIAN; THEUVSEN, 2017; PIERPAOLI et al., 2013; SILVA; MORAES; MOLIN, 2011; TEY; BRINDAL, 2012). Em relação à Irrigação de Precisão, a sua adoção é influenciada também por fatores, como qualidade do solo, custo de água, custo de energia, tipo de cultura, tamanho do campo, habilidades do agricultor (GALIOTO; RAGGI; VIAGGI, 2017; MORENO; SUNDING, 2005).

Resultam pouco estudados os fatores relativos aos motivos e valores que determinam o processo pelo qual os agricultores decidem adotar (PIVOTO, 2018) e também os fatores relacionados à gestão das operações agrícolas (JØRGENSEN, 2018). Pesquisas que analisam os fatores relacionados à gestão de operações são raras, como o trabalho de Robertson et al. (2012), que consideram a incompatibilidade de equipamentos com as operações existentes na adoção de aplicação de fertilizantes a taxa variável. Além disso, poucos estudos abordam a adoção da PI, como o trabalho de Galioto, Raggi e Viaggi (2017). A maioria dos trabalhos aplica o método de pesquisa levantamento (LOWENBERG-DEBOER; ERICKSON, 2019; PIERPAOLI et al., 2013), enquanto os métodos qualitativos são pouco utilizados (BARNES et al., 2019b). Dois exemplos são os estudos de Ayerdi Gotor et al. (2020), que realizam entrevistas semiestruturadas, e de Batte e Arnholt (2003), que conduzem estudos de caso.

3.2 INTERNET DAS COISAS E TECNOLOGIAS DE SENSORIAMENTO NA AGRICULTURA DE PRECISÃO

O conceito de Internet das Coisas (*Internet of Things* - IoT) é uma das tecnologias-chave para a Agricultura 4.0 (SYMEONAKI; ARVANITIS; PIROMALIS, 2020). A IoT evoluiu nos últimos anos, de um foco em hardware, como etiquetas de identificação por radiofrequência (*Radio-Frequency IDentification* - RFID), sensores e telefones celulares (ATZORI; IERA; MORABITO, 2010) para um foco em aplicativos (ATZORI; IERA; MORABITO, 2017). A definição que pode ser dada para a IoT como se apresenta hoje é:

> uma estrutura conceitual que aproveita a disponibilidade de dispositivos heterogêneos e soluções de interconexão, bem como objetos físicos aumentados[1], fornecendo uma base de informações compartilhada em escala global, para apoiar o desenho de aplicativos envolvendo no mesmo nível virtual pessoas e representações de objetos (ATZORI; IERA; MORABITO, 2017, p. 141).

Essa definição ressalta a importância de criar uma base de informações compartilhada para fornecer aplicativos aos usuários dos dispositivos IoT, como os agricultores nesse projeto de tese.

[1] **Objeto físico aumentado**. Com tecnologias como RFID, um produto pode ser aumentado digitalmente se os dados digitais forem anexados a ele, por exemplo, colando uma etiqueta RFID ou integrando um sistema embarcado. Anexar uma etiqueta digital permite a conexão do produto ao mundo virtual, armazenando informações no próprio chip ou uma conexão para a Internet que pode ser usada por dispositivos móveis como a principal fonte de informações. O objeto - produto mais componente digital conectada a ele - gera a esfera virtual aumentada do produto (NICOLAI; RESATSCH; MICHELIS, 2005).

O advento da IoT tem impulsionado uma nova direção de pesquisa na agricultura. As redes de sensores são amplamente aplicadas em programação da irrigação, monitoramento de sistemas agrícolas e controle remoto. Um usuário remoto pode monitorar o estado do campo, controlar os sensores, ligar/ desligar uma bomba quando o nível de água atinge algum valor predefinido (OJHA; MISRA; RAGHUWANSHI, 2015). Ainda, dispositivos de sensoriamento remoto (termo geral que descreve o ato de coletar dados à distância) (USHA; SINGH, 2013), montados em tratores, aeronaves ou satélites, oferecem o potencial de mapeamento preciso do solo e das condições da cultura (EARL; THOMAS; BLACKMORE, 2000).

A IoT desempenha um papel fundamental na agricultura uma vez que os sensores podem medir vários fatores continuamente, e, usando o poder de processamento da nuvem (KAMIENSKI et al., 2019), é possível criar modelos para avaliar o desenvolvimento da cultura, os recursos do solo e a disponibilidade de água para apoiar o processo de tomada de decisões. Tais modelos podem avaliar a evapotranspiração (ALLEN et al., 1998) ou propriedades do solo e sua dinâmica ou mesmo avaliar a demanda de água em campos de cultivo. Os dados da cultura obtidos por sensores IoT e combinados com os dados coletados por dispositivos IoT adicionais, como veículos aéreos não tripulados (*Unmanned Aerial Vehicles* - UAV), tornam possível correlacionar uma infinidade de parâmetros que ajudam em um entendimento mais amplo da cultura e melhor abordar a dinâmica de seu crescimento. As tecnologias de sensoriamento IoT abrem espaço para maneiras inovadoras de usar melhor os recursos naturais, como a água na irrigação (JABRO et al., 2020; KIM; EVANS; IVERSEN, 2008).

Existem vários tipos de tecnologias de sensoriamento IoT sendo usadas para estimar o uso de água na agricultura e parâmetros de cultivo. Os parâmetros que essas tecnologias disponibilizam para o gerenciamento da água de irrigação são ilustrados no Quadro 2.

Existem vários tipos de tecnologias de sensoriamento IoT sendo usadas para estimar o uso de água na agricultura e parâmetros de cultivo. Os parâmetros que essas tecnologias disponibilizam para o gerenciamento da água de irrigação são resumidos no Quadro 2.

O uso de sondas de solo permite a obtenção de vários parâmetros do solo, como umidade, salinidade e temperatura em várias profundidades (BRINKHOFF et al., 2017). As estações meteorológicas locais são dispositivos para capturar dados ambientais locais como temperatura e umidade relativa do ar, parâmetros importantes para avaliar a evapotranspiração. Ambas as fontes de dados, sonda de solo e estação meteorológica local, permitem avaliar os efeitos do clima e do solo na necessidade de água, pois captam indiretamente as demandas dinâmicas de água da cultura. Outros parâmetros relevantes como temperatura do dossel, índice de vegetação de diferença normalizada (*Normalized Difference Vegetation Index* - NDVI) e

graus-dia de crescimento (*Growing Degree Days* - GDD) (HUNSAKER et al., 2003) podem ser obtidos a partir dos dados coletados por meio de satélite e UAV (DRUSCH et al., 2012).

Esses parâmetros combinados podem produzir um modelo da cultura com um mínimo de parâmetros estimados (BRINKHOFF et al., 2017). Todos esses dados podem ser combinados por meio de coordenadas de GPS e parâmetros de tempo para estimar a quantidade de água que está sendo usada pela cultura e estimar a sua necessidade de água.

Quadro 2 - Parâmetros medidos por meio das tecnologias de sensoriamento IoT

Fatores	**Estação meteorológica**	**Satélite**	**Sonda de solo**	**UAV**
Fatores da cultura		Índices de vegetação, temperatura do dossel, índice de área foliar (*Leaf Area Index* - LAI)*, albedo de superfície*, necessidades de água da cultura*	Altura da água, umidade das folhas	Temperatura do dossel, índices de vegetação, umidade das folhas*, tamanho das culturas*, forma das culturas*, espessura* do caule da planta, cobertura da cultura*, transpiração da cultura*
Fatores climáticos	Precipitação, temperatura do ar, umidade do ar, velocidade do vento, direção do vento, radiação solar, pressão barométrica, intensidade da luz, umidade relativa	Previsão do tempo*, radiação solar*, velocidade do vento*, evapotranspiração instantânea*, temperatura do ar*, umidade*, onda curta de entrada*, radiação*, radiação de onda longa de entrada*, precipitação*, fluxo de calor latente*	Temperatura ambiental, intensidade de luz, umidade do ar, radiação solar, dióxido de carbono	Temperatura ambiente, umidade do ar
Fatores do solo		Temperatura da superfície do solo*	Temperatura do solo em profundidades, molhamento foliar, umidade do solo, condutividade elétrica, salinidade, valor de pH	Temperatura da superfície do solo*, cor do solo, transpiração do solo*

Fonte: Autor "adaptado de" Monteleone et al., 2020b, p. 4
(*) parâmetros medidos indiretamente (diretamente quando as tecnologias de sensoriamento IoT são usadas para coletar o parâmetro, indiretamente quando modelos são usados para estimar o parâmetro).

Além do impacto nos parâmetros ilustrados no Quadro 2, a escolha das tecnologias de sensoriamento IoT tem impacto também na gestão das operações. Por exemplo, os UAV demonstram competir com as plataformas de aquisição tradicionais, como satélite e aeronave, devido aos baixos custos operacionais e a alta flexibilidade (MATESE et al., 2015).

Esse projeto de tese propõe de considerar na investigação empírica as tecnologias de sensoriamento IoT e os parâmetros apresentados no Quadro 2, para a exploração dos fatores que podem afetar a adoção de AP no contexto da Agricultura 4.0.

3.3 AGRICULTURA 4.0 E FATORES RELACIONADOS COM A INDÚSTRIA 4.0 E A GESTÃO DAS OPERAÇÕES

Esta seção apresenta a definição de Agricultura 4.0 usada neste trabalho e descreve os fatores relacionados à Industria 4.0 e à gestão das operações.

3.3.1 Definição de Agricultura 4.0

Atualmente, a Agricultura 4.0 é um termo vago e mal definido. Uma definição comumente aceita do termo Agricultura 4.0 ainda não existe e não está totalmente claro onde o termo Agricultura 4.0 tem origem (BERTOGLIO et al., 2021). As definições propostas na literatura são baseadas em revisões da literatura (BERTOGLIO et al., 2021; SILVEIRA; LERMEN; AMARAL, 2021; SPONCHIONI et al., 2019) e contribuições de resultados empíricos ainda faltam. Contudo, a Agricultura 4.0 é um tópico em crescente interesse na literatura, como mostra uma pesquisa realizada na base de dados Scopus. Em 14 de janeiro de 2022, nessa base de dados, 220 documentos que mencionavam o termo "*Agriculture 4.0*" no título, resumo e palavras-chave foram encontrados. Em 14 de setembro de 2020, na base de dados Scopus, 69 documentos que mencionavam o termo "*Agriculture 4.0*" no título, resumo e palavras-chave foram encontrados, enquanto apenas 15 documentos em 16 de agosto de 2019. Alguns autores usam da mesma forma Agricultura 4.0 (*Agriculture 4.0*) e agricultura inteligente (*Smart Farming*) ou "*Farming* 4.0" ou agricultura digital (PIVOTO, 2018; WELTZIEN, 2016; ZAMBON et al., 2019), enquanto outros autores usam Agricultura 4.0 para se referir à quarta revolução agrícola (ROSE; CHILVERS, 2018) e outros usam Agricultura 4.0 como evolução da Indústria 4.0 (BRAUN; COLANGELO; STECKEL, 2018; SYMEONAKI; ARVANITIS; PIROMALIS, 2020; ZAMBON et al., 2019) ou como evolução da Agricultura de Precisão (SYMEONAKI; ARVANITIS; PIROMALIS, 2020; WELTZIEN, 2016; ZAMBON et al., 2019).

Além disso, há uma variedade de tecnologias associadas ao termo Agricultura 4.0, já operacionais ou em desenvolvimento (como robótica, nanotecnologia, inteligência artificial, *blockchain* e aprendizado de máquina), mas isso em grande parte ocorreu tacitamente. Parece

não haver regras formais para determinar o que é uma "tecnologia da Agricultura 4.0", mas as tecnologias frequentemente mencionadas parecem ser emergentes, de ponta (*high-tech*) e, atualmente, não amplamente implementadas nas empresas agrícolas (KLERKX; ROSE, 2020).

Algumas pesquisas recentes contribuem para uma melhor compreensão dos conceitos de digitalização na agricultura, agricultura inteligente e Agricultura 4.0. A digitalização na agricultura implica que as tarefas de gerenciamento dentro e fora da empresa agrícola se concentrem em diferentes tipos de dados, usando sensores, máquinas, UAV e satélites para tomar decisões mais oportunas ou precisas. Os conceitos de agricultura inteligente, AP, agricultura digital, Agricultura 4.0 surgem para expressar diferentes formas de digitalização no setor agrícola (KLERKX; JAKKU; LABARTHE, 2019). Dentre as tecnologias digitais na agricultura, destacam-se o uso de internet para atividades gerais ligadas à produção agrícola, aplicativos de celular ou programas de computador para a gestão da propriedade rural e para a compra e venda de insumos e produtos, sistemas de posicionamento global por satélite, sensores remotos ou no campo para fornecer dados ou imagens, máquinas ou equipamentos com eletrônica embarcada (BOLFE et al., 2020).

A agricultura inteligente (*Smart Farming*) representa o uso de serviços e aplicativos da tecnologia da informação inteligentes e ricos em dados, em combinação com equipamentos avançados (em tratores, estufas, etc.). A agricultura inteligente estende o conceito da AP, uma vez que as tarefas existentes de gestão e tomada de decisões com base em dados são aprimoradas pelo contexto, situação e conhecimento local (WOLFERT; GOENSE; SØRENSEN, 2014). A agricultura inteligente inclui três categorias principais de tecnologias: sistemas de informação de gestão agrícola (*Farm Management Information Systems* - FMIS), AP, e automação agrícola e robótica (BALAFOUTIS; EVERT; FOUNTAS, 2020).

Quanto à Agricultura 4.0, recentemente Sponchioni et al. (2019) propõem uma definição holística, baseada em uma revisão sistemática da literatura, com uma abordagem multiperspectiva e cobrindo toda a cadeia de valor agrícola e alimentar. Em linha com o escopo do projeto SWAMP, focado em levar o conceito de IoT para a irrigação de precisão em empresas agrícolas-piloto, neste trabalho, a definição de Sponchioni et al. (2019, p. 146) é usada, mas limitada apenas à empresa agrícola:

> Agricultura 4.0 é a evolução da Agricultura de Precisão, realizada por meio da coleta, integração e análise automatizadas de silos de dados previamente separados provenientes do campo, sensores de equipamentos e outras fontes de terceiros, habilitada pelo uso de tecnologias inteligentes e digitais da Indústria 4.0 (como sensores, cérebros digitais, tecnologias de comunicação, Sistema Ciber-Físico),

> possibilitando dessa forma a geração de conhecimento, para apoiar o agricultor na tomada de decisões na empresa agrícola.

A maioria dos estudos sobre a Agricultura 4.0 são teóricos e abordam principalmente temas relacionados à automação e robótica (LUWES; OGOCHUKWU; RSKOTSOANE, 2020; MANCINI; FRONTONI; ZINGARETTI, 2019a), sustentabilidade ambiental (ADAMIDES et al., 2020), cadeia agroalimentar (CORALLO; LATINO; MENEGOLI, 2020; KLERKX; ROSE, 2020), assuntos tecnológicos (IGLESIAS; BULACIO; TAPIA, 2020; KATAMREDDY et al., 2019; SYMEONAKI; ARVANITIS; PIROMALIS, 2020) e apoio ao processo de tomada de decisões (SAIZ-RUBIO; ROVIRA-MÁS, 2020; ZHAI et al., 2020). Recentemente os primeiros estudos sobre a sustentabilidade social e os impactos sociais da Agricultura 4.0 (KLERKX; ROSE, 2020; ROSE et al., 2021; ROSE; CHILVERS, 2018), e também sobre a Agricultura 4.0 dirigida a empresas agrícolas de pequeno e meio porte (COTTER; ASCH, 2020; ZAMBON et al., 2019) foram publicados.

Pesquisas lidando com temas da gestão das operações ainda são raras (BRAUN; COLANGELO; STECKEL, 2018), assim como os estudos sobre a gestão das operações inspirados no conceito da Indústria 4.0.

Para abordar os tópicos da gestão das operações na era 4.0 e responder a sugestão de Jørgensen (2018), nas seguintes seções os trabalhos que estudam os temas da Industria 4.0, da Industria 4.0 na agricultura e da gestão das operações na agricultura são analisados.

3.3.2 Fatores relacionados à Industria 4.0

O termo Indústria 4.0 foi cunhado na Alemanha em 2011 como resultado de uma iniciativa do governo alemão (KAGERMANN; WAHLSTER; HELBIG, 2013), para indicar a revolução industrial que está impulsionado uma transformação na indústria, e, mais geralmente, na humanidade, remodelando o contexto económico, social, cultural e humano atual. A indústria 4.0 é promovida por efeito do desenvolvimento e da adoção de tecnologias emergentes, como inteligência artificial, Internet das Coisas, veículos autônomos, impressão 3D, nanotecnologia, computação quântica, entre outras. Ao habilitar as “fábricas inteligentes”, a Indústria 4.0 cria um mundo no qual os sistemas virtuais e físicos de manufatura globalmente cooperam entre si de maneira flexível, possibilitando a criação de novos modelos operacionais. Essa transformação coloca também novos desafios sociais a serem enfrentados (como desenvolvimento de conhecimento e habilidades para utilizar as tecnologias emergentes,

criação de novas profissões), para garantir que ela seja empoderadora e centrada no ser humano (SCHWAB, 2016).

Apesar da atual referência generalizada ao conceito da Indústria 4.0, é difícil encontrar uma definição clara (BERNHARDT et al., 2021). Vários sinônimos e definições são propostas para o termo Indústria 4.0, sem um consenso ter sido alcançado pelos pesquisadores, dado que depende do foco do estudo (conceito de "fábrica inteligente", atenção específica a Internet das Coisas, estrutura da cadeia de valor, entre outros). A Indústria 4.0 ainda é um novo assunto de pesquisa, pelo menos nos estudos de gestão (PICCAROZZI; AQUILANI; GATTI, 2018), o que impõe sérias limitações à construção de teorias e à comparabilidade das pesquisas. Trabalhos recentes mostram uma omissão clara na conceituação desse fenômeno (CULOT et al., 2020). A Indústria 4.0 parece ser um termo coletivo de diferentes desenvolvimentos. Um dos motivos pode ser a origem do conceito também impulsionada politicamente, e não puramente científica (BEIER et al., 2020).

No entanto, na maioria dos estudos o termo Indústria 4.0 é usado para se referir à quarta revolução industrial (KAGERMANN; WAHLSTER; HELBIG, 2013), que propõe mudanças significativas em como a indústria tradicional lida com produtos, processos, relacionamentos intraorganizacionais, globalização e concorrência (CARRARO; GODINHO FILHO; OLIVEIRA, 2020). Nesse contexto, quatro componentes básicos fundamentam o conceito da Indústria 4.0: o Sistema Ciber- Físico (*Cyber-Physical System* - CPS), que monitora processos físicos, cria uma cópia virtual do mundo físico e toma decisões descentralizadas (HERMANN; PENTEK; OTTO, 2015; KAGERMANN; WAHLSTER; HELBIG, 2013); Internet das Coisas (ATZORI; IERA; MORABITO, 2017), meio de comunicação e cooperação em tempo real entre o CPS e os indivíduos (HERMANN; PENTEK; OTTO, 2015); Internet dos Serviços (*Internet of Services* - IoS), serviços oferecidos pelos fornecedores através da Internet (BUXMANN; HESS; RUGGABER, 2009); Fábrica Inteligente, uma fábrica em que o CPS se comunica pela IoT e auxilia pessoas e máquinas na execução de suas tarefas (HERMANN; PENTEK; OTTO, 2015). Além dos benefícios, a literatura identifica também algumas barreiras consideradas relevantes para a implementação da Indústria 4.0 no setor de manufatura, como por exemplo: investimento na implementação, falta de clareza quanto aos benefícios econômicos, baixo nível de maturidade das tecnologias, risco de violações de segurança, falta de padrões e formas de certificação, falta de infraestrutura tecnológica, falta de habilidades digitais, resistência à mudança, falta de uma estratégia digital ao lado da escassez de recursos (RAJ et al., 2020).

Quanto à gestão das operações, a Indústria 4.0 se baseia na integração das tecnologias de informação e comunicação na cadeia de valor dos produtos e serviços por meio da

interconectividade de pessoas, produtos e processos. No entanto, esse novo paradigma envolve o desafio de dispor de funcionalidades dedicadas para gerenciar e controlar todos os processos e recursos relacionados à produção por meio de um modelo dedicado (GASPAR; JULIAO, 2020).

Portanto, com base na revisão da literatura e de acordo com o objetivo de explorar os fatores relacionados ao comportamento do agricultor, nesse trabalho o termo Industria 4.0 se refere à transformação industrial que sugere uma nova fase na indústria por meio de inovações impulsionadas pelas tecnologias da comunicação e informação, com o papel fundamental desempenhado pela Internet das Coisas.

As abordagens da Indústria 4.0 podem ser aprimoradas e ser pertinentes ao setor agrícola. Enquanto a Indústria 4.0 é, hoje, muito avançada, tanto do ponto de vista científico e de pesquisa quanto da atitude prática, já que muitas empresas a aplicam, a Agricultura 4.0 ainda é restrita e adiada em teoria (ZAMBON et al., 2019). A inspiração para a Indústria 4.0 identifica algumas vantagens que podem ser introduzidas na agricultura, como melhorias no planejamento e controle (BRAUN; COLANGELO; STECKEL, 2018). Se o conceito da Indústria 4.0 for transferido para a agricultura, um sistema de aprendizagem central seria capaz de controlar a empresa agrícola e tomar decisões, com base em dados coletados de sensores espalhados pelo campo (KNOLL; CZYMMEK, 2018). Os sensores são os componentes essenciais para o monitoramento e controle ambiental, incluindo vários tipos de situações de estresse anormais como anormalidades na temperatura, pressão e umidade (GUO; DUSADEERUNGSIKUL; NOF, 2018). Ainda, o processamento de dados em tempo real permite monitorar e controlar a aplicação de nutrientes durante todo o período de crescimento das plantas, e, portanto, direcionar a água e os fertilizantes para plantas individuais, de modo que cada uma cresça de maneira ideal (KNOLL; CZYMMEK, 2018).

As tecnologias da Indústria 4.0 oferecem uma oportunidade para aumentar a produtividade do setor agrícola (SHARMA; PARHI; SHISHODIA, 2021), graças à automação, e consequentemente para reduzir a dependência de uma grande força de trabalho (WINBERG, 2020). Além da redução de custo com mão de obra, a adoção de tecnologias desenvolvidas pela Indústria 4.0 leva a redução de custos com a possibilidade de aplicação exata de irrigação, fertilizantes e defensivos (CARRARO; GODINHO FILHO; OLIVEIRA, 2020).

Porém, a onda da Indústria 4.0 também apresenta novos desafios que a agricultura tradicional precisa superar (SPANAKI; KARAFILI; DESPOUDI, 2019). Quando comparadas à produção industrial, as operações agrícolas interagem com um sistema biologicamente ativo. A produção industrial ocorre em ambientes próximos e bem definidos, nos quais os dados de

desempenho podem ser medidos por quantidades determinísticas. Nas operações agrícolas, pela natureza incerta, muitos ajustes são possíveis para otimizar os métodos operacionais (JØRGENSEN, 2018). O processo de produção na agricultura é diferente do industrial em vários aspectos: sazonalidade, papel preponderante do meio ambiente, incerteza e risco inerentes (por exemplo crescimento de culturas, condições climáticas), complexidade na avaliação de decisões de risco (BOCHTIS; SORENSEN; KATERIS, 2018; DORA et al., 2015). Ainda, devido às condições meteorológicas extremas e à natureza do solo, é difícil adquirir e instalar sensores que sejam robustos e capazes de medir indicadores do crescimento da cultura (KATAMREDDY et al., 2019). O planejamento e controle são mais difíceis do que nos ambientes industriais, já que respeito às quantidades a produzir o resultado é sempre uma estimativa, diferentemente de outros empreendimentos onde as quantidades resultantes são determinadas a priori (SCARPELLI; BATALHA, 2001). Outros desafios são representados pelo alto grau de mobilidade das instalações de produção, pela disponibilidade e largura de banda das conexões sem fio que estão sujeitas a influências perturbadoras, dificultando a comunicação constante (BRAUN; COLANGELO; STECKEL, 2018). Além disso, a tecnologia de comunicação sem fio deve fornecer coberturas que variam de dezenas de metros a quilômetros, uma vez que os sensores podem ser implantados longe e em locais remotos (GUILLÉN-NAVARRO; PEREÑÍGUEZ-GARCÍA; MARTÍNEZ-ESPAÑA, 2017).

Em relação à tomada de decisões, é importante ressaltar que os métodos quantitativos na agricultura são menos desenvolvidos. Devido à complexidade que caracteriza o setor agrícola, os métodos heurísticos baseados na experiência desempenham um papel fundamental (BRAUN; COLANGELO; STECKEL, 2018) e a busca por abordagens matemáticas estritas permanece bastante incomum (MIRANDA; YAMAKAMI; RAMPAZZO, 2019).

Intrinsecamente ligado à experiência, existe outro desafio colocado pela automação. Através da automação, trabalhadores rurais podem não ser mais necessários e é presumível que o conhecimento baseado na experiência do agricultor pode ser perdido (KNOLL; CZYMMEK, 2018). Porém, ao mesmo tempo, a adoção de tecnologias que aumentam a automação contribui para a evolução dos trabalhadores rurais, e não a substituí-los. A adoção pode levar à hibridização do trabalho baseado na combinação entre conhecimento das práticas agrícolas (profundo conhecimento local e da cultura) aprimorado por meio dessas tecnologias e aprendizagem especializada (por exemplo interpretar as leituras dos sensores). O resultado é a necessidade, para os trabalhadores rurais, de desenvolver mais capacidades tecnológicas e habilidades relacionadas (WINBERG, 2020). A automação apresenta também os desafios do alto capital necessário para investir (KNOLL; CZYMMEK, 2018) e da demanda de energia

elétrica, devido à adoção de maquinários pesados. Porém, muitas tecnologias são de baixa potência, capazes de funcionar com energia solar. Essas tecnologias podem resultar na redução geral do consumo de energia e combustível (WINBERG, 2020).

As vantagens e os desafios relacionados à inspiração para a Industria 4.0 identificados na literatura são resumidos no Quadro 3. As vantagens e os desafio são associados a fatores identificados com base na revisão da literatura.

Quadro 3 - Vantagens e desafios relacionados à inspiração para a Industria 4.0

Categorias	**Descrição**	**Referencias**	**Fatores**
Vantagens	Melhorias no planejamento e controle	Braun; Colangelo e Steckel (2018); Knoll e Czymmek (2018)	Planejamento e controle
	Sistema de aprendizagem central capaz de controlar a empresa agrícola e tomar decisões	Knoll e Czymmek (2018)	Controle, tomada de decisões
	Monitoramento e controle ambiental	Guo; Dusadeerungsikul e Nof, (2018)	Controle
	Aumento da produtividade e redução da dependência da força de trabalho	Winberg (2020); Sharma; Parhi e Shishodia (2021)	Automação
	Redução de custos com a possibilidade de aplicação exata de irrigação	Carraro; Godinho Filho; Oliveira (2020)	Custos
Desafios	Sistema biologicamente ativo, natureza incerta, possíveis ajustes	Jørgensen (2018)	Planejamento e controle
	Processo de produção diferente do industrial (meio ambiente, natureza do solo, incerteza e risco)	Bochtis; Sorensen e Kateris (2018); Dora et al. (2015); Katamreddy et al. (2019)	Processo de produção
	Planejamento e controle mais difíceis	Braun; Colangelo e Steckel (2018); Scarpelli e Batalha (2001)	Planejamento e controle
	Cobertura da tecnologia de comunicação sem fio, sensores espalhados	Guillén-Navarro; Pereñíguez-García e Martínez-España (2017)	Tecnologia de comunicação
	Métodos quantitativos menos desenvolvidos, papel fundamental dos métodos heurísticos	Braun; Colangelo e Steckel (2018); Miranda; Yamakami e Rampazzo (2019)	Tomada de decisões
	Perda de conhecimento baseado na experiência, hibridização do trabalho	Knoll e Czymmek (2018); Winberg (2020)	Automação
	Alto capital necessário para investir em automação	Knoll e Czymmek (2018)	Automação, custos
	Consumo de energia e combustível	Winberg (2020)	Custos

Fonte: Autor

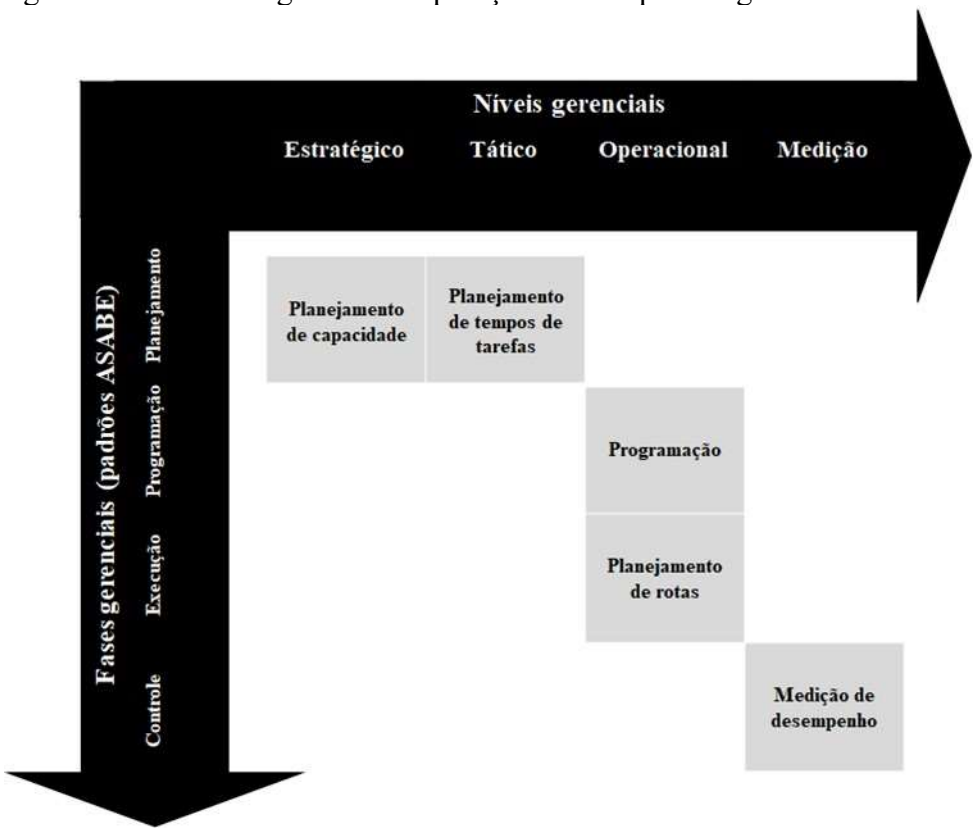
Esse projeto de tese propõe de considerar na investigação empírica as vantagens e os desafios analisados nesta seção, e ilustrados no Quadro 3, para verificar se a inspiração para o conceito da Indústria 4.0 pode facilitar o estabelecimento de soluções operacionais, a fim de explicar o potencial ainda inexplorado da AP para as operações agrícolas (JØRGENSEN, 2018).

3.3.3 Fatores relacionados à gestão das operações

A gestão das operações é a atividade de gestão dos recursos que produzem e entregam produtos e serviços, alterando entradas em saídas usando um processo de "entrada-transformação-saída". A função de operações é a parte da organização responsável por essa atividade (SLACK; CHAMBERS; JOHNSTON, 2010). O objetivo dessa função é planejar e controlar as operações necessários para produzir os bens ou serviços demandados pelo cliente (BOCHTIS; SORENSEN; KATERIS, 2018). A gestão das operações é importante em todos os tipos de organização, como uma fábrica de automóveis, um hospital, um supermercado ou uma empresa agrícola (SLACK; CHAMBERS; JOHNSTON, 2010).

A gestão das operações na agricultura lida com o desenho, planejamento, programação e execução de operações humanas e de máquinas. Uma operação na agricultura é geralmente vista como o elo entre recursos, materiais processados e materiais produzidos. As operações agrícolas podem, por exemplo, ser semeadura, fertilização, tratamento de plantas, irrigação e colheita (BOCHTIS; SORENSEN; KATERIS, 2018; JØRGENSEN, 2018). As operações são executadas com homens e máquinas (VAN ELDEREN, 1980; WIJNGAARD, 1988). Os recursos incluem terra disponível, horas de trabalho, maquinários, tempo de preparação do campo, equipamentos, capacidade de armazenamento, entre outros (LOWE; PRECKEL, 2004; SCARPELLI; BATALHA, 2001). Um exemplo de modelo de gestão das operações de máquinas agrícolas é ilustrado na Figura 2 (BOCHTIS; SØRENSEN; BUSATO, 2014).

Figura 2 - Modelo de gestão das operações de máquinas agrícolas



Fonte: Autor “adaptado de” Bochtis, Sørensen e Busato, 2014, p. 71

Uma empresa agrícola enfrenta muitas questões relevantes para a gestão das operações, como: o planejamento e controle da produção de produtos sazonais (por exemplo a salada) para atender a demanda anual ao longo da cadeia de consumo agroalimentar; o controle de qualidade de produtos agrícolas perecíveis para atender as vendas e o consumo ao longo da cadeia agroalimentar (SLACK; CHAMBERS; JOHNSTON, 2010); o problema de decisão de um agricultor associado à alocação de sua terra entre diferentes culturas com diferentes necessidades de água, e a decisão de adquirir uma certa quantidade de capacidade de água de irrigação antes da temporada e de alocar essa capacidade como água de irrigação a ser aplicada durante a temporada para cada uma das culturas selecionadas (HUH; LALL, 2013).

A visão sobre a gestão das operações na agricultura evolui a partir dos anos 1950 através de quatro fases: mecanização (1950 - 1970), organização do trabalho (1970 - 1990), tecnologias da informação e comunicação e automação (1990 - hoje), robótica. Nessa evolução, as noções de planejamento e programação desempenham um papel central, gerando a necessidade de ferramentas avançadas de gestão, aquisição e análise de dados, para suportar a tomada de decisões (BOCHTIS; SORENSEN; KATERIS, 2018; JØRGENSEN, 2018).

As decisões do agricultor, que dependem de diferentes estágios da produção agrícola, incluem: decisões agronômicas relacionadas ao plantio (como escolha de tipo de cultura, variedade de sementes, método de cultivo, densidade e data de plantio); decisões relacionadas aos estágios de desenvolvimento (como aplicações de pesticidas, herbicidas, fertilizantes e irrigação); decisões de colheita e pós-colheita (como data de colheita, irrigação e cultivo) (HU et al., 2006). Além disso, a tomada de decisões depende de fatores não controláveis (como condições climáticas e características do solo) e de fatores modificáveis (como infraestrutura de irrigação). Os fatores modificáveis abrangem uma ampla variedade de decisões, como: escolha de quais operações de campo executar, como e quando concluir as operações, quais máquinas usar (RECIO; RUBIO; CRIADO, 2003). Os fatores externos, como a volatilidade do clima, tornam a tomada de decisões na agricultura ainda mais difícil (WOLFERT; GOENSE; SØRENSEN, 2014).

As decisões de gestão das operações são influenciadas também pelo planejamento da empresa agrícola, que envolve várias decisões sazonais que o agricultor deve tomar, como: determinar os tipos de culturas a ser cultivadas, a área a ser usada para cada cultura e os requisitos de equipamentos e força de trabalho; determinar as políticas de irrigação, de aplicação de fertilizantes e de rotação das culturas (GLEN, 1987); determinar quais práticas operacionais de produção adotar e qual nível de custos de produção perseguir (OSAKI; BATALHA, 2014). Esse planejamento inclui também a seleção de máquinas por alguns anos, a preparação do plano de cultivo para o próximo ano (VAN ELDEREN, 1980).

Além disso, o agricultor deve levar em consideração que algumas operações e decisões são interligadas. Por exemplo, o tempo de plantio da cultura e a sua colheita afetam o rendimento da safra; questões como a rotação das culturas são intimamente relacionadas ao plantio e à colheita; decisões sobre qual cultura cultivar e sobre a porção de terra agrícola dedicar a cada cultura devem considerar decisões semelhantes a ser tomadas nas safras subsequentes; a irrigação para culturas concorrentes é uma questão importante de planejamento agrícola quando a água é escassa (LOWE; PRECKEL, 2004). Ainda, muitas operações agrícolas (como preparação do campo, semeadura e colheita) precisam ser executadas em uma ordem específica. Cada operação tem um número de condições agronômicas que devem ser satisfeitas em um campo antes que a operação possa ser executada de maneira eficiente e efetiva (EDWARDS et al., 2015).

Para o planejamento é fundamental ter em consideração também a tempestividade (*timeliness*) de algumas operações: quando uma operação não é executada no tempo “ideal”, o

efeito pode ser uma queda no valor da colheita devido a perdas de rendimento e de qualidade (LOWE; PRECKEL, 2004; WIJNGAARD, 1988).

Em relação à irrigação, duas decisões são prioritárias no processo de planejamento: definição da quantidade de água a aplicar e do tempo de irrigação. Essas decisões são afetadas por fatores como clima e estágios de desenvolvimento da cultura (KOECH; LANGAT, 2018). Para decidir o nível ótimo de irrigação para cada campo, no início de cada período de irrigação os agricultores precisam considerar também outros fatores: a água disponível, o custo de irrigação (alguns campos podem estar distantes e sua irrigação pode consumir mais energia elétrica), o número de hectares em cada campo, as zonas de manejo, as culturas plantadas em cada campo, os estágios de desenvolvimento da cultura, a umidade do solo (CID-GARCIA; BRAVO-LOZANO; RIOS-SOLIS, 2014).

As decisões que podem ser tomadas no planejamento e programação das operações agrícolas e os fatores envolvidos são resumidos no Quadro 4.

Quadro 4 - Decisões no planejamento e programação das operações agrícolas

Operações	**Decisões**	**Fatores**	**Referências**
Planejamento	Tempo de execução de uma operação	Tempestividade	Wijngaard (1988); Lowe e Preckel (2004)
Plantio e colheita	Planejamento	Interligação entre operações	Lowe e Preckel (2004)
Irrigação	Determinação das políticas de irrigação	Planejamento da empresa agrícola	Glen (1987)
Irrigação	Quantidade de água a aplicar, tempo de irrigação	Clima, estágios de desenvolvimento da cultura	Koech e Langat (2018); Hu et al. (2006)
Irrigação	Nível ótimo de irrigação	Água disponível, custo de irrigação, número de hectares, zonas de manejo, culturas plantadas, estágios de desenvolvimento da cultura	Cid-Garcia; Bravo-Lozano e Rios-Solis (2014)
Colheita	Execução	Ordem específica, preparação do campo	Edwards et al. (2015)

Fonte: Autor

Os fatores ilustrados no Quadro 4 são levados em consideração na investigação empírica desta tese como fatores que podem afetar a adoção de tecnologias de AP no contexto da Agricultura 4.0, como foco na gestão das operações de irrigação, além de influenciar as decisões no planejamento e programação das operações agrícolas. Ainda, esse projeto de tese propõe de considerar na investigação empírica esses fatores, para verificar se a inspiração para o conceito

da Indústria 4.0 pode facilitar o estabelecimento de soluções operacionais, a fim de explicar o potencial ainda inexplorado da AP para as operações agrícolas (JØRGENSEN, 2018).

3.4 COMPORTAMENTO DO AGRICULTOR E FATORES QUE AFETAM A ADOÇÃO

Esta seção apresenta as teorias utilizadas para explicar a adoção de inovações e descreve a TPB e os fatores que afetam a adoção de inovações na agricultura.

3.4.1 Teorias utilizadas para explicar a adoção de inovações

Conforme os agricultores decidem que as inovações serão implementadas em suas empresas agrícolas, é importante entender as decisões dos agricultores sobre a adoção de inovações, como a adoção de melhores práticas de gestão (BORGES; OUDE LANSINK; EMVALOMATIS, 2019). As vantagens ou oportunidades oferecidas aos agricultores pelas inovações podem ser estudadas tanto da perspectiva do adotante e de seu contexto agrícola quanto da perspectiva da inovação (OCA MUNGUIA; LLEWELLYN, 2020).

A adoção de novas tecnologias e práticas tem recebido considerável atenção acadêmica ao longo dos anos. Uma gama de modelos de base puramente econômica da tomada de decisões do agricultor foi desenvolvida a fim de prever mudanças na agricultura (EDWARDS-JONES, 2006). A literatura econômica na agricultura é baseada na suposição de que a tomada de decisões do agricultor pode ser modelada puramente em termos da ação individual para maximizar o lucro (AUSTIN et al., 1998) ou a utilidade esperada (WEERSINK; FULTON, 2020). Existe também uma extensa literatura sociológica rural na qual o agricultor atribui grande importância aos aspectos do "estilo de vida" e as considerações pessoais, que interagem fortemente com as decisões de gestão. Essa literatura sugere que os modelos puramente econômicos não podem capturar toda a complexidade da motivação e do comportamento do agricultor (AUSTIN et al., 1998).

A teoria econômica tradicional estabelece que as pessoas tomam decisões com base na mudança esperada em seu nível de "bem-estar", onde o termo técnico para bem-estar é "utilidade", conceito que permite aos economistas modelar o comportamento de uma forma conceitual. Uma das principais premissas dos modelos econômicos tradicionais é que as pessoas procuram maximizar seus níveis de utilidade. Uma vez que a utilidade é muito difícil de medir em situações do mundo real, em muitos modelos econômicos o lucro é usado como substituto da utilidade. No entanto, desde a década de 1990, as abordagens tradicionais da ciência e

economia agrícola foram complementadas por uma contribuição crescente da sociologia e psicologia, na tentativa de compreender as respostas dos agricultores à questões não financeiras, relacionadas ao fornecimento de bens ambientais e problemas sociais (EDWARDS-JONES, 2006). Como resultado, os modelos da literatura que estudam a adoção consideram fatores financeiros (BARNES et al., 2019a), fatores não financeiros (como características do agricultor, da empresa agrícola, do ambiente e da inovação) (DABERKOW; MCBRIDE, 1999; FOUNTAS et al., 2005; NAPIER; ROBINSON; TUCKER, 2000) e também fatores psicológicos, entre os quais a atitude tem recebido mais atenção (EDWARDS-JONES, 2006).

Apesar de várias teorias tenham sido desenvolvidas ao longo do tempo, quatro delas podem ser consideradas referências para desenvolver modelos usados para analisar as decisões dos agricultores de adotar uma inovação: maximização da utilidade (*Utility Maximization* - UM) (WEERSINK; FULTON, 2020), Teoria da Ação Racional (*Theory of Reasoned Action* - TRA) (AJZEN; FISHBEIN, 1975) e Teoria do Comportamento Planejado (*Theory of Planned Behavior* - TPB) (AJZEN, 1991), Modelo de Aceitação da Tecnologia (*Technology Acceptance Model* - TAM) (BETTIGA; LAMBERTI, 2017; BORGES; OUDE LANSINK; EMVALOMATIS, 2019; DAVIS, 1989). Essas teorias estabelecem a base para a escolha dos fatores explicativos para a adoção de inovações (OCA MUNGUIA; LLEWELLYN, 2020).

A teoria UM é aplicada com mais frequência do que as TRA, TPB e TAM para estudar as decisões de adoção dos agricultores. A UM é usada principalmente na literatura econômica, enquanto as TRA e TPB são usadas na literatura da psicologia social e das ciências sociais (BORGES; OUDE LANSINK; EMVALOMATIS, 2019; WILLOCK et al., 1999) e a TAM no campo dos sistemas de informação (ADRIAN; NORWOOD; MASK, 2005). Um raro exemplo de aplicação da TPB para estudar a adoção de AP é o trabalho de Reichardt et al. (2009), enquanto a TAM é utilizada por Adrian, Norwood e Mask (2005), Aubert, Schroeder e Grimaudo (2012) e Reichardt et al. (2009). A UM é aplicada para o desenvolvimento de modelos de regressão para fornecer evidências da adoção (OCA MUNGUIA; LLEWELLYN, 2020; GRILICHES, 1957), como no caso dos estudos de D'Antoni, Mishra e Joo (2012), Thompson et al. (2019) e Walton et al. (2010) sobre a adoção de AP. A TAM e a TPB preveem o comportamento a partir da intenção dos agricultores (MATHIESON, 1991) e compartilham a ideia de que a intenção é o resultado de um processamento racional de informações sobre a inovação e o seu contexto de uso (BETTIGA; LAMBERTI, 2017).

A TRA argumenta que o comportamento é melhor previsto pelas intenções de uma pessoa, que por sua vez são afetadas por suas atitudes e influências de outras pessoas significativas em sua intenção de agir (REZAEI-MOGHADDAM; SALEHI, 2010; WILLOCK

et al., 1999). Embora a TRA possa prever adequadamente comportamentos que são relativamente simples (ou seja, sob controle voluntário), sob circunstâncias em que há restrições à ação, a mera formação de uma intenção é insuficiente para prever o comportamento (ARMITAGE; CONNER, 2001). Na verdade, muitos comportamentos requerem certas habilidades, conhecimento ou cooperação de outras pessoas, e podem exigir a habilidade de superar barreiras como falta de dinheiro ou tempo (SOK et al., 2020). A TPB expande a TRA através da inclusão do Controle Comportamental Percebido (*Perceived Behavioral Control* - PBC), para permitir a previsão de comportamentos que não são sob controle volitivo completo (AJZEN, 1991; ARMITAGE; CONNER, 2001) e para explicar as condições em que os indivíduos não têm controle total sobre seu comportamento (TAYLOR; TODD, 1995). A adição do PBC reflete a realidade em que os indivíduos têm diferentes níveis de controle sobre as decisões que podem tomar (SUTHERLAND, 2011).

A principal suposição nos modelos que aplicam a UM é que os agricultores tomam decisões de adoção com base em considerações de utilidade e que suas ações são consistentes com o objetivo de maximizar sua utilidade (EDWARDS-JONES, 2006; WEERSINK; FULTON, 2020). O argumento central é que um agricultor adota uma inovação se a utilidade de adotar excede a utilidade de não adotar, ou se a utilidade de adotar excede a utilidade de adotar outra inovação disponível. As variáveis explicativas mais usadas nos modelos que aplicam a UM são as características do agricultor e da empresa agrícola, o contexto agrícola. Um ponto forte desses modelos é que capturam o comportamento "real" dos agricultores. Ou seja, a decisão de um agricultor de adotar uma inovação é baseada na maximização da utilidade e presume-se que sua preferência seja revelada pela observação de seu comportamento. Outro ponto forte é que as variáveis mais frequentemente usadas são medidas mais facilmente do que os construtos psicológicos (BORGES; OUDE LANSINK; EMVALOMATIS, 2019), que precisam de escadas validadas (AJZEN, 1991, 2006).

Os estudos baseados na TRA e na TPB analisam os comportamentos de uma forma mais profunda do que os estudos baseados na UM (BORGES; OUDE LANSINK; EMVALOMATIS, 2019). A inclusão do PBC fornece informações sobre as potenciais restrições à ação percebidas pelo ator e é realizada para explicar por que as intenções nem sempre predizem o comportamento (ARMITAGE; CONNER, 2001). Outro ponto forte da TRA e da TPB é que consideram explicitamente o papel da pressão social sobre os agricultores para a adoção de uma inovação, por meio do construto Norma Subjetiva (*Subjective Norm* - SN) (BORGES; OUDE LANSINK; EMVALOMATIS, 2019). A principal fraqueza que as teorias TRA e TPB mostram é que parecem ser um melhor preditor de intenções autorreferidas do que

de comportamentos observados (ARMITAGE; CONNER, 2001)**.** Os pesquisadores geralmente não medem o comportamento revelado, mas sim a intenção de realizar um comportamento específico. Ainda, os estudos que usam a TRA ou a TPB não consideram explicitamente o papel de outros fatores explicativos, como características do agricultor e da empresa agrícola (BORGES; OUDE LANSINK; EMVALOMATIS, 2019). Contudo, os construtos Atitude, SN e PBC podem ser decompostos em dimensões de crença específicas. Essa decomposição proporciona um aumento na explicação da intenção comportamental (TAYLOR; TODD, 1995).

A teoria TAM explica o comportamento de uso pela intenção comportamental, atitude, utilidade percebida e facilidade de uso percebida (DAVIS, 1989). A TAM, desenvolvida com base na TRA (REZAEI-MOGHADDAM; SALEHI, 2010), postula que a adoção é determinada pela intenção comportamental em adotar a inovação; tal intenção, por sua vez, é determinada pela Utilidade Percebida (*Perceived Utility* - PU) e Facilidade de Uso Percebida (*Perceived Ease of Use* - PEOU), que são o resultado dos estímulos aos quais o indivíduo é exposto. A PU e PEOU determinam a atitude, que por sua vez define a intenção comportamental, enquanto a PU pode influenciar até mesmo diretamente tal intenção (BETTIGA; LAMBERTI, 2017). O apelo desse modelo é simples: um pequeno número de fatores, que são fáceis de entender, é responsável pelo comportamento (TAYLOR; TODD, 1995). Uma fraqueza da TAM em comparação com a TPB, é que a TPB incorpora fatores adicionais, como a influência de outras pessoas significativas, habilidade percebida e controle que não estão presentes na TAM, mas que podem resultar importantes determinantes do comportamento e fornecer uma compreensão mais completa do comportamento (TAYLOR; TODD, 1995). A TAM não inclui explicitamente as variáveis sociais, importantes se capturam a variância ainda não explicada por outras variáveis. Além disso, a TAM fornece informações muito gerais sobre facilidade de uso e utilidade e não considera de nenhuma forma óbvia as questões de controle externo. A TPB fornece informações mais específicas do contexto e identifica os fatores que os indivíduos consideram ser barreiras para a adoção. A TPB também identifica grupos cujas opiniões podem ser importantes para os indivíduos levar em consideração (MATHIESON, 1991).

Outra classificação dos modelos desenvolvidos através das teorias em análise é entre modelos ex-ante e modelos ex-post. A adoção de tecnologias de AP na literatura é analisada com uma abordagem ex-ante ou ex-post. Estudos ex-post demonstram os motivos ou razões que encorajaram os agricultores a adotarem novas tecnologias de AP, enquanto estudos ex-ante permitem analisar a aceitação de uma nova tecnologia antes de sua introdução. Essas investigações preditivas revelam quais fatores determinantes podem afetar o comportamento do agricultor antes que seja tomada a decisão de usar uma nova tecnologia (PIERPAOLI et al.,

2013). Os trabalhos ex-post descrevem uma natureza "pós-evento" de um inquérito, com o objetivo de explicar por que os agricultores adotaram ou não tecnologias (TEY; BRINDAL, 2012). Os economistas favorecem as análises ex-post que usam dados sobre preferências observadas, porque se baseiam em escolhas tecnológicas feitas pelos agricultores em condições reais. Com este tipo de dados, as questões de observabilidade, que criam problemas de dados faltantes, se referem principalmente as características da inovação que variam em um nível de indivíduo (USECHE; BARHAM; FOLTZ, 2013). Os modelos econômicos podem ser aplicados também ex-ante. Nesse caso a utilidade, que os agricultores esperam derivar das tecnologias de AP, é um fator que afeta suas decisões (TORBETT et al., 2008). Ao decidir adotar uma tecnologia, os agricultores procuram maximizar sua utilidade esperada. Um conjunto de fatores (pessoais, sociais, características da tecnologia e da propriedade, entre outros) tem o potencial de afetar a percepção dos agricultores em relação à utilidade esperada de uma tecnologia, modificando a probabilidade de adoção (CARRER; SOUZA FILHO; BATALHA, 2017).

Enfim, como resultado de uma revisão crítica dos modelos econômicos e psicológicos sobre a adoção de inovação na agricultura, os estudos baseados na UM usam um grande número de variáveis, algumas das quais sem base teórica. A maioria das variáveis tem um efeito insignificante com mais frequência do que um efeito significativo na adoção. Os resultados dos estudos baseados na TRA e na TPB mostram que as correlações entre os construtos psicológicos são mais frequentemente significativas. Contudo, não é possível identificar um padrão claro entre as pesquisas, dado que a maioria das variáveis são utilizadas apenas em um ou dois trabalhos. Além disso, estudos que utilizam os modelos baseados na TRA e na TPB sofrem da falta de consistência na mensuração dos construtos, dado que os pesquisadores não medem os construtos recomendados por essas teorias (BORGES; OUDE LANSINK; EMVALOMATIS, 2019). Quanto à comparação entre TAM e TPB, a TAM fornece uma maneira rápida e econômica de estudar um comportamento, enquanto a TPB é mais onerosa de aplicar, mas fornece mais informações sobre os fatores que os indivíduos consideram ao fazer suas escolhas. A TAM é mais fácil de aplicar, mas fornece apenas informações muito gerais sobre as opiniões dos indivíduos. A TPB fornece informações mais específicas que podem orientar melhor o estudo. Contudo, as medidas das crenças da TPB precisam ser desenvolvidas para cada contexto, embora algumas crenças possam se generalizar. Identificar essas crenças faz parte da metodologia para usar a TPB. Embora tal exploração não seja excluída na TAM, não é uma parte essencial dessa teoria. Os construtos da TAM são medidos da mesma maneira em todas as situações, enquanto a TPB requer um estudo piloto em cada contexto (MATHIESON, 1991).

As características das teorias UM, TRA, TPB e TAM são resumidas no Quadro 5.

Quadro 5 - Características das teorias utilizadas para explicar a adoção de inovações

Características	UM	TRA	TPB	TAM	Referências
Literatura de referência	Economia	Psicologia social, ciências sociais	Psicologia social, ciências sociais	Sistemas de informação	Adrian; Norwood e Mask (2005); Borges; Oude Lansink e Emvalomatis (2019); Edwards-Jones (2006); Willock et al. (1999)
Objetivo	Modelar a tomada de decisões, maximizar a utilidade	Prever e explicar comportamento sob controle voluntário	Prever e explicar o comportamento não sob controle total	Prever e explicar o comportamento de uso	Ajzen e Fishbein (1975); Armitage e Conner (2001); Austin et al. (1998); Davis (1989); Edwards-Jones (2006)
Fatores explicativos da adoção	Contexto, informações, características agricultor e empresa agrícola	Intenção, atitude, norma subjetiva	Intenção, atitude, norma subjetiva, controle comportamental percebido, fatores antecedentes	Intenção, atitude, utilidade percebida, facilidade de uso percebida	Ajzen (1991); Ajzen e Fishbein (1975); Davis (1989); Weersink e Fulton (2020)
Pontos fortes	Capturar o comportamento real, medição variáveis, comparação resultados	Análise mais profunda, considerar pressão social	Análise mais profunda, pressão social, identificar barreiras, compreensão mais completa e específica do comportamento	Modelos simples, teoria aplicável em muitas situações	Armitage e Conner (2001); Borges; Oude Lansink e Emvalomatis (2019); Mathieson (1991); Taylor e Todd (1995)
Pontos fracos	Algumas variáveis sem base teórica, variáveis com efeito insignificante na adoção	Medição intenção em vez comportamento observado, comportamento sob controle voluntário, não explicitar outros fatores explicativos, correlações significativas, não detectar padrão claro, falta de consistência na mensuração dos construtos psicológicos	Medição intenção em vez comportamento observado, não explicitar outros fatores explicativos, correlações significativas, não detectar padrão claro, falta de consistência na mensuração dos construtos psicológicos, medidas das crenças para cada contexto	Ausência de variáveis sociais, de influência de outras pessoas, de habilidade percebida e controle	Armitage e Conner (2001); Borges; Oude Lansink e Emvalomatis (2019); Mathieson (1991); Taylor e Todd (1995)

Continua...

Conclusão.

Características	UM	TRA	TPB	TAM	Referências
Ex-ante/ Ex-post	Ex-ante, ex-post	Ex-ante, ex-post	Ex-ante, ex-post	Ex-ante, ex-post	Carrer; Souza Filho e Batalha (2017); Pierpaoli et al. (2013); Reichardt et al. (2009); Tey e Brindal (2012); Torbett et al. (2008)

Fonte: Autor

Como resultado da comparação das características das quatro teorias e de acordo com a sugestão de Pivoto (2018), que, para ampliar o entendimento dos fatores determinantes da adoção da AP na era 4.0, recomenda adotar a abordagem comportamental (BURTON, 2004; MORRIS; POTTER, 1995), contexto em que a TPB fornece uma estrutura conceitual (BURTON, 2004) sólida para estruturar a pesquisa, esse projeto de tese propõe de aplicar a TPB.

Essa escolha é justificada também pela atenção da TPB ao comportamento humano quando a pessoa tem controle parcial sobre o processo de tomada de decisões (BIANCHI; FIGUEIREDO, 2017), característica do contexto da adoção de AP em que o acesso às informações e às fontes de informações são barreiras para a adoção (BAGHERI; BORDBAR, 2014; GALIOTO; RAGGI; VIAGGI, 2017; REICHARDT; JURGENS, 2009; SILVA; MORAES; MOLIN, 2011; SOARES FILHO; CUNHA, 2015). Em muitos casos, novas tecnologias de AP são produzidas por meio do impulso do desenvolvedor, e não puxada do usuário. Ainda, geralmente há uma grande lacuna de conhecimento entre desenvolvedores e usuários, e não há esforço suficiente para preencher essa lacuna. Desenvolvedores e usuários têm expectativas que não sempre são convergentes: posicionamento, produto, preços e promoção para os desenvolvedores, enquanto protocolos, desempenho e percepção para os usuários (LAMB; FRAZIER; ADAMS, 2008). Os agricultores têm recursos limitados (tempo, dinheiro, informações) e são incapazes de determinar imediatamente quais tecnologias oferecem vantagem relativa. Quanto mais forte e mais profunda for a rede do agricultor, maior será o acesso às informações sobre as inovações aplicáveis e maior será a receptividade do agricultor (WEERSINK; FULTON, 2020).

Ainda, os estudos baseados na TPB analisam os comportamentos do agricultor de uma forma mais profunda e completa do que os modelos baseados nas outras teorias, graças à inclusão dos construtos SN e PBC (ARMITAGE; CONNER, 2001; BORGES; OUDE

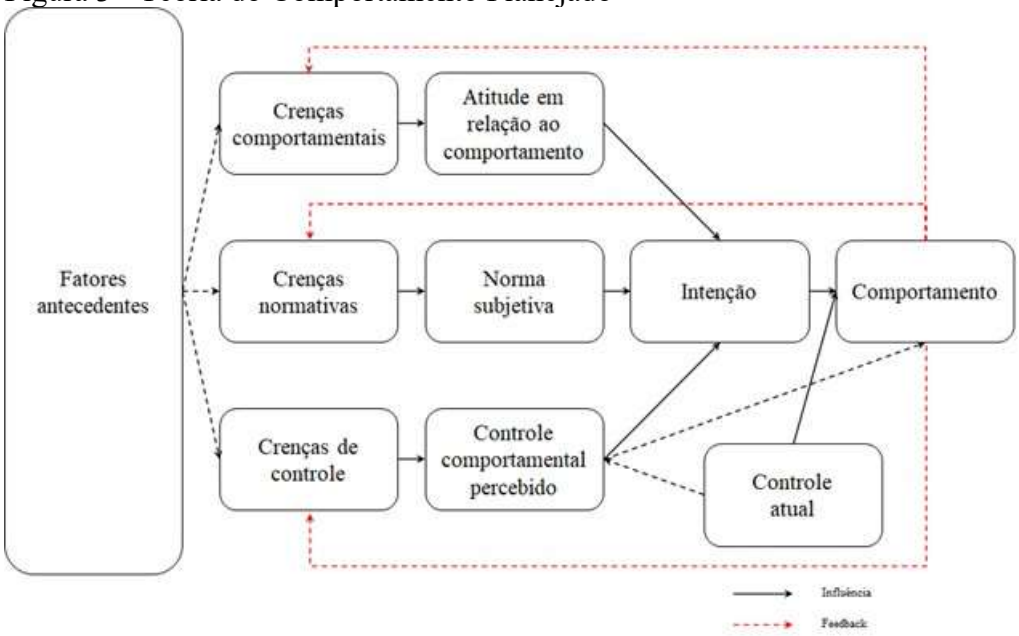
LANSINK; EMVALOMATIS, 2019). Os modelos devem ser avaliados também em termos de parcimônia e de sua contribuição para o conhecimento. Para aplicações preditivas, a parcimônia pode ser mais ponderada. Ao tentar obter a compreensão mais completa de um fenômeno, um certo grau de parcimônia pode ser sacrificado (TAYLOR; TODD, 1995).

3.4.2 Teoria do Comportamento Planejado

A Teoria do Comportamento Planejado (*Theory of Planned Behavior* - TPB) (AJZEN, 1991) é uma estrutura bem conhecida e frequentemente aplicada para prever e explicar o comportamento humano em contextos específicos (SOK et al., 2020). A TPB é amplamente utilizada em muitos campos de pesquisa para explicar comportamentos que vão desde fazer uma dieta, a excesso de velocidade, passando pela adoção de novas técnicas e práticas agrícolas (AJZEN, 2021a). A TPB é aplicada para estudar o comportamento do agricultor em diferentes contextos, como a adoção de tecnologia de economia de água (LYNNE et al., 1995), as decisões de usar ou não usar as previsões do tempo e do clima (HU et al., 2006), a adoção de medidas de economia de água para irrigação (PINO et al., 2017), a adoção de tecnologia de fertilizantes verdes (ADNAN et al., 2017), a aceitação e uso de sistemas de rastreabilidade em cadeias de abastecimento agroalimentares (PAPPA; ILIOPOULOS; MASSOURAS, 2018), a mudança da irrigação tradicional para a pressurizada (LANZA CASTILLO; ENGLER; WOLLNI, 2021).

Na TPB, ilustrada na Figura 3, as intenções para realizar comportamentos podem ser previstas da Atitude em relação ao comportamento (*Attitude* - AC, grau em que uma pessoa tem uma avaliação favorável ou desfavorável do comportamento), Norma Subjetiva (*Subjective Norm* - SN, pressão social percebida para executar ou não executar o comportamento) e Controle Comportamental Percebido (*Perceived Behavioral Control* - PBC, facilidade ou dificuldade de realizar o comportamento, que reflete a experiência passada, bem como impedimentos e obstáculos). Quanto mais favoráveis a AC e a SN, e quanto maior o PBC, mais forte deve ser a intenção de realizar o comportamento estudado (AJZEN, 1991).

Figura 3 - Teoria do Comportamento Planejado



Fonte: Autor
Nota: Elaborado com base em Ajzen (1991) e Fishbein e Ajzen (2010)

A intenção, que é uma indicação da prontidão de uma pessoa para realizar um comportamento, pode encontrar expressão em afirmações como as seguintes: "*Vou me envolver no comportamento*", "*Tenho a intenção de me envolver no comportamento*", "*Espero me envolver no comportamento*", "*Eu pretendo me envolver no comportamento*", "*Vou tentar me envolver no comportamento*" (FISHBEIN; AJZEN, 2010).

AC, SN e PBC são relacionados à conjuntos apropriados de crenças comportamentais, normativas e de controle sobre o comportamento (AJZEN, 1991). As crenças representam as informações que as pessoas têm sobre um comportamento, suas prováveis consequências, as expectativas normativas de outras pessoas e os prováveis impedimentos ao seu desempenho. Ao medir essas crenças, o pesquisador ganha intuições sobre a base cognitiva subjacente, ou seja, pode explorar por que as pessoas mantêm certas atitudes, normas subjetivas e percepções de controle comportamental (AJZEN, 2006).

Para executar um determinado comportamento, a pessoa acredita que as vantagens (benefícios, resultados positivos esperados) superam as desvantagens (custos, resultados negativos previstos). Em outras palavras, a pessoa tem uma atitude positiva em relação ao desempenho do comportamento (FISHBEIN; AJZEN, 2010). Além disso, os recursos e oportunidades disponíveis para uma pessoa devem, até certo ponto, ditar a probabilidade de realização do comportamento. Quanto mais recursos e oportunidades os indivíduos acreditam possuir, e quanto menos obstáculos ou impedimentos anteciparem, maior será o controle

percebido sobre o comportamento (AJZEN, 1991). Na maioria das investigações empíricas, no entanto, é difícil ou impossível determinar quanto controle uma pessoa realmente tem sobre o desempenho de um comportamento, portanto, o PBC é usado como uma aproximação para o controle real (AJZEN, 2006; SOK et al., 2020).

A representação gráfica da teoria ilustrada na Figura 3 inclui também possíveis efeitos de feedback do comportamento nas variáveis antecedentes (AJZEN, 1991). Quando um comportamento é realizado, pode resultar em consequências inesperadas positivas ou negativas, pode provocar reações favoráveis ou desfavoráveis de outras pessoas e pode revelar dificuldades imprevistas ou fatores facilitadores. Esse feedback provavelmente mudará as crenças comportamentais, normativas e de controle da pessoa e, assim, afetará as futuras intenções e ações (FISHBEIN; AJZEN, 2010).

Na pesquisa com a TPB é importante definir claramente o comportamento em estudo em termos de alvo para o qual é dirigido, ação realizada, contexto em que ocorre e período de tempo relevante. Ainda, se a pesquisa pretende explorar as crenças mais influentes por trás de AC, SN e PBC, é necessário conduzir um estudo piloto para construir os itens das crenças de comportamento, normativas e de controle (FISHBEIN; AJZEN, 2010; SOK et al., 2020).

A TPB está aberta à inclusão de preditores adicionais se puder ser mostrado que eles capturam uma proporção significativa da variância na intenção ou comportamento, depois que as variáveis atuais da teoria foram levadas em consideração. A TPB expande a TRA original ao adicionar o PBC (AJZEN, 1991; AJZEN; FISHBEIN, 1975). No entanto, por uma questão de parcimônia, preditores adicionais devem ser propostos e adicionados à teoria com cautela, e somente após cuidadosa deliberação e exploração empírica (FISHBEIN; AJZEN, 2010).

Além disso, a TPB está aberta à inclusão de fatores antecedentes (*background factors*) (SOK et al., 2020), como idade, gênero, educação, experiência. A TPB reconhece a importância potencial de tais fatores que podem influenciar as crenças que as pessoas têm. Se uma determinada crença é ou não afetada por um fator antecedente é uma questão empírica (FISHBEIN; AJZEN, 2010). Na medida em que se descobre que um fator antecedente influencia o comportamento, assume-se que o faz indiretamente por seus efeitos nas crenças comportamentais, normativas e/ ou de controle. Os fatores antecedentes também podem moderar as relações entre os construtos da teoria (SOK et al., 2020).

Os métodos de pesquisa padrão desenvolvidos ao longo dos anos para o uso da TPB são amplamente de natureza quantitativa. Ainda, a TPB pode ser usada como uma estrutura para orientar as questões a ser levantadas na pesquisa qualitativa (AJZEN, 2021b). Além disso, as

crenças identificadas em um estudo qualitativo podem ser relevantes para pesquisas futuras usando instrumentos quantitativos, como questionários em larga escala (HOME et al., 2014).

Os seguintes trabalhos são exemplos de aplicação da TPB com métodos qualitativos na literatura agrícola: identificação do que motiva ou impede os agricultores de se envolverem na conservação da natureza em suas empresas agrícolas (HOME et al., 2014); análise dos sistemas de crenças ambientais dos agricultores orgânicos e convencionais (KINGS; ILBERY, 2010); estudo das características que tornam práticas de gestão agrícola aceitáveis para os produtores agrícolas (REIMER; WEINKAUF; PROKOPY, 2012); avaliação dos fundamentos para a realização de agricultura de baixo insumo, colocando decisões para converter para a agricultura orgânica (SUTHERLAND, 2011); aumento da compreensão das atitudes ambientais dos agricultores e das conexões com o comportamento de conservação (REIMER; WEINKAUF; PROKOPY, 2012); revisão da discussão das atitudes do agricultor e da participação na programação ambiental (SUTHERLAND, 2010); estudo das informações sobre a adoção de lavouras de conservação (BIJTTEBIER et al., 2018); exploração das influências na tomada de decisões do agricultor em relação às práticas de gestão ambiental duráveis (MILLS et al., 2017).

Embora a TPB seja uma teoria amplamente aplicada em vários contextos de pesquisa, também recebeu algumas críticas ao longo dos anos. Modelos de tomada de decisão comportamental, como a TRA e TPB, tendem a se basear em autorrelatos, apesar das evidências sugerirem a vulnerabilidade de tais dados à vieses de auto apresentação. Contudo, este não é um problema específico dessas teorias, mas fornece uma indicação do debate mais amplo dentro da psicologia social (ARMITAGE; CONNER, 2001).

Ajzen (1991) argumenta que os construtos PBC e autoeficácia são intercambiáveis. No entanto, vários autores sugerem que autoeficácia e PBC não são totalmente sinônimos: a autoeficácia está mais preocupada com as percepções cognitivas de controle com base em fatores de controle interno, enquanto a PBC também reflete fatores externos mais gerais (ARMITAGE; CONNER, 2001). Fishbein e Ajzen (2010) apontam que se os recursos e obstáculos são internos ou externos à pessoa é irrelevante. O referencial teórico da TPB se preocupa apenas com a extensão em que se acredita que os fatores de controle estejam presentes e sejam percebidos como facilitadores ou impeditivos do desempenho do comportamento.

Críticas importantes foram levantadas dentro da comunidade de saúde, em que a TPB tem sido a abordagem teórica dominante para orientar a pesquisa sobre comportamento nas últimas três décadas. Como resultado foi afirmado que "*Três décadas depois, a TPB perdeu sua utilidade ..... e deveria poder desfrutar de sua merecida aposentadoria*" (SNIEHOTTA; PRESSEAU; ARAÚJO-SOARES, 2014). Em resposta, em vez de aposentar a TPB, existe um

bom motivo para capitalizar sobre as contribuições que ela fez e continua a fazer, e para considerar as maneiras pelas quais ela pode ser estendida de forma útil. Além disso, um dos grandes pontos fortes da TPB tem sido sua capacidade de prever uma grande variedade de comportamentos em diferentes populações usando apenas quatro construtos (CONNER, 2014).

Quanto à agricultura, a simplicidade torna a TPB fácil de entender e útil para explicar os padrões de comportamento atuais, mas limita sua utilidade para conceituar mudanças de comportamento das pessoas (SUTHERLAND, 2010). A TPB pode fornecer diretrizes gerais, mas não diz que tipo de intervenção será mais eficaz (AJZEN, 2006). Além disso, um questionamento sobre auto apresentação e autorrelato é levantado. A TPB se baseia nas percepções - o que os entrevistados acreditam ser verdade sobre um comportamento específico - mas não avalia a precisão dessas crenças (SUTHERLAND, 2011). Contudo, essa questão é presente na literatura sobre a adoção de AP e não é criticada na relativa comunidade cientifica (BERNARDI; INAMASU, 2014; GARDEZI; BRONSON, 2019; KHANAL et al., 2019; TAMIRAT; PEDERSEN; LIND, 2018; TEY; BRINDAL, 2012). A ênfase na percepção é característica de todos os três construtos (AC, SN e PBC), consistente com uma perspectiva geral que não conceitua os indivíduos como atores racionais, capazes de avaliar com precisão as probabilidades e os benefícios das decisões que tomam (SUTHERLAND, 2010).

Este projeto de tese incorpora essas críticas, também a seguir de uma recente revisão sistemática da literatura publicada por Sok et al. (2020) sobre o comportamento do agricultor. Essa revisão evidencia alguns erros metodológicos cometidos por alguns pesquisadores na aplicação da TPB, como não conseguir conceituar e avaliar os construtos teóricos de acordo com os princípios e diretrizes estabelecidas. Esse projeto propõe de utilizar a TPB como uma estrutura para orientar as questões a ser levantadas em uma pesquisa qualitativa (AJZEN, 2021b). Os fatores resultantes desse projeto podem ser relevantes para pesquisas futuras usando instrumentos quantitativos, como questionários em larga escala (HOME et al., 2014).

3.4.3 Fatores que afetam a adoção de inovações na agricultura

A Teoria do Comportamento Planejado tem o potencial de criar as ligações conceituais entre as crenças e o comportamento de um futuro adotante de tecnologias de AP. No processo de adoção várias etapas são realizadas, como a formação de uma atitude negativa ou positiva em relação à tecnologia, a intenção de aceitar ou rejeitar a tecnologia e aceitar ou rejeitar a tecnologia. Portanto, a TPB pode oferecer uma visão importante sobre a compreensão da

adoção de tecnologias de AP como um processo potencial pelo qual a atitude e as crenças sobre a tecnologia podem sustentar o comportamento (PATHAK; BROWN; BEST, 2019).

A atitude nos estudos rurais é um fator central em relação à compreensão da adoção do agricultor. A atitude é definida como uma resposta positiva ou negativa em relação à um objeto-atitude, que pode ser uma pessoa, ideia, objeto físico. As atitudes são formadas pela percepção do indivíduo sobre o objeto-atitude. Essa percepção pode ser baseada em informações, conhecimento ou uma reação emocional (WILLOCK et al., 1999). Nesses estudos a adoção pode ser estabelecida com sucesso se o agricultor identificar benefícios claros e ver praticabilidade. O agricultor é fundamental para o sucesso das inovações, principalmente durante o processo de adoção (BUSSE et al., 2014). Para entender melhor as decisões de adoção dos agricultores é importante primeiro entender suas percepções sobre os benefícios (THOMPSON et al., 2019). A tecnologia pode ser abandonada se o produtor perceber que os benefícios produzidos pela tecnologia são menores do que o custo associado ao uso. Por outro lado, é possível que outras tecnologias sejam abandonadas em favor de tecnologias mais novas e/ ou mais eficientes (WALTON et al., 2010). Também o PBC pode desempenhar um papel importante na ação do agricultor (BURTON, 2004).

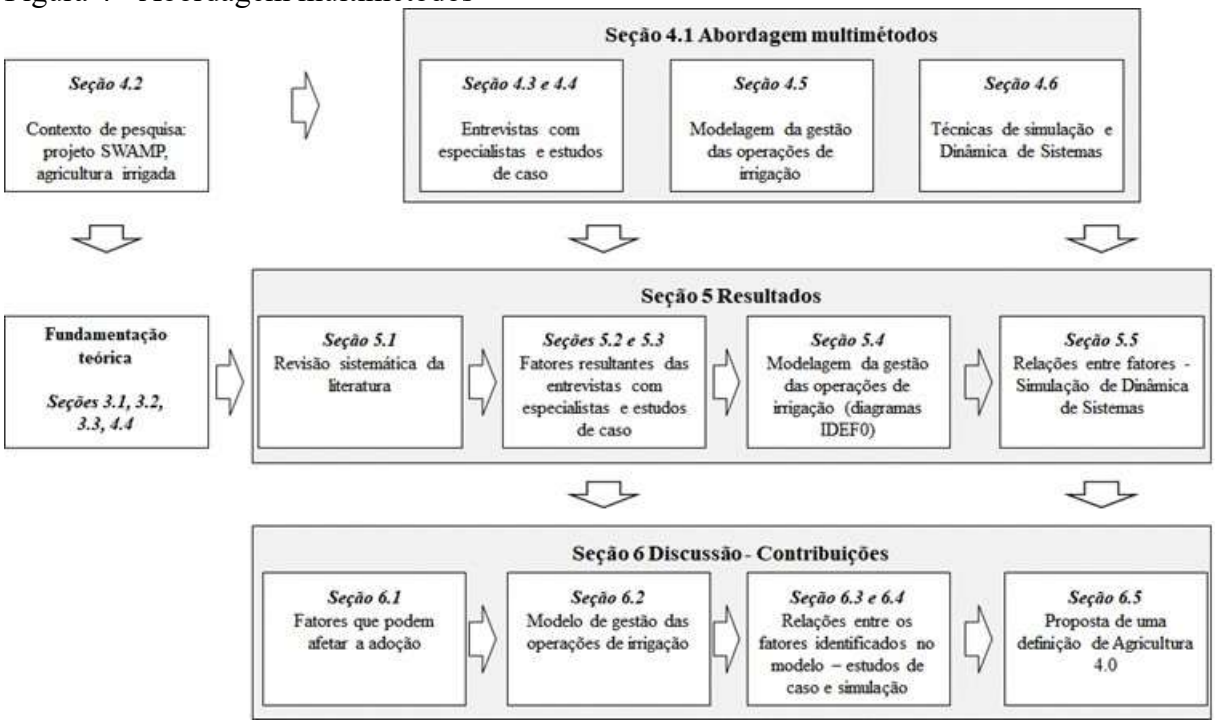
Outros fatores específicos para o domínio agrícola são as características do agricultor e da empresa agrícola, as fontes de informações, os eventos facilitadores e os eventos de impedimento/ barreiras (HUH; LALL, 2013; LANZA CASTILLO; ENGLER; WOLLNI, 2021; PINO et al., 2017; REICHARDT et al., 2009; SUTHERLAND, 2011). Além disso, muitas crenças e valores individuais podem sustentar uma atitude, como o valor que o indivíduo atribui à agricultura, por exemplo agricultura como forma de vida ou como negócio (WILLOCK et al., 1999), agricultura vista como um meio de obtenção de renda e segurança (GASSON, 1973).

Portanto, esse trabalho incorpora as sugestões de Sok et al. (2020) e também as observações resultantes da literatura em relação à aplicação de métodos qualitativos no caso de aplicação da TPB. Ainda, esse projeto de tese propõe de considerar na investigação empírica os fatores que afetam a adoção de inovações na agricultura mencionados nessa seção, para ampliar a compreensão dos fatores determinantes da adoção da AP na era 4.0 (PIVOTO, 2018).

4 METODOLOGIA

Esta seção apresenta a abordagem multimétodos adotada neste estudo, consistindo em revisão sistemática da literatura, entrevistas com especialistas, estudos de caso, modelagem de gestão das operações de irrigação e simulação. O fluxograma da abordagem multimétodos é ilustrado na Figura 4, que apresenta as etapas realizadas nesta abordagem.

Figura 4 - Abordagem multimétodos



Fonte: Autor

4.1 ABORDAGEM MULTIMÉTODOS

Na literatura existem muitos métodos de pesquisa: estudo de caso, experimento de campo, simulação, levantamento e entrevistas são alguns exemplos (FILIPPINI, 1997; MEREDITH; KAPLAN; RATURI, 1989; YIN, 2001). Além disso, um projeto de pesquisa pode ser classificado de acordo com várias dimensões: o objetivo de pesquisa (como exploração, descrição, avaliação, geração de hipóteses, teste de hipóteses), a abordagem adotada para gerar conhecimento (indutiva, dedutiva), a natureza das unidades de análise (por exemplo indivíduos, grupos, processos), a técnica usada para coletar os dados (como modelo, literatura, levantamento, observação, entrevista, experimento), as técnicas usadas para analisar os dados (por exemplo estatística, análise de protocolo, taxonomia) (MEREDITH; KAPLAN;

RATURI, 1989), a tipologia de dados (qualitativos, quantitativos) e o tempo da coleta de dados (simultâneo, sequencial) (CRESWELL, J. W.; CRESWELL, J. D., 2014).

Além dos métodos de pesquisa quantitativos e qualitativos, na literatura existe uma terceira abordagem: métodos mistos (JOHNSON et al., 2007). Essa abordagem, que é relativamente recente nas ciências sociais e humanas como método de pesquisa distinto, envolve a coleta de dados qualitativos e quantitativos e inclui a análise de ambas as formas de dados, integrando as duas formas. A escolha da sequência das etapas qualitativa e quantitativa depende da estratégia de pesquisa e da receptividade do público para o estudo (CRESWELL, J. W.; CRESWELL, J. D., 2014). Esta decisão depende também da comunidade acadêmica envolvida: tradicionalmente, há uma forte diferença entre os métodos aplicados nas ciências naturais e aqueles nas ciências sociais e humanas. As ciências naturais tendem a aplicar métodos quantitativos, enquanto as ciências sociais, especialmente psicologia, geografia humana e sociologia, são mais orientadas qualitativamente (STRIJKER; BOSWORTH; BOUTER, 2020).

O pressuposto central desta forma de investigação é que a combinação dos métodos qualitativos e quantitativos fornece uma compreensão mais completa de um problema de pesquisa (CRESWELL, J. W.; CRESWELL, J. D., 2014) e pode oferecer um potencial ainda maior para aprimorar novas teorias do que qualquer um dos métodos separadamente (MEREDITH, 1998). No entanto, o pesquisador precisa considerar as vantagens e desvantagens dessa abordagem. Combinar uma série de observações sobre métodos mistos pode ser descrito como abordar uma pergunta de pesquisa de qualquer ângulo relevante (STRIJKER; BOSWORTH; BOUTER, 2020). Um método misto pode aumentar a amplitude e profundidade dos resultados da pesquisa. O pesquisador pode tirar vantagem da abertura e flexibilidade oferecidas pelo método misto. O uso de abordagens qualitativas pode beneficiar os resultados ao lançar luz sobre o impacto de variáveis que às vezes faltam, por exemplos, em bancos de dados institucionais (AKIMOWICZ et al., 2018). Quanto as desvantagens, esse método exige mais trabalho (STRIJKER; BOSWORTH; BOUTER, 2020) e requer um pesquisador bem treinado em ambos os métodos (MEREDITH, 1998). Porém, a percepção da dualidade da pesquisa qualitativa e quantitativa pode ser reconciliada focalizando o que funciona para responder às perguntas de pesquisa. As análises conduzidas em pesquisas qualitativas geralmente carecem de generalização estatística, mas permitem a formulação de novos pressupostos de trabalho (AKIMOWICZ et al., 2018).

Considerando a possibilidade de abordagens qualitativas, quantitativas ou de métodos mistos, os fatores que afetam a escolha de uma abordagem em relação a outra são: a visão do mundo do pesquisador, o problema de pesquisa, as experiências pessoais do pesquisador e o

público-alvo dos resultados da pesquisa, oportunidade de acesso à dados quantitativos e qualitativos (CRESWELL, J. W.; CRESWELL, J. D., 2014).

No caso de natureza exploratória da pergunta de pesquisa, a escolha do estudo exploratório qualitativo permite desenvolver ideias que podem ser testadas com algum método quantitativo. O papel da pesquisa exploratória, que depende mais fortemente de técnicas qualitativas, é identificar ou refinar problemas de pesquisa, o que pode ajudar a formular e testar estruturas conceituais (HAIR; PAGE; BRUNSVELD, 2016).

Portanto, considerando a incipiente base teórica sobre a Agricultura 4.0 e a natureza exploratória das perguntas de pesquisa, neste trabalho é adotada uma abordagem exploratória multimétodos, composta por revisão sistemática da literatura, entrevistas com especialistas, estudos de caso, modelagem da gestão das operações de irrigação e simulação (BARRATT; KULL; SODERO, 2018; HAIR; PAGE; BRUNSVELD, 2016; VENKATESWARAN; SON, 2005). Um método misto é proposto para coletar dados qualitativos e quantitativos a fim de identificar os fatores determinantes da adoção pesquisada, formalizar e estudar as relações entre esses fatores, de acordo com Creswell, J. W. e Creswell, J. D. (2014) e Johnson et al. (2007). A abordagem de métodos mistos proposta é útil uma vez que, o método quantitativo ou qualitativo separadamente é inadequado para melhor compreender o problema de pesquisa e os pontos fortes da pesquisa quantitativa e qualitativa podem fornecer um melhor entendimento. A abordagem proposta é sequencial exploratória, em que o pesquisador começa com uma fase de pesquisa qualitativa explorando dados e com análises qualitativas e, em seguida, usa os resultados em uma segunda fase quantitativa (CRESWELL, J. W.; CRESWELL, J. D., 2014). Desta forma, múltiplas perspectivas são combinadas para permitir a triangulação dos resultados de cada método e para fornecer uma compreensão mais completa e mais profunda do tema pesquisado (JOHNSON et al., 2007). A triangulação significa que o pesquisador têm diferentes perspectivas sobre o assunto em estudo, que podem ser fundamentadas na utilização de diversos métodos e combinando diferentes tipos de dados (FLICK, 2009).

A metodologia proposta combina uma abordagem indutiva com uma dedutiva. A primeira fase qualitativa é orientada para a descoberta, com o pesquisador usando os dados coletados para gerar ideias e hipóteses, ou construir uma estrutura conceitual. Enquanto a segunda fase quantitativa se concentra em testar hipóteses com base o raciocínio dedutivo (HAIR; PAGE; BRUNSVELD, 2016).

As principais características de cada método que compõe a abordagem exploratória multimétodos são descritas a seguir.

O objetivo de conduzir uma revisão sistemática da literatura é permitir ao pesquisador mapear e avaliar o território intelectual existente e especificar uma pergunta de pesquisa para desenvolver ainda mais o corpo do conhecimento existente. Um processo de revisão mais sistemático pode ajudar a justificar a pergunta de pesquisa final que é colocada no estudo (TRANFIELD; DENYER; SMART, 2003). A revisão sistemática é conduzida de forma estruturada, transparente e reproduzível (SANTOS; D'ANTONE, 2014). A revisão atende também aos seguintes propósitos: distinguir o que foi feito do que precisa ser feito, descobrir os fatores relevantes para o tema em estudo, aprimorar e adquirir o vocabulário do assunto, identificar as principais metodologias e técnicas de pesquisa utilizadas (HART, 1998).

Entrevistas semiestruturadas com especialistas (FLICK, 2009) e estudos de caso (EISENHARDT, 1989; VOSS; TSIKRIKTSIS; FROHLICH, 2002) em um piloto do projeto SWAMP e em uma empresa agrícola localizada no Estado de Bahia são conduzidos para propor um modelo de gestão das operações de irrigação, desenvolvido com a técnica de modelagem IDEF0 (KUSIAK; NICK LARSON; WANG, 1994; VENKATESWARAN; SON, 2005) e para construir um modelo de simulação da Dinâmica de Sistemas (ALBIN, 1997; STERMAN, 2000). O modelo de gestão das operações é estrutural, enfatizando a organização do sistema em estudo, enquanto o modelo de simulação é comportamental, enfatizando a dinâmica do sistema (BOOCH; RUMBAUGH; JACOBSON, 2000). O objetivo desta abordagem é induzir intuições nascentes da investigação empírica, que podem fornecer uma base sólida para formular suposições realistas na modelagem da simulação na gestão das operações (FLYNN et al., 1990), para explorar e entender melhor o fenômeno emergente e contemporâneo da Agricultura 4.0 em seus ambientes naturais e desenvolver teoria (BENBASAT, 1987; EISENHARDT, 1989; VOSS; TSIKRIKTSIS; FROHLICH, 2002; YIN, 2001).

Entrevistas com especialistas e estudos de caso são especialmente úteis quando o pesquisador não conhece as variáveis importantes a examinar (CRESWELL, J. W.; CRESWELL, J. D., 2014), para novas áreas de pesquisa ou áreas para as quais a teoria existente parece inadequada (EISENHARDT, 1989). Ainda, o pesquisador espera que os especialistas estejam mais sintonizados com as tendências atuais e forneçam informações representativas do tema em estudo (KUTTER et al., 2011).

Quanto à simulação, a simulação é uma ferramenta de apoio às decisões bem conhecida, que se mostra útil na tomada de decisões no agronegócio (LOWE; PRECKEL, 2004). No caso, por exemplo, da adoção de um sistema de irrigação à taxa variável de irrigação, dado que os benefícios são difíceis de quantificar em termos financeiros, o custos de capital é alto e a

complexidade de gestão do sistema é grande (O'SHAUGHNESSY et al., 2019), a simulação é muito útil para suportar a tomada de decisões do agricultor.

4.2 CONTEXTO DE PESQUISA: PROJETO SWAMP, MERCADO DE PRODUÇÃO AGROPECUÁRIO E AGRICULTURA IRRIGADA NO BRASIL

Nessa seção é descrito o projeto SWAMP, do qual este trabalho faz parte. Ainda as principais características do mercado de produção agropecuário e da agricultura irrigada no Brasil são apresentadas. Considerado que esse trabalho propõe de realizar dois estudos de caso no piloto MATOPIBA do projeto SWAMP e em uma empresa agrícola localizada no Estado de Bahia, que podem ser classificadas como empresa agrícola industrial, nessa seção os principais números dos estabelecimentos agropecuários no Brasil são relatados.

4.2.1 Projeto SWAMP

Esta pesquisa é desenvolvida no âmbito do projeto SWAMP (*Smart Water Management Platform*) que é o resultado de uma parceria entre pesquisadores brasileiros e europeus e que pretende levar o conceito de IoT para a irrigação de precisão (KAMIENSKI et al., 2019). Os principias objetivos são: desenvolver métodos e abordagens baseadas em IoT para o gerenciamento inteligente de água; gerar pilotos das abordagens estudadas. Os objetivos incluem vários subobjetivos, entre os quais os seguintes são de interesse para este trabalho: reduzir o uso de água ao desenvolver sistemas de irrigação que otimizem o uso de água com base na necessidade agrícola, na quantidade disponível de água e nas expectativas futuras de crescimento; desenvolver uma plataforma flexível e fácil de usar que forneça informações agregadas e específicas aos agricultores para um uso eficiente da água; disseminar os resultados. Isso inclui o desenvolvimento de novos modelos de negócios para o uso da IoT na gestão inteligente da água (SMART WATER MANAGEMENT PLATFORM, 2017).

No projeto SWAMP quatro locais-piloto com diferentes tipos de culturas e técnicas de irrigação são operativos: o primeiro na região de MATOPIBA (que compreende os Estados do Maranhão, Tocantins, Piauí e Bahia), em que a irrigação é realizada por meio de pivô central, os tipos de culturas são soja, milho e algodão; o segundo piloto é localizado na Vinícola Guaspari, em Espírito Santo Pinhal (SP), com técnica de irrigação por gotejamento no cultivo de uva; o terceiro piloto, Consorzio di Bonifica Emilia Centrale (CBEC), é localizado na Itália e inclui a distribuição de água e a irrigação por gotejamento nos cultivos de uva, pera, maçã,

soja e milho; o quarto piloto, localizado na Espanha, envolve a irrigação de superfície nos cultivos de alface, chicória, espinafre, ervas e folhas de bebê (TORRE NETO et al., 2018). Os objetivos dos pilotos incluem a validação do modelo de negócios e abordagens para a sustentabilidade e replicabilidade das soluções desenvolvidas para diferentes localizações e contextos. O resultado esperado é tanto um aumento na confiabilidade da solução quanto na redução de custos com base em maior produtividade e menor uso de energia e água (SMART WATER MANAGEMENT PLATFORM, 2017).

Em linha com os objetivos de disseminar os resultados do projeto SWAMP e de replicar as soluções desenvolvidas para diferentes localizações e contextos, este projeto propõe a inclusão do estudo de uma empresa agrícola industrial localizada no Estado de Bahia. A possibilidade de realizar entrevistas e coletar dados, quantitativos e qualitativos, em duas empresas agrícolas possibilita também uma análise comparativa dos fatores que afetam a adoção da AP em contextos diferentes.

4.2.2 Mercado de produção agropecuário no Brasil

Em 2017 no Brasil o número de estabelecimentos agropecuários (unidades de produção dedicada, total ou parcialmente, à exploração agropecuária, florestal ou aquícola, independentemente de seu tamanho) resulta de 5,07 milhões. Cerca de 70% dos estabelecimentos têm área entre 1 e 50 hectares, com 7,2% de 100 a 500 hectares e 2% de 500 a 10.000 hectares. O número de pessoas ocupadas em atividades dos estabelecimentos agropecuários resulta de 15,1 milhões (INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA, 2017). O piloto MATOPIBA e a “Empresa agrícola Bahia” podem ser classificadas na última categoria de tamanho de área.

Quanto ao nível educacional, do total de produtores agropecuários, 15% declaram que nunca frequentaram escola, 14% frequentaram até o nível de alfabetização e 43%, no máximo, o nível fundamental. Do total que declara já ter cursado escola no máximo até o ensino fundamental, que totaliza 2,91 milhões de produtores, 1,93 milhões (66%) declaram não ter terminado o curso. 1,16 milhões produtores (23%) afirmam não saber ler e escrever (IBGE, 2017).

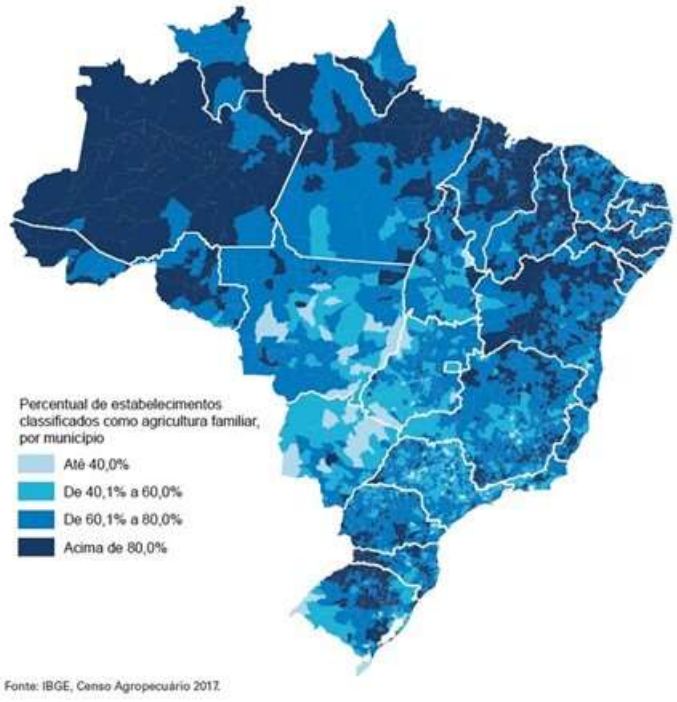
As principais lavouras em termos de produção são algodão herbáceo, soja, milho, arroz, cana-de-açúcar, feijão, café e laranja. O milho, cultura considerada nos cenários de simulação realizados na “Empresa agrícola Bahia”, é cultivado em 1,6 milhões de estabelecimentos, que

produziram 88 milhões de toneladas em 15,8 milhões de hectares. Analisando a última década, observa-se que a cultura teve grande incremento de produtividade (56%) (IBGE, 2017).

10% dos estabelecimentos do País usam técnicas de irrigação (por inundação, infiltração, aspersão ou semelhante). Considerando a área irrigada equipada para irrigação no Brasil, a distribuição por método empregado é a seguinte: 21% por inundação, 2,5% por superfície (sulcos e corrugação ou faixas), 21% por pivô central, 27% por outros métodos de aspersão, 24% por métodos localizados e 3,5% por outros métodos ou molhação (IBGE, 2017).

Em relação ao tamanho da empresa agrícola - empresa familiar ou industrial, a agricultura familiar tem dinâmica e características distintas da agricultura industrial. A percentual de estabelecimentos caracterizados como de agricultura familiar em relação ao total de estabelecimentos, por municípios, é ilustrada na Figura 5.

Figura 5 - Percentual de estabelecimentos caracterizados como de agricultura familiar



Fonte: IBGE, 2017, p. 101

Na agricultura familiar a gestão da propriedade é compartilhada pela família e a atividade produtiva agropecuária é a principal fonte geradora de renda. A agricultura familiar tem uma grande importância com relação ao número de estabelecimentos agropecuários, sendo que 77% são classificados como agricultura familiar (cerca de 3,9 milhões de estabelecimentos), e do pessoal ocupado, sendo que 67% são classificados como pessoal ocupado em agricultura familiar (cerca de 10,1 milhões de pessoas) (IBGE, 2017).

Ainda, os estabelecimentos classificados como agricultura familiar ocupam uma área de 81 milhões de hectares, ou seja, 23% da área total dos estabelecimentos agropecuários brasileiros. Enquanto, a agricultura familiar é responsável por 23% (igual a 107 bilhões de reais) de toda a produção agropecuária brasileira (IBGE, 2017).

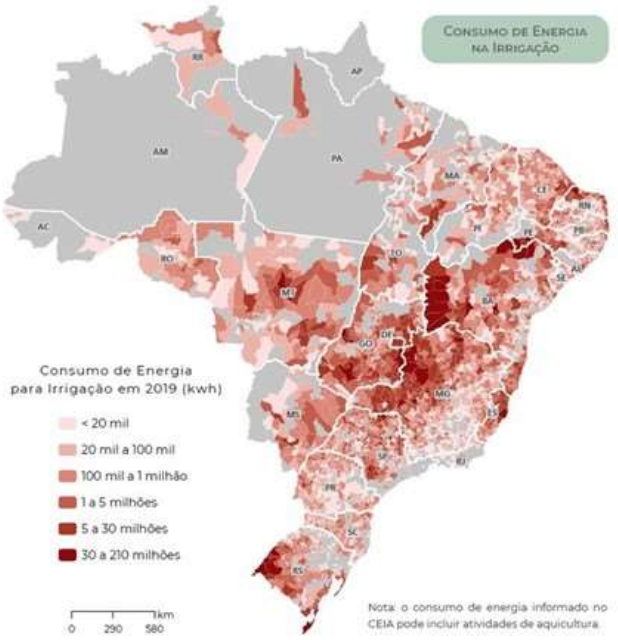
4.2.3 Agricultura irrigada no Brasil

O Brasil totaliza 8,2 milhões de hectares equipados para irrigação - 35,5% (2,9 Mha) com fertirrigação com água de reuso e 64,5% (5,3 Mha) com irrigação com água de mananciais. Considerando a distribuição das áreas irrigadas propriamente ditas (excluindo as fertirrigadas), o Brasil totaliza 5,3 milhões de hectares equipados para irrigação - o arroz ocupa 25% do total, a cana-de-açúcar 15%, o café 8%, as culturas anuais em pivôs centrais 27% e as demais culturas e sistemas 25%. Estima-se que entre 7 e 9% da produção da agricultura ocorra em áreas irrigadas, que agregam entre 13 e 15% do valor da produção pela possibilidade de realização de mais de uma safra no mesmo local e pela produção irrigada ter maior valor agregado. Em 2019, o valor da produção irrigada foi de R$ 55 bilhões - 16 produtos apresentaram valor anual superior a R$ 1 bilhão. No Brasil são identificados 28 Polos Nacionais, ou seja, áreas especiais de gestão dos recursos hídricos para a agricultura irrigada em escala nacional. Esses polos concentram 50% da área irrigada e 60% da demanda hídrica atual (ANA, 2021).

A maior parte da água captada para irrigação utiliza energia elétrica e a legislação atual garante ao irrigante, em atividade relacionada à agropecuária, desconto especial sobre a tarifa (tarifa verde), que varia de 60% a 90%, aplicado pelo período diário contínuo de oito horas e meia, aproveitando o período noturno de menor demanda sobre os sistemas de distribuição (ANA, 2021).

A Figura 6 ilustra o consumo de energia na irrigação no Brasil em 2019. Os métodos predominantes de irrigação nos municípios brasileiros são quatro: localizado (microaspersão ou gotejamento), superficial (sulcos ou inundação), aspersão por pivôs centrais e aspersão por outros sistemas. Os pivôs centrais irrigam grande diversidade de culturas, mas há uma concentração de sua utilização para a produção de feijão, milho, soja, algodão e, em menor proporção, trigo e batata (ANA, 2021). O Brasil possuía, em 2017, 23.181 pontos-pivô (FONTENELLE et al., 2019).

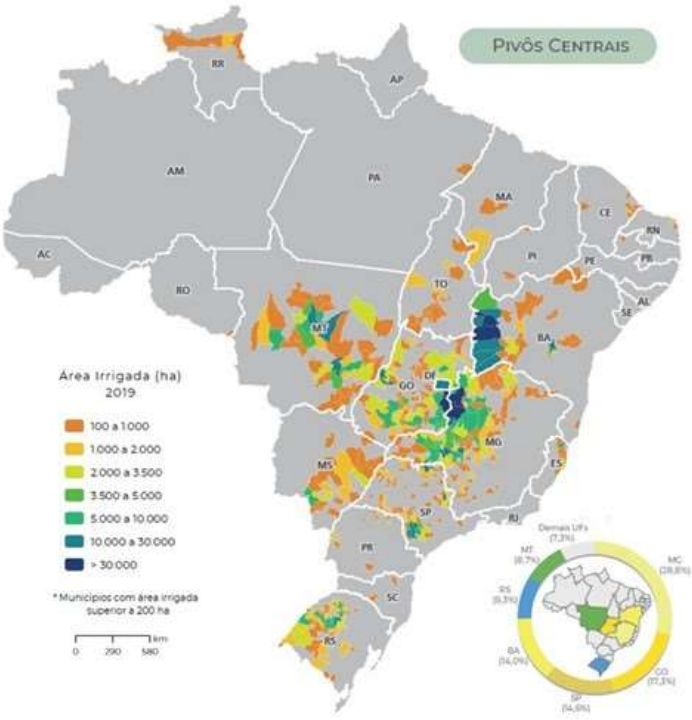
Figura 6 - Consumo de energia na irrigação no Brasil em 2019



Fonte: ANA, 2021, p. 22

A Figura 7 ilustra a área irrigada por pivôs centrais em 2019.

Figura 7 - Área irrigada por pivôs centrais no Brasil em 2019



Fonte: ANA, 2021, p. 42

São identificados 1,556 Mha irrigados por pivôs centrais, sendo 111,1 mil hectares em cana-de-açúcar (67,7 mil ha) ou café (43,4 mil ha). Assim, 1,445 Mha estão ocupados com culturas temporárias que variam intra e interanualmente. Ocorrem em polos bem delimitados, notadamente em Minas Gerais (28,8%), Goiás (17,3%), São Paulo (14,6%), Bahia (14,0%), Rio Grande do Sul (9,3%) e Mato Grosso (8,7%). A área atual é 50 vezes maior do que a área mapeada em 1985 e todos esses Estados apresentam crescimento expressivo no médio e curto prazo - Mato Grosso e Rio Grande do Sul crescem em ritmo superior aos demais, resultando no surgimento de polos nacionais de irrigação e na maior participação desses dois Estados no total nacional (7% em 2000, 11% em 2010 e 18% em 2019) (ANA, 2021).

Para a captação de água em mananciais superficiais ou subterrâneos, a regularização (outorga de direito de uso dos recursos hídricos e/ ou cadastro) é obrigatória junto aos órgãos gestores de recursos hídricos dos Estados e do Distrito Federal ou, em corpos hídricos de domínio da União, da ANA. A outorga corresponde a uma autorização para uso da água, seja para captação ou lançamento de efluentes, tendo como objetivo assegurar o controle quantitativo e qualitativo e o efetivo exercício dos direitos de acesso à água. Podem ser dispensados de outorga os usos de baixa expressão considerados insignificantes (captações pequenas), mas o cadastro junto ao respectivo órgão gestor segue obrigatório. Deve-se destacar ainda que a maior parte dos irrigantes capta água em mananciais gerenciados pelos Estados e o Distrito Federal (76% das interferências). Por outorgar em rios de maior porte, a ANA concentra 42% do volume das captações regularizadas, referente a 24% dos usuários (ANA, 2021).

4.3 ENTREVISTAS COM ESPECIALISTAS

A entrevista com especialista é um método de pesquisa qualitativa, projetado para explorar o conhecimento de especialistas. Na pesquisa científica, um indivíduo é considerado um especialista porque o pesquisador assume que ele ou ela possui um conhecimento, que ele ou ela pode não necessariamente possuir sozinho, mas que não é acessível a ninguém no campo em estudo. É esta vantagem do conhecimento que a entrevista com o especialista pretende descobrir. É o pesquisador que, de acordo com seu objetivo de pesquisa, decide quem vai entrevistar. Esta não é uma escolha arbitrária, mas é relacionada ao reconhecimento de um indivíduo como especialista em seu próprio campo de ação (MEUSER; NAGEL, 2009). Por exemplo, Kutter et al. (2011) escolhem especialistas por sua posição dentro de um ambiente de trabalho ligado à Agricultura de Precisão e sua vasta experiência no campo: funcionários de

empresas de tecnologia relacionada à AP, pesquisadores experientes, membros de equipe de sindicato, consultores agrícolas e agricultores praticantes de AP bem conhecidos.

Além de explorar o conhecimento, a entrevista com um especialista pode ser usada para fornecer orientação em um campo temático recente ou pouco claro, para aguçar a consciência do pesquisador sobre o problema estudado. As entrevistas exploratórias ajudam, nesse sentido, a estruturar o campo de pesquisa e a gerar hipóteses (BOGNER; LITTIG; MENZ, 2009).

Devido à natureza interdisciplinar deste projeto de tese, especialistas são selecionados pela sua expertise em gestão do agronegócio, agricultura de precisão, irrigação, gestão de recursos hídricos e gestão das operações.

O questionário utilizado nas entrevistas com especialistas, ilustrado no Apêndice C, é baseado nos preceitos da TPB (AJZEN, 1991) e focado na gestão das operações de irrigação (JUMMAN, 2016), incluindo perguntas sobre as vantagens e desafios relacionados à inspiração para a Industria 4.0, resumidos no Quadro 3. Uma ou mais perguntas são elaboradas para abordar cada elemento da teoria. O questionário inclui também quatro perguntas adicionais (RENZI; KLOBAS, 2008), a serem feitas em caso os relativos tópicos não se esgotarem nas respostas anteriores (GUEST; BUNCE; JOHNSON, 2006). Para reduzir o viés das respostas, e considerando a natureza exploratória da pesquisa, a definição de Agricultura 4.0 utilizada neste trabalho não é incluída no questionário e não é fornecida aos entrevistados (FLICK, 2009; PAULHUS, 1991).

Para estabelecer quantas entrevistas realizar, existem vários fatores que afetam o tamanho da amostra: heterogeneidade da população, orçamento e recursos disponíveis, escopo do estudo, natureza do assunto, experiencia do entrevistador, competência no tema escolhido, tempo, energia, disponibilidade de participantes. Esses fatores podem afetar como e quando o pesquisador sente que tem dados suficientes (MASON, 2010). Para decidir quantas entrevistas realizar e preparar um orçamento antes de entrar no campo, as amostras intencionais (nas quais os participantes são escolhidos de acordo com alguns critérios comuns) são a forma mais comumente usada de amostragem não probabilística. Seu tamanho, estabelecido indutivamente, normalmente depende do conceito de saturação teórica, ou o ponto em que nenhuma nova informação é observada nos dados. Embora a ideia de saturação seja útil no nível conceitual, ela fornece pouca orientação prática para estimar o número de entrevistas a realizar. Como alternativa, o pesquisador pode utilizar o conceito de saturação dos dados, como o ponto na coleta e análise de dados quando novas informações produzem pouca ou nenhuma mudança no livro dos códigos (GUEST; BUNCE; JOHNSON, 2006). Os códigos são os blocos de construção da teoria, ou de modelos, e a base sobre a qual repousam os argumentos do

pesquisador, de acordo com a pergunta de pesquisa. Os códigos adicionam informações ao texto (em vez de reduzi-lo) por meio de um processo de interpretação que simultaneamente divide o texto em pedaços significativos de segmentos. Os códigos funcionam como coordenadas em um mapa: quando aplicados ao texto, eles ligam as características do texto (por exemplo, palavras, frases, diálogo) às construções do pesquisador (MACQUEEN et al., 2008). Os códigos são rótulos que atribuem significado simbólico a "blocos" de dados de tamanhos variados (MILES; HUBERMAN, 1994).

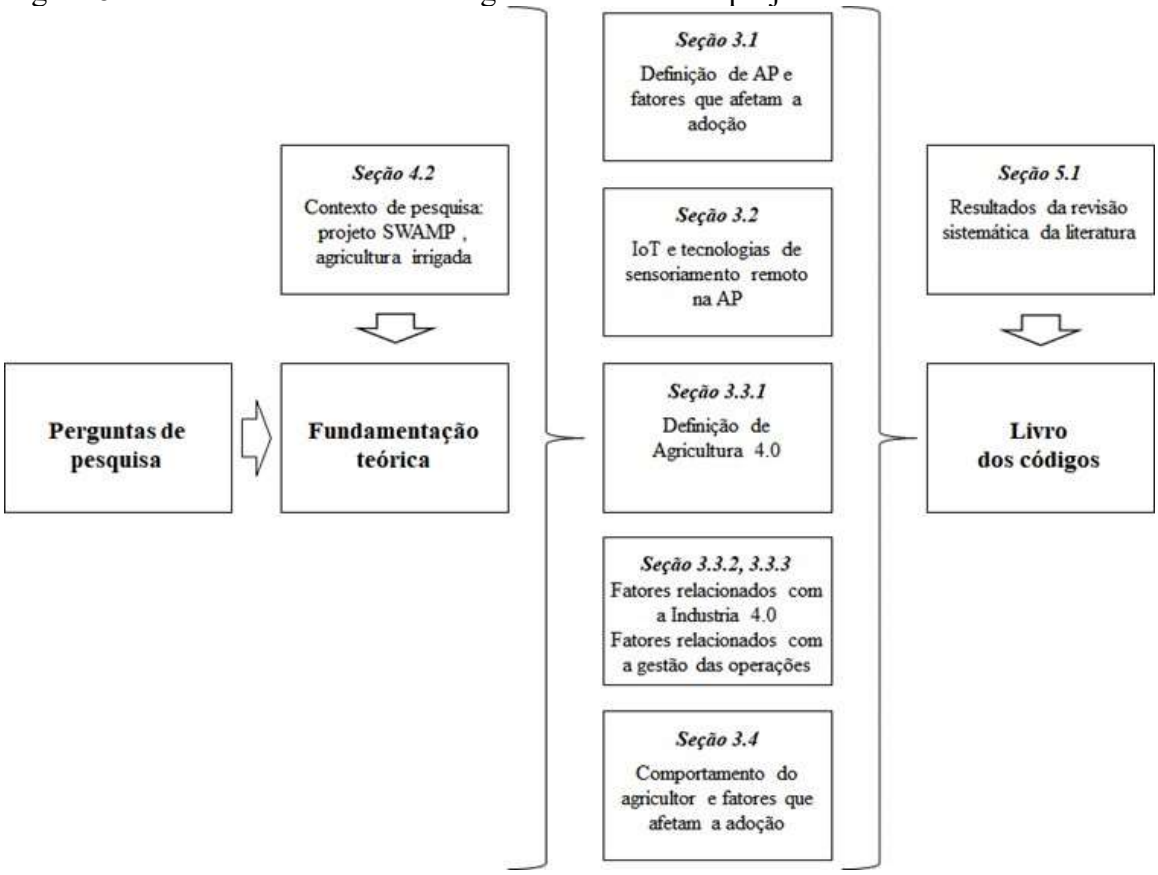
Uma amostra de referência é proposta por Guest, Bunce e Johnson (2006), que, com base numa pesquisa empírica, relatam ter atingido a saturação dos dados após doze entrevistas, na maior parte do número total dos códigos desenvolvidos. Contudo, os autores evidenciam que esse resultado depende da homogeneidade da população: quanto mais os participantes de uma amostra são semelhantes em suas experiências em relação ao domínio de pesquisa, mais rapidamente é esperado que a saturação seja alcançada.

Em relação à análise das entrevistas, na exploração do conhecimento especializado, o foco permanece no contexto dentro do qual o especialista se move. O contexto é levado em consideração a fim de avaliar o significado e a importância das declarações do especialista. Ainda, a atenção está voltada para trechos com tópicos semelhantes que estão espalhados nas entrevistas (“desconstrução” do conhecimento dos especialistas), e na comparação de passagens de diferentes entrevistas. O resultado é uma revisão dos textos e da terminologia dos entrevistados e a consequente criação de códigos com base no conhecimento teórico. Isso leva a uma “reconstrução” do conhecimento dos especialistas e a representação dos resultados empíricos enquadrados por uma perspectiva inspirada teoricamente. Esse processo é recursivo, enquanto muitas vezes se mostra necessário voltar a um estágio anterior para verificar a adequação das generalizações baseadas em dados empíricos (MEUSER; NAGEL, 2009).

De acordo com Guest, Bunce e Johnson (2006), a respeito da dificuldade de estimar o número de entrevistas a realizar especialmente para populações difíceis de alcançar, ou ocultas, como no caso de especialistas no contexto da Agricultura 4.0, nesse trabalho uma amostragem intencional é aplicada, com o objetivo de atingir a saturação dos dados em relação à códigos identificados dos dados coletados nas entrevistas. Ainda, no contexto desse trabalho os códigos (“desconstrução” do conhecimento dos especialistas) e a perspectiva inspirada teoricamente (“reconstrução” do conhecimento dos especialistas) são identificadas com base o conhecimento da literatura sobre AP, agricultura 4.0, IoT, comportamento do agricultor e gestão das operações.

A estrutura do livro dos códigos é composta por seis componentes: o código, sua definição, uma seção “quando usar” (fornece instâncias específicas em que o código deve ser aplicado), uma seção “quando não usar” (fornece casos em que o código pode ser considerado, mas não deve ser aplicado, muitas vezes porque outro código é mais apropriado), uma seção de "exemplo" de citações extraídas dos dados que são bons exemplos do código. O livro dos códigos funciona como um quadro ou limite que reflete as perguntas de pesquisa e que o pesquisador constrói para mapear sistematicamente o campo dos dados coletados (MACQUEEN et al., 2008). A estrutura do livro dos códigos, construída a partir das perguntas de pesquisa e do contexto de pesquisa, utilizada nesse projeto de tese é ilustrada na Figura 8.

Figura 8 - Estrutura do livro dos códigos utilizada nesse projeto de tese



Fonte: Autor

A estrutura compreende os fatores que podem afetar a adoção de AP no contexto da Agricultura 4.0, identificados com base na literatura de AP, IoT, Agricultura 4.0, Industria 4.0, gestão das operações e comportamento do agricultor, e também os resultados da revisão sistemática da literatura.

Quanto ao processo de codificação, três etapas são conduzidas: codificação estrutural, análise aprofundada, manutenção. A codificação estrutural consiste na identificação de todo o texto associado às perguntas de pesquisa e de grandes segmentos de texto que podem formar a base para uma análise aprofundada dentro ou entre tópicos. Na segunda etapa, o pesquisador usa os próprios termos dos entrevistados para orientar a construção de códigos e suas definições para uma análise aprofundada. Para facilitar a análise das respostas, os códigos são organizados em categorias homogêneas baseadas na literatura. Conforme a análise de dados avança, o livro dos códigos é revisado para manter quaisquer inconsistências, sobreposições ou imprecisões nos códigos em constante evolução (MACQUEEN et al., 2008).

Em consequência da evolução da pandemia de coronavírus, não foi possível acessar aos laboratórios da universidade, para utilizar o software NVivo para a análise dos dados qualitativos coletados nas entrevistas. Ainda, o autor optou para realizar uma codificação manual em vez de suportada pelo computador, também para capturar as categoria e os fatores por meio de uma análise detalhada do texto (SANTOS; D'ANTONE, 2014).

4.4 ESTUDOS DE CASO

Para planejar e conduzir estudos de caso, os seguintes componentes de um projeto de pesquisa são importantes: perguntas do estudo, estudo de caso único ou de casos múltiplos, unidade(s) de análise, técnicas para a coleta de dados, elaboração do protocolo para o estudo de caso, critérios para interpretar as descobertas (YIN, 2001). A seguir, cada componente é analisado.

Cada pergunta deve ser acompanhada de uma lista de fontes prováveis de evidências, que podem incluir os documentos ou as observações (YIN, 2001).

O pesquisador escolhe casos únicos quando o propósito de pesquisa é a exploração e o estudo em profundidade (VOSS; TSIKRIKTSIS; FROHLICH, 2002), enquanto escolhe casos múltiplos quando a tática perseguida é a lógica de replicação em mais estudos de caso e não de amostragem (EISENHARDT, 1989; YIN, 2001). A lógica de replicação é diferente da lógica de amostragem que presume que um número de respondentes "represente" um grupo maior ou universo de respondentes, o que exige procedimento estatístico para selecionar o subconjunto específico de respondentes que vão participar da pesquisa. Os estudos de caso não devem ser utilizados para avaliar a incidência dos fenômenos, mas devem tratar tanto do fenômeno de interesse quanto de seu contexto. O resultado é um grande número de variáveis potencialmente relevantes, que necessitam de replicação por outros casos (YIN, 2001). Como relatado por Batte

e Arnholt (2003) em uma pesquisa realizado no Estado do Ohio nos Estados Unidos, os agricultores envolvidos em estudos de caso não devem ser vistos como representativos de todos os agricultores do Estado. Mesmo assim, os resultados atingidos são instrutivos para esse grupo maior. Ainda, a construção de teoria a partir de casos múltiplos produz uma teoria mais robusta e generalizável do que a pesquisa de caso único, porque as proposições são mais profundamente fundamentadas em evidências empíricas de vários casos (EISENHARDT; GRAEBNER, 2007; VOSS; TSIKRIKTSIS; FROHLICH, 2002).

A definição da unidade de análise apropriada é relacionada à maneira como as perguntas iniciais da pesquisa são definidas. Um estudo de caso pode ser denominado holístico, em caso de unidade única, ou incorporado, em caso de unidades múltiplas (YIN, 2001).

Os estudos de caso podem combinar uma grande variedade de fontes de dados, incluindo entrevistas, dados de arquivo (EISENHARDT; GRAEBNER, 2007), documentos e observação direta ao campo escolhido para o estudo. A oportunidade de utilizar muitas fontes diferentes para a obtenção de evidências, que convergem relativamente ao mesmo conjunto de fatos ou descobertas, leva ao conceito de triangulação (YIN, 2001).

O protocolo deve apresentar as seguintes seções: uma visão geral do projeto do estudo de caso (incluindo os objetivos e o patrocínio do projeto); apresentação do projeto (com a descrição do projeto, seu objetivo e as pessoas envolvidas); uma carta de apresentação (a ser enviada aos principais entrevistados e organizações que podem ser o objeto do estudo); procedimentos de campo (YIN, 2001).

Quanto aos critérios para se interpretar as descobertas, duas técnicas podem ser aplicadas aos dados coletados nos estudos de caso: análise dentro de caso (*within-case analysis*), que envolve redações detalhadas de cada caso como uma entidade autônoma; pesquisa cruzada de padrões (*cross-case pattern search*). A pesquisa cruzada de padrões pode ser conduzida em diferentes maneiras. Uma tática é selecionar categorias ou dimensões e, em seguida, procurar semelhanças dentro do grupo juntamente com diferenças entre grupos. Uma segunda tática é selecionar pares de casos e, em seguida, listar as semelhanças e diferenças entre cada par. A próxima etapa desse processo iterativo é comparar sistematicamente o quadro emergente com as evidências de cada caso, a fim de avaliar o quão bem ou mal ele se ajusta aos dados do caso. A ideia central é que o pesquisador compare constantemente a teoria e os dados, iterando em direção a uma teoria que se ajusta perfeitamente aos dados, a fim de produzir uma teoria empiricamente válida (EISENHARDT; GRAEBNER, 2007).

Um outro princípio que deve ser seguido, a fim de aumentar a confiabilidade das informações em um estudo, é manter um encadeamento das evidências: isto é, ligações

explícitas entre as perguntas feitas, os dados coletados e as conclusões. O resultado é permitir que um observador externo - o leitor do estudo de caso, por exemplo - possa perceber que qualquer evidência proveniente das perguntas de pesquisa leva às conclusões finais do estudo (YIN, 2001).

Ao utilizar um projeto de estudos de caso, o pesquisador vai se deparar com uma outra questão: o número de casos supostamente necessários ou suficientes para o seu estudo, que depende da certeza que o pesquisador quer atingir sobre os resultados obtidos (YIN, 2001). A seleção de casos deve ser cuidadosamente pensada ao invés de ser uma escolha oportunista do pesquisador (BENBASAT, 1987). Quanto menor for o número de casos, maior será a oportunidade de profundidade de observação (VOSS; TSIKRIKTSIS; FROHLICH, 2002). Ainda, é oportuno para o pesquisador usar uma amostragem teórica e não aleatória. Embora não haja um número ideal de casos, um número entre quatro e dez casos geralmente funciona bem para a lógica de replicação (EISENHARDT, 1989).

De acordo com Voss, Tsikriktsis e Frohlich (2002) dois estudos de caso em profundidade (com unidade de análise a empresa agrícola) são apresentados, pelo propósito exploratório e finalizado ao desenvolvimento de teoria dessa tese e pelas possibilidades de realizar estudo em profundidade, de coletar dados históricos sobre a gestão das operações de irrigação e de realizar também simulações.

Os dois estudos de casos possuem características homogêneas em termos de interesse em participar de projetos de pesquisa, tamanho de empresa - empresa industrial, localização (Estado de Bahia), região climática, agricultura arável, sistema de irrigação (pivô central), estrutura organizacional (gerente da empresa), características do agricultor (como idade, nível educacional, conservadorismo e capacidade de inovação). Portanto, de acordo com Yin (2001), esses estudos apresentam perfis para prever resultados semelhantes.

Nesse trabalho os resultados dos dois estudos de caso e da simulação realizada com os dados coletados na “Empresa agrícola Bahia” são apresentados, enquanto os resultados da simulação realizada com os dados coletados no piloto MATOPIBA são publicados em Monteleone et al. (2020b).

As técnicas de coleta de dados aplicadas são ilustradas no Quadro 6. As entrevistas foram conduzidas remotamente e não foi possível visitar as duas empresas por causa da evolução da pandemia de coronavírus.

Quadro 6 - Técnicas de coleta de dados aplicadas

Fontes de evidência	Técnicas de coleta de dados
Documentos	Fotos, relatórios das empresa agrícolas, contratos das empresa agrícolas, relatórios dos consultores.
Registros em arquivo	Base de dados do sistema de gestão da irrigação, relatórios das empresas agrícolas, contratos das empresa agrícolas, relatórios dos consultores, base de dados secundários.
Entrevistas	Realizadas remotamente.
Observação direta	Não realizadas visitas de campo por causa da evolução da pandemia de coronavírus.

Fonte: Autor

O protocolo para o estudo de caso e o questionário com o objetivo da entrevista, o contexto do qual a pesquisa faz parte e as perguntas propostas são ilustrados no Apêndice D. As perguntas, baseadas nos preceitos da TPB (AJZEN, 1991) e focadas na gestão das operações de irrigação (JUMMAN, 2016), são as mesmas do questionário usado para as entrevistas com especialistas. Em vez da palavra "Agricultura 4.0", refere-se a sensores e drones, para serem equipamentos que o agricultor pode identificar como representativos de tecnologias inovadoras para a irrigação, além de serem equipamentos incluídos no contexto da Agricultura 4.0.

Para analisar os dados coletados nos estudos de caso é utilizado o processo de codificação dos dados coletados nas entrevistas com os especialistas descrito na seção 4.3 (MACQUEEN et al., 2008).

4.5 TÉCNICAS DE MODELAGEM E IDEF0

Na literatura existem diferentes técnicas para modelagem da estrutura, comportamento e organização de uma empresa ou sistema de informação, como Definição de Integração para Modelagem de Funções (*Integration Definition for Function Modeling* - IDEF0), Linguagem de Modelagem Unificada (*Unified Modeling Language* - UML) (ABT; VIGIER; SCHNEIDER, 2009; KIM et al., 2003; VERNADAT, 2002). A importância da modelagem se encontra na possibilidade de construir modelos para comunicar a estrutura e o comportamento da empresa ou sistema, para visualizar e controlar a sua arquitetura, para entender melhor a empresa ou sistema em construção, para documentar decisões a tomar (BOOCH; RUMBAUGH; JACOBSON, 2000).

Nesse contexto, duas comunidades de modelagem distintas desenvolveram-se em grupos de pesquisa acadêmica em todo o mundo: ‘‘modeladores empresariais’’, que têm como

referência a técnica IDEF0, e "modeladores de sistemas de objetos distribuídos"[2], que têm como referência a técnica UML. Os ‘‘modeladores empresariais’’ têm uma preocupação principal centrada em questões de negócios comuns em organizações e em como essas preocupações impactam no ciclo de vida dos processos de negócios e seus sistemas empresariais, que incluem sistemas humanos e da tecnologia de informação. A segunda comunidade de modeladores tem se preocupado principalmente com a engenharia de sistemas de software (KIM et al., 2003).

A IDEF0 é uma técnica de modelagem baseada na arquitetura Manufatura Integrada Auxiliada por Computador (*Integrated Computer-Aided Manufacturing* - ICAM) da *Air Force Wright Aeronautical Laboratories* para o desenvolvimento de representações gráficas estruturadas de um sistema ou empresa. O uso desta norma permite a construção de modelos compreendendo funções de sistema (atividades, ações, processos, operações), relações funcionais e dados (informações ou objetos) dentro do sistema modelado. Para novos sistemas, a IDEF0 pode ser usada para definir os requisitos e especificar as funções e, em seguida, para projetar uma implementação que atenda aos requisitos e execute as funções (NATIONAL INSTITUTE OF STANDARDS AND TECHNOLOGY, 1993). A IDEF0 pode representar aspectos comerciais e sociais, bem como aspectos técnicos (KIM et al., 2003).

A UML é uma linguagem gráfica para visualizar, especificar, construir e documentar os artefatos de um sistema intensivo de software. A UML oferece uma maneira padrão de escrever projetos de sistema, cobrindo “coisas conceituais”, como processos de negócios e funções do sistema, bem como “coisas concretas”, como classes escritas em uma linguagem de programação específica, esquemas de banco de dados e componentes de software reutilizáveis (BOOCH; RUMBAUGH; JACOBSON, 2000).

Os principais pontos fortes da IDEF0 são: simplicidade, pois usa apenas uma construção notacional, chamada Entrada-Controle-Saída-Mecanismo ICOM (*Input-Control-Output-Mechanism* - ICOM); precisão, pois a construção de um diagrama é governada por muitas regras e convenções; abstração de dados por meio de uma decomposição hierárquica do sistema (CHENG-LEONG; PHENG; LENG, 1999; GIAGLIS, 2001; MANDEL, 1990). Além disso, várias fontes de informações - interfaces - podem ser identificadas (entradas, saídas, controles e mecanismos) e requisitos de ferramentas de gerenciamento podem ser apontados (ABT; VIGIER; SCHNEIDER, 2009). A técnica IDEF0 é bem adequada para os esforços dos

[2] “**Objetos**” normalmente são referidos como “objetos corporativos”' ou “objetos de negócios”, que são as “coisas” a partir das quais sistemas corporativos complexos são feitos. “Objetos de negócios” podem ser vistos como sendo partes comuns de sistemas de negócios, como um sistema de Planejamento de Recursos Empresariais (*Enterprise Resource Planning* - ERP) (KIM et al., 2003).

modeladores de negócios para entender e capturar as operações de negócios e os requisitos do sistema de informação de apoio (NORAN, 2000). Ainda, a IDEF0 é mais adequada para descrever o que um sistema muito complexo deve fazer de muitos pontos de vista. Pelo contrário, a IDEF0 é menos adequada para modelagem detalhada dos comportamentos de "objetos corporativos" (ou seja, pessoas, sistemas de software e máquinas) para que as responsabilidades pelas atividades possam ser atribuídas (KIM et al., 2003). As notações da IDEF0 não são adequadas para descrever interações entre organizações. A falta de qualquer distinção clara entre um fluxo de material e um fluxo de informações também leva a restrições que limitam o uso de modelos IDEF no suporte de projeto, implementação e mudança de sistemas de informação e humanos (KIM et al., 2003). Ainda, os modelos IDEF0 são diagramas estáticos, sem representação explícita ou mesmo implícita do tempo. Mesmo a sequência da ICOM não se destina a representar as relações temporais entre as atividades (GIAGLIS, 2001).

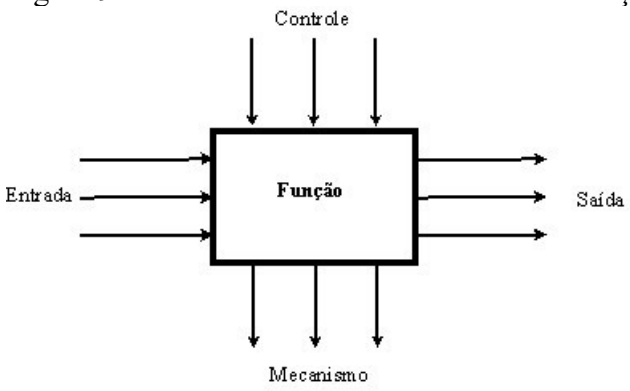
A técnica UML é principalmente voltada para situações de modelagem de sistemas, embora uma "extensão para modelagem de negócios" seja disponível (GIAGLIS, 2001). Como a UML não oferece procedimento predefinido (ou processo a ser seguido) ao desenvolver sistemas corporativos, isso pode aumentar a flexibilidade e a utilidade da abordagem, mas significa que a modelagem UML é uma tarefa especializada (KIM et al., 2003). Ainda, o padrão internacional UML permite flexibilidade e oferece disponibilidade de ferramentas de software capazes de lidar com modelos complexos e gerar visualizações gráficas de subconjuntos desses modelos (NASH et al., 2009).

Existem semelhanças entre a família de técnicas UML e IDEF0. Cada método exibe a tentativa de cobrir os domínios tradicionais da outra técnica. Enquanto a UML é estendida para cobrir a modelagem de negócios, a família IDEF0 é adicionada a novos componentes para permitir o desenvolvimento de software e sistemas (NORAN, 2000). Contudo, as técnicas IDEF0 e UML se complementam: a IDEF0 oferece uma abordagem padrão e amplamente usada para desenvolver as partes frontais (*front-ends*) de negócios para a UML, enquanto a UML pode fornecer a estrutura de apoio (*back-end*) de engenharia de software, padrão e amplamente usada, para modeladores IDEF0 (KIM et al., 2003).

Portanto, considerando que: a IDEF0 é simples, permite desenvolver modelos conceituais de modelos de negócios, é um padrão governado por muitas regras e convenções, representa no mesmo diagrama dados e recursos, esse projeto de tese propõe de aplicar a técnica de modelagem IDEF0 para modelar a gestão das operações de irrigação, também de acordo com a finalidade exploratória das perguntas e dos objetivos de pesquisa.

Um modelo IDEF0 é composto por uma série hierárquica de blocos de diagramas cujos componentes principais são caixa e seta. Em um diagrama, uma caixa representa uma função e uma seta representa uma interface, como ilustrado na Figura 9.

Figura 9 - Caixa e setas de interface de uma função IDEF0



Fonte: Autor

Uma interface pode ser uma entrada, uma saída, um controle ou um mecanismo. As entradas (I) entram na caixa da esquerda, são transformadas pela função e deixam a caixa da direita como saída (O). Um controle (C) entra no topo da caixa e influência ou determina a função. Um controle é uma informação que facilita a execução da função (ou seja, um procedimento escrito, um comando oral, uma experiência do trabalhador, etc.). Um mecanismo (M) é uma ferramenta ou recurso que executa a função. Cada caixa pode ser decomposta em um nível inferior de detalhe. Este recurso restringe a quantidade de informações que podem estar contidas no modelo em um único nível. Os diagramas resultantes formam uma hierarquia de informações que são resumidas em uma árvore de nós (KUSIAK; NICK LARSON; WANG, 1994).

Como metodologia sistemática para especificação funcional estática de sistema ou empresa (VENKATESWARAN; SON, 2005), a IDEF0 pode ser usada em combinação com modelos de simulação para o suporte que fornece na documentação do modelo e coleta de dados. O nível de detalhe do modelo tem implicações claras para a coleta de dados. À medida que o detalhe do modelo aumenta, mais dados podem ser introduzidos, com impacto no desenvolvimento do modelo de simulação. A IDEF0 permite que um sistema seja descrito como completo no nível de detalhe desejado (PERERA; LIYANAGE, 2000).

4.6 TÉCNICAS DE SIMULAÇÃO E DINÂMICA DE SISTEMAS

Uma simulação é a imitação da operação de um processo ou sistema do mundo real ao longo do tempo. O comportamento de um sistema conforme ele evolui ao longo do tempo é estudado através do desenvolvimento de um modelo de simulação, que é uma simplificação de um sistema com o propósito de estudá-lo. Este modelo assume a forma de um conjunto de premissas relativas à operação do sistema, que são expressas em relações matemáticas, lógicas e simbólicas entre os objetos do sistema (BANKS et al., 2004; GILBERT; TROITZSCH, 2005). Nas ciências sociais, um modelo é uma representação matemática de um sistema social que pode ser simulado para gerar resultados numéricos (RAHMANDAD; STERMAN, 2012).

Para modelar um sistema, é necessário entender o seu conceito (definido como um grupo de objetos unidos em alguma interação e interdependência para a realização de algum propósito) e os seus limites. Os sistemas podem ser categorizados como discretos (em que as variáveis mudam apenas em um conjunto discreto de pontos no tempo) ou contínuos (em que as variáveis mudam continuamente ao longo do tempo). O estado de um sistema é definido como aquela coleção de variáveis necessárias para descrever o sistema a qualquer momento, em relação aos objetivos do estudo (BANKS et al., 2004).

A simulação é uma forma prática de testar modelos complexos: quando a experimentação em sistemas reais é inviável, a simulação se torna a principal e talvez a única maneira de descobrir como funcionam os sistemas complexos. A maioria das pessoas pensam na complexidade de um sistema em termos de número de seus componentes ou de combinações que devem ser consideradas ao tomar uma decisão. Ao contrário, a complexidade surge das interações entre os componentes ao longo do tempo (STERMAN, 2000).

4.6.1 Técnicas de simulação

Na literatura existem diferentes técnicas de simulação e várias abordagens são usadas para o desenvolvimento de teorias, entre elas a Dinâmica de Sistemas (DAVIS; EISENHARDT; BINGHAM, 2007). No contexto da gestão das operações, e especialmente para estudar os problemas de planejamento e controle da produção, as técnicas comumente usadas são a Simulação de Eventos Discretos (*Discrete Event Simulation* - DES), a Dinâmica de Sistemas (*System Dynamics* - SD) e a Simulação Baseada em Agentes (*Agent Based Simulation* - ABM) (JEON; KIM, 2016). A SD é uma técnica de modelagem rigorosa que permite construir simulações formais computacionais de sistemas complexos e usá-las para projetar políticas (ou

seja, regras de decisão) e organizações mais eficazes (STERMAN, 2000). A SD é uma forma de modelagem de computador que usa os conceitos de feedback de informações e variáveis de estado para modelar sistemas sociais e explorar a relação entre a estrutura do sistema e seu comportamento evolutivo no tempo (FORRESTER, 1961). A DES é a modelagem de sistemas nos quais as variáveis de estado mudam apenas em um conjunto discreto de pontos no tempo (BANKS et al., 2004). A ABM é uma abordagem para modelar sistemas compostos de "agentes" que interagem. Um modelo típico baseado em agentes tem três elementos: um conjunto de agentes, seus atributos e comportamentos; um conjunto de relacionamentos e métodos de interação; o ambiente dos agentes (MACAL; NORTH, 2010).

Cada uma das três técnicas tem suas características, vantagens e desvantagens, que a tornam mais aplicável a certos tipos de problemas (JEON; KIM, 2016; LÄTTILÄ; HILLETOFTH; LIN, 2010). A comparação das características identifica qual técnica é mais apropriada também para problemas de Planejamento e Controle da Produção (*Production Planning and Control* - PPC) (JEON; KIM, 2016). Nenhuma técnica é superior às outras completamente, mas cada uma pode ser útil em diferentes circunstâncias (MORECROFT; ROBINSON, 2005). As características das técnicas, resumidas no Quadro 7, devem auxiliar na decisão sobre a melhor escolha para uma determinada situação (GREASLEY, 2009).

Quadro 7 - Resumo das características das técnicas de simulação

Características	**SD**	**DES**	**ABM**	**Referências**
Conceitos chave	Complexidade dinâmica, visão agregada, visão holística do mundo, modelo mental.	Entidades, eventos, visão analítica, visão de detalhes.	Perspectiva do agente, interação entre agentes.	Forrester (1961); Jeon e Kim (2016); Lättilä; Hilletofth e Lin (2010); Macal e North (2006); Morecroft e Robinson (2005); Sterman (2000); Van Dyke Parunak; Savit e Riolo (1998); Venkateswaran e Son (2004)
Nível de decisão	Estratégico, curto e longo prazo.	Operacional ou tático.	Operacional.	Jeon e Kim (2016)
Gestão do tempo	Continua.	Discreta.	Discreta ou contínua.	Jeon e Kim (2016)
Componentes básicos	Ciclos de feedback, estoques e fluxos.	Entidades, eventos.	Agentes, regras.	Lättilä; Hilletofth e Lin (2010)
Complexidade	Estrutura do sistema, interações entre componentes.	Detalhes dos processos.	Interação entre agentes.	

Continua...

Conclusão.

Características	SD	DES	ABM	Referências
Pontos fortes	Modelos pequenos, identificação das causas de um problema, compreensão da dinâmica subjacente ao sistema.	Planejamento da sequência de processos, compreensão do comportamento dos componentes.	Perspectiva do agente, modelos pequenos, modelos de grande escala.	Jeon e Kim (2016)
Pontos fracos	Lidar com eventos discretos, entidades individuais, diagramas dos ciclos causais.	Falta de método de diagramação padrão, modelos com muitos detalhes.	Perspectiva baseada em processos.	Greasley (2009); Jeon e Kim (2016); Lättilä; Hilletofth e Lin (2010); Macal e North (2006); Morecroft (1982); Morecroft a Robinson (2005); Van Dyke Parunak; Savit e Riolo (1998)
Comunicação	Diagramas dos ciclos causais, diagramas dos estoques e fluxos, diagrama do limite do modelo, diagrama dos subsistemas, diagrama da estrutura da política.	Mapeamento de processos, uso de UML.	Uso de UML.	Lane (2008); Macal e North (2006); Morecroft (1982); Morecroft a Robinson (2005); Sterman (2000)
Aplicações em PPC	Planejamento de capacidade, gestão de estoques, políticas estratégicas.	Programação, desenho de processo.	Desenho de produto e processo.	Jeon e Kim (2016); Venkateswaran e Son (2004).
Complementaridade	Integração com ABM, modelos híbridos com DES.	Modelos híbridos com SD e ABM.	Modelos híbridos com DES e SD.	Jeon e Kim (2016); Lättilä; Hilletofth e Lin (2010)

Fonte: Autor

A SD fornece uma ferramenta estratégica poderosa, que apoia a política de planejamento em um período de curto ou longo prazo. A SD é usada para descrever mudanças contínuas no sistema, aproximadas por pequenos passos discretos de igual comprimento (JEON; KIM, 2016). A estrutura de um sistema impulsiona a complexidade, que não depende do número de componentes do sistema, mas surge das interações entre eles ao longo do tempo (complexidade dinâmica) (STERMAN, 2000). A complexidade dinâmica surge porque os sistemas são: dinâmicos, fortemente acoplados (os componentes do sistema interagem fortemente uns com os outros), governados por feedbacks, não lineares (o efeito raramente é proporcional à causa), contraintuitivos (causa e efeito são distantes no tempo e no espaço). Outros conceitos básicos da SD são a visão agregada, que o pesquisador precisa ter sobre os itens e eventos separados de um sistema (FORRESTER, 1961), a visão holística do mundo e o modelo mental, que inclui as crenças sobre as redes de causas e efeitos que descrevem como um sistema opera (STERMAN, 2000)**.** Os modelos SD são determinísticos e suas variáveis representam os valores médios. A respeito dos problemas de PPC, a SD é mais aplicada para abordar problemas de planejamento

de capacidade, gestão de estoques, compra e gestão de suprimentos que requerem um fator de tempo contínuo para a modelagem de simulação (JEON; KIM, 2016). Além disso, o uso típico de SD é projetar e determinar políticas estratégicas para a cadeia de suprimentos (VENKATESWARAN; SON, 2004). Contudo, a SD possui alguns pontos fracos. Trabalhar com variáveis agregadas torna o uso da SD difícil em ambientes heterogêneos. Ainda. como os modelos SD são contínuos por natureza, esse modelos têm dificuldades em lidar com eventos discretos (LÄTTILÄ; HILLETOFTH; LIN, 2010), como linha de montagem em sistemas de produção (JEON; KIM, 2016).

A DES é geralmente usada para estudar problemas em níveis operacionais ou táticos (JEON; KIM, 2016). Ao construir uma modelo de DES, o sistema que está sendo simulado é visto como consistindo em uma série de entidades (por exemplo, produtos, pessoas) que têm uma série de atributos (por exemplo, tipo de produto, idade) (GREASLEY, 2009). As entidades podem ser físicas ou conceituais (fluxo de informações). As mudanças de estado ocorrem em intervalos de tempo discretos. Quando o evento ocorre, certas mudanças são acionadas no modelo, e não há mudanças nas variáveis de modelagem entre dois eventos (JEON; KIM, 2016). Problemas e decisões operacionais associadas à programação e desenho de processo têm grande parte da aplicação da DES (JEON; KIM, 2016; VENKATESWARAN; SON, 2004).

A ABM se concentra em agentes (por exemplo empresas ou suas divisões) (VAN DYKE PARUNAK; SAVIT; RIOLO, 1998), que interagem com base em regras geralmente simples. O comportamento emergente resultante de tais agentes como um sistema complexo é a unidade básica de análise (SCHOLL, 2001). A ABM é frequentemente usada para modelagem operacional com tempo de manipulação discreto (JEON; KIM, 2016). Um agente é um indivíduo discreto com um conjunto de características e regras que regem seus comportamentos e capacidade de tomada de decisões. Os agentes possuem protocolos para interação com outros agentes, como para a comunicação, e a capacidade de responder ao ambiente (MACAL; NORTH, 2006). A complexidade do sistema emerge da interação entre diferentes agentes, não da estrutura do sistema (SCHOLL, 2001). Presume-se que os agentes agem em seus próprios interesses, como benefício econômico, e que seu conhecimento sobre todo o sistema é limitado (MACAL; NORTH, 2006). Quanto às questões de PPC, o problema de desenho de produto e processo é popularmente abordado pela ABM. Problemas de programação e transporte na gestão de compras e demanda também possuem alta aplicação da ABM (JEON; KIM, 2016). É benéfico pensar em termos de agentes quando há representação natural como agentes, quando é importante que os agentes formem organizações (MACAL; NORTH, 2006).

A SD é mais apropriada para análise de decisão gerencial usando dados agregados, enquanto a DES é mais aplicada para análise de decisão operacional usando representação detalhada do sistema, para compreender o comportamento real dos componentes individuais (VENKATESWARAN; SON, 2004). Em comparação com a DES e a ABM, as entidades individuais não são modeladas especificamente na SD, mas são representadas como uma quantidade agregada contínua em um estoque (JEON; KIM, 2016; VAN DYKE PARUNAK; SAVIT; RIOLO, 1998). Portanto, a estrutura é relativamente rígida em modelos SD (LÄTTILÄ; HILLETOFTH; LIN, 2010), e, devido ao nível de agregação, os modelos SD tendem a ser relativamente pequenos em termos de número de elementos. As simulações DES tendem a ser bastante complexas, com cada processo modelado em detalhes. O nível de detalhe é um fator crítico na construção do modelo; um modelo com muitos detalhes provavelmente levará muito tempo para ser construído e será menos confiável (GREASLEY, 2009). Quanto à ABM, alguns modelos são pequenos, incluindo apenas os detalhes essenciais de um sistema, outros modelos são de grande escala e em grande detalhe (MACAL; NORTH, 2006).

A DES é uma técnica mais apropriada da SD no caso de planejamento da sequência de processos (JEON; KIM, 2016). Ao contrário, a ABM representa mais naturalmente o processo como um conjunto de comportamentos (VAN DYKE PARUNAK; SAVIT; RIOLO, 1998).

Com referência à comunicação, a SD inclui uma variedade de ferramentas para comunicar as características do modelo e representar sua estrutura (STERMAN, 2000). Para comunicar as suposições causais e as características principais dos modelos, dois métodos principais de diagramação são empregados: diagramas dos ciclos causais e diagramas dos estoques e fluxos (LANE, 2008). Embora o diagrama dos ciclos causais tenha ganhado destaque como a ferramenta de diagramação para conceituar modelos de SD, ele não representa explicitamente os processos de tomada de decisões humana e não correspondem a modelos mentais comuns de sistemas sociais e industriais e, portanto, são ineficientes como ferramenta de comunicação. Não é possível examinar o diagrama dos ciclos causais e deduzir onde as decisões foram tomadas, como as responsabilidades são distribuídas e quais informações os diferentes tomadores de decisão consideram importantes em sua parte do sistema (MORECROFT, 1982). Outras ferramentas de diagramação parecem superar muitas das fraquezas do diagrama dos ciclos causais: diagrama do limite do modelo (que resume o escopo do modelo elencando os componentes exógenos e excluídos do modelo), diagrama dos subsistemas (que mostra a arquitetura geral de um modelo e seus principais subsistemas), diagrama da estrutura da política (que mostra a estrutura interna de um subsistema,

identificando explicitamente a rede de estoque e fluxo e a rede de informações) (MORECROFT, 1982; STERMAN, 2000).

Ao contrário da SD, não há um método de diagramação padrão compartilhado para representar os modelos DES: várias abordagens são disponíveis, incluindo mapeamento de processos e técnica UML (MORECROFT; ROBINSON, 2005). A ABM também pode se beneficiar do uso da UML para representar modelos (MACAL; NORTH, 2006).

De acordo com Morecroft e Robinson (2005) as técnicas de simulação analisadas podem ser vistas não como abordagens opostas e incompatíveis, mas como complementares. A aplicação de mais abordagens em conjunto pode gerar inspirações complementares. Por exemplo, visto que a SD é útil para modelar o contexto organizacional de um problema, os pesquisadores avançaram para estender os modelos de DES já criados usando a SD. Ainda, a integração entre a ABM e a SD é uma abordagem comum na cadeia de suprimentos para uma visão geral dos problemas de PPC (JEON; KIM, 2016). Os pontos fracos destacados sobre a SD e a ABM podem ser superados integrando essas duas técnicas, melhorando a qualidade do modelo e fornecendo mais intuições (LÄTTILÄ; HILLETOFTH; LIN, 2010).

As três técnicas de simulação são utilizadas na agricultura por vários pesquisadores. A SD é aplicada por exemplo para desenvolver um modelo de simulação de um sistema de irrigação agrícola (BALA et al., 1988); para explorar a adoção de tecnologias de programação de irrigação no cultivo de cana-de-açúcar (JUMMAN, 2016); para avaliar a adoção de tecnologias de mapeamento e monitoramento de produtividade (FISHER et al., 2000); para estudar o balanço hídrico em um sistema de campo de arroz (KHAN; YUFENG; AHMAD, 2009); para apoiar os tomadores de decisão na gestão da água de irrigação (PLUCHINOTTA; PAGANO; TSOUKIÀS, 2018). Enquanto a DES é usada por exemplo para examinar o impacto que as falhas do equipamento de irrigação têm na produção agrícola e na lucratividade sob a programação da irrigação do sorgo (HORNBAKER; ESTES, 1986); para resolver o problema de eficiência operacional das atividades agrícolas, em termos de tempo e custo, no planejamento das operações de campo (TOBA; GRIFFEL; HARTLEY, 2020); para desenvolver uma abordagem para a cooperação entre robôs agrícolas (JU; SON, 2020). A ABM é aplicada por exemplo para observar e medir a variabilidade no campo através de veículos terrestres não tripulados e um UAV como agentes (CHEVALIER et al., 2015); para propor uma estrutura para o desenvolvimento de um padrão de cultivo visando a recuperação de água subterrânea (NOURI; SAGHAFIAN, 2019); para identificar os fatores fundamentais e analisar o processo de disseminação de informações para a difusão de novas práticas em um perímetro irrigado (CAMPOS; CUNHA; BUENO, 2020).

Como resultado da comparação das características das três técnicas de simulação esse projeto de tese propõe de aplicar a Dinâmica de Sistemas no estudo de caso da "Empresa agrícola Bahia" a fim de construir um modelo de simulação para estudar as relações entre os fatores que afetam a adoção de AP no contexto da Agricultura 4.0. A ABM é descartada porque, considerando o escopo do projeto, no sistema em estudo não há representação natural como agentes, de acordo com Macal e North (2006). A técnica SD é recomendada para entender melhor o comportamento do sistema em estudo, pois é possível representar ciclos de feedback facilmente e obter uma visão holística de como as variáveis interagem umas com as outras (STERMAN, 2000), o que facilita a exploração dos fatores determinantes da adoção e o estudo das relações entre os fatores identificados. Ainda, a SD é mais apropriada para a análise de decisão gerencial e em nível estratégico de negócios, usando dados agregados, enquanto a DES é mais aplicada para análise de decisão operacional e em nível tático, usando representação detalhada do sistema (GREASLEY, 2009; VENKATESWARAN; SON, 2004). Esse ponto é alinhado com o propósito desse trabalho de estudar as decisões dos agricultores em relação à adoção de tecnologias de AP, que é uma decisão em nível gerencial.

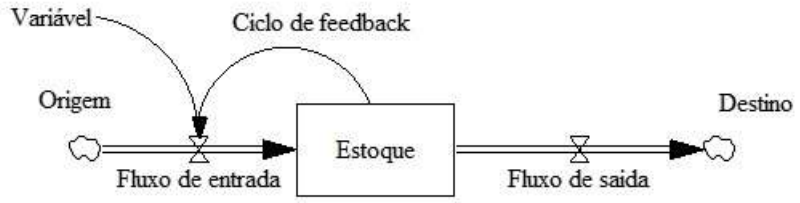
Com base nas justificativas apresentadas, na próxima seção a técnica SD é descrita.

4.6.2 Dinâmica de Sistemas

A Dinâmica de Sistemas, criada no final dos anos 1950 com o nome de Dinâmica Industrial (*Industrial Dynamics*), mudado para Dinâmica de Sistema no final dos anos 1960 (FORRESTER, 1961; LANE, 2008; STERMAN et al., 2015), é uma técnica para desenvolver modelos de simulação no contexto de sistemas complexos. O seu principal objetivo é explicar o comportamento do sistema e ajudar o tomador de decisões a aprender sobre a complexidade dinâmica, compreender as fontes de resistência e projetar políticas (regras de decisão) mais eficazes (STERMAN, 2000). Um modelo de SD ajuda também a mostrar como a estrutura do sistema, as políticas, as decisões, os atrasos nas decisões e as ações são inter-relacionadas para influenciar a estabilidade e o crescimento do sistema (FORRESTER, 1961).

O sistema de interesse é modelado usando sete elementos básicos, ilustrados na Figura 10: origem, fluxo de entrada, fluxo de saída, estoque, destino, variável, ciclo de feedback (LÄTTILÄ; HILLETOFTH; LIN, 2010).

Figura 10 - Elementos básicos de um modelo de Dinâmica de Sistemas

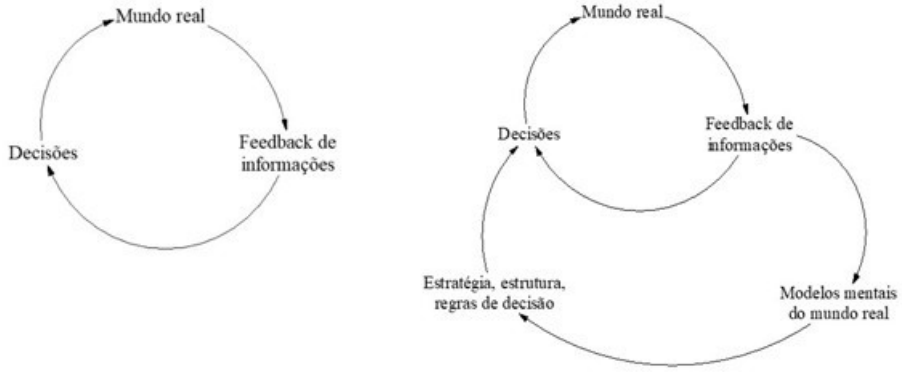


Fonte: Autor “adaptado de” Lättilä, Hilletofth e Lin, 2010, p. 7971

A origem e o destino são considerados fora do limite do modelo. Os estoques (por exemplo mercadorias em trânsito, saldos bancários, número de empregados) representam os valores das variáveis que resultam da diferença acumulada entre entradas e saídas. Os fluxos definem os fluxos instantâneos presentes entre os estoques do sistema. Os fluxos correspondem à atividade, enquanto os estoques medem o estado resultante para o qual o sistema é levado pela atividade. As funções de decisão (desenhadas como válvulas), que controlam as taxas de fluxo entre os estoques, são as declarações de políticas que determinam como as informações disponíveis sobre os estoques conduzem às decisões. Uma "política" é uma regra que determina como as decisões são tomadas. As decisões são as ações realizadas em um determinado momento e são o resultado da aplicação das regras às condições no momento (FORRESTER, 1961).

Quanto ao componente de feedback, este é de grande importância no processo de aprendizagem. Grande parte da modelagem de SD é descobrir e representar os processos de feedback, que, juntamente com as estruturas de estoques e fluxos, determinam a dinâmica de um sistema. Também a aprendizagem depende de feedbacks, como ilustrado na Figura 11 (a). Um indivíduo toma decisões que alteram o mundo real, coleta informações sobre o mundo real e, usando as novas informações, revisa sua compreensão do mundo e as decisões que toma para trazer sua percepção do estado do sistema para mais perto de seus objetivos (STERMAN, 2000). Os ciclos têm polaridades positivas ou negativas que indicam se um ciclo tem a tendência de reforçar ou contrabalançar uma mudança em um ou mais de seus elementos (SCHOLL, 2001).

Figura 11 - Processo de aprendizagem baseado no feedback



(a) (b)

Fonte: Autor “adaptado de” Sterman, 2000, p. 15-20

O conceito de feedback tem uma importância relevante também na Teoria do Comportamento Planejado. A representação gráfica da teoria ilustrada na Figura 3 inclui possíveis efeitos de feedback do comportamento nas variáveis antecedentes (AJZEN, 1991). Esse feedback pode mudar as crenças da pessoa e, assim, afetar as futuras intenções e ações (FISHBEIN; AJZEN, 2010), assim como a aprendizagem baseada no sistema de feedback de informações (FORRESTER, 1961).

O feedback de informações sobre o mundo real não é a única entrada para as decisões, que são o resultado também da aplicação de políticas, estruturas institucionais e estratégias, que, por sua vez, são governadas por modelos mentais. Na SD, o termo "modelo mental" inclui as crenças sobre as redes de causas e efeitos que descrevem como um sistema opera, junto com o limite do modelo (quais variáveis são incluídas e quais são excluídas) e o horizonte de tempo relevante (STERMAN, 2000). O processo de aprendizagem influenciado também pelo modelo mental do tomador de decisões é ilustrado na Figura 11 (b).

Além disso, o feedback do mundo real também pode estimular mudanças nos modelos mentais. Esse aprendizado envolve uma nova compreensão ou reformulação de uma situação e leva a novas regras de decisão, não apenas novas decisões (STERMAN, 2000).

O conceito de modelo mental tem relevância também na tomada de decisões na agricultura. O uso dos modelos mentais dos agricultores tem a vantagem, em comparação com modelos computadorizados, de um certo elemento de adaptação para melhorar seu desempenho ao longo do tempo. A desvantagem é a falta de precisão, principalmente em áreas onde o agricultor não tem experiência. O uso de modelos computadorizados para representar o domínio e as capacidades de raciocínio permite ao agricultor basear suas decisões em um conjunto mais abrangente de informações, ganhando mais precisão no processo de tomada de decisões

(BOCHTIS; SORENSEN; KATERIS, 2018). Porém, a literatura sobre os fatores que afetam as decisões do agricultor considera também o fator conservadorismo (*conservativeness*), que pode ser incluído nas crenças do modelo mental (BURTON, 2004). Os agricultores são menos abertos a mudanças e mais conservadores em sua orientação para valores do que a população em geral (BAUR; DOBRICKI; LIPS, 2016). Essa atitude é um fator importante que influencia a tomada de decisões dos agricultores. As tipologias atitudinais do agricultor podem variar da orientação conservadora (agricultor cauteloso sobre novas ideias e que não gosta de risco) para orientação inovadora (agricultor mais aberto a novas tecnologias) (O'SHEA et al., 2018).

Portanto, esse projeto de tese propõe de considerar na construção do modelo de simulação de SD os componentes relacionados ao modelo mental e ao feedback de informações, para conseguir uma visão holística dos fatores que afetam a adoção de AP no contexto da Agricultura 4.0, de acordo com Sterman (2000).

Ao descrever o processo de modelagem de um modelo de SD, os pesquisadores organizam as principais atividades usando diferentes arranjos, variando de três a sete diferentes estágios. As atividades ao longo dos diferentes estágios permanecem razoavelmente constantes, permitindo agrupar essa atividades em quatro fases: conceptualização (definição do problema e conceptualização do sistema), formulação, teste (comportamento e avaliação do modelo), implementação (análise e uso das políticas) (LUNA-REYES; ANDERSEN, 2003). Os quatro estágios são recursivos: depois de concluir cada estágio, o pesquisador pode retornar aos estágios anteriores para incorporar novas informações ou intuições (ALBIN, 1997).

A conceptualização, que é atividade mais importante no desenvolvimento de um modelo (LUNA-REYES; ANDERSEN, 2003), considera os seguintes passos: definição da finalidade do modelo, definição do limite do modelo, descrição dos modos de referência das variáveis-chave, definição dos mecanismos básicos. A definição da finalidade do modelo descreve o problema que o modelo pretende analisar e o público principal, e comunica o comportamento no tempo que o modelo irá analisar. A definição do limite do modelo apresenta a lista dos componentes, organizados em dois grupos (endógenos e exógenos), e identifica as variáveis-chave. A descrição dos modos de referência das variáveis-chave ilustra a representação gráfica do comportamento das principais variáveis ao longo do tempo. Os modos de referência capturam os modelos mentais e dados históricos do sistema, fornecendo uma sugestão para a estrutura apropriada do modelo. A definição dos mecanismos básicos representa o menor conjunto de relações de causa e efeito capazes de gerar os modos de referência (ALBIN, 1997).

Os mecanismos básicos são ilustrados através de diagramas de ciclos causais, que consistem em variáveis-chave conectadas por setas denotando as influências causais entre as

variáveis e identificando os ciclos de feedback. As variáveis são conectadas por ligações causais que podem assumir polaridade positiva ou negativa. Uma ligação de polaridade positiva significa que uma mudança em uma variável resulta na mudança na mesma direção para outra variável. Uma ligação de polaridade negativa indica que uma mudança em uma variável resulta em uma mudança na direção oposta para outra variável. Barras paralelas na seta representam os atrasos no sistema. Variáveis que não têm setas apontando para elas são exógenas. Os ciclos em um diagrama são destacados por um identificador que indica a sua polaridade: se o ciclo cria feedback positivo (reforço - R) ou negativo (balanceamento - B) (SIMÕES, 2018).

A fase de formulação tem o objetivo de formular as variáveis, constantes, fluxos e estoques no modelo. A partir dos resultados da conceptualização, as variáveis, constantes, fluxos e estoques serão desenhadas no modelo. Essa fase inclui também a documentação do modelo, uma das práticas de modelagem mais importantes. Ao documentar modelos, pode-se garantir que os resultados possam ser compreendidos, replicados, criticados e estendidos por outros pesquisadores (DIAMOND, 2001; STERMAN, 2000).

Quanto à fase de teste, o seu objetivo consiste em comparar o comportamento simulado do modelo com o comportamento real do sistema. A literatura disponibiliza uma ampla variedade de testes específicos para testar o modelo, descobrir as falhas e propor melhorias, como adequação de limite, avaliação de estrutura, consistência dimensional, avaliação de parâmetros, condições extremas, erro de integração, reprodução de comportamento, anomalia de comportamento, membro da família, comportamento surpresa, análise de sensibilidade, melhoria do sistema (STERMAN, 2000).

5 RESULTADOS

Esta seção apresenta os resultados da revisão sistemática da literatura, das entrevistas com especialistas, dos estudos de caso no piloto MATOPIBA e na "Empresa agrícola Bahia", do modelo proposto de gestão das operações de irrigação e dos cenários de simulação realizados na "Empresa agrícola Bahia". Os resultados são organizados para responder as perguntas de pesquisa e atingir os objetivos de pesquisa.

Os fatores resultantes da revisão sistemática da literatura são descritos inicialmente, para dar continuidade aos fatores resultantes das entrevistas com especialistas e dos estudos de caso e com a proposta de um modelo de gestão das operações de irrigação utilizando a modelagem IDEF0.

Os resultados das entrevistas com especialistas e dos estudos de caso, combinados com conceitos de TPB, Agricultura 4.0, AP, gestão das operações e irrigação, são usados para identificar os fatores que podem afetar a adoção de AP no contexto da Agricultura 4.0. Esses achados são codificados com base nos construtos da TPB em escopo (Atitude e Controle Comportamental Percebido), nas categorias e fatores resultantes da literatura (AJZEN, 1991; EISENHARDT, 1989; MILES; HUBERMAN, 1994). Essa abordagem é inspirada ao livro dos códigos de três níveis usado por Araújo et al. (2019) para analisar os dados coletados por meio de entrevistas, em que os três níveis de codificação são equivalentes aos três níveis identificados neste trabalho: construtos da TPB, categorias e fatores.

Um exemplo do processo de codificação para identificar a categoria "modelos de gestão das operações inspirados à indústria" e os fatores "modelos de planejamento e controle das operações", recursos (hardware - máquinas agrícolas, equipamentos agrícolas, sensores) é ilustrado no Quadro 8.

As respostas das entrevistas e os dados dos estudos de caso são classificados por construtos da TPB e em seguida analisados para identificar os trechos com tópicos semelhantes das entrevistas ("desconstrução" do conhecimento dos especialistas e dos gerentes das empresas agrícolas). Com base nos fatores identificados na fundamentação teórica sobre a AP, a Agricultura 4.0, a IoT, o comportamento do agricultor e a gestão das operações, os trechos com tópicos semelhantes são agrupados em códigos, para definir as categorias e os fatores ("reconstrução" do conhecimento).

Quadro 8 - Exemplo do processo de codificação para identificar as categorias e os fatores

Perspectiva inspirada teoricamente: TPB, Panejamento e Controle da Produção		**Desconstrução do conhecimento**	**Reconstrução do conhecimento**
Construtos da TPB	**Fundamentação teórica**	**Entrevistas - Trechos com tópicos semelhantes**	**Categoria e fatores**
Atitude (vantagens, benefícios, resultados positivos esperados)	A inspiração para a Indústria 4.0 identifica algumas vantagens que podem ser introduzidas na agricultura, como melhorias no planejamento e controle (BRAUN; COLANGELO; STECKEL, 2018). A gestão das operações na agricultura lida com o desenho, planejamento, programação e execução de operações humanas e de máquinas (BOCHTIS; SORENSEN; KATERIS, 2018). Se o conceito da Indústria 4.0 for transferido para a agricultura, um sistema de aprendizagem central seria capaz de controlar a empresa agrícola e tomar decisões, com base em dados coletados de sensores espalhados pelo campo (KNOLL; CZYMMEK, 2018).	"*Existem ferramentas de planejamento clássicas da indústria, que o agricultor poderia utilizar, como PERT, CPM, um sistema de custeio ABC por exemplo para fazer planejamento*", especialista 10. "*O agricultor pode aumentar a competência de gestão, por meio de sensores, para controlar se algo está danificado, quebrado, parado, se ocorreu algum problema com máquinas e equipamentos agrícolas*", especialista 8.	Modelos de gestão das operações inspirados à indústria, modelos de planejamento e controle das operações, recursos (hardware - máquinas agrícolas, equipamentos agrícolas, sensores)

Fonte: Autor

Os resultados empíricos são enquadrados por uma perspectiva inspirada teoricamente (MEUSER; NAGEL, 2009), nessa tese a perspectiva é orientada pela TPB, pela introdução de modelos inspirados à indústria, em particular o PPC - Planejamento e Controle da Produção. Os códigos são organizados em categorias (por exemplo, "medidas de desempenho", "acesso à dados") e fatores ("reconstrução" do conhecimento dos especialistas e dos gerentes das empresas agrícolas). A proposta de introduzir modelos inspirados à indústria na agricultura é fundamentada na lacuna da literatura sugerida por Jørgensen (2018), nos fatores relacionados à Industria 4.0 e à gestão das operações analisados na seção 3.3 e nas citações dos especialistas entrevistados. Esse processo é recursivo, enquanto na análise se mostra necessário voltar a um estágio anterior para verificar a adequação das generalizações baseadas em dados empíricos (MEUSER; NAGEL, 2009). Durante o processo de codificação, verifica-se se o entrevistado utiliza a mesma categoria ou fator em outras respostas, considerando que as questões formuladas são semiestruturadas (YIN, 2001).

5.1 RESULTADOS DA REVISÃO SISTEMÁTICA DA LITERATURA

Essa seção apresenta os resultados da revisão sistemática da literatura sobre os fatores que afetam a adoção de Agricultura de Precisão. As etapas da revisão, os critérios utilizados

para identificar os trabalhos selecionados, a abordagem para extrair os dados e para analisar os dados coletados são descritos no Apêndice E. Os resultados são focados, além na identificação dos fatores determinantes da adoção, na análise das fontes de publicação, das comunidades acadêmicas dos autores selecionados, dos métodos de pesquisa e das teorias utilizadas pelos autores. A revisão sistemática da literatura permite evidenciar algumas lacunas de pesquisa e formular algumas proposições teóricas que fundamentam esse projeto de tese.

Os fatores determinantes da adoção de AP identificados nos documentos selecionados são classificados em conformidade com os componentes da TPB, como proposto na seção E.3 do Apêndice E. O resultado dessa análise, ilustrado na Tabela 1, permite revisar os documentos que mencionam esses fatores.

Tabela 1 - Análise dos fatores determinantes da adoção de AP

Componentes da TPB	**Fatores classificados**	**Número de documentos que mencionam o fator (N = 66)**
	Crenças do agricultor	16
	Fatores relacionados à gestão das operações	6
Atitude	Benefícios esperados	8
	Benefícios percebidos	40
	Desvantagens	5
Norma Subjetiva	Fatores relacionados à SN	7
Controle Comportamental Percebido	Recursos e oportunidades	30
	Barreiras e obstáculos	26
Fatores antecedentes	Características do agricultor	55
	Características da empresa agrícola	63
	Características das tecnologias de AP	10

Fonte: Autor

A análise das teorias adotadas nos documentos selecionados evidência que a TPB é aplicada em 1 pesquisa (REICHARDT et al., 2009) e nenhum estudo aplicando a abordagem comportamental é encontrado. Contudo, 16 trabalhos incluem fatores que podem ser classificados nas crenças do agricultor, ou seja nos motivos, valores e atitudes que determinam o seu processo de tomada de decisões (BURTON, 2004; OCA MUNGUIA; LLEWELLYN, 2020; MORRIS; POTTER, 1995), como: impactos sociais (bem-estar no trabalho e redução do tempo de trabalho) entre os motivadores para a adoção de AP, mais do que os impactos econômicos (AYERDI GOTOR et al., 2020); avaliações pessoais e subjetivas sobre os benefícios (BERNARDI; INAMASU, 2014); percepção do agricultor sobre o benefício da AP (TAMIRAT; PEDERSEN; LIND, 2018); confiança na tecnologia (BAGHERI; BORDBAR, 2014; BARNES et al., 2019b) e na capacidade de aprender e usar as tecnologias (ADRIAN; NORWOOD; MASK, 2005; MICHELS; VON HOBE; MUSSHOFF, 2020); atitude medida

com base nas percepções do agricultor sobre o retorno muito longo do investimento e o tamanho pequeno da sua empresa agrícola (BARNES et al., 2019a); percepções sobre a importância futura da AP (D'ANTONI; MISHRA; JOO, 2012); crenças adequadas as informações disponíveis (TAMIRAT; PEDERSEN; LIND, 2018); disposição para adotar ou pagar para adotar tecnologias de AP (HUDSON; HITE, 2003; MARRA et al., 2010; TEY; BRINDAL, 2012); conscientização como pré-condição para a adoção (VECCHIO et al., 2020b).

Os fatores relativos à gestão das operações são praticamente ausentes nos trabalhos selecionados. No entanto, alguns autores (6 documentos sobre 66) citam fatores que podem ser classificados no contexto da gestão das operações (BOCHTIS; SORENSEN; KATERIS, 2018; SLACK; CHAMBERS; JOHNSTON, 2010), como: incompatibilidade de equipamentos com as operações agrícolas (ROBERTSON et al., 2012); layout da empresa agrícola (PATHAK; BROWN; BEST, 2019); redução da fadiga do operador e da quantidade de tempo para concluir as operações no campo, entre os benefícios percebidos (JOCHINKE et al., 2007); habilidades operacionais, entre os riscos percebidos para não adotar as tecnologias de AP (LI et al., 2020); operações técnicas envolvidas para cada tecnologia de AP, fator incluído nas características técnicas das tecnologias (AYERDI GOTOR et al., 2020); mudanças nas práticas de gestão resultantes da adoção da AP, quais tempo de plantio e programação dos maquinários, entre os benefícios percebidos (BATTE; ARNHOLT, 2003). Contudo, esses trabalhos não são focados no estudo da relação entre a adoção da AP e a gestão das operações.

Quanto à Atitude, os documentos que citam benefícios esperados são 8, enquanto os trabalhos que analisam benefícios percebidos são 40. Entre os benefícios esperados resultam os seguintes: redução do uso de água, redução dos investimentos em sementes, fertilizantes e pesticidas (LI et al., 2020); aumento esperado na lucratividade (BRAMLEY; OUZMAN, 2018); economia de energia para a irrigação (GALIOTO; RAGGI; VIAGGI, 2017); facilidade de uso percebida (PIERPAOLI et al., 2013); benefício sobre o custo (HUDSON; HITE, 2003). Os benefícios percebidos incluem: impactos observados pelo agricultor, como redução de insumos e uso de combustível, e impactos percebidos relatados pelo agricultor, como economia de tempo de trabalho e bem-estar no trabalho (AYERDI GOTOR et al., 2020); estar na vanguarda da adoção de tecnologia (PAUDEL et al., 2020); programas de irrigação mais direcionados (GALLARDO et al., 2019); medição da variabilidade espacial, melhoria na tomada de decisões graças a dados organizados (KOUTSOS; MENEXES, 2019); vantagens das tecnologias de AP sobre as tecnologias existentes, tanto em eficácia quanto em relação ao custo (PATHAK; BROWN; BEST, 2019); melhorias na coleta de dados e nas recomendações baseadas nos dados (THOMPSON et al., 2019); melhor gestão da empresa agrícola (KENDALL et al., 2017);

mudanças significativas na gestão (SILVA; MORAES; MOLIN, 2011); melhor conhecimento do campo (REICHARDT; JURGENS, 2009); compreensão do padrão e da causa da variabilidade do rendimento no campo, tomada de decisões sobre o valor do zoneamento de campo (JOCHINKE et al., 2007); acesso à dados (BATTE; ARNHOLT, 2003). Em alguns trabalhos (6 sobre 66) os autores evidenciam também as desvantagens da adoção da AP, como complexidade percebida pelo agricultor do processo de adoção (VECCHIO et al., 2020a, 2020b); retorno do investimento em AP muito longo (BARNES et al., 2019a); custos das tecnologias de AP, dificuldade no uso da tecnologia e custos operacionais (BAGHERI; BORDBAR, 2014; LENCSÉS; TAKÁCS; TAKÁCS-GYÖRGY, 2014; PIERPAOLI et al., 2013); aumento do tempo de trabalho (LENCSÉS; TAKÁCS; TAKÁCS-GYÖRGY, 2014). Esse pequeno resultado (6 sobre 66) pode ser explicado pelo fato de a maioria dos pesquisadores e/ ou agricultores colocarem as desvantagens nas barreiras que dificultam a adoção.

Também os autores que consideram os fatores concernentes a Norma Subjetiva (AJZEN, 1991) são poucos. Esses fatores, presentes em 7 trabalhos sobre 66, são os seguintes: influência social na atitude e na intenção comportamental (LI et al., 2020); influência de atores externos, como outros agricultores, consultores e fornecedores (BARNES et al., 2019a); opinião de vizinhos e amigos (PATHAK; BROWN; BEST, 2019); voluntariedade percebida (AUBERT; SCHROEDER; GRIMAUDO, 2012); pressão de crescimento urbano ao redor da empresa agrícola (TEY; BRINDAL, 2012); opiniões de pessoas importantes no ambiente social do agricultor, incluindo concorrentes ou colegas (REICHARDT et al., 2009); influências urbanas, causando mudanças na gestão das operações agrícolas (ISGIN et al., 2008).

A respeito do PBC (AJZEN, 1991), 30 documentos sobre 66 consideram recursos e oportunidades que podem facilitar a adoção, quais por exemplo fontes de informações (ASARE; SEGARRA, 2018; AYERDI GOTOR et al., 2020; DABERKOW; BRIDE, 2003; KESKIN; SEKERLI, 2016; REICHARDT; JURGENS, 2009; SILVA; MORAES; MOLIN, 2011); fatores contextuais específicos regionais, como a presença de cooperativas e a estrutura industrial dos fornecedores (BARNES et al., 2019b; PINTO; FERREIRA; TEIXEIRA, 2017; SOARES FILHO; CUNHA, 2015); fontes de financiamentos, apoio financeiro com incentivos fiscais e apoio do governo; fontes de informações usadas ao investir em AP e que os agricultores consultam para a assistência (FOUNTAS et al., 2005).

26 documentos sobre 66 consideram no estudo também as barreiras e obstáculos que podem dificultar a adoção pelo agricultor e que incluem os seguintes fatores: custo de entrada (BARNES et al., 2019b); custo de software e aquisição de equipamentos, custo com pessoal (BORGHI et al., 2016); custo de serviços (SILVA; MORAES; MOLIN, 2011); financiamentos,

como falta de disponibilidade de crédito, falta de cobertura de seguro (FRANCO; SINGH; PRAVEEN, 2018); falta de fontes de financiamento adequadas (SILVA; MORAES; MOLIN, 2011); tamanho econômico da empresa agrícola para alavancar a assunção de riscos (BARNES et al., 2019b) e escala da empresa agrícola, necessidade de adaptação da tecnologia para pequenas propriedades (KENDALL et al., 2017); benefícios, como eficiência e ganhos ambientais potencialmente limitados (SKEVAS; KALAITZANDONAKES, 2020); conhecimento e habilidades, como conhecimento necessário para operar as tecnologias de AP, assistência necessária para processar e interpretar os dados coletados (SKEVAS; KALAITZANDONAKES, 2020); conhecimento em informática, mão de obra especializada (ANTONINI et al., 2018); mercado e rede, ausência de serviços de extensão (GALIOTO; RAGGI; VIAGGI, 2017); distância do mercado principal, nível de organização dos produtores na região (ANTOLINI; SCARE; DIAS, 2015); falta de informações sobre tecnologias de AP (SILVA; MORAES; MOLIN, 2011); barreiras tecnológicas, como compatibilidade entre tecnologias (BARNES et al., 2019a); equipamentos e software com manuais muito complexos (BORGHI et al., 2016); barreiras sociais/ culturais (BARNES et al., 2019b); confiança nas tecnologias modernas (BAGHERI; BORDBAR, 2014).

Muitos trabalhos analisam os fatores relacionados ao acesso às fontes de informações (23 documentos sobre 66) entre os recursos e oportunidades disponíveis pelos agricultores. As fontes de informações incluem: empresas de consultoria e consultores independentes (SILVA; MORAES; MOLIN, 2011); outros produtores (GALLARDO et al., 2019); familiares (REICHARDT; JURGENS, 2009); universidades e instituições de pesquisa (SOARES FILHO; CUNHA, 2015); serviço de extensão (DABERKOW; MCBRIDE, 1999; HUDSON; HITE, 2003); revendedores de máquinas e software (FOUNTAS et al., 2005); mídias (rádio, televisão, jornal, revistas, Internet) (KESKIN; SAY; GÖRÜCÜ KESKIN, 2009; WATCHARAANANTAPONG et al., 2014); feiras e exposições (SOARES FILHO; CUNHA, 2015); concorrentes (SILVA; MORAES; MOLIN, 2011); demonstrações (DABERKOW; MCBRIDE, 1999).

Entre os fatores recursos e oportunidades e barreiras, a análise permite também identificar alguns fatores que podem ser classificados como acesso ao mercado (das tecnologias, dos financiamentos e da educação) e que podem influenciar a percepção do agricultor. Os fatores que podem ser relacionados com o acesso ao mercado das tecnologias envolvem por exemplo: falta de informações sobre as tecnologias de AP (SOARES FILHO; CUNHA, 2015); necessidade de adaptação da tecnologia para pequenas propriedades (KENDALL et al., 2017). Quanto ao acesso ao mercado dos financiamentos, os seguintes

fatores podem ser considerados: custos de investimento que limitam a adoção de Irrigação de Precisão para agricultores com baixa capacidade financeira (GALIOTO; RAGGI; VIAGGI, 2017); custos de implantação e na prestação de serviços (SOARES FILHO; CUNHA, 2015). O acesso ao mercado de educação abrange: falta de pessoas capacitadas, indisponibilidade de mão de obra qualificada (FRANCO; SINGH; PRAVEEN, 2018); dificuldade a interpretar as saídas de dados sem treinamento explícito (KENDALL et al., 2017).

Quanto aos fatores antecedentes, as características do agricultor (55 documentos sobre 66) e as características da empresa agrícola (63 documentos sobre 66) são usados por quase todos os autores. As características do agricultor consideram por exemplo os seguintes fatores: idade e nível de educação (BATTE; ARNHOLT, 2003; BERNARDI; INAMASU, 2014; PAUDEL et al., 2020; PIERPAOLI et al., 2013; REICHARDT; JURGENS, 2009; TEY; BRINDAL, 2012); experiência em agricultura (ISGIN et al., 2008); propensão ao risco (PATHAK; BROWN; BEST, 2019); uso de computador para a gestão da empresa agrícola e no campo (MACQUEEN et al., 2008; WATCHARAANANTAPONG et al., 2014); conhecimento de tecnologias de AP e capacidade de inovação do agricultor (AUBERT; SCHROEDER; GRIMAUDO, 2012). Enquanto os fatores incluídos nas características da empresa agrícola são: tamanho da empresa (BERNARDI; INAMASU, 2014; BORGHI et al., 2016; PAUSTIAN; THEUVSEN, 2017; VECCHIO et al., 2020b); área cultivada (JOCHINKE et al., 2007; LARSON et al., 2008); localização da empresa (LARSON et al., 2008; OFORI; GRIFFIN; YEAGER, 2020); renda da empresa (TEY; BRINDAL, 2012); número de funcionários (BARNES et al., 2019a); acesso à Internet (BUCCI; BENTIVOGLIO; FINCO, 2019); nível de educação e treinamento, capacidade de gestão e experiência de trabalho do pessoal da empresa agrícola (PATHAK; BROWN; BEST, 2019), gestão de dados (BRAMLEY; OUZMAN, 2018); investimentos em AP (THOMPSON et al., 2019); equipamentos agrícolas e de AP (AYERDI GOTOR et al., 2020; BORGHI et al., 2016; FOUNTAS et al., 2005).

Alguns estudos (10 documentos sobre 66) consideram fatores concernentes as características das tecnologias de AP, como o tamanho e a idade do colhedor de algodão (D'ANTONI; MISHRA; JOO, 2012); compatibilidade do equipamento com as operações agrícolas e complexidade em relação à dificuldade de uso (PATHAK; BROWN; BEST, 2019; ROBERTSON et al., 2012); compatibilidade da tecnologia com as necessidades do agricultor e suporte técnico (PATHAK; BROWN; BEST, 2019); compatibilidade e complementaridade entre tecnologias de AP (LAMBERT; PAUDEL; LARSON, 2015; TAKÁCSNÉ GYÖRGY et al., 2018); grau de automação da tecnologia (KUŠOVÁ; TĚŠITEL; BOUKALOVÁ, 2017); incompatibilidade de máquinas de diferentes fabricantes (REICHARDT; JURGENS, 2009). O

limitado número de trabalhos que abordam também os fatores relativos às características das tecnologias de AP parece contrastar a afirmação de Groher et al. (2020), segundo os quais os fatores que influenciam as taxas de adoção dependem do tipo de tecnologias.

Pesquisas que analisam os fatores relacionados à gestão de operações são raras, como o trabalho de Robertson et al. (2012).

Considerando os objetivos da revisão sistemática da literatura ilustrados nas seções 4.1 e E.1, os resultados atingidos permitem apresentar vários propósitos a alcançar ao longo do projeto de tese. De acordo com Wright et al. (2007), os resultados permitem distinguir o que foi feito do que não foi feito e identificar algumas lacunas da literatura: a análise das teorias adotadas nos documentos selecionados evidência que a TPB é aplicada em 1 pesquisa (REICHARDT et al., 2009) e nenhum estudo usando a abordagem comportamental é encontrado. Essas lacunas reforçam a sugestão de Pivoto (2018), que, para ampliar o entendimento dos fatores determinantes da adoção da AP na era 4.0, recomenda adotar a abordagem comportamental, contexto em que a TPB fornece uma estrutura conceitual de referência. Além disso, 6 autores sobre 66 citam fatores que podem ser classificados no contexto da gestão das operações e nenhum trabalho selecionado enfoca o estudo na relação entre adoção da AP e gestão das operações. Essa lacuna suporta a sugestão de Jørgensen (2018) de verificar se a inspiração para o conceito da Indústria 4.0 pode facilitar o estabelecimento de soluções operacionais, a fim de explicar o potencial ainda inexplorado da AP para as operações agrícolas.

De acordo com Wright et al. (2007), incluindo essa duas perspectivas (abordagem comportamental e gestão das operações) no estudo da adoção, espera-se de complementar a literatura atual sobre os fatores que afetam a adoção de AP e também sobre o conceito de Agricultura 4.0. Espera-se também de responder a sugestão de Sponchioni et al. (2019) sobre a necessidade de uma análise mais aprofundada para entender o que é a Agricultura 4.0.

A análise estruturada (SANTOS; D'ANTONE, 2014) e rigorosa (TRANFIELD; DENYER; SMART, 2003) dos fatores que afetam a adoção da AP permite identificar os fatores relevantes para o estudo (WRIGHT et al., 2007). A lista resultante permite ter uma visão holística sobre os fatores e construir um modelo de gestão das operações mais abrangente.

Os resultados da revisão sistemática evidenciam também os métodos de pesquisa utilizados nos documentos selecionados (HAIR; PAGE; BRUNSVELD, 2016) e destacam que os métodos qualitativos, entrevistas semiestruturadas (AYERDI GOTOR et al., 2020) e estudos de caso (BATTE; ARNHOLT, 2003), e os métodos mistos (GALIOTO; RAGGI; VIAGGI, 2017) são aplicados por poucos pesquisadores. A proposta de adotar uma abordagem exploratória multimétodos é em linha também com essa lacuna da literatura, bem como com a

incipiente base teórica sobre a Agricultura 4.0 e a natureza exploratória das perguntas de pesquisa. Ainda, essa proposta possibilita responder à lacuna relacionada à falta de estudos qualitativos na literatura sobre as tecnologias de AP (BARNES et al., 2019a).

Enfim, o mapeamento da literatura existente (TRANFIELD; DENYER; SMART, 2003) identifica as comunidades acadêmicas envolvidas nas pesquisas sobre os fatores que afetam a adoção de AP. Esse resultado viabiliza identificar os periódicos científicos de interesse onde submeter os resultados desse projeto de tese.

5.2 FATORES QUE PODEM AFETAR A ADOÇÃO RESULTANTES DAS ENTREVISTAS COM ESPECIALISTAS

Trinta e seis entrevistas com especialistas foram realizadas (nove entre novembro de 2019 e abril de 2020, Vinte e sete entre abril e agosto de 2021). O Apêndice F resume os perfis dos especialistas, cuja seleção foi baseada na amostragem intencional (FLICK, 2009). O critério de escolha apresentou como base a especialidade do entrevistado em gestão do agronegócio, agricultura de precisão, irrigação, gestão de recursos hídricos e gestão das operações. Especialistas com experiencia como pesquisador e também em órgãos gestores de recursos hídricos foram incluídos, considerada a importância desse tópico para esse projeto de tese.

Inicialmente, cinco especialistas foram selecionados, cujas entrevistas iluminaram as perguntas de pesquisa. Em seguida a técnica de amostragem “bola de neve” foi adotada para selecionar os outros especialistas (PATTON, 2002).

Cinco entrevistas foram realizadas presencialmente, enquanto trinta e um foram conduzidas remotamente. Uma entrevista piloto foi realizada para testar o questionário (FLYNN et al., 1990). As entrevistas começaram delineando os objetivos do estudo. As perguntas foram formuladas de forma inequívoca, garantindo que fossem de fácil compreensão e perguntas de esclarecimento foram feitas a fim de completar as respostas do especialista (AYERDI GOTOR et al., 2020). Todas as entrevistas foram gravadas e transcritas na íntegra. Referencias ou dados confidenciais e sensíveis foram omitidos ou substituídos para garantir a privacidade e identidade do entrevistado (GUEST; BUNCE; JOHNSON, 2006). Quaisquer trechos inaudíveis foram substituídos pelo texto "...".

As respostas dos especialistas entrevistados são categorizadas e classificadas de acordo com a Teoria do Comportamento Planejado (AJZEN, 1991; HOME et al., 2014), para produzir as transcrições e os resultados ilustrados no Apêndice G.

No que se refere a análise das entrevistas, na exploração do conhecimento dos especialistas, é adotada a abordagem baseada na "desconstrução" do conhecimento e "reconstrução" desse conhecimento ilustrada na introdução da Seção 5. A atenção é voltada para identificar trechos com tópicos semelhantes, espalhados nas entrevistas (MEUSER; NAGEL, 2009), para identificar as categorias e os fatores. Se as citações levam a identificar benefícios e resultados positivos esperados a seguir da adoção de AP no contexto da Agricultura 4.0, os fatores são classificados no construto Atitude. Por outro lado, se as citações levam a identificar recursos e oportunidades disponíveis a seguir da adoção, os fatores são classificados no construto Controle Comportamental Percebido. Portanto, os fatores concernentes a gestão das operações de irrigação são agrupados em diferentes categorias se podem ser relacionados à vantagens, benefícios, resultados positivos esperados (construto Atitude) ou à impedimentos e obstáculos, recursos e oportunidades disponíveis (construto PBC).

As respostas às perguntas adicionais são associadas aos fatores e às categorias mais adequadas, de acordo com o processo de codificação descrito na introdução da Seção 5. Fatores não relacionados à gestão das operações e fatores relacionados à atores externos à empresa agrícola são considerados fora do escopo deste trabalho. No entanto, alguns desses fatores, por exemplo, concernentes o desenvolvimento sustentável de uma empresa agrícola ou grupo de empresas, são abordados na Seção 7 - Limitações e agenda de pesquisa futura.

O Apêndice G apresenta uma seleção de citações das entrevistas com os especialistas.

Os fatores e as categorias que podem afetar a adoção resultantes das entrevistas com os especialistas são apresentadas no Quadro 9, classificadas de acordo com os construtos da TPB e com base nas categorias e nos fatores identificados na fundamentação teórica sobre a AP, a Agricultura 4.0, a IoT, o comportamento do agricultor e a gestão das operações.

Quadro 9 - Fatores e categorias que podem afetar a adoção resultantes das entrevistas com os especialistas

Construtos TPB	**Fatores**	**Categorias**
Atitude (vantagens, benefícios, resultados positivos esperados)	Necessidade de água da cultura, uso de água, uso de energia, custo de uso de água, custo de uso de energia, uso de água a taxa variável, produtividade, lucro, receita, custo de produção.	Medidas de desempenho quantitativas
	Benefícios de gestão, melhorias no planejamento da irrigação, melhorias no controle da irrigação.	Medidas de desempenho qualitativas
	Acesso à dados agronômicos, acesso à dados operacionais.	Acesso à dados
	Capacitação, capacitação técnica, capacitação gerencial, modelo mental, gestão da irrigação, gestão baseada em dados gestão da empresa agrícola como negócio.	Mudanças para o agricultor

Continua...

Conclusão.

Construtos TPB	Fatores	Categorias
	Gestão da empresa agrícola, gestão das operações, qualificação da mão de obra.	Mudanças para a empresa agrícola
Controle Comportamental Percebido (impedimentos e obstáculos, recursos e oportunidades disponíveis**)**	Modelos de planejamento e controle das operações, modelos de gestão colaborativa.	Modelos de gestão das operações inspirados à indústria
	Recursos (insumos, hardware, pessoas), recursos (fontes de água), recursos (insumos - água), recursos (insumos - energia), recursos (hardware - máquinas agrícolas, equipamentos agrícolas), recursos (hardware - estações meteorológicas, sondas de solo, drones, satélites, sensores), recursos (hardware - sistema de gestão da irrigação), recursos (pessoas - agricultores, gerentes, trabalhadores, consultores).	Recursos
Fatores antecedentes	Idade, nível educacional, renda, experiência em agricultura, familiaridade com tecnologias, família de agricultores, conservadorismo, capacitação gerencial, capacidade de absorção, propensão ao risco, capacidade de inovação.	Características do agricultor
	Tamanho da empresa agrícola - empresa familiar, empresa industrial, localização da empresa agrícola, tipo de cultura, associativismo e cooperativismo, volume de produção, rentabilidade de produto.	Características da empresa agrícola
	Tipo de tecnologia, tipo de equipamento, preço, complexidade.	Características das tecnologias

Com base nas citações dos especialistas e no processo de codificação descrito na introdução da seção 5, a adoção de AP no contexto da Agricultura 4.0 pode levar a vantagens e benefícios que podem ser medidos por meio de medidas de desempenho. As medidas de desempenho resultam relacionadas à Atitude enquanto identificam benefícios que podem ser atingidos com a adoção. Esses benefícios podem ser quantitativos ou qualitativos. Alguns desempenhos são simplesmente quantitativos e podem ser observados facilmente. Isso significa que eles são facilmente compreendidos, pois geralmente são representados numericamente, como custo. As medidas de desempenho qualitativas geralmente são ideias conceituais e as pessoas julgam esses desempenhos por seu próprio entendimento, o que leva a um problema de inconsistência devido à falta de padronização (CHAN, 2003).

Portanto, as medidas de desempenho quantitativas são benefícios aos quais é possível associar uma medida de desempenho quantitativa. São usadas se na análise das entrevistas for possível identificar extratos relativos à benefícios quantitativos concernentes as operações de planejamento e controle da irrigação.

Os especialistas 1, 3 e 26 ressaltam a diferença entre o utilizo dos termos "*uso*" e "*consumo*": "*A agricultura consome 70% da água. Ela não consome, absolutamente, usa no ciclo hidrológico*", especialista 1, "*A agricultura consume 70% da água do país, a agricultura não consome água, ela usa*", especialista 3.

Quanto às medidas de desempenho quantitativas, todos os especialistas destacam que a adoção envolve a redução de custos, no caso da irrigação redução de uso de água e de uso de energia. O especialista 3 afirma: "*No caso da agricultura de precisão para irrigação, o tema redução de custos é fundamental, pois o agricultor vai trabalhar minimizando recursos e otimizando insumos. As vantagens da adoção passam pela busca da redução de custos e, se possível, melhorar a produtividade. Esse é o que o agricultor busca em qualquer inovação tecnológica, inclusive na Agricultura 4.0 na irrigação*". Os especialistas 8, 20, 23, 25, 32 e 36 acrescentam que a adoção pode levar um uso racional de água em termos de irrigação na quantidade certa e mais próxima a necessidade de água da cultura, no tempo certo e no local certo. O uso racional de água leva a possibilidade de introduzir o uso de água a taxa variável, considerado a variabilidade espacial da lavoura, como relatado pelos especialistas 8 e 9: "*Para que o uso de água seja eficiente na irrigação, o conceito de Agricultura 4.0 é fundamental para aplicar a água onde é mais necessário de onde é menos necessário e para aplicar de forma diferenciada considerando a variabilidade espacial da lavoura. A adoção de Agricultura 4.0 permite, portanto, a gestão da irrigação a taxa variável*", especialista 9.

A redução de uso de água, e do relativo custo, tem um impacto na economia de energia para a irrigação, de acordo com os especialistas 1, 7, 11, 17 e 20: "*O agricultor vai ter uma economia de água muito grande porque ele vai conseguir definir qual é a quantidade de água exata para aquela área exata, talvez o mais próximo da realidade da demanda hídrica daquela cultura e com isso ele vai conseguir economizar energia elétrica que é um dos grandes problemas na agricultura irrigada, que a questão da grande demanda energética*", especialista 20. Os especialistas 1, 3, 32 e 34 ressaltam que a redução de uso de água, e do relativo custo, afeta também um aumento de produtividade da produção devido a eficiência na irrigação. O especialista 34 afirma que: "*A adoção de Agricultura de Precisão no uso de água para a irrigação permite agregar mais valor na produção por menos metros cúbicos utilizados de água. Então o agricultor tem economia de água, economia de energia, economia de mão de obra, diminuição de custos e isso vai gerar uma maior produtividade e uma melhor receita*". Portanto, a economia de água e a economia de energia elétrica têm um impacto positivo sobre os resultados econômicos da empresa agrícola, como lucro, receita e custo de produção, conforme afirmado também pelos especialistas 6, 15, 20 e 25.

No que se refere as medidas de desempenho qualitativas, as entrevistas permitem identificar também benefícios qualitativos relativos à gestão da irrigação, como afirmado pelos especialistas 12, 17 e 36. Os especialistas 12 enfatiza os benefícios de gestão em comparação com o aumento de produtividade: "*Existem outros benefícios além do aumento de*

produtividade, que são os benefícios de gestão. A adoção de Agricultura 4.0 tem um impacto maior em termos de ganho gerencial, comparado com o aumento de produtividade pela adoção da tecnologia". O especialista 8 acrescenta que o agricultor pode aumentar a competência de gestão, por exemplo no caso de irrigação com pivô central, por meio de sensores que fornecem dados para criar um mapa daquela área e aplicar a irrigação a taxa variável. As medidas de desempenho qualitativas envolvem também melhorias no planejamento da irrigação, em termos de redução de erro, segundo o especialista 9: "*E quanto mais dados tiver, o agricultor vai conseguir montar um planejamento da irrigação com menor erro*", e de aumento da eficiência, de acordo com o especialista 14: "*E tem uma decisão mais precisa do momento de vazão e de irrigação, porque o agricultor conseguiria trabalhar com sensores que dão essa precisão na informação para a tomada de decisões, e planejar o equipamento para que a irrigação seja mais efetiva*". O especialista 35 acrescenta a oportunidade de mudar de um planejamento muitas vezes baseado na experiência para uma metodologia e um conjunto de dados à disposição que tornam este planejamento mais automatizado, mais científico, mais fácil de ser operacionalizado. Além disso, a adoção permite obter melhorias no controle da irrigação, em termos de aumento da competência de gestão, por meio da adoção de sensores, satélites ou drones, para controlar o correto funcionamento dos recursos do sistema de irrigação, de acordo com o especialista 8. O especialista 29 acrescenta que esse controle vai se tornar muito mais detalhado, em termos de gastos de água para medir a eficiência da irrigação e a produtividade da safra.

A adoção de AP no contexto da Agricultura 4.0 pode levar benefícios graças a um acesso à dados mais organizados, segundo o especialista 25. O especialista 36 evidencia que: "*Em relação às vantagens da adoção, o melhor insumo para produzir e ganhar dinheiro é o conhecimento e se o agricultor consegue trabalhar com o conhecimento - em termos de acesso às dados e gestão de informações - de uma forma organizada ele consegue otimizar a gestão*". O acesso à dados mais organizados permite melhorar o planejamento e controle das operações, como relatado também pelos especialistas 8, 9, 35 e 36. O especialista 13 ressalta que: "*A vantagem é grande, de o agricultor ter dados, principalmente para gerenciar um recurso, a água, que é caro e é bastante complicado, para gerenciar os seus sistemas de irrigação e deixar de molhar e passa a gerenciar o fornecimento de água para a planta*".

Com base as citações dos especialistas, os benefícios da adoção de AP no contexto da Agricultura 4.0 podem ser relacionados ao acesso à dados agronômicos dos três pilares, cultura, solo e clima, segundo os especialistas 1, 7 e 20. Os especialistas 1, 20 e 36 ressaltam que esses dados podem ser usados para calcular a necessidade de água da cultura e a necessidade de água

de irrigação. O acesso à dados agronômicos é proporcionado e viabilizado pela adoção de diferentes dispositivos de sensoriamento IoT, como sensores, sondas de solo, drones e estações meteorológicas, de acordo com o especialista 8: "*Com a adoção de Agricultura 4.0 e de dispositivos como sensores, o agricultor começa a gerar dados em grande velocidade, em grande variedade e em grande volume. Ele consegue saber dados por exemplo de clima, da temperatura, se choveu se não choveu, isso quando ele espalha várias estações meteorológicas na área e esses dados chegam até o escritório para ele. Além disso o agricultor pode ter dados do solo também e com isso ele tem uma espécie de mapa daquela área. Então esses dados aumentam muito a capacidade de gestão do agricultor*". Além dos dispositivos IoT, o especialista 24 acrescenta também plataformas digitais, que podem disponibilizar o acesso à dados que possam estar sendo coletados por diferentes fontes, que possam estar sendo processados distante da propriedade e retornar com sugestões de aprimoramento de manejo.

O agricultor tem a possibilidade também de acesso à dados operacionais relativos as operações de irrigação, como disponibilidade de água para a irrigação, vazão, custo de uso de água, contrato de acesso à água (outorga), contrato de fornecimento de energia elétrica, de acordo com os especialistas 8, 10, 26, 27 e 36.

Os fatores concernentes as mudanças necessárias para a adoção de AP no contexto da Agricultura 4.0 são classificados em duas categorias: mudanças para o agricultor e mudanças para a empresa agrícola.

Quanto às mudanças para o agricultor, ele tem que se capacitar para adotar as tecnologias de AP no contexto da Agricultura 4.0, como relatado pelos especialistas 2, 3, 24 e 25. O especialista 25 afirma que: "*O agricultor tem que se capacitar, ou ter uma estrutura capacitada, para a adoção da tecnologia. Ele tem que estar preparado em termos de cultura e de conhecimento, para usar essa tecnologia. Se ele não entender bem, ele muito provavelmente não vai adotar de maneira correta*". O especialista 3 complementa que o agricultor tem que estar atualizado com as informações técnicas e com os equipamentos, dependendo do tamanho da empresa agrícola. Contudo, o especialista 2 ressalta que: "*A maioria dos agricultores não tem o treinamento e a educação formal que envolve essa transição de uma tecnologia bem rudimentar para uma mais sofisticada* ".

A capacitação inclui a capacitação técnica e a capacidade de gestão, como relatado pelo especialista 22. A capacitação técnica é necessária para a irrigação, de acordo com o especialista 26: "*O agricultor precisa se capacitar, ele precisa entender o que é a irrigação, o que é a agricultura irrigada*". O especialista 9 acrescenta a capacitação técnica em relação a variabilidade da lavoura: "*Para a adoção de AP para a irrigação no contexto da Agricultura*

4.0, o agricultor precisa entender que a lavoura tem variabilidade, em termos de análise de solo, precisa ser uma pessoa que esteja capacitado e possa desenhar essa variabilidade dentro do sistema de informação para utilizá-la para a gestão da irrigação“, enquanto o especialista 17 menciona também o conhecimento sobre a ciência da computação: “*A agricultura está caminhando para uma forma de atuação muito dependente da ciência da computação e da engenharia de comunicação. As inovações envolvem um grande conhecimento de ciência da computação e de matemática. O agricultor tem que estar familiarizado, ou vai ter que ser orientado, assessorado, por profissionais que tenham esse conhecimento*”

A capacitação inclui a capacitação gerencial em termos de capacidades específicas de análise de dados, de planejamento e gestão de novas tecnologias, como relatado pelos especialistas 5 e 15, que afirmam: “*Necessariamente precisa de mudanças na capacidade gerencial do agricultor e na qualificação da mão de obra, porque a adoção de Agricultura 4.0 envolve a introdução de um sistema de produção que demanda um conjunto de capacidades específicas, de análise de dados, de planejamento e manejo de maquinários para operar de acordo com o planejado*.” Os especialistas 2, 6, 10, 19, 22 e 33 evidenciam que essa mudança deve superar alguns desafios em termos de percepção pelo agricultor, baixos índices de educação, formação e treinamento, incluídos as áreas de engenharia de operações, administração e gestão. O especialista 10 enfatiza que: “*O planejamento não é fácil para o agricultor e não é fácil sequer para o técnico agrícola e para o agrônomo, porque ele não tem formação para essa operação, ele não foi formado para isso, ele entende pouco de engenharia de operações, e muitas vezes quem aconselha o agricultor também não tem essa formação”.*

Esses desafios são ligados à necessidade de mudar o modelo mental do agricultor, de acordo com os especialista 1, 11 e 29. O especialista 1 afirma que: “*A maior dificuldade é uma mudança de cultura. O agricultor mais tradicional, mais velho, conhece só no final quanto colheu e quanto dinheiro ganhou. Com a Agricultura 4.0 e Internet das Coisas o agricultor tem que trabalhar com a mesma cabeça com que a aviação trabalha. É tudo preventivo, é tudo calculado. Aquele parafuso o agricultor vai trocar porque ele vai quebrar. Então esse modelo hoje não existe fácil na mentalidade da maioria dos agricultores*”.

Essa mudança de modelo mental envolve a gestão da irrigação, gestão baseada em dados e a gestão da empresa agrícola como negócio. Em relação à gestão da irrigação, o agricultor precisa mudar a crença que irrigar é diferente de molhar e a agricultura irrigada é diferente da agricultura de sequeiro mais água, como destacado pelos especialistas 13, 20 e 26. O especialista 20 enfatiza que: “*Muitos agricultores acham que irrigar simplesmente é ligar o sistema de irrigação e ver a área molhada significa que consegui atender a demanda de água*

daquela cultura. Ainda, muitos agricultores acham que a irrigação localizada, a irrigação de gotejamento em que uma fração muito pequena de água está sendo aplicada, não é suficiente para a planta, quando na verdade é um sistema de irrigação que tem uma eficiência muito grande, permite uma economia de água e é suficiente para a cultura se desenvolver". O agricultor precisa também mudar o seu modelo mental para passar de uma gestão baseada na experiência para uma gestão baseada em dados, que leva benefícios para o planejamento das operações, como relatado pelo especialista 35. Contudo, para introduzir essa mudança precisa vencer o desafio do modelo mental do agricultor, que na maioria dos casos é baseado na experiência e na intuição, como relatado pelos especialistas 9, 23, 24 e 35. O especialista 24 afirma que: "*A primeira mudança é de gestão, o agricultor tem que se preparar para um nível de gestão mais avançado, a trabalhar com dados e a trabalhar menos com a intuição. Isso exige um preparo mental, estar aptos a fazer ajustes nas atividades e ser flexível no planejamento*". O especialista 1 acrescenta que: "*Com a adoção de Agricultura 4.0 o agricultor tem uma serie de dados, que sozinhos não querem dizer nada e que ele tem necessariamente aprender a ler esses dados, e transformar esses dados em informação, em conhecimento, em ação, curativa e preventiva*", enquanto o especialista 30 evidencia que: "*A cultura de muitos agricultores é baseada no conhecimento de família e de comunidade, transmitido de pai para filho, do que adoção de técnicas advindas de conhecimento tecnológico ou científico. Mesmo tendo instituições voltadas para fornecer esse conhecimento, existe um hiato entre o fornecedor do conhecimento, que leva a capacitação e a capacidade de compreensão, e o agricultor na adoção de técnicas da agricultura irrigada*".

Quanto à irrigação, a mudança para uma gestão baseada em dados também precisa compreender a conscientização do agricultor de que a água é um recurso escasso, como afirmado pelos especialistas 19, 28, 31 e 36. O especialista 19 destaca que: "*A agricultura tem que dar uma resposta a sociedade de como ela vai gerir a água, que é cada vez mais escassa. Muitos agricultores acharam que em algum momento a água era infinita, ao contrário é um recurso limitado, que em algumas bacias estão sendo bem escasso. E a adoção de Agricultura 4.0 é imprescindível para essa mudança*". A adoção de tecnologia como os dispositivos de sensoriamento IoT pode viabilizar essa mudança sobre a escassez da água, que deve ser levada em consideração na gestão da irrigação e que pode ser medida com um uso racional de água, de acordo com os especialistas 29 e 31. Além de tomar conscientização que a água é um recurso escasso, para a adoção de AP para a irrigação no contexto da Agricultura 4.0 o agricultor precisa entender que a lavoura tem variabilidade, segundo os especialistas 9 e 15. O especialista 9 destaca que: "*Para a adoção, o agricultor precisa entender que a lavoura tem variabilidade.*

Esse é o primeiro passo para o agricultor mudar de uma agricultura convencional para uma Agricultura de Precisão. A mudança por parte do agricultor é mais de atitude do que mudanças de equipamento no início. É mais uma questão de tempo que o produtor deve dispensar em cima dos dados e fazer um estudo para planejar o sistema de irrigação a taxa variável, desenhado de acordo com a variabilidade no solo".

No que se refere à gestão da empresa agrícola como negócio, o agricultor tem uma dificuldade muito grande na gestão, como relatado pelo especialista 21: "*O produtor tem uma dificuldade muito grande na questão da gestão, do controle administrativo, ele é um homem do campo, ele gosta de fazer e ver acontecer e quando entra na parte do gerenciamento, no controle e no planejamento, ele acha que isso não é para ele e ele negligência muito isso*". O especialista 32 complementa que a gestão da empresa agrícola deve incluir também o planejamento e controle da irrigação: "*O controle da irrigação é algo que tem que ser pensado sempre num processo de planejamento, que faz parte de todo o processo de gestão de uma propriedade*". Ainda, os especialistas 3 e 32 ressaltam que muitas vezes o produtor não conhece o custo da sua produção e não tem uma compreensão dos seus custos e das suas receitas, qualquer tecnologia que ele adota. O especialista 14 enfatiza os desafios do modelo mental do agricultor em relação ao controle da irrigação: "*Em relação ao controle da irrigação, a principal dificuldade é o hábito do agricultor ter os registros e fazer as anotações, fazer as conferências. É muito mais uma questão de gestão, uma disciplina que o agricultor precisa alcançar*".

Além das mudanças para o agricultor, a análise das entrevistas com os especialistas leva a identificar fatores que podem ser classificados na categoria mudanças para a empresa agrícola. Para a adoção de AP no contexto da Agricultura 4.0 a principal mudança é relativa à gestão da empresa agrícola como relatado pelo especialista 19: "*O agricultor tem que mudar o processo produtivo, ele não vai poder produzir como produzi antigamente. Ele vai ter inovações, ele vai ter que gerenciar a sua propriedade e seu recurso hídrico de forma melhor. Então acho que a gestão muda bastante*". A gestão da empresa agrícola deve ser construída nas funções básicas da administração, segundo o especialista 13: "*Para aproveitar da Agricultura 4.0 a empresa agrícola tem que ter as funções básicas da administração, que são o planejamento, a implementação e o controle. O que adianta o agricultor adotar uma tecnologia que vai coletar uma imensidade de dados, se ele não tem a capacidade de usar aquelas informações num contexto geral para tomar decisões*". O especialista 29 acrescenta mudanças nos aspectos organizacionais, como mecanismos de controle e indicadores de desempenho da gestão da empresa agrícola; enquanto o especialista 15 enfatiza também ao aspectos de integração entre

diferentes sistemas dentro de uma empresa agrícola para coletar e analisar os dados de produção e em seguida planejar e controlar a irrigação. Contudo, o especialista 26 evidencia que a gestão da empresa agrícola ainda é uma falha entre a maioria dos agricultores, especialmente os pequenos e médios produtores. As mudanças para a empresa agrícola evolvem também a gestão das operações, que não evoluí na mesma velocidade da gestão agronômica, de acordo com o especialista 15: "*A gestão das operações, ou seja planejamento e controle das operações, é algo que ficou um pouco atrasado nos últimos anos no Brasil. São aspectos na minha opinião da produção agropecuária que não evoluíram na mesma velocidade dos aspectos agronômicos*". Os especialistas 6 e 10 acrescentam que a gestão das operações é uma área pouco valorizado pelo agricultor porque ele tem pouco conhecimento.

Outro fator classificado nas mudanças para a empresa agrícola é a qualificação da mão de obra, que constitui uma das principais dificuldades a superar para a adoção da AP no contexto da Agricultura 4.0, de acordo com os especialistas 13, 15, 18, 21 e 28. O especialista 13 afirma que: "*Outra ação chave na adoção é a questão de capacitação da mão de obra, capacitação das pessoas que vão estar no campo implementando a tecnologia e que vão poder usar os dados coletados para tomar as decisões*". O especialista 2 evidencia que a qualificação é necessária também na área da gestão das operações, em que a mão de obra ainda tem pouco conhecimento.

É importante ressaltar que as mudanças relacionadas à adoção estudada devem ser gradativas, como destacado pelos especialistas 1, 8, 11, 13, 16, 21, 35. O especialista 21 afirma que: "*A Agricultura 4.0 tem várias etapas e o agricultor pode caminhar pelas etapas iniciais, que não envolvem a robotização, falando de tecnologia absolutamente disruptiva, inovadora. Existem tecnologias intermediárias que já têm um ganho muito grande e que talvez o agricultor consiga ter um acesso mais rápido. Portanto, o agricultor pode adotar com um processo mais gradual em que o custo-benefício é facilmente identificado*". Os especialistas 1 e 35 acrescentam que a adoção de Agricultura 4.0 não é um caminho único e o agricultor não adota todas as tecnologias envolvidas ao mesmo tempo, mas por exemplo pode entrar inicialmente com um satélite e depois com um drone.

A análise das respostas dos especialistas relativas às perguntas associadas ao construto Controle Comportamental Percebido permite identificar recursos e oportunidades disponíveis para o agricultor a seguir da adoção de AP no contexto da Agricultura 4.0. As categorias são modelos de gestão das operações inspirados à indústria e recursos.

Os especialistas 4, 5, 10 e 15 inspiram a adoção de modelos de planejamento e controle das operações, que consistem nos componentes: planejamento, programação e controle para a gestão da irrigação. O especialista 10 ressalta que esses modelos, como mapeamento de

processo, ainda não são aplicados na agricultura. Os especialistas sugerem modelos de planejamento e controle bem conhecidos da indústria, como PPC (Planejamento e Controle da Produção), PERT (*Program Evaluation and Review Technique* - Técnica de Avaliação e Revisão de Programas), CPM (*Critical Path Method* - Método do Caminho Crítico), mapeamento de processo (BOCHTIS; SORENSEN; KATERIS, 2018; SCARPELLI; BATALHA, 2001; SLACK; CHAMBERS; JOHNSTON, 2010). O especialista 10 afirma que: "*E têm ferramentas de planejamento, clássicas da indústria, que o agricultor poderia utilizar, como PERT e CPM. Como na implantação de um PPC, para o planejamento das operações o agricultor precisaria ter um mapeamento de processo, um fluxo de produção, as atividades, os tempos, os custos das máquinas, da mão de obra, previsão de demanda. Com essas informações o agricultor consegue fazer um sistema decente de apoio à tomada de decisões*". No entanto, para o planejamento e o controle da irrigação na inspiração para os modelos industriais é preciso considerar o desafio do fator "clima", segundo os especialistas 4 e 5.

Outra oportunidade disponível para o agricultor, a seguir da adoção de AP no contexto da Agricultura 4.0, é constituída pelos modelos de gestão colaborativa, como relatado pelos especialistas 25, 31, 34 e 36. O especialista 25 sugere o utilizo de um processo de alocação negociada de água: "*O órgão gestor de recursos hídricos pode conversar com os produtores para verificar quem vai plantar, quem não vai, quem vai irrigar e quem não vai irrigar, para dividir a disponibilidade de água no período mais crítico e evitar que o agricultor plante e não possa colher*". O especialista 34 inspira a adoção de um modelo de gestão no tempo certo (*Just-in-Time* - JIT) para o controle do utilizo das motobombas dos sistemas de irrigação, com o objetivo de monitorar a captação de água nas empresas agrícolas. Os especialistas destacam que a adoção desses modelos de gestão colaborativa permite superar alguns desafios relacionados ao planejamento e controle da irrigação no caso de gestão compartilhada de recursos hídricos, como a garantia, para o agricultor, de disponibilidade de água ao longo de uma safra.

Quanto ao construto Controle Comportamental Percebido, a análise das entrevistas identifica também a categoria recursos, que inclui insumos, hardware, pessoas. Esses recursos são necessários para a gestão das informações concernentes o planejamento das operações, de acordo com o especialista 5, e também para o controle das operações, como relatado pelo especialista 8: "*Para o controle da irrigação também são utilizadas imagens aéreas de satélite, através de cálculo de índice de vegetação*".

Os recursos - insumos incluem água (especialistas 11, 17, 23 e 26) e energia (especialistas 1, 11, 17, 18 e 27).

Os fatores classificados como hardware são: sensores (especialistas 8, 12, 14), drones (especialistas 1, 8, 32, 35), satélites (especialistas 1, 8, 32, 35), máquinas agrícolas (especialistas 8, 10, 24), equipamentos agrícolas (especialistas 8, 12, 14), sistema de medição para o acesso à água (especialista 11, 34), sistema de gestão da irrigação (especialistas 11, 14, 36). A adoção de recursos - hardware permite conseguir benefícios para o planejamento das operações, como no caso de sensores para o planejamento da irrigação: "*Se o agricultor conseguir trabalhar com sensores, ele tem uma informação mais precisa do momento em que captar a água e aplicar a irrigação. O agricultor pode planejar o sistema de irrigação para que a irrigação seja mais efetiva*", especialista 14", e para o controle da irrigação: "*O agricultor pode aumentar a competência de gestão, por meio de sensores, para controlar se alguma máquina e equipamento agrícola está danificado, quebrado ou parado. Por exemplo no caso de pivô central, através de imagens de satélite, de drone ou sensores o agricultor vai identificar que a pressão abaixou, que um pulverizador por exemplo deu um problema*", especialista 8.

Em relação aos recursos - pessoas, os especialistas 11, 12, 17 e 32 destacam o papel dos consultores como oportunidade para as empresas agrícolas no planejamento da irrigação. O especialista 12 destaca que: "*As empresas que prestam serviços sobre o planejamento da irrigação obtêm os dados dos equipamentos, dos sensores e têm uma equipe que processa esses dados e faz recomendações para o agricultor*". Esses serviços são contratados prevalentemente pelos grandes produtores, que têm normalmente uma mão de obra especializada e precisam de consultoria para apoiar o agricultor no planejamento da irrigação, como relatado pelo especialista 11. O especialista 17 acrescenta que, por efeito da complexidade das tecnologias de AP, o produtor que vai adotar precisa da prestação de serviços de um especialista.

Com base as citações dos especialistas, a adoção de AP no contexto da Agricultura 4.0 pode ser afetada também pelas características do agricultor, pelas características da empresa agrícola e pelas características das tecnologias, como destacado pelo especialista 10: "*A aplicação das ferramentas incluídas no conceito de Agricultura 4.0 na agricultura vai ter velocidades diferentes, segundo as regiões do País, as características da propriedade e do agricultor, os tipos de produto. Em algumas culturas e algumas propriedades a Agricultura 4.0 deve chegar mais rapidamente*", e pelo especialista 14: "*Em relação à adoção, acho que tem que ter adaptação para perfis diferentes de produtores, em termos de tamanho da empresa agrícola, tipo de equipamentos, nível de instrução, mão de obra, estrutura do sistema de produção, nível tecnológico*".

As características do agricultor incluem idade (especialistas 17 , 23), nível educacional (especialistas 2, 13, 17, 18, 19, 29, 30, 32), renda (especialistas 7, 18, 32), experiência em

agricultura (especialistas 23, 29), familiaridade com tecnologias (especialistas 8, 17), família de agricultores (especialistas 29, 30), conservadorismo (especialistas 1, 3, 6, 22, 23, 25, 30), capacitação gerencial (especialistas 5, 15, 19), capacidade de absorção (especialistas 9, 13), propensão ao risco (especialistas 7, 12, 14, 25, 35), capacidade de inovação (especialistas 12, 14).

Em relação aos objetivos dos cenários de simulação de estudar também os benefícios da adoção de tecnologias de AP no contexto da Agricultura 4.0, e de acordo com a importância do construto Atitude para os benefícios associados à adoção e percebidos pelo agricultor (BUSSE et al., 2014; EDWARDS-JONES, 2006; THOMPSON et al., 2019), é importante ressaltar a característica do agricultor "conservadorismo", como destacado pelo especialista 3: "*O produtor rural não acredita nas coisas, ele quer ver as coisas*". O especialista 30 complementa: *"Para o agricultor confiar numa inovação, ele precisa ver onde funcionou, isso deu certo em um lugar, foi testado, têm resultados e como ele pode adotar*". Enquanto o especialista 23 afirma que: "*O agricultor não acredita e normalmente diz: esse negócio não vai dar certo, eu vou gastar dinheiro e acho que não vai ter retorno, porque esse sistema de irrigação aplica só uma gotinha caindo no solo*".

Como relatado pelo especialista 10, a adoção de AP no contexto da Agricultura 4.0 pode ser afetada também pelas características da empresa agrícola: "*A aplicação das ferramentas incluídas no conceito de Agricultura 4.0 na agricultura vai ter velocidades diferentes, segundo as características da propriedade*". As características da empresa agrícola incluem tamanho da empresa agrícola - empresa familiar, empresa industrial (especialistas 11, 14, 25, 26, 30), localização da empresa agrícola (especialistas 10, 18, 34), tipo de cultura (especialistas 10, 17, 32, 34), associativismo e cooperativismo (especialistas 11, 12, 33), volume de produção (especialistas 11, 32), rentabilidade de produto (especialistas 13, 27, 32). O "associativismo e cooperativismo" é um fator que pode favorecer a adoção de tecnologias e também o utilizo de modelos de gestão das operações de irrigação, como a contratação de serviços de consultores, de acordo com o especialista 12: "*Os produtores vão encontrar dificuldades porque muitos deles não teriam o tempo para se dedicar ao planejamento ou até mesmo conhecimentos necessários para fazer as análises dos dados e elaborar um planejamento adequado. Então. está crescendo muito a terceirização, serviços de consultores técnicos ou via cooperativa, que fornece os equipamentos e ao mesmo tempo a consultoria aos produtores*", e também segundo o especialista 33: "*Se o agricultor está vinculado a uma cooperativa ele tem um volume de informações muito maior. A cooperativa também disponibiliza os insumos e a assistência técnica, tem uma série de aportes que podem auxiliar no planejamento das operações*".

As características das tecnologias incluem tipo de tecnologia (especialistas 29, 33, 34), tipo de equipamento (especialista 14), preço (especialistas 2, 18, 27), complexidade (especialistas 15, 17). Além do fator preço, citado por exemplo pelos especialistas 2, 18 e 27, outros fatores classificados nas características das tecnologias podem afetar a adoção pelo agricultor. O especialista 14 evidencia que o tipo de equipamento pode afetar a adoção: *"Em relação à adoção, acho que a tecnologia precisa ser adaptada ao tipo de equipamento em questão, além de perfis diferentes de produtores e de tamanho da empresa agrícola*", enquanto o especialista 33 ressalta o tipo de tecnologia: "*Acredito que a necessidade do agricultor em conhecer melhor o tipo de tecnologia em questão pode facilitar a adoção. Muitas tecnologias, dependendo do tamanho da propriedade e da renda, são completamente inviáveis*".

5.3 FATORES QUE PODEM AFETAR A ADOÇÃO RESULTANTES DOS ESTUDOS DE CASO

Para a realização dos estudos de caso foram selecionados o piloto MATOPIBA do projeto SWAMP e a "Empresa agrícola Bahia", cujo proprietário tinha interesse em experimentar sistemas avançados de irrigação. Uma amostragem teórica foi adotada (EISENHARDT, 1989), em razão das características das empresas ligadas a teoria e a literatura abordadas na tese, como explorar os fatores que afetam a adoção de AP no contexto da Agricultura 4.0 em empresas agrícolas - tamanho industrial e em sistema de irrigação de pivô central. A escolha da "Empresa agrícola Bahia" foi também consistente com o objetivo do projeto SWAMP de replicar os resultados em termos de modelos e soluções propostas, entre elas o modelo de gestão das operações de irrigação. Além disso, a "Empresa agrícola Bahia", familiarizada com a participação em projetos de pesquisa, disponibilizou dados quantitativos da gestão das operações de irrigação para a realização de simulações, e, consequentemente, atingir o objetivo de pesquisa de construir um modelo de simulação para estudar as relações entre os fatores identificados no modelo de gestão das operações de irrigação.

O protocolo de pesquisa utilizado nos estudos de caso foi elaborado com as perguntas a serem aplicadas nas entrevistas e os dados específicos a serem coletados (AJZEN, 1991; EISENHARDT, 1989; JUMMAN, 2016). Entrevistas com o gerente do piloto MATOPIBA foram realizadas entre janeiro de 2020 e dezembro de 2021, e com o gerente da "Empresa agrícola Bahia" entre junho de 2021 e dezembro de 2021. Por causa da pandemia de coronavírus, não foi possível visitar as duas empresas agrícolas.

As perguntas baseadas na TPB foram as mesmas do questionário usado para as entrevistas com os especialistas. Em vez da palavra “Agricultura 4.0”, foi feita referência a sensores e drones, para serem equipamentos que o agricultor poderia identificar como representativos de tecnologias inovadoras para a irrigação, bem como equipamentos incluídos no contexto da Agricultura 4.0. A unidade de análise foi a empresa agrícola, de acordo com o objetivo do projeto SWAMP e das perguntas de pesquisa (YIN, 2001).

As entrevistas começaram delineando os objetivos de pesquisa. As perguntas foram formuladas de forma inequívoca, garantindo que fossem de fácil compreensão e perguntas de esclarecimento foram feitas a fim de completar a coleta de dados (AYERDI GOTOR et al., 2020). As respostas foram classificadas de acordo com os construtos da TPB (AJZEN, 1991; HOME et al., 2014). Os fatores que podem afetar a adoção de AP no contexto da Agricultura 4.0 resultantes dos casos foram classificados e apresentados de acordo com as categorias e fatores resultantes da fundamentação teórica. Esses fatores, ilustrados no Quadro 10, foram triangulados com os resultados das entrevistas com os especialistas (FLICK, 2009; YIN, 2001).

Para identificar os fatores ilustrados no Quadro 10, as categorias e fatores, resultantes da revisão da literatura e das entrevistas com os especialistas, foram aplicados aos dados coletados nos estudos de caso para realizar uma análise dentro de caso (*within-case analysis*), que envolve redações detalhadas para cada estudo de caso, e pesquisa cruzada de padrões entre os casos (*cross-case pattern search*) (EISENHARDT, 1989). Os fatores identificados após a análise dentro de cada caso são ilustrados em cada coluna do Quadro 10, enquanto a pesquisa cruzada realizada considerando os fatores em cada linha permite identificar os padrões entre os dois casos, descritos no texto que ilustra o conteúdo do quadro.

Quadro 10 - Fatores que podem afetar a adoção resultantes dos estudos de caso

Categorias	**Fatores**	**Empresa agrícola Bahia**	**Piloto MATOPIBA**
Características do agricultor	Nível educacional	Graduação (Engenharia Agronômica)	Graduação (Engenharia Agronômica)
	Idade	30-35 anos	30-35 anos
	Conservadorismo	Baixo	Baixo
	Propensão ao risco	Sim	Sim
	Capacidade de inovação	Sim	Sim
Características da empresa agrícola	Tamanho da empresa agrícola	Empresa industrial 9.800 hectares (1.600 irrigados)	Empresa industrial 915 hectares (700 irrigados)
	Distância sede - campos cultivados	6 km de largura e 17 km de comprimento, sede localizada a 7 km da entrada	Pivô mais próximo em 700 metros, pivô mais distante em 4 km
	Localização da empresa agrícola	Estado de Bahia	Estado de Bahia
	Tipo de cultura	Soja e milho	Soja, milho, sorgo e algodão

Continua...

Categorias	Fatores	Empresa agrícola Bahia	Piloto MATOPIBA
Medidas de desempenho	Quantitativas	Necessidade de água da cultura, uso de água, uso de energia, custo de uso de água, custo de uso de energia, produtividade, lucro, receita, custo de produção	Necessidade de água da cultura, uso de água, uso de energia, custo de uso de água, custo de uso de energia, produtividade, lucro, receita, custo de produção
	Qualitativas	Benefícios de gestão, melhorias no planejamento da irrigação, melhorias no controle da irrigação	Benefícios de gestão, melhorias no planejamento da irrigação, melhorias no controle da irrigação
Acesso à dados	Acesso à dados agronômicos	Estação meteorológica, sistema de gestão da irrigação	Estação meteorológica, sistema de gestão da irrigação
	Acesso à dados operacionais	Contrato de acesso à água (outorga), contrato de fornecimento de energia elétrica, sistema de gestão da irrigação	Contrato de acesso à água (outorga), contrato de fornecimento de energia elétrica, sistema de gestão da irrigação
Mudanças para o agricultor	Capacitação técnica	Gerente capacitado, consultores	Gerente capacitado, consultores
	Capacitação gerencial	Empresa industrial com acesso à mercado	Empresa industrial com acesso à mercado
	Modelo mental	Minimização custo de uso de energia elétrica, falta de definição do custo de uso de água	Minimização custo de uso de energia elétrica, falta de definição do custo de uso de água
	Gestão da irrigação	Sim (irrigar e não molhar), mas ainda não cobrança pelo uso de água	Sim (irrigar e não molhar), mas ainda não cobrança pelo uso de água
	Gestão baseada em dados	Sim, também experiência Projetos de irrigação em andamento (uso de água a taxa variável)	Sim, também experiência Projetos de irrigação em andamento (sonda de solo, uso de água a taxa variável)
	Gestão da empresa agrícola como negócio	Sim	Sim
Mudanças para a empresa agrícola	Gestão da empresa agrícola	Empresa industrial	Empresa industrial
	Gestão das operações	Área pouco valorizada, gerente não capacitado	Área pouco valorizada, gerente não capacitado
	Qualificação da mão de obra	Nível educacional baixo	Nível educacional baixo
Modelos de gestão das operações inspirados à indústria	Modelos de planejamento e controle das operações	Área pouco valorizada, gerente não capacitado Planejamento da irrigação (semanal, sistema de gestão da irrigação, consultores) Estimativa da necessidade de água da cultura (balanço hídrico) Controle da irrigação (mecânico e manual, experiência)	Área pouco valorizada, gerente não capacitado Planejamento da irrigação (semanal, sistema de gestão da irrigação) Estimativa da necessidade de água da cultura (balanço hídrico) Controle da irrigação (mecânico e manual, experiência)
Recursos	Fontes de água	Rio, outorga para acesso à água (tempo, volume e custo não formalizados)	Rio, outorga para acesso à água (tempo, volume e custo não formalizados)
	Energia	Bombas elétricas, motores elétricos	Bombas elétricas, motores elétricos

Continua...

Conclusão.

Categorias	Fatores	Empresa agrícola Bahia	Piloto MATOPIBA
	Máquinas agrícolas, equipamentos agrícolas	17 pivôs centrais	7 pivôs centrais, reservatório
	Estação meteorológica	Localizada na empresa	Localizada na empresa
	Sistema de comunicação	Internet - 4G	Internet - 4G
	Sonda de solo	Não adotada	Projeto de pesquisa
	Satélite	Não adotado	Não adotado
	Sistema de gestão da irrigação	Sim	Sim
	Trabalhadores	25 trabalhadores agrícolas	16 trabalhadores agrícolas
	Consultores	Planejamento da irrigação, renovação do contrato de acesso à água, controle do uso de energia elétrica	Gestão do contrato de acesso à água

Fonte: Autor

No que se refere à análise dentro de caso (*within-case analysis*), a "Empresa agrícola Bahia" é administrada por um gerente, com idade entre 30 e 35 anos e formado em Engenharia Agrícola. A percepção do autor é que o conservadorismo do gerente é baixo e que ele tem propensão ao risco em relação a adotar inovações. A empresa agrícola, localizada no Estado de Bahia, pode ser classificada como empresa industrial, de acordo com IBGE (2017). A área de pesquisa da "Empresa agrícola Bahia" é de 80,23 hectares.

Medidas quantitativas relativas ao uso de água e de energia elétrica são utilizadas na empresa, como necessidade de água da cultura, uso de água, uso de energia, custo de uso de água, custo de uso de energia, além de medidas econômicas como produtividade, lucro, receita e custo de produção. Quanto às medidas de desempenho qualitativas, os resultados do estudo de caso permitem propor medidas concernentes a gestão, melhorias no planejamento da irrigação e no controle da irrigação, como aumento da competência de gestão do gerente (especialistas 8, 17, 36), redução do erro do planejamento da irrigação (especialista 9), aumento da eficácia do planejamento da irrigação (especialistas 8, 14) e aplicação de uma metodologia que torna o planejamento mais automatizado e mais científico (especialistas 29, 35).

Em relação às acesso à dados agronômicos, uma estação meteorológica, localizada dentro da "Empresa agrícola Bahia", disponibiliza dados meteorológicos. Dados de cultivo, de solo e dados históricos de irrigação são acessíveis através do sistema de gestão da irrigação. Quanto ao acesso à dados operacionais, o sistema de gestão da irrigação disponibiliza alguns dados de resumo, como produtividade, receita e custo total por pivô central. O contrato de

fornecimento de energia elétrica disponibiliza os dados de tempo de funcionamento e de custo de uso de energia nos diferentes períodos noturno, diurno e no pico.

Relativamente às mudanças para o agricultor, o gerente possui competências técnicas e gerenciais, visto que é formado em Engenharia Agrícola, que a empresa é classificada como industrial e é administrada como negócio. A gestão é baseada em dados e método científico (como o utilizo do balanço hídrico para a estimativa da necessidade de água da cultura), embora a experiência ainda seja um fator presente no planejamento e controle da irrigação. No entanto, as capacidades relacionadas com a gestão das operações são limitadas, em razão da pouca valorização desta área. Além disso, em relação à adoção de tecnologias de AP no contexto da Agricultura 4.0, a empresa tem a possibilidade de acesso ao mercado de tecnologias, recursos financeiros e educação. Consequentemente, essas mudanças não representam grandes desafios para o gerente.

O seu modelo mental é atualmente voltado para a minimização do custo de uso de energia elétrica, por efeito da falta de definição do custo de uso de água na vigente outorga.

O gerente é consciente que as principais mudanças são gerenciais e relacionadas à necessidade de treinamento para conhecer as novas ferramentas e aprender a ler corretamente os dados, para gerenciar o planejamento e controle da irrigação.

A respeito das mudanças para a empresa agrícola, o estudo de caso presenta duas mudanças. A primeira envolve a gestão das operações dado que essa é uma área pouco valorizada na empresa agrícola e que o gerente não é capacitado. A segunda mudança é relacionada com a qualificação da mão de obra no caso da adoção de tecnologias de AP no contexto da Agricultura 4.0, em razão do baixo nível educacional dos trabalhadores agrícolas da empresa. Esses dois desafios podem ser superados considerado o tamanho de empresa industrial, as suas possibilidades de acesso ao mercado, o baixo conservadorismo, a propensão ao risco e a capacidade de inovação do gerente. Também em relação às modelos de gestão das operações inspirados à indústria o estudo de caso evidencia uma lacuna na adoção de modelos de planejamento e controle das operações pela pouca valorização da gestão das operações e baixa capacitação gerencial do gerente.

O gerente da “Empresa agrícola Bahia” utiliza um sistema de gestão da irrigação para o planejamento da irrigação. As estimativas da necessidade de água da cultura, da necessidade de água de irrigação planejada e do tempo de irrigação planejado são realizadas semanalmente por consultores, utilizando o método do balanço hídrico. Os dados meteorológicos são coletados por meio de uma estação localizada na empresa. Com base no contrato de fornecimento de energia elétrica são definidos o tempo de funcionamento noturno (das 21:00 às 6:00), o tempo

de funcionamento diurno (das 6:00 às 18:00) e o tempo de funcionamento no pico (das 18:00 às 21:00) de operação dos pivôs centrais. O objetivo de planejamento do gerente é a minimização do custo de uso de energia elétrica para aproveitar do tempo de funcionamento noturno: "*A prioridade é aproveitar o horário reservado para a irrigação, que é 9 horas por noite. Mas a irrigação é realizada durante o dia também, no máximo 4 horas. Durante a manhã, então os funcionários vão desligar, às 10-11:00 quase todos os pivôs estão desligados às 11:00*".

Quanto ao controle da irrigação, o gerente analisa manualmente a umidade do solo com base na experiência. Também as operações de controle dos pivôs são realizadas manualmente, considerado o desafio da qualidade da energia, como relatado pelo gerente da "Empresa agrícola Bahia": "*Apesar de ter 17 pivôs, nosso sistema de irrigação é tudo manual, ainda, porque a qualidade da energia elétrica é muito ruim*".

Em relação aos recursos, a fonte de água para irrigação é um rio. A outorga para acesso à água é formalizada, mas o custo de uso de água de irrigação, os tempo e volume de captação ainda não são definidos. A técnica de irrigação é o pivô central. A "Empresa agrícola Bahia" utiliza 17 pivôs, todos movidos por bombas e motores elétricos. Quanto aos dispositivos de sensoriamento IoT, a empresa adota uma estação meteorológica, o satélite ainda não é adotado. Relativamente ao recurso pessoas, o gerente lidera 25 funcionários.

No que se refere ao piloto MATOPIBA, a empresa é administrada por um gerente, com idade entre 30 e 35 anos, formado em Engenharia Agrícola, com baixo conservadorismo e com propensão ao risco em relação a adotar inovações. Também essa empresa, localizada no Estado de Bahia, pode ser classificada como empresa industrial, de acordo com IBGE (2017). A área de pesquisa do piloto MATOPIBA é de 105 hectares.

Medidas quantitativas relativas ao uso de água e de energia elétrica são utilizadas também no piloto MATOPIBA. Os resultados do estudo de caso permitem propor medidas de desempenho qualitativas referentes a gestão, melhorias no planejamento da irrigação e melhorias no controle da irrigação.

O gerente do piloto MATOPIBA utiliza uma estação meteorológica, localizada dentro da empresa, e um sistema de gestão da irrigação para ter acesso à dados agronômicos, enquanto utiliza o contrato de acesso à água (outorga) e o contrato de fornecimento de energia elétrica, além do sistema de gestão da irrigação, para acessar à dados operacionais.

Quanto às mudanças para o agricultor, também o gerente do piloto MATOPIBA possui competências técnicas e gerenciais, apesar da experiência ainda seja um fator presente no planejamento e controle da irrigação, e da pouca valorização da gestão das operações. Essas

mudanças, principalmente gerenciais, não representam grandes desafios para o gerente, em razão da possibilidade de acesso ao mercado de tecnologias, recursos financeiros e educação. Em relação à capacitação técnica, o principal desafio para o gerente do piloto MATOPIBA é a decisão sobre onde irrigar, com base na tecnologia de sensoriamento IoT de sonda de solo e, portanto, implementar a irrigação a taxa variável. Se o gerente puder usar a quantidade de água necessária de acordo com o tipo de solo e a capacidade de retenção de água de cada zona do pivô, ele será capaz de otimizar os recursos hídricos e financeiros.

O seu modelo mental é atualmente voltado para a minimização do custo de uso de energia elétrica, por efeito da falta de definição do custo de uso de água na vigente outorga.

Relativamente às mudanças para a empresa agrícola, o estudo de caso presenta as duas mudanças identificadas na "Empresa agrícola Bahia" e relacionadas com a gestão das operações e com a qualificação da mão de obra.

O gerente do piloto MATOPIBA gerencia o planejamento da irrigação com o apoio de um sistema de gestão da irrigação. A necessidade de água da cultura é estimada semanalmente por meio de uma abordagem baseada no balanço hídrico, que utiliza dados de previsão de tempo, umidade de solo, capacidade de campo, evapotranspiração (obtida por meio da estação meteorológica), demanda da cultura de acordo com os seus estágios de desenvolvimento. A necessidade de água de irrigação e o tempo de irrigação são planejados com base no custo de uso de energia elétrica que define como prioridade o tempo de funcionamento noturno, com horário de início da irrigação (21:00 horas) e horário de fim da irrigação (6:00 horas) dos pivôs centrais. O gerente executa a irrigação noturna, que é mais econômica, dado que o custo de uso de energia elétrica noturno é dez vezes menor do que durante o dia. Ele afirma que: "*A irrigação noturna é o que viabiliza o negócio*". Quanto ao controle da irrigação e as operações de controle dos pivôs, essas operações são realizadas manualmente com base na experiência.

Em relação aos recursos, a fonte de água para irrigação é um rio. A outorga para acesso à água é formalizada, mas o custo de uso de água de irrigação, os tempo e volume de captação ainda não são definidos. A técnica de irrigação é o pivô central. No piloto MATOPIBA 7 pivôs são utilizados. Quanto aos dispositivos de sensoriamento IoT, o gerente adota uma estação meteorológica, localizada nas empresas. O satélite ainda não é adotado. No piloto MATOPIBA trabalham 16 funcionários.

No que concerne à pesquisa cruzada de padrões entre os casos (*cross-case pattern search*), as duas empresas apresentam fatores homogêneos em termos de características do agricultor, características da empresa agrícola (principalmente tamanho da empresa agrícola – empresa industrial, localização da empresa), medidas de desempenho quantitativas e

qualitativas, acesso à dados agronômicos, acesso à dados operacionais, mudanças para o agricultor e mudanças para a empresa agrícola, modelos de gestão das operações inspirados à indústria, recursos (fontes de água, energia, técnica de irrigação, estação meteorológica, satélite, sistema de gestão da irrigação).

Em relação às acesso à dados agronômicos e ao acesso à dados operacionais, o sistema de gestão da irrigação utilizado pela "Empresa agrícola Bahia" e pelo piloto MATOPIBA é fornecido pela mesma empresa. Em ambas as empresas o contrato de acesso à água (outorga) é formalizado, mas o custo de uso de água, os tempo e volume de captação não são definidos.

Quanto às mudanças para o agricultor, no piloto MATOPIBA o gerente está realizando um projeto de irrigação com o objetivo de experimentar a adoção de sonda de solo e de realizar a irrigação a taxa variável.

Relativamente aos modelos de gestão das operações inspirados à indústria, no piloto MATOPIBA o planejamento da irrigação é gerenciado pelo gerente, enquanto no caso da "Empresa agrícola Bahia" as estimativas da necessidade de água da cultura, da necessidade de água de irrigação planejada e do tempo de irrigação planejado são realizadas por consultores.

A respeito dos recursos, as duas empresas apresentam algumas características heterogêneas no sistema de irrigação. No piloto MATOPIBA 2 pivôs são alimentados por bombas elétricas, incluindo o pivô piloto; os demais pivôs são abastecidos por meio de um reservatório localizado no meio da empresa agrícola. O reservatório, com capacidade de 150.000 m^3, permite reduzir a evaporação (em torno de 20%) durante a distribuição de água. Na "Empresa agrícola Bahia" todos os 17 pivôs são abastecidos diretamente da fonte de água. Quanto aos dispositivos de sensoriamento IoT, o piloto MATOPIBA está realizando um projeto de pesquisa para a adoção de sondas de solo. Relativamente ao recurso pessoas - consultores, no piloto MATOPIBA o gerente é auxiliado por consultores especialistas de engenharia agronômica para o planejamento da necessidade de água de irrigação e o tempo de irrigação. Ainda, ele utiliza consultoria empresarial para o controle do uso de energia elétrica, para a gestão da relativa conta e para algumas questões inerentes o órgão fornecedor de energia elétrica relacionadas a demanda contratada, que determina um alto custo fixo mensal, e a baixa qualidade da energia elétrica. O gerente da "Empresa agrícola Bahia" compra serviços de consultoria empresarial para a renovação do contrato de acesso à água (outorga) e consultoria técnica para controlar em remoto o uso de energia elétrica semanalmente.

5.4 RESULTADOS DA ABORDAGEM INDUTIVA: PROPOSIÇÕES TEÓRICAS

De acordo com a proposta de combinar uma abordagem indutiva com uma dedutiva (HAIR; PAGE; BRUNSVELD, 2016), os resultados da primeira fase qualitativa desse projeto de tese permitem gerar ideias e formular proposições teóricas para explicar as relações entre a adoção e os fatores identificados nas entrevistas com os especialistas e nos estudos de caso. As proposições teóricas fornecem uma base sólida na modelagem da simulação na gestão das operações (FLYNN et al., 1990) e para orientar a pesquisa futura. A seguir as proposições teóricas são ilustradas, na ordem das categorias e dos fatores apresentados nos Quadros 9 e 10.

Proposição teórica 1a. A adoção de Agricultura de Precisão no contexto da Agricultura 4.0 permite conseguir vantagens e benefícios que podem ser mensurados por meio de medidas de desempenho quantitativas. Essa proposição é suportada pelas seguintes ideias: a adoção envolve a redução de custos, no caso da irrigação redução de uso de água e de uso de energia; a redução de uso de água, e do relativo custo, afeta também um aumento de produtividade da produção devido a eficiência na irrigação; a economia de água e a economia de energia elétrica têm um impacto positivo sobre os resultados econômicos da empresa agrícola, como lucro, receita e custo de produção. ***Proposição teórica 1b***. A adoção de AP no contexto da Agricultura 4.0 permite obter vantagens e benefícios que podem ser mensurados por meio de medidas de desempenho qualitativas, como aumento da competência de gestão, melhorias no planejamento da irrigação, melhorias no controle da irrigação.

Proposição teórica 2. A adoção de AP no contexto da Agricultura 4.0 pode levar a benefícios graças à um acesso à dados mais organizados. ***Proposição teórica 2a***. O acesso à dados mais organizados permite melhorar o planejamento e controle das operações. ***Proposição teórica 2b***. Os benefícios da adoção de AP no contexto da Agricultura 4.0 podem ser relacionados também ao acesso à dados agronômicos dos três pilares cultura, solo e clima. ***Proposição teórica 2c***. Esses dados podem ser usados para calcular a necessidade de água da cultura e a necessidade de água de irrigação. ***Proposição teórica 2d***. O acesso à dados agronômicos é proporcionado e viabilizado pela adoção de diferentes dispositivos de sensoriamento IoT, como sensores, sondas de solo, drones e estações meteorológicas. ***Proposição teórica 2e***. A adoção de AP no contexto da Agricultura 4.0 permite conseguir benefícios graças à possibilidade também de acesso à dados operacionais concernentes as operações de irrigação. ***Proposição teórica 2f***. O sistema de gestão da irrigação disponibiliza alguns dados de resumo, como produtividade, receita e custo total por pivô central. ***Proposição teórica 2g***. O contrato de fornecimento de energia elétrica disponibiliza os dados de tempo de funcionamento e de custo de uso de energia nos diferentes períodos noturno, diurno e no pico; com base no contrato de fornecimento de energia elétrica são definidos o tempo de

funcionamento noturno, diurno e no pico de operação do pivô central. ***Proposição teórica 2h***. O contrato de acesso à água (outorga) coloca à disposição os dados de custo de uso de água, tempo de captação e volume de captação.

Proposição teórica 3. A adoção de AP no contexto da Agricultura 4.0 exige mudanças para o agricultor. ***Proposição teórica 3a***. Para adotar as tecnologias de AP no contexto da Agricultura 4.0 o agricultor tem que se capacitar. Essa proposição é suportada pelas seguintes ideias: a capacitação inclui a capacitação técnica e a capacidade de gestão; a capacitação compreende a capacitação gerencial em termos de capacidades específicas de análise de dados, de planejamento e gestão de novas tecnologias. ***Proposição teórica 3b***. A adoção de AP no contexto da Agricultura 4.0 exige mudanças no modelo mental do agricultor, que envolvem a gestão da irrigação. Essa proposição é suportada pela ideia da necessidade de mudar a crença que irrigar é diferente de molhar e que a agricultura irrigada é diferente da agricultura de sequeiro mais água. ***Proposição teórica 3c***. As mudanças no modelo mental do agricultor envolvem também a gestão baseada em dados. Essa proposição é suportada pela ideia que passar de uma gestão baseada na experiência para uma gestão baseada em dados permite obter benefícios para o planejamento das operações. ***Proposição teórica 3d***. As mudanças no modelo mental do agricultor abrangem também a conscientização do agricultor de que a água é um recurso escasso. Essa proposição é suportada pelas seguintes ideias: a adoção de tecnologias como os dispositivos de sensoriamento IoT pode viabilizar essa mudança sobre a escassez da água; para a adoção, o agricultor precisa entender que a lavoura tem variabilidade. ***Proposição teórica 3e***. As mudanças no modelo mental do agricultor envolvem também a gestão da empresa agrícola como negócio. Essa proposição é suportada pelas seguintes ideias: a gestão da empresa agrícola deve incluir o planejamento e controle da irrigação; o produtor muitas vezes não conhece o custo da sua produção e não tem uma compreensão dos seus custos e das suas receitas. ***Proposição teórica 3f***. Para superar os desafios relacionados às mudanças, o agricultor pode acessar ao mercado de tecnologias, de recursos financeiros e de educação.

Proposição teórica 4. A adoção de AP no contexto da Agricultura 4.0 exige mudanças para a empresa agrícola. ***Proposição teórica 4a***. A gestão da empresa agrícola deve ser construída nas funções básicas da administração (planejamento, implementação e controle). ***Proposição teórica 4b***. Mudanças são necessárias também nos aspectos organizacionais, como mecanismos de controle, indicadores de desempenho da gestão da empresa agrícola, aspectos de integração entre diferentes sistemas dentro de uma empresa para coletar e analisar os dados de produção e em seguida planejar e controlar a irrigação. ***Proposição teórica 4c***. As mudanças para a empresa agrícola incluem a gestão das operações, que não evoluí na mesma velocidade

da gestão agronômica. ***Proposição teórica 4d***. As mudanças envolvem também a qualificação da mão de obra, que constitui uma das principais dificuldades a superar para a adoção da AP no contexto da Agricultura 4.0.

Proposição teórica 5. As mudanças referentes à adoção estudada são gradativas, de acordo com a proposta evolutiva do Quadro 2.

Proposição teórica 6. Para a adoção de AP no contexto da Agricultura 4.0 o agricultor disponibiliza de modelos de planejamento e controle das operações de irrigação, inspirados à modelos bem conhecidos da indústria, como o PPC - Planejamento e Controle da Produção.

Proposição teórica 7. Para a adoção de AP no contexto da Agricultura 4.0 o agricultor tem a possibilidade de utilizar modelos de gestão colaborativa. Essa proposição é suportada pela seguinte ideia: a adoção de modelos de gestão colaborativa permite superar alguns desafios relacionados ao planejamento e controle da irrigação no caso de gestão compartilhada de recursos hídricos, como a garantia, para o agricultor, de disponibilidade de água durante a safra.

Proposição teórica 8. Para a adoção de AP no contexto da Agricultura 4.0 o agricultor disponibiliza de recursos necessários para a gestão das informações concernentes o planejamento das operações. ***Proposição teórica 8a***. Esses recursos incluem os insumos água e energia. ***Proposição teórica 8b***. Esses recursos compreendem hardware, como sensores, drone, satélite, sistema de medição para acesso à água, sistema de gestão da irrigação. ***Proposição teórica 8c***. A adoção de recursos - hardware permite conseguir benefícios para o planejamento das operações, como no caso de sensores para o planejamento da irrigação. ***Proposição teórica 8d***. Esses recursos incluem pessoas, como consultores que desempenham um papel importante para as empresas agrícolas no planejamento da irrigação.

Proposição teórica 9. A adoção de AP no contexto da Agricultura 4.0 pode ser afetada pelas características do agricultor, como idade, nível educacional, conservadorismo, capacitação gerencial, propensão ao risco, capacidade de inovação.

Proposição teórica 10. A adoção de AP no contexto da Agricultura 4.0 pode ser afetada pelas características da empresa agrícola, como tamanho da empresa agrícola (empresa familiar, empresa industrial), localização da empresa agrícola, tipo de cultura.

Proposição teórica 11. A adoção de AP no contexto da Agricultura 4.0 pode ser afetada pelas características das tecnologias, como tipo de tecnologia, tipo de equipamento, preço, complexidade.

As Proposições 1a, 1b, 2, 2a, 2b, 2c, 2d, 2e, 2f, 2g, 2g, 2h, 4d, 6, 8, 8a, 8b, 8c, 8d, 10 fundamentam a proposta do modelo de gestão das operações de irrigação apresentado na seção 5.5.

Os fatores nível educacional (relacionado à Proposição 9), capacitação (relacionado à Proposição 3a), acesso à dados (relacionado à Proposição 2) e recursos (pessoas - consultores) (relacionado à Proposição 8d) são discutidos na seção 6.3 e incluídos na agenda de pesquisa futura.

Outros fatores considerados fora do escopo desse projeto de tese, como capacitação (relacionado à Proposição 3a), acesso ao mercado (relacionado à Proposição 3f), mudanças – gestão das operações (relacionado à Proposição 4c), mudanças gradativas (relacionado à Proposição 5), modelos de gestão colaborativa (relacionado à Proposição 7), tamanho da empresa agrícola - empresa familiar (relacionado à Proposição 10), localização da empresa agrícola (relacionado à Proposição 10), características das tecnologias (relacionado à Proposição 11), são analisados na agenda de pesquisa futura.

5.5 MODELAGEM DA GESTÃO DAS OPERAÇÕES DE IRRIGAÇÃO

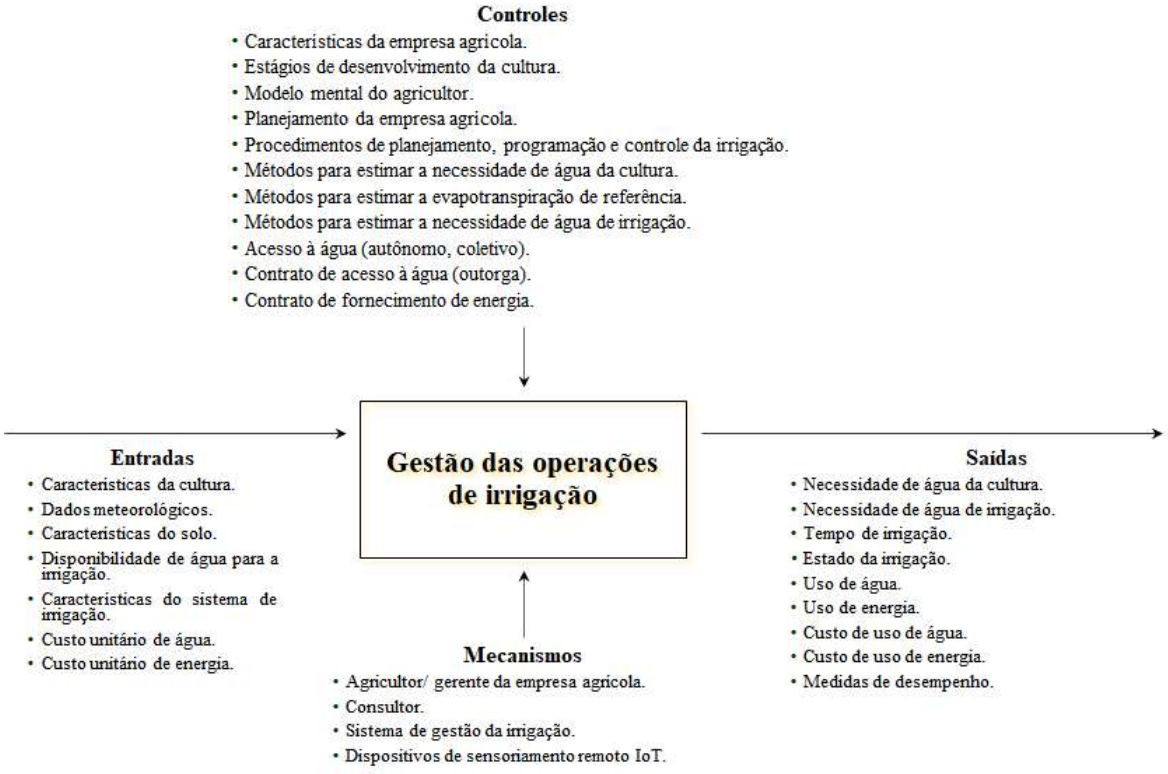
Como resultado das proposições teóricas geradas com a abordagem indutiva (HAIR; PAGE; BRUNSVELD, 2016), dos fatores identificados na revisão da literatura, nas entrevistas com os especialistas e nos estudos de caso, é proposto um modelo de gestão das operações de irrigação, desenvolvido com a técnica de modelagem IDEF0 e combinando conceitos de AP, Agricultura 4.0, TPB, gestão das operações de irrigação e IoT. O modelo é inspirado aos modelos de planejamento e controle das operações bem conhecidos da indústria, como o PPC - Planejamento e Controle da Produção, de acordo com a formulação da Proposição teórica 6.

Este modelo, construído a partir da abordagem proposta pelo NIST (1993) e dos resultados preliminares deste projeto de tese publicados em Monteleone et al. (2020b), apoia a conceptualização e formulação do modelo de simulação e o desenvolvimento de teoria sobre a adoção de AP no contexto da Agricultura 4.0.

O diagrama de contexto da gestão das operações de irrigação, ilustrado na Figura 12, define o escopo do modelo e descreve a modelagem da função de nível superior, com suas entradas, controles, saídas e mecanismos.

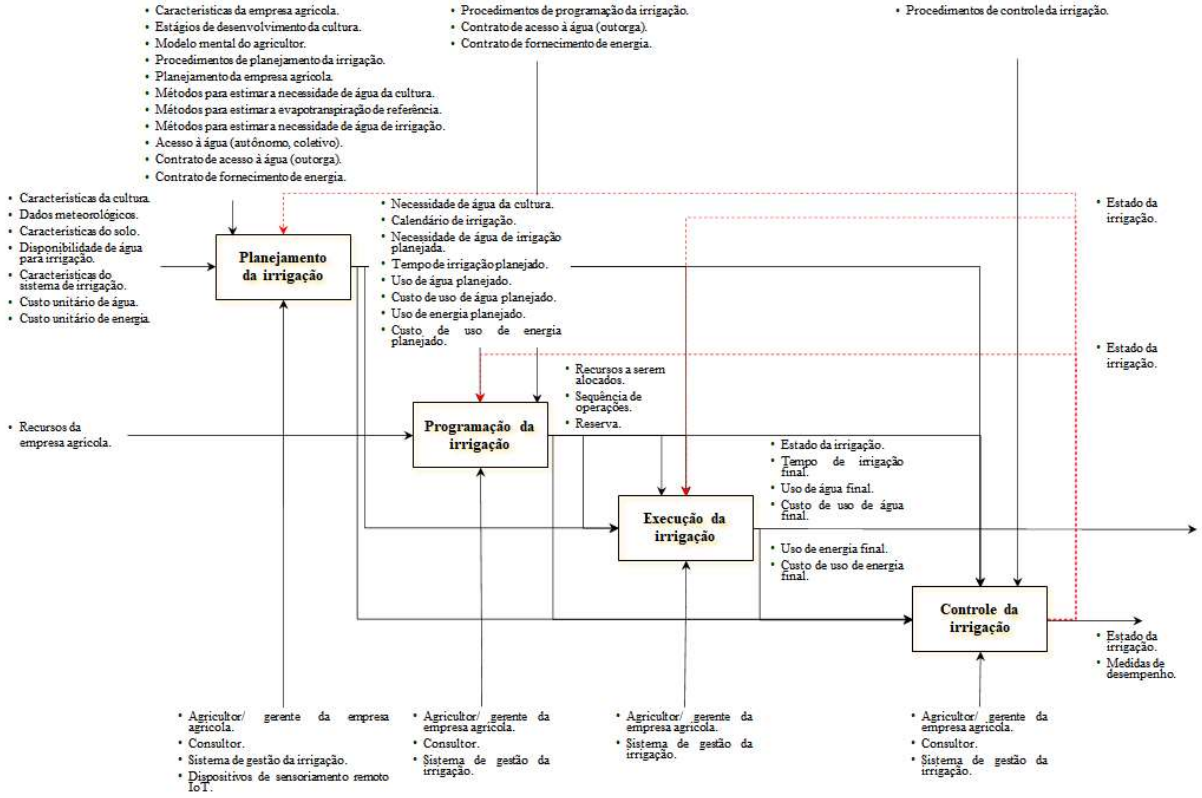
O diagrama de contexto é decomposto em quatro funções, conforme ilustrado na Figura 13: planejamento da irrigação, programação da irrigação, execução da irrigação e controle da irrigação. Este modelo diferencia o planejamento e a programação de acordo com a literatura sobre IDEF0 (CIURANA et al., 2008; MACKULAK, 1984; VENKATESWARAN; SON, 2005) e a sugestão, dos especialistas 4, 5, 10 e 15, de adotar um modelo de gestão inspirado à indústria.

Figura 12 - Diagrama de contexto da gestão das operações de irrigação



Fonte: Autor

Figura 13 - Diagrama IDEF0 da gestão das operações de irrigação



Fonte: Autor

O planejamento da irrigação produz a necessidade de água da cultura, o calendário de irrigação, a necessidade de água de irrigação planejada, o tempo de irrigação planejado, o uso de água planejado, o custo de uso de água planejado, o uso de energia planejado e o custo de uso de energia planejado. O planejamento da irrigação pode ser referido a um planejamento em escala de tempo de safra ou dentro da safra, de acordo com os especialistas 25 e 29.

Para planejar a necessidade de água da cultura os dados de três pilares são fundamentais: cultura, solo e clima (fatores relacionados às Proposições teóricas 2b e 2c), como relatado pelos especialistas 20, 24, 25 e 32.

O calendário de irrigação estabelece os dias de irrigação com base nos procedimentos de planejamento da irrigação, como minimização do custo de uso de energia, aproveitamento da irrigação no tempo de funcionamento noturno dado o contrato de fornecimento de energia e o relativo custo unitário de energia nos diferentes horários durante o dia, como relatado pelos gerentes das duas empresas agrícolas e pelos especialistas 1 e 11. Os fatores mencionados são abordados nas Proposições teóricas 2e e 2g.

O tempo de irrigação pode ser planejado em relação ao tempo de funcionamento noturno, diurno e no pico (fatores relacionados às Proposições teóricas 2e e 2g), de acordo com os gerentes das duas empresas agrícolas e os especialistas 19, 23 e 34. Também o uso de água, o custo de uso de água, o uso de energia e o custo de uso de energia podem ser planejados com base nos diferentes tempos de funcionamento. O uso de energia e o custo de uso de energia podem ser planejados dependendo dos equipamentos do sistema de irrigação, como bombas e motores como relatado pelos gerentes das duas empresas agrícolas (fatores mencionados relacionados às Proposições teóricas 2e, 2g, 2h, 8a, 8b). As bombas e os motores podem ser alimentados por óleo diesel, por energia renovável ou eletricidade (EVANS, 2001), de acordo com o especialista 36. O planejamento da irrigação pode ser realizado a nível de empresa agrícola e também de campos a serem irrigados.

Os controles que facilitam a execução da função são: o planejamento da empresa agrícola, os métodos para estimar a necessidade de água da cultura (ALLEN et al., 1998; SUBEDI; CHÁVEZ, 2015), os métodos para estimar a evapotranspiração de referência (ALLEN et al., 1998; PEREIRA et al., 2015; SUBEDI; CHÁVEZ, 2015), os métodos para estimar a necessidade de água de irrigação (BROUWER; HEIBLOEM, 1986; BROUWER; PRINS; HEIBLOEM, 1989), os estágios de desenvolvimento da cultura, as características da empresa agrícola (como layout da empresa, técnica de irrigação utilizada, sistema de irrigação utilizado), os procedimentos de planejamento da irrigação, o acesso à água (autônomo,

coletivo), o contrato de acesso à água (outorga) e o contrato de fornecimento de energia, com base as entrevistas com os gerentes das duas empresas agrícolas e os especialistas 10, 20, 24, 25, 26 e 32. O contrato de acesso à água (outorga) é fundamental para o agricultor conhecer a disponibilidade de água para a irrigação, como relatado pelos especialistas 25, 34, 35 e 36. Os fatores mencionados são tratados nas Proposições teóricas 2b, 2c, 2g, 2h e 10.

A água para a irrigação pode ser considerada ilimitada ou limitada, dependendo da quantidade de água disponível para a irrigação e da capacidade do sistema de distribuição da água (MATANGA; MARIÑO, 1979) e conforme as afirmações dos especialistas 23, 25, 34, 35 e 36. A disponibilidade de água para a irrigação também é influenciada pelo acesso coletivo aos recursos hídricos, que põe desafios para o planejamento da irrigação com base em fatores como demanda de água, oferta de água, volume de água disponível, localização da empresa agrícola, prioridade no acesso da empresa e do setor econômico (ação humana, ação animal, irrigação, indústria) em caso de conflitos pelo uso de água, de acordo com os especialistas 8, 18, 23, 24, 26, 27, 33, 35 e 36 (fatores relacionados às Proposições teóricas 2h e 10). O especialista 26 destaca que: "*No caso de sistema de irrigação alimentado por um canal de irrigação coletivo, nem sempre a água está disponível para o agricultor, que precisa conhecer a variação da vazão ao longo do ano e também ser informado com antecedência sobre a disponibilidade de água*". O especialista 34 acrescenta a possibilidade de conflitos em caso de disponibilidade limitada de recursos hídricos, fator que pode afetar a adoção de tecnologias de AP: "*Se o agricultor é localizado em uma região com baixo nível de conflito pelo uso de água, ou seja, numa região que tem abundância em termos de recursos hídricos, a Agricultura de Precisão perde um pouco da atratividade, continua sendo atrativa por conta de todas as vantagens de diminuição de custos, mas ela perde um pouco atratividade por conta do investimento inicial*".

O contrato de fornecimento de energia, por exemplo elétrica, pode contribuir a estabelecer os procedimentos de planejamento dado que o custo de energia elétrica pode variar com base os horários durante o dia e, portanto, impactar a definição do tempo de irrigação, como relatado pelos gerentes das duas empresas agrícolas nos estudos de caso: "*A irrigação noturna é o que viabiliza o negócio*", gerente do piloto MATOPIBA, "*A prioridade é aproveitar o horário reservado para a irrigação, que é 9 horas por noite. Mas a irrigação é realizada durante o dia também, no máximo 4 horas. Durante a manhã, então os funcionários vão desligar, às 10-11:00 quase todos os pivôs já estão desligados*", gerente da "Empresa agrícola Bahia", e de acordo com os especialistas 11 e 23. Os fatores mencionados são abordados nas Proposições teóricas 2a, 2e, 2g.

O planejamento da empresa agrícola envolve diferentes fatores que afetam várias decisões sazonais que o agricultor deve tomar, como determinar as safras a serem cultivadas, a área a ser usada para cada safra, a política de irrigação, as estratégias de irrigação (GARCÍA-VILA; FERERES, 2012; GLEN, 1987). O especialista 10 destaca a natureza estratégica desse planejamento que envolve decisões no longo prazo (fator relacionado à Proposição teóricas 6).

O especialista 1 destaca que a sazonalidade das operações é uma das principais características que diferenciam a agricultura da indústria: "No *ciclo agrícola o agricultor tem a hora certa de plantar e se errar ele compromete uma colheita inteira. A agricultura é uma janela, então isso deve ser feito antes, com base nessa janela*". O especialista 10 acrescenta que: "*No mapeamento de fluxo de valor do café, por exemplo, existe um tempo que o agricultor não consegue diminuir e que é o tempo que a cultura vai levar para crescer. Tem um tempo que é diferente da indústria, o agricultor não consegue diminuir muito, essa é uma característica da agricultura*".

Os especialista 10, 18, 24, 29, 31, 33, 34, 35 e 36 citam outra característica da agricultura, que é a incerteza relacionado as variáveis climáticas como precipitação, disponibilidade hídrica e temperatura do ar, entre outras (fatores relacionados à Proposição teórica 2b). O especialista 27 acrescenta a volatilidade muito grande de precipitações e de seca pela extensão do território do Brasil. O especialista 10 enfatiza a diferença entre indústria e agricultura: "*Na indústria, dentro do galpão da fábrica, o processo, de certa forma, é conhecido e está controlado. Na agricultura não chove, chove mais, chove menos, acontece uma chuva de granizo, acontece um problema de mosca da fruta, de ferrugem na soja. O agricultor não tem como lidar muitas vezes com essas variáveis, tanto é que grande parte do desafio da agricultura é transformar ela numa indústria e diminuir a sazonalidade*", enquanto o especialista 35 acrescenta que a adoção de AP no contexto da Agricultura 4.0 pode contribuir a reduzir o risco relacionado com essas variáveis: "*Quanto mais o agricultor investe em Agricultura de Precisão no contexto da Agricultura 4.0, maior é a base de informações e o conhecimento dessas variáveis que ele tem. Portanto maior é o controle do seu negócio, que gera conforto, mesmo que ele não gere maior produtividade*" (fatores relacionados à Proposição teórica 2b).

O planejamento da empresa agrícola envolve também fatores econômicos que o agricultor precisa ter em consideração no planejamento da irrigação. Entre os fatores econômicos os especialistas 1, 12, 13, 25, 33, 34 e 35, citam preços de insumos, disponibilidade de insumos, custo de produção, preços de produtos, previsão de produção de outros países, preço do dólar, variações da bolsa, tendencias de mercado nacional e internacional. Conforme evidenciado pelos estudos de caso realizados, por exemplo o preço do insumo energia elétrica

tem um papel fundamental no planejamento da irrigação, tanto porque ele pode influenciar o uso de energia elétrica, e seu custo, quanto porque ele pode determinar o tempo de operação do sistema de irrigação. Os fatores mencionados são objeto das Proposições teóricas 2e, 2g.

Os insumos transformados pelo planejamento da irrigação são as características da cultura, os dados meteorológicos e as características do solo (ADEYEMI et al., 2018; BROUWER; HEIBLOEM, 1986; CALERA et al., 2017; GARCÍA-TEJERO et al., 2018; JABRO et al., 2020; SAVVA; FRENKEN, 2002), a disponibilidade de água para a irrigação, como relatado pelos especialistas 26 e 36, as características do sistema de irrigação (como lâmina mínima aplicável, vazão, área irrigada), o custo unitário de água, o custo unitário de energia de acordo com os gerentes das duas empresas agrícolas. Esses fatores são tratados nas Proposições teóricas 2b, 2e, 2g e 2h.

Os mecanismos que realizam o planejamento da irrigação são o agricultor ou gerente da empresa agrícola (dependendo da organização da empresa), o consultor, o sistema de gestão da irrigação e os dispositivos de sensoriamento IoT (CALERA et al., 2017; DHUNGEL et al., 2014; JABRO et al., 2020) (fatores relacionados às Proposições teóricas 8, 8b, 8d). O agricultor ou gerente da empresa agrícola supervisiona todas as operações. O papel fundamental dos recursos (classificados em insumos, hardware e pessoas) (fator relacionado à Proposição teórica 8) é destacado pelo especialista 5: "*Para o planejamento das operações de irrigação, são necessárias as seguintes informações: os recursos ao nível dos insumos (ou seja, matéria-prima), o hardware (ou seja, os equipamentos que o agricultor precisa), os recursos das pessoas (ou seja, quantas pessoas estão envolvidas neste processo)*". As empresas agrícolas como o piloto MATOPIBA e a "Empresa agrícola Bahia" utilizam um sistema de gestão da irrigação para auxiliar o gerente no planejamento. Os dispositivos de sensoriamento IoT apoiam o planejamento graças à coleta de dados de campo e ao acesso de informações mais precisas, como relatado pelo especialista 14 (fatores relacionados às Proposições teóricas 2, 2b, 8b, 8c). Os especialistas 11, 12, 17 e 32 destacam o papel do consultor (fator abordado na Proposição teórica 8d) como oportunidade para apoiar o agricultor no planejamento da irrigação.

A programação da irrigação define quais recursos agrícolas devem ser alocados para a execução da irrigação. Os recursos agrícolas a serem alocados são pessoas e máquinas (VAN ELDEREN, 1980) e recursos do sistema de irrigação, que dependem das características da empresa agrícola e do tipo de cultura, como válvulas e bombas (BUCHLEITER; HEERMANN, 1986; KESWANI et al., 2020; OJHA; MISRA; RAGHUWANSHI, 2015), técnica de irrigação por pivô central ou gotejamento (BUCHLEITER; HEERMANN, 1986), fontes de água (como rio, poço, nascente, canais, reservatório) (fatores relacionados às Proposições teóricas 8 e 10).

Como exemplo, o gerente do piloto MATOPIBA ilustra: "*Na empresa agrícola a fonte de água para a irrigação é um rio. Os dois pivôs centrais mais próximos são alimentados por bombas elétricas, incluindo o pivô piloto. Os demais pivôs são abastecidos por meio de um reservatório localizado no meio da empresa. A água é levada por bombas elétricas para este reservatório, que distribui a água para os outros pivôs mais distantes*". O gerente da "Empresa agrícola Bahia" descreve: "*A água é captada através de bombas elétricas de um rio. Cada pivô central é alimentado por sua própria bomba*".

Em caso de fontes de água compartilhadas como um canal coletivo de irrigação, uma bacia hidrográfica ou um perímetro irrigado, o acesso água e o uso desse recurso dependem de um contrato de acesso à água (outorga), como destacado pelos especialistas 11, 17, 23, 25, 26, 34, 35 e 36. O especialista 17 evidencia que: "*No caso de uso coletivo de água, como por exemplo nos perímetros irrigados, em que a gestão e o planejamento da distribuição de água são feitos pelo distrito de irrigação, o agricultor recebe um determinado volume de água para a irrigação por um determinado tempo, dependendo do tamanho da área, e o uso de água é taxado por isso*". O especialista 18 acrescenta que um outro fator que afeta a programação da irrigação é a localização do agricultor, por exemplo em um perímetro irrigado: "*A depender da localização do agricultor dentro do perímetro irrigado, se tiver logo na entrada d'água, não vai ter impacto nenhum. Agora, se estiver no final da linha, a falta de água vai para o agricultor*". A outorga pode também regulamentar o uso de recursos para a medição do uso de água, que os agricultores têm que colocar para medir a vazão que eles estão usando, de acordo com o especialista 11. Os fatores mencionados são analisados nas Proposições teóricas 1a, 2h e 10).

A programação da irrigação produz uma reserva na tupla <operação, janela de tempo, recurso> e uma sequência de operações a serem realizadas. Um exemplo pode ser ilustrado com o piloto MATOPIBA, em que a operação "*execução da irrigação*", utilizando o recurso "*pivô central 8*", é programada na janela de tempo "*início às 21:00h do dia 1 e fim às 6:00 h no dia 2*". Outro exemplo no caso da "Empresa agrícola Bahia", em que a operação "*execução da irrigação com a aplicação de uma necessidade de água de irrigação igual a 9,4 mm em 50% da área irrigada*", utilizando o recurso "*pivô central 4*", é programada no "*dia 1*" (fatores relacionados às Proposições teóricas 2, 2e, 6). Os procedimentos de programação da irrigação podem incluir qual cultura deve receber prioridade ao alocar água durante o próximo turno de irrigação (HILL; ALLEN, 1996), regras de prioridade baseadas em objetivos de gestão (MACKULAK, 1984). Um exemplo de regra de prioridade é a minimização do custo de uso de energia elétrica em relação ao uso de água. No caso do piloto MATOPIBA e da "Empresa

agrícola Bahia", esta regra determina a prioridade para a execução da irrigação durante o tempo de funcionamento noturno. Outro exemplo é a possibilidade de ligar/ desligar uma bomba/ válvula quando o nível de água aplicado ao campo atinge algum valor limite predefinido (OJHA; MISRA; RAGHUWANSHI, 2015). Os fatores mencionados são abordados nas Proposições teóricas 1a, 2g e 6).

De acordo com a proposta de adotar um modelo de gestão inspirado à indústria (fator relacionado à Proposição teórica 6), a programação da irrigação pode ser considerada um planejamento a nível operacional, como relatado pelo especialista 10: "*O agricultor tem um planejamento que é mais estratégico, de longo e médio prazo. E tem depois um planejamento mais operacional, com que ele define o planejamento das máquinas, da irrigação, da pulverização, da colheita, da pós-colheita*".

A execução da irrigação concerne a realização das operações programadas (BOCHTIS; SORENSEN; KATERIS, 2018; PINEDO, 2008). A ativação dos recursos programados no contexto da Agricultura 4.0 é esperada ser automática, segundo o especialista 7: "*Todo o processo é feito de forma automática, o que reduz o trabalho da mão de obra. O agricultor não precisa ligar o pivô, o sistema de irrigação sob a superfície do solo*". Também o especialistas 10 e 31 ressaltam os benefícios que a automação no contexto da Agricultura 4.0 pode levar na execução da irrigação, em particular em relação à ligar e desligar os equipamentos (fatores concernentes as Proposições teóricas 1b e 8).

Contudo, os especialistas 10 e 11 acrescentam um desafio relacionado à qualidade da energia elétrica (fator relacionado à Proposição teórica 2g) para a execução da irrigação com um sistema automatizado: "*O agricultor não pode instalar um sistema de automação de ligar e desligar a motobomba e os sistemas de controle porque a qualidade da energia vai queimar mais esses equipamentos rapidamente, pela sobrecarga que existe*", especialista 11. O especialista 26 cita também o desafio da cobertura Internet na localização da empresa agrícola (fator relacionado à Proposição teórica 10) para viabilizar a execução da irrigação com um sistema automatizado, enquanto o especialista 27 evidencia o desafio da capacitação da mão de obra (fator tratado na Proposição teórica 4d) para executar um sistema baseado na automação: "Um d*esafio que acontece com frequência no Brasil é o agricultor adotar tecnologias e ter o pessoal não capacitado para utilizá-las. Isso é um problema, então o agricultor precisa capacitar os trabalhadores para poder atuar na irrigação no contexto da Agricultura 4.0*". Os desafios da qualidade da energia elétrica e da cobertura Internet (fatores relacionados às Proposições teóricas 2g e 10) são confirmados também pelo gerente da "Empresa agrícola Bahia": "*Apesar de ter 17 pivôs, nosso sistema é tudo manual, porque a qualidade da energia*

elétrica é muito ruim. E quanto menos o sistema for automatizado, menor é o risco que os equipamentos possam queimar. Ainda, se ligar ao mesmo tempo todos os pivôs a energia cai, portanto, cada pivô tem um tempo de início diferente de um minuto".

Os resultados da execução da irrigação são o estado da irrigação e as seguintes medidas de desempenho: tempo de irrigação final, uso de água final, uso de energia final, custo de uso de água final e custo de uso de energia final, com base as saídas do planejamento da irrigação e da programação da irrigação. A execução da irrigação utilizando as tecnologias de AP no contexto da Agricultura permite conseguir benefícios mensuráveis com as mencionadas medidas de desempenho, de acordo com os especialistas 11, 20, 24 e 34, "*A aplicação da necessidade de água da cultura estimada o mais próximo da realidade da demanda hídrica daquela cultura permite ao agricultor definir a quantidade de água exata para a área exata e, portanto, de economizar água e energia elétrica*", especialista 20. O especialista 11 acrescenta: "*Outra vantagem da adoção consiste na possibilidade de medir o excesso de água e a falta de água que afetam o desenvolvimento da cultura, inclusive o custo*". Os fatores analisados são objeto das Proposições teóricas 1a, 2 e 2a.

O controle da irrigação recebe, como entradas, as saídas das demais funções e os comandos de controle dos recursos do sistema de irrigação (ANTOLINI; SCARE; DIAS, 2015; KESWANI et al., 2020; KIM; EVANS; IVERSEN, 2008; LIU; XU, 2018). O controle da irrigação monitora o sistema de irrigação e seus recursos, por meio da sua identificação, operação, localização e estado, e dos procedimentos de controle da irrigação (KIM; EVANS; IVERSEN, 2008; MARRA et al., 2010). No caso por exemplo dos equipamentos e maquinários de irrigação, essa função realiza o controle da aplicação dos insumos, como relatado pelos especialistas 11, 24 e 25 (fatores relacionados às Proposições teóricas 2e, 6, 8 e 8b). O especialista 11 destaca que: "*Eu acho que a grande vantagem da adoção é exatamente o agricultor fazer o controle da aplicação de água, de energia, de produtos químicos, de fertilizantes. Então, quando o agricultor tem uma precisão no processo de controle, ele vai evitar a volta desnecessária e vai controlar o nível de utilização da energia que tem um custo muito elevado".* Enquanto os especialistas 18, 25 e 32 acrescentam outros benefícios, como aplicação localizada de água, uniformidade de aplicação, eficiência do equipamento, controle de pressão, controle de vazamento (fatores analisados nas Proposições teóricas 1a, 2 e 2a).

Este controle permite superar os riscos de irrigação insuficiente e excessiva (JABRO et al., 2020) (fatores relacionados às Proposições teóricas 1a e 2a).

Através de recursos como os dispositivos de sensoriamento IoT estação meteorológica, satélite e drone, são monitorados também os três pilares, cultura, solo e clima, de acordo com

os especialistas 11, 23, 24, 25 e 32. O especialista 32 por exemplo afirma que: "*Além de controlar os equipamentos e as máquinas, é importante também avaliar o resultado olhando para a planta, utilizando imagens de satélite e de drone. E também avaliar os dados de produtividade, para controlar como a planta está respondendo ao manejo*". O especialista 25 destaca que esse controle está evoluindo numa escala de propriedade e de pivô central. Esses fatores são tratados nas Proposições teóricas 1a, 2b, 2f, 8b e 8c.

A possibilidade de controlar as operações de irrigação por meio de dispositivos de sensoriamento IoT pode afetar a adoção da Agricultura 4.0, como afirmado pelo especialista 5: "*O controle da irrigação seria muito mais fácil graças ao uso de sensores, no contexto da IoT, para verificar se aquela planta precisa de água, nutrientes*". O especialista 32 evidência o grande volume de dados disponíveis e acessíveis graças a esses dispositivos, cuja adoção pode melhorar a inspeção visual utilizada também pelos gerentes das duas empresas agrícolas dos estudos de caso. Além disso, o especialista 1 acrescenta que a adoção desses dispositivos permite monitorar exatamente quanta água, onde, de que forma, em que hora, em que local. E a adoção também facilita o controle dos recursos, tanto maquinários agrícolas quanto maquinários de irrigação, segundo o especialista 8 (fatores relacionados às Proposições teóricas 1a, 2, 2d, 8b e 8c).

O controle da irrigação monitora o estado da irrigação, com base nas informações recebidas das operações de planejamento, programação e execução, para fornecer feedback para as outras funções (FAROOQ et al., 2020; MACKULAK, 1984). O controle pode fornecer informações também para a próxima safra, como afirmado pelo especialista 35: "*O agricultor vai usar as informações da próxima safra ou da safra atual para a próxima. O que aconteceu? Como o modelo respondeu? O ganho ou a eficiência atendeu as expectativas do agricultor? Então o controle da safra atual faz parte do planejamento da próxima e assim o agricultor vai alimentando os ciclos*" (fatores analisados nas Proposições teóricas 2 e 6).

O controle da irrigação também permite calcular medidas de desempenho como medidas de eficiência de produção (por exemplo produção e margem bruta por unidade de área irrigada), além de resultados diretamente relacionados ao uso de água e uso de energia proporcionada pela execução da irrigação (como potência absorvida por unidade de área irrigada) (CÓRCOLES et al., 2010) (fatores abordados nas Proposição teórica 1a). No caso da "Empresa agrícola Bahia" o sistema de gestão da irrigação fornece medidas de desempenho por recurso como produção, receita e custo total por pivô central. O controle por recurso é evidenciado também pelos especialistas 11 e 13 como uma vantagem da adoção de AP para a irrigação no contexto da Agricultura 4.0 (fatores relacionados às Proposições teóricas 1a, 2, 2a, 2f e 8b).

Como na indústria, as empresas agrícolas têm a oportunidade de adotar medidas para monitorar e revisar o desempenho (DORA et al., 2015) com foco a gestão das operações. Esse benefício é destacado também pelo especialista 5: "*Os indicadores industriais tradicionais, como eficiência, produtividade, capacidade, disponibilidade, podem ser calculados e utilizados nas empresas agrícolas, como nas operações de fábrica*". O especialista 6 acrescenta: "*Acredito que no futuro a Agricultura 4.0 trará alguns desenvolvimentos próximos da indústria, por exemplo, maior confiabilidade e, uma questão que está muito presente na indústria, maior rastreabilidade*" (fatores tratados nas Proposições teóricas 1a, 1b e 6).

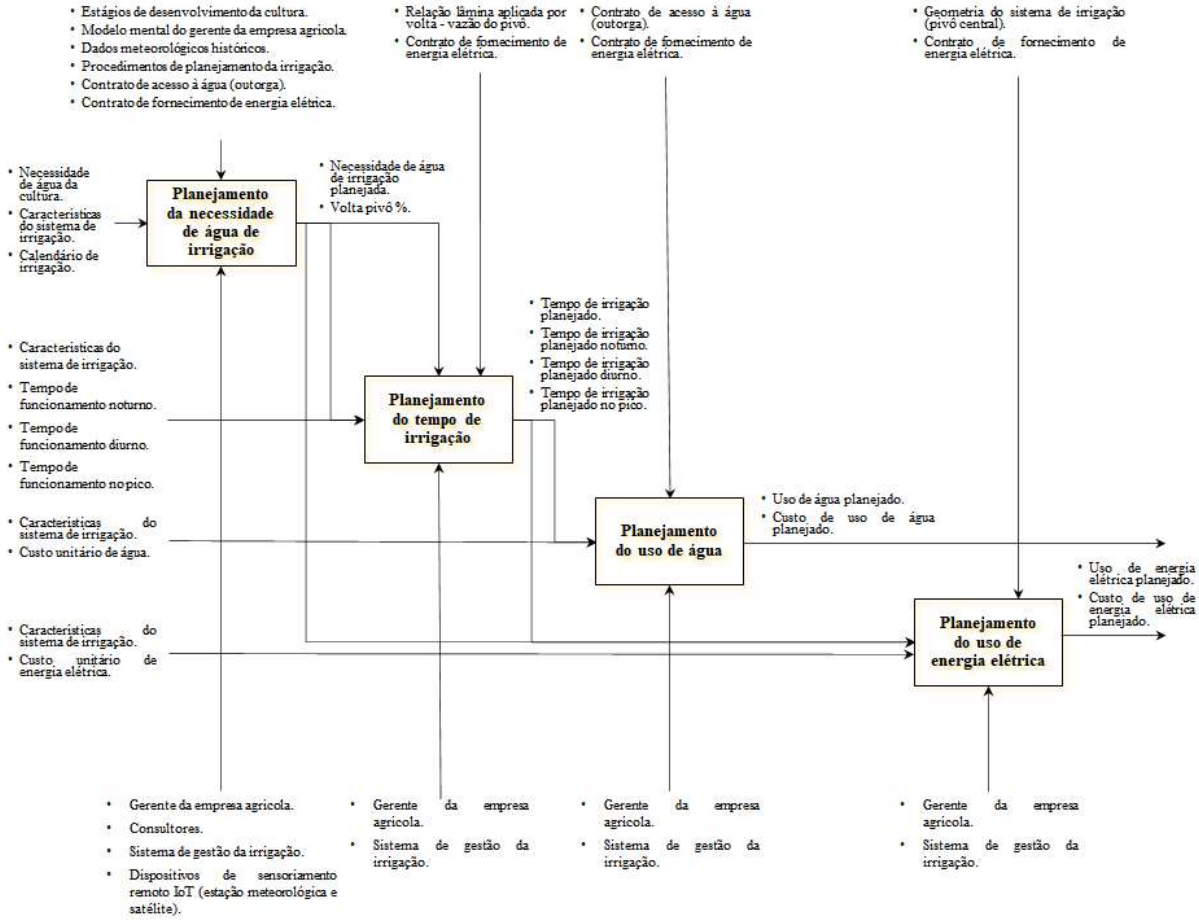
Os procedimentos de controle da irrigação se referem às informações de controle para realizar as operações de irrigação (fatores relacionados à Proposição teórica 6). Um exemplo do procedimento envolve a necessidade de água de irrigação planejada e o tempo de irrigação planejado. De acordo com o modelo de gestão inspirado à indústria (fator relacionado à Proposição teórica 6), se os valores reais dessas saídas planejadas desviam do valor esperado, o feedback é enviado para a função planejamento da irrigação (ROMERO et al., 2012; VENKATESWARAN; SON, 2005) para reavaliar os programas de irrigação existentes (MATANGA; MARIÑO, 1979). Outro exemplo envolve a informação para manter o teor de umidade do solo entre a capacidade de campo e o ponto de murcha permanente, no caso da tecnologia de sensoriamento IoT da sonda de solo (ADEYEMI et al., 2018). Quanto ao uso de energia elétrica, o tempo de funcionamento de um pivô central deve estar de acordo com as normas de fornecimento de energia elétrica, para as quais em determinadas regiões os sistemas de irrigação não podem operar durante o horário de pico (BERNARDO; SOARES; MANTOVANI, 1982). O especialista 17 acrescenta que no caso de uso coletivo de água, como por exemplo nos perímetros irrigados, o agricultor recebe um determinado volume de água para a irrigação por um determinado tempo, dependendo do tamanho da área, volume e tempo que devem ser controlados durante a execução da irrigação.

5.6 RELAÇÕES ENTRE FATORES - SIMULAÇÃO DE DINÂMICA DE SISTEMAS

O modelo proposto de gestão das operações de irrigação fornece uma estrutura conceitual para estudar os fatores identificados (na revisão da literatura, nas entrevistas com os especialistas e nos estudos de caso), as relações entre eles, as proposições teóricas geradas como resultado da abordagem indutiva, e, consequentemente, a adoção de AP no contexto da Agricultura 4.0. Uma aplicação deste modelo, com o objetivo de estudar as relações de causa-efeito entre alguns fatores envolvidos no planejamento da irrigação, é apresentada nesta seção,

que ilustra os resultados dos cenários de simulação realizados com dados coletados e entrevistas na “Empresa agrícola Bahia”, considerando o tipo de cultura “*milho*” e o “*pivô central 06*”. Esses cenários de simulação são desenvolvidos com o diagrama IDEF0 ilustrado na Figura 14, que é decomposto em quatro funções: planejamento da necessidade de água de irrigação, planejamento do tempo de irrigação, planejamento do uso de água e planejamento do uso de energia elétrica.

Figura 14 - Diagrama IDEF0 do planejamento da irrigação dos cenários de simulação



Fonte: Autor

O Planejamento da necessidade de água de irrigação produz a necessidade de água de irrigação planejada e a volta pivô %. A necessidade de água de irrigação planejada define o volume de água a ser aplicada na área a irrigar do pivô central, com base a necessidade de água da cultura, as características do sistema de irrigação (eficiência de aplicação do pivô, lâmina mínima aplicável), os estágios de desenvolvimento da cultura e o calendário de irrigação. O calendário de irrigação estabelece os dias de irrigação com base nos procedimentos de planejamento da irrigação definidos pelo modelo mental do gerente da “Empresa agrícola

Bahia": minimização do custo de uso de energia elétrica, visto que no atual contrato de acesso à água (outorga) ainda não é formalizado um custo unitário de água; aproveitamento da irrigação no tempo de funcionamento noturno em razão do vigente contrato de fornecimento de energia elétrica e do relativo custo unitário de energia elétrica nos diferentes horários durante o dia; execução da irrigação todos os dias considerados os dados meteorológicos históricos de baixa precipitação na safra; área a irrigar do pivô central definida com base os estágios de desenvolvimento da cultura do milho (igual a 100% no estágio "Início-germinação", 50% no estágio "Início" até o fim do estágio "Maturação", 0% no estágio "Secagem"). O estágio "Secagem" é incluído nos estágios porque é uma operação realizada no campo antes da colheita, dado que é necessário secar o milho para a venda e também porque a empresa agrícola não possui secador e é mais econômico secar o milho na área do pivô naquela época com baixas precipitações, conforme afirmado pelo gerente. Os insumos transformados pelo planejamento da necessidade de água de irrigação são a necessidade de água da cultura, as características do sistema de irrigação e o calendário de irrigação. Os controles que facilitam a execução da função são os procedimentos de planejamento da irrigação, o modelo mental do gerente da "Empresa agrícola Bahia", o contrato de acesso à água (outorga), o contrato de fornecimento de energia elétrica, os dados meteorológicos históricos e os estágios de desenvolvimento da cultura do milho. Os mecanismos que executam a função são o gerente da empresa agrícola, o sistema de gestão da irrigação, os consultores especialistas em engenharia agronômica (que fornecem o modelo para estimar a necessidade de água de irrigação planejada) e as tecnologias de sensoriamento IoT consideradas nas simulações (estação meteorológica e satélite).

O Planejamento do tempo de irrigação produz o tempo de irrigação planejado, o tempo de irrigação planejado noturno, o tempo de irrigação planejado diurno e o tempo de irrigação planejado no pico. O tempo de irrigação planejado define o tempo de funcionamento do pivô central para aplicar a necessidade de água de irrigação planejada, com base a vazão do pivô central, a sua área irrigada e a volta pivô %. O tempo de irrigação planejado é igual à soma do tempo de irrigação planejado noturno, tempo de irrigação planejado diurno e tempo de irrigação planejado no pico. O tempo de irrigação planejado noturno define o tempo de funcionamento do pivô central durante o tempo de funcionamento noturno (das 21:00 às 6:00) com base o contrato de fornecimento de energia elétrica, da mesma forma em relação ao tempo de irrigação planejado diurno durante o tempo de funcionamento diurno (das 6:00 às 18:00) e em relação ao tempo de irrigação planejado no pico durante o tempo de funcionamento no pico (das 18:00 às 21:00). Os insumos transformados pelo planejamento do tempo de irrigação são as características do sistema de irrigação (volta pivô %, vazão, área irrigada), o tempo de

funcionamento noturno, o tempo de funcionamento diurno e o tempo de funcionamento no pico. Os controles que facilitam a execução da função incluem a relação lâmina aplicada por volta - vazão do pivô central, ilustrada na Equação 4 (BERNARDO; SOARES; MANTOVANI, 1982, p. 455) e o contrato de fornecimento de energia elétrica,

$$L = \frac{Q*H}{10*A} \quad ...(4)$$

onde L é a lâmina média aplicada em mm/volta, Q é a vazão do pivô central em m^3/hora, H o tempo de irrigação por volta em horas, A é a área irrigada em hectares. O custo unitário de energia elétrica do vigente contrato leva o gerente da empresa agrícola a maximizar a irrigação no tempo de funcionamento noturno, a completar a aplicação da necessidade de água de irrigação planejada no tempo de funcionamento diurno e a evitar de irrigar durante o tempo de funcionamento no pico. Os mecanismos que executam a função são o gerente da empresa agrícola e o sistema de gestão da irrigação.

O Planejamento do uso de água produz o uso de água planejado e o custo de uso de água planejado. O uso de água e o custo de uso de água podem ser planejados em relação ao tempo de irrigação planejado noturno, ao tempo de irrigação planejado diurno e ao tempo de irrigação planejado no pico. O uso de água planejado define o volume de água planejado em um dia para a irrigação durante o tempo de irrigação planejado noturno, o tempo de irrigação planejado diurno e o tempo de irrigação planejado no pico, com base a vazão do pivô central. O custo de uso de água determina o custo de uso de água planejado em um dia para a irrigação durante o tempo de irrigação planejado noturno, o tempo de irrigação planejado diurno e o tempo de irrigação planejado no pico, com base o uso de água planejado, o contrato de acesso à água (outorga) e o custo unitário de água. Dependendo do prazo de planejamento, o uso de água planejado e o custo de uso de água planejado podem ser produzidos antes da safra ou dentro da safra em relação à semana, mês ou estágio de desenvolvimento da cultura, para planejar o volume de água acumulado. Os insumos transformados pelo planejamento do uso de água são as características do sistema de irrigação (vazão), o tempo de irrigação planejado noturno, o tempo de irrigação planejado diurno, o tempo de irrigação planejado no pico e o custo unitário de água. Os controles que facilitam a execução da função incluem o contrato de acesso à água (outorga) e o contrato de fornecimento de energia elétrica. Os mecanismos que executam a função são o gerente da empresa agrícola e o sistema de gestão da irrigação.

O Planejamento do uso de energia elétrica produz o uso de energia elétrica planejado e o custo de uso de energia elétrica planejado. O uso de energia elétrica e o custo de uso de energia elétrica podem ser planejados para a bomba e o motor do pivô central, relativamente ao tempo de irrigação planejado noturno, diurno e no pico. O uso de energia elétrica planejado estabelece a quantidade de energia elétrica planejada em um dia necessária para alimentar a bomba e o motor do pivô central e para aplicar a necessidade de água de irrigação planejada durante o tempo de irrigação planejado noturno, diurno e no pico, com base as características do sistema de irrigação (volta pivô, volta área irrigada, velocidade última torre, área a irrigar, raio área irrigada, taxa de consumo da bomba, taxa de consumo do motor). O custo de uso de energia elétrica define o custo de uso de energia elétrica planejado em um dia necessário para alimentar a bomba e o motor do pivô central e para aplicar a necessidade de água de irrigação planejada durante o tempo de irrigação planejado noturno, o tempo de irrigação planejado diurno e o tempo de irrigação planejado no pico, com base o uso de energia elétrica planejado, o contrato de fornecimento de energia elétrica e o custo unitário de energia elétrica. Dependendo do prazo de planejamento, o uso de energia elétrica planejado e o custo de uso de energia elétrica planejado podem ser produzidos antes da safra ou dentro da safra relativamente à semana, mês ou estágio de desenvolvimento da cultura, para planejar a quantidade de energia elétrica acumulada. Os insumos transformados pelo planejamento do uso de energia elétrica são as características do sistema de irrigação (volta última torre, volta área irrigada, velocidade última torre, área a irrigar, raio área irrigada, taxa de consumo da bomba, taxa de consumo do motor), a necessidade de água de irrigação planejada, o tempo de irrigação planejado noturno, o tempo de irrigação planejado diurno e o tempo de irrigação planejado no pico, o custo unitário de energia elétrica relativo ao tempo de irrigação planejado noturno, o tempo de irrigação planejado diurno e o tempo de irrigação planejado no pico. Os controles que facilitam a execução da função incluem a geometria do sistema de irrigação (pivô central) e o contrato de fornecimento de energia elétrica. Os mecanismos que executam a função são o gerente da empresa agrícola e o sistema de gestão da irrigação.

5.6.1 Construção do modelo de simulação da Dinâmica de Sistemas

Levando em consideração os fatores identificados por meio das entrevistas com os especialistas (ilustrados no Quadro 9) e dos estudos de caso (ilustrados no Quadro 10), o modelo de gestão das operações de irrigação proposto (ilustrado na Figura 12 e Figura 13) e o diagrama

IDEF0 do planejamento da irrigação dos cenários de simulação (ilustrado na Figura 14), o problema que o modelo analisa consiste em:

a) quais relações de causa e efeito existem entre os fatores identificados no planejamento do tempo de irrigação, planejamento do uso de água e planejamento do uso de energia elétrica, e, consequentemente, qual é o efeito na adoção de Agricultura de Precisão no contexto da Agricultura 4.0 e quais políticas é possível sugerir para direcionar a adoção.

O público principal do modelo é constituído pelos atores envolvidos no projeto SWAMP e pelas comunidades cientificas evidenciadas na revisão da literatura. Além disso, é identificado um público não acadêmico no gerente da "Empresa agrícola Bahia", que apoia a construção do modelo de simulação.

A finalidade do modelo, que envolve fatores abordados nas Proposições teóricas 1a e 8c, é:

a) estudar os benefícios relacionados ao uso de água e uso de energia elétrica, simulando que o gerente da "Empresa agrícola Bahia" adote a tecnologia de sensoriamento IoT do satélite e comparando os resultados com o utilizo da estação meteorológica.

O propósito é construir as relações de causa e efeito entre os fatores envolvidos no planejamento do tempo de irrigação, planejamento do uso de água e planejamento do uso de energia elétrica, simular os efeitos no uso de água e no uso de energia elétrica e analisar os benefícios resultantes dos dois cenários:

a) cenário de simulação 1: utilizo da tecnologia de sensoriamento IoT da estação meteorológica;

b) cenário de simulação 2: adoção da tecnologia de sensoriamento IoT do satélite.

É importante ressaltar que a literatura propõe um conjunto de fatores para estudar as vantagens e os resultados positivos esperados da adoção das tecnologias de AP, entre eles a demonstração dos benefícios tangíveis (KENDALL et al., 2017) e as percepções do agricultor sobre os benefícios. Focar na redução de custos pode influenciar a adoção e pode melhorar a compreensão das percepções e motivações do agricultor para a adoção dessas tecnologias (THOMPSON et al., 2019).

Para realizar a simulação, os dados sobre o cultivo de milho foram coletados do final de abril de 2020 até o final de setembro de 2020 na "Empresa agrícola Bahia". O milho foi escolhido porque foi possível acompanhar todos os estágios de desenvolvimento, da semeadura

até a colheita. O modelo de simulação foi construído utilizando as técnicas de coleta e de análise de dados (LUNA-REYES; ANDERSEN, 2003; STERMAN, 2000) ilustradas no Quadro 11.

Quadro 11 - Técnicas de coleta e análise de dados para a construção do modelo de simulação

Fase	Técnicas de coleta de dados	Técnicas de análise de dados
Conceptualização	Entrevistas com o gerente da empresa, base de dados do sistema de gestão da irrigação, relatórios da empresa, contratos da empresa, relatórios dos consultores.	Processo de codificação para identificar as categorias e os fatores, modelagem gráfica.
Formulação	Entrevistas com o gerente da empresa, base de dados do sistema de gestão da irrigação, relatórios da empresa, contratos da empresa, relatórios dos consultores, base de dados secundários.	Processo de codificação para identificar as categorias e os fatores, modelagem de simulação.
Teste	Resultados dos cenários de simulação.	Entrevistas com o gerente, técnicas estatísticas.

Fonte: Autor

As entrevistas foram realizadas com o gerente da "Empresa agrícola Bahia". Os dados quantitativos foram coletados na base de dados do sistema de gestão da irrigação, em relatórios da empresa e dos consultores especialistas em engenharia agronômica. Uma base de dados secundários foi utilizada para estimar o custo unitário de uso de água.

Durante a conceptualização, as entrevistas possibilitaram a compreensão do problema e a identificação dos componentes envolvidos. Ainda, o processo de codificação foi utilizado para identificar os fatores com base nos dados coletados durante as entrevistas (LUNA-REYES; ANDERSEN, 2003).

Quanto à definição do limite do modelo, as saídas do Planejamento da necessidade de água de irrigação, necessidade de água de irrigação planejada e volta pivô %, são componentes exógenos. Os componentes exógenos são os componentes cujos valores não são afetados diretamente pelo sistema, enquanto os endógenos são os componentes envolvidos nos ciclos de feedback do sistema (ALBIN, 1997). A lista dos componentes endógenos e exógenos, ilustrada no Quadro 12, é baseada no diagrama IDEF0 do planejamento da irrigação dos cenários de simulação (ilustrado na Figura 14) e nas entrevistas realizadas com o gerente da "Empresa agrícola Bahia".

Quadro 12 - Lista dos componentes endógenos e exógenos

Componentes	Exógeno	Endógeno
Necessidade de água de irrigação planejada	Exógeno	
Volta pivô %	Exógeno	
Vazão do pivô central	Exógeno	
Área irrigada do pivô central	Exógeno	
Tempo de irrigação planejado		Endógeno

Continua...

Conclusão.

Componentes	Exógeno	Endógeno
Tempo de funcionamento noturno	Exógeno	
Tempo de funcionamento diurno	Exógeno	
Tempo de irrigação planejado noturno		Endógeno
Tempo de irrigação planejado diurno		Endógeno
Tempo de irrigação planejado no pico		Endógeno
Uso de água planejado noturno		Endógeno
Uso de água planejado diurno		Endógeno
Uso de água planejado no pico		Endógeno
Uso de água planejado na safra		Endógeno
Custo unitário de uso de água	Exógeno	
Custo de uso de água planejado noturno		Endógeno
Custo de uso de água planejado diurno		Endógeno
Custo de uso de água planejado no pico		Endógeno
Custo de uso de água planejado na safra		Endógeno
Volta última torre		Endógeno
Circunferência última torre	Exógeno	
Velocidade última torre		Endógeno
Tempo de ajuste		Endógeno
Arco da volta última torre noturno		Endógeno
Arco da volta última torre diurno		Endógeno
Arco da volta última torre no pico		Endógeno
Circunferência área irrigada	Exógeno	
Arco da volta área irrigada noturno		Endógeno
Arco da volta área irrigada diurno		Endógeno
Arco da volta área irrigada no pico		Endógeno
Raio área irrigada	Exógeno	
Área a irrigar noturna		Endógeno
Área a irrigar diurna		Endógeno
Área a irrigar no pico		Endógeno
Taxa de consumo da bomba	Exógeno	
Uso de energia elétrica planejado noturno - bomba		Endógeno
Uso de energia elétrica planejado diurno - bomba		Endógeno
Uso de energia elétrica planejado no pico - bomba		Endógeno
Taxa de consumo do motor	Exógeno	
Uso de energia elétrica planejado noturno - motor		Endógeno
Uso de energia elétrica planejado diurno - motor		Endógeno
Uso de energia elétrica planejado no pico - motor		Endógeno
Uso de energia elétrica planejado noturno - bomba + motor		Endógeno
Uso de energia elétrica planejado diurno - bomba + motor		Endógeno
Uso de energia elétrica planejado no pico - bomba + motor		Endógeno
Uso de energia elétrica planejado noturno na safra		Endógeno
Uso de energia elétrica planejado diurno na safra		Endógeno
Uso de energia elétrica planejado no pico na safra		Endógeno
Uso de energia elétrica planejado na safra		Endógeno
Custo unitário de energia elétrica noturno	Exógeno	
Custo unitário de energia elétrica diurno	Exógeno	
Custo unitário de energia elétrica no pico	Exógeno	
Custo de uso de energia elétrica planejado noturno		Endógeno
Custo de uso de energia elétrica planejado diurno		Endógeno
Custo de uso de energia elétrica planejado no pico		Endógeno
Custo de uso de energia elétrica planejado noturno na safra		Endógeno
Custo de uso de energia elétrica planejado diurno na safra		Endógeno
Custo de uso de energia elétrica planejado no pico na safra		Endógeno
Custo de uso de energia elétrica planejado na safra		Endógeno

Fonte: Autor

A abordagem proposta na seção 3.1.2 é aplicada para estimar a necessidade de água de irrigação. A evapotranspiração de referência é estimada pela versão da FAO do modelo de Penman Monteith descrita na Equação 1, a evapotranspiração da cultura é calculada com a Equação 2 e a necessidade de água de irrigação é determinada usando a Equação 3 baseada no balanço hídrico.

A safra de milho analisada em 2020 é dividida nos seguintes estágios de desenvolvimento: Início -germinação (de 29 de abril a 4 de maio), Início (de 5 de maio a 18 de maio), Desenvolvimento (de 19 de maio a 7 de julho), Floração e frutificação (de 8 de julho a 21 de agosto), Maturação (de 22 de agosto a 3 de setembro) e Secagem (de 4 de setembro a 25 de setembro).

O calendário de irrigação estabelece de planejar a irrigação todos os dias desde o estágio Início - germinação até a conclusão do estágio Maturação, com base nos procedimentos de planejamento da irrigação definidos pelo modelo mental do gerente. O intervalo de tempo (*time step*) do modelo é igual ao dia, de acordo com o prazo de execução da irrigação.

A necessidade de água de irrigação planejada é um componente exógeno em razão do propósito da tese de estudar o comportamento do agricultor e, portanto, de considerar o consultor um ator fora de escopo. O componente exógeno volta pivô % determina a % da circunferência completada pela última torre em uma volta com base os estágios de desenvolvimento. A última torre, torre mais distante do ponto de articulação do pivô central, controla o movimento de todo o pivô (EVANS, 2001).

O tempo de irrigação planejado é um componente endógeno que define o tempo de funcionamento do pivô central para aplicar a necessidade de água de irrigação planejada. O tempo de irrigação planejado é igual à soma do tempo de irrigação planejado noturno, tempo de irrigação planejado diurno e tempo de irrigação planejado no pico.

O uso de água planejado noturno, que estabelece o volume de água planejado em um dia para a irrigação durante o tempo de irrigação planejado noturno, é calculado com base a vazão do pivô central e o tempo de irrigação planejado noturno. O uso de água planejado diurno e o uso de água planejado no pico são calculados da mesma forma. O uso de água na safra define o volume de água acumulado, com base no prazo de planejamento (semana, mês, estágio de desenvolvimento, safra). O custo unitário de água é um componente exógeno, definido com base em dados secundários, visto que no atual contrato de acesso à água (outorga) o órgão gestor ainda não estabelece um custo unitário de uso de água. O custo de uso de água planejado noturno determina o custo cobrado pelo volume de água planejado em um dia para a irrigação durante o tempo de irrigação planejado noturno. O custo de uso de água planejado na safra

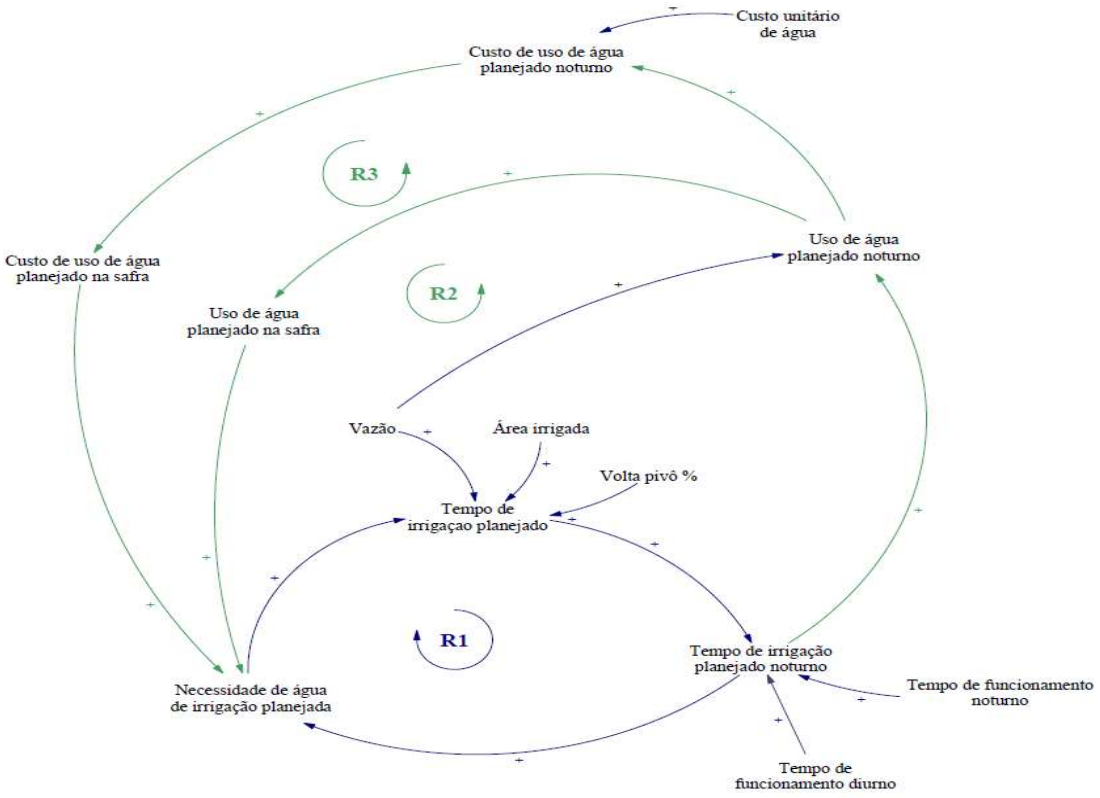
define o custo cobrado pelo volume de água acumulado, com base o prazo de planejamento (semana, mês, estágio de desenvolvimento, safra).

Em relação ao planejamento do uso de energia elétrica, o uso de energia elétrica depende do uso de energia elétrica da bomba utilizado para a captação de água da fonte de água e do uso de energia elétrica do motor utilizado para a movimentação do pivô central durante a execução da irrigação. A taxa de consumo da bomba depende da área a irrigar, que define a área em que aplicar a necessidade de água de irrigação planejada durante o tempo de irrigação planejado noturno, diurno e no pico. A área a irrigar é afetada pelas características do sistema de irrigação (pivô central) e da sua geometria: circunferência última torre (circunferência completada pela última torre em uma volta), circunferência área irrigada (circunferência relativa à área irrigada), volta última torre (% da circunferência completada pela última torre em uma volta), velocidade última torre (velocidade referida à última torre em uma volta). O tempo de ajuste é um componente endógeno que ajusta o prazo de execução da irrigação (igual ao dia) ao intervalo de tempo (*time step*) no modelo, de acordo com Forrester (1961) e Sterman (2000). A taxa de consumo do motor é um componente exógeno fixo para cada volta e não depende da velocidade do pivô central utilizado para realizar as simulações. A soma do uso de energia elétrica planejado da bomba e do uso de energia elétrica planejado do motor permite calcular o uso de energia elétrica planejado para aplicar a necessidade de água de irrigação planejada por meio do pivô central. O uso de energia elétrica planejado na safra possibilita planejar a quantidade de energia elétrica necessária para aplicar a necessidade de água de irrigação planejada no tempo de irrigação planejado noturno, diurno e no pico com base no prazo de planejamento (semana, mês, estágio de desenvolvimento, safra) definido perlo gerente. Enfim, o custo de uso de energia elétrica planejado noturno define o custo cobrado pela quantidade de energia elétrica planejada em um dia para a irrigação durante o tempo de irrigação planejado noturno, com base no custo unitário de energia elétrica noturno e no uso de energia elétrica planejado noturno - bomba + motor. O custo de uso de energia elétrica planejado diurno e no pico são calculados da mesma forma.

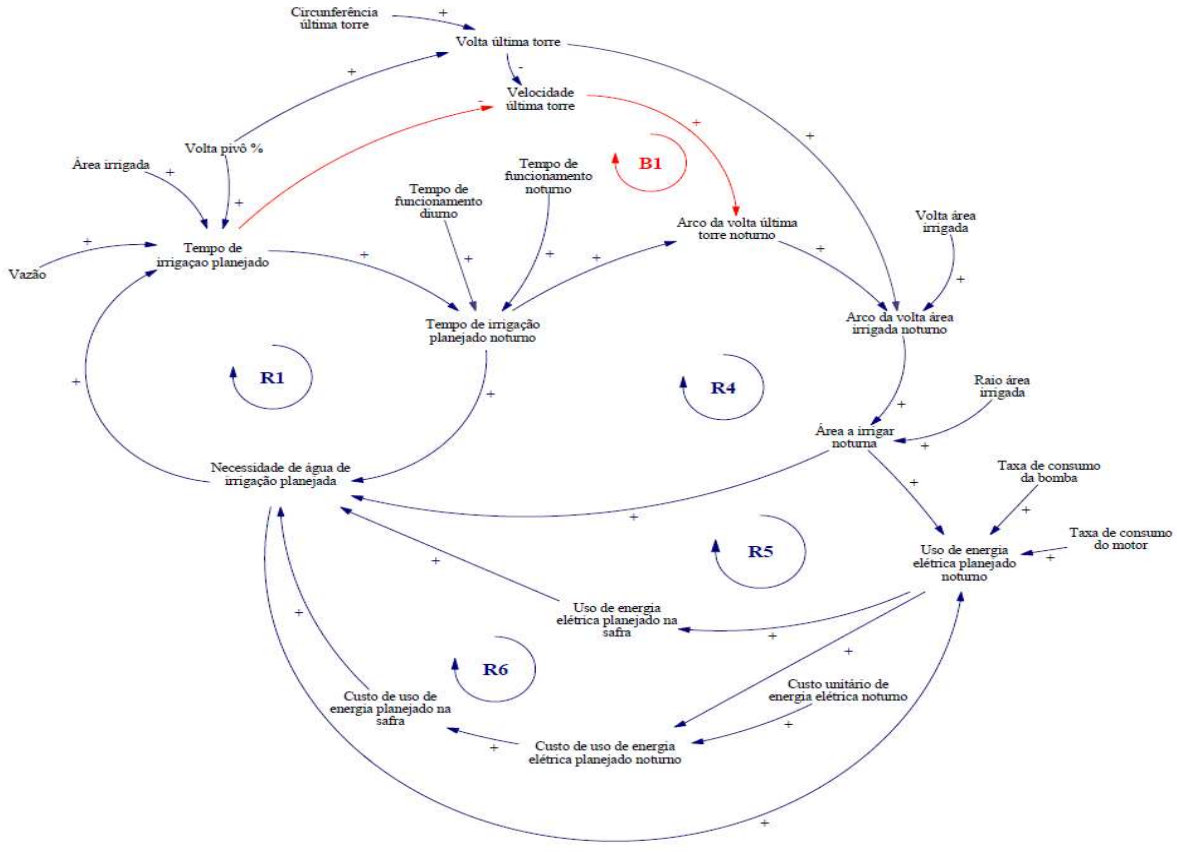
5.6.2 Mecanismos básicos e diagrama dos ciclos causais

No que se refere à definição dos mecanismos básicos, um diagrama dos ciclos causais dos principais mecanismos básicos considerando o tempo de funcionamento noturno é ilustrado na Figura 15, para representar as relações entre os componentes do modelo de simulação.

Figura 15 - Diagrama dos ciclos causais dos mecanismos básicos



(a)



(b)

Fonte: Autor

Da mesma forma, um diagrama dos ciclos causais considerando o tempo de funcionamento diurno e no pico pode ser construído.

Esse diagrama dos ciclos causais é baseado em uma hipótese dinâmica, que é uma explicação do comportamento das operações de irrigação consistente com o propósito do modelo (ALBIN, 1997). Nesse trabalho a hipótese dinâmica consiste em:

a) o utilizo da estação meteorológica (cenário de simulação 1) e a adoção da tecnologia de sensoriamento IoT do satélite (cenário de simulação 2) pelo gerente da "Empresa agrícola Bahia" afetam o uso de água planejado e uso de energia elétrica planejado.

De acordo com Sterman (2000), o diagrama ilustra os principais mecanismos básicos para analisar a estrutura geral dos ciclos e como os diferentes ciclos interagem, para entender a lógica e avaliar a plausibilidade do modelo. O diagrama dos ciclos causais não pretende ser uma descrição do modelo no nível detalhado das equações.

O diagrama pode ser utilizado para analisar qualitativamente os beneficios do utilizo da estação meteorológica (cenário de simulação 1) e da adoção da tecnologia de sensoriamento IoT do satélite (cenário de simulação 2) em relação ao uso de água planejado e uso de energia elétrica planejado. O resultado do utilizo e da adoção das duas tecnologias sobre a necessidade de água de irrigação planejada pode ser avaliado no uso de água planejado (ciclos R1, R2 e R3) e no uso de energia elétrica planejado (ciclos R4, R5, R6 e B1) por meio dos ciclos identificados e das relações entre seus componentes.

O ciclo R1 ilustra as relações de causa e efeito entre a necessidade de água de irrigação planejada e o tempo de irrigação planejado noturno, atraves do componente endogeno tempo de irrigação planejado e exogenos, tempo de funcionamento noturno e tempo de funcionamento diurno, que dependem do contrato de fornecimento de energia eletrica. O tempo de irrigação planejado é afetado pelas caracteristicas do sistema de irrigação, vazão e área irrigada, e pela volta pivô %. O ciclo R2 ilustra as relações de causa e efeito entre a necessidade de água de irrigação planejada, o tempo de irrigação planejado noturno e o uso de água planejado noturno e o uso de água planejado na safra. O ciclo R3 permite estudar as relações de causa e efeito entre a necessidade de água de irrigação planejada, o tempo de irrigação planejado noturno, o uso de água planejado noturno e o custo de uso de água planejado noturno e custo de uso de água planejado na safra. O custo de uso de água planejado noturno depende do custo unitário da água, que é definido com base no contrato de acesso à água (outorga). Também para os ciclos R2 e R3, o diagrama destaca a relação entre o contrato de fornecimento de energia elétrica e o

tempo de irrigação planejado noturno por meio dos componentes exógenos tempo de funcionamento noturno e tempo de funcionamento diurno.

Quanto às relações que envolvem o uso de energia elétrica planejado, o ciclo R4 ilustra as relações de causa e efeito entre a necessidade de água de irrigação planejada e a área a irrigar noturna, atraves dos componentes endógenos tempo de irrigação planejado, tempo de irrigação planejado noturno, arco da volta última torre noturno (arco da circunferência completado pela última torre durante o tempo de irrigação planejado noturno) e arco da volta área irrigada noturno (arco da circunferência relativa à área irrigada completado durante o tempo de irrigação planejado noturno) e do componente exógeno raio área irrigada. O efeito do ciclo R4 no arco da volta última torre noturno é equilibrado pelo ciclo B1 por efeito do componente velocidade última torre. Os dois arco da volta última torre noturno e arco da volta área irrigada noturno são definidos com base nas características do sistema de irrigação e na sua geometria. O ciclo R5 permite analisar as relações de causa e efeito entre a necessidade de água de irrigação planejada e o uso de energia elétrica planejado na safra, adicionando aos componentes do ciclo R4 o uso de energia elétrica planejado noturno, que depende dos componentes exógenos taxa de consumo da bomba e taxa de consumo do motor. Enfim, o ciclo R6 introduz o custo de uso de energia elétrica planejado noturno para ilustrar as relações de causa e efeito entre a necessidade de água de irrigação planejada e o custo de uso de energia elétrica planejado na safra. O custo de uso de energia elétrica planejado noturno depende do componente exógeno custo unitário da energia elétrica, que é definido com base no contrato de fornecimento de energia elétrica.

Portanto, é possível esperar que uma redução ou um aumento da estimativa da necessidade de água de irrigação planejada, em razão da adoção da tecnologia de sensoriamento IoT do satélite comparada com o utilizo da estação meteorológica, possa reduzir ou aumentar o uso de água planejado e uso de energia elétrica planejado. Contudo, esses resultados potenciais são afetados pelos componentes exógenos contrato de acesso à água (outorga) e contrato de fornecimento de energia elétrica que determinam os custos unitários dos insumos, água e energia elétrica. Além disso, o contrato de fornecimento de energia elétrica e a falta de cobrança pelo uso de água do vigente contrato de acesso à água (outorga) fundamentam o modelo mental do gerente da empresa agrícola, que prioriza a minimização do uso de energia elétrica. Esses resultados potenciais são afetados também pelas características do sistema de irrigação (pivô central) e pela sua geometria.

5.6.3 Diagrama de estoques e fluxos

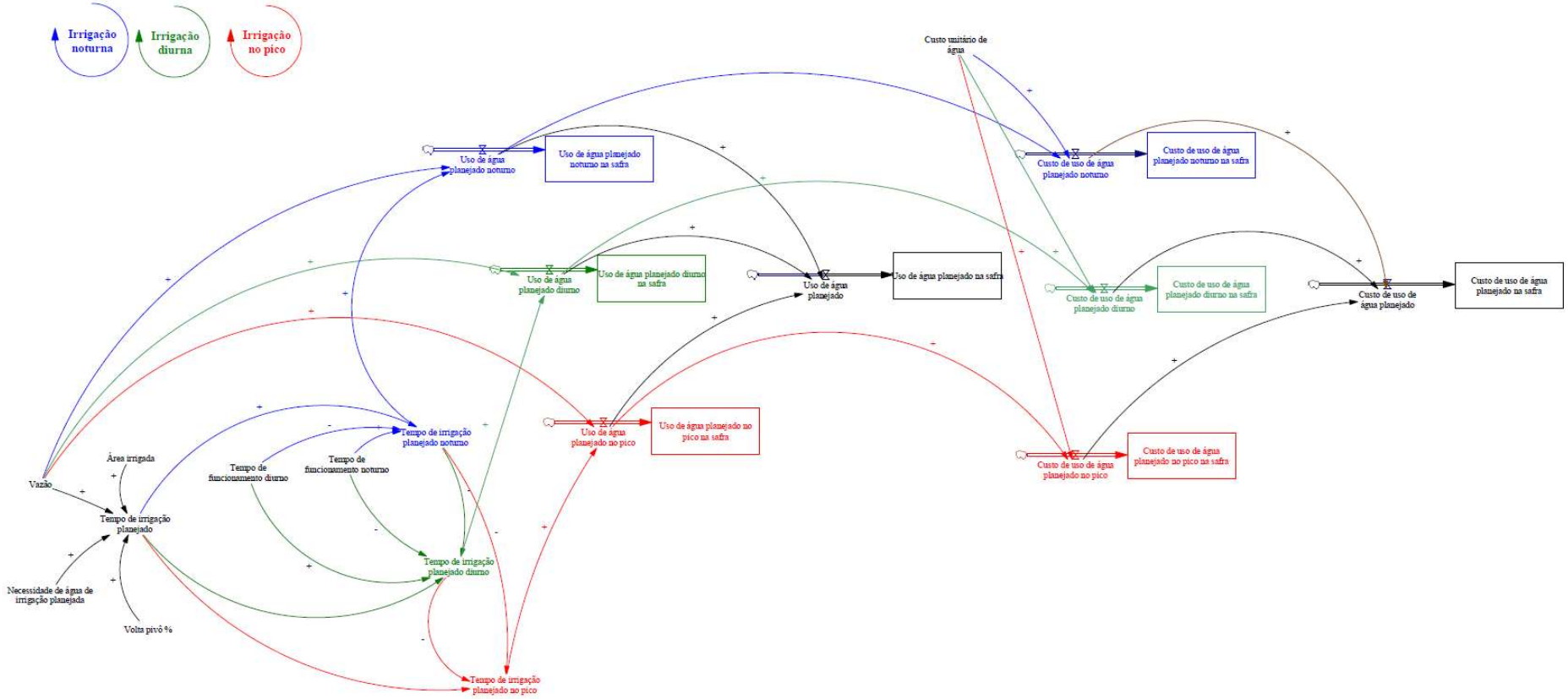
A respeito da formulação do modelo, o objetivo dessa fase consiste em formular as variáveis, constantes, fluxos e estoques do modelo (DIAMOND, 2001). De acordo com Sterman (2000), os estoques e fluxos acompanham os acúmulos de uso de água e uso de energia elétrica ao longo da safra, em função do prazo de planejamento (semana, mês, estágio de desenvolvimento, safra).

A partir dos resultados da conceptualização (identificação dos componentes exógenos e endógenos, descrição dos mecanismos básicos), do diagrama IDEF0 do planejamento de irrigação dos cenários de simulação, e com o suporte do software Vensim®, as variáveis, constantes, fluxos e estoques são desenhadas no modelo e ilustradas na Figura 16 (ciclos causais R1, R2 e R3) em relação ao planejamento de uso de água e nas Figura 18 (ciclos causais R1, B1 e R4) e Figura 19 (ciclos causais R5 e R6) em relação ao planejamento de uso de energia elétrica. Os ciclos destes dois planejamentos têm em comum os componentes endógenos tempo de irrigação planejado, tempo de irrigação planejado noturno, tempo de irrigação planejado diurno e tempo de irrigação planejado no pico.

Essa fase inclui também a documentação do modelo, ilustrada no Apêndice H, para garantir que os resultados possam ser compreendidos, replicados, criticados e estendidos por outros pesquisadores (DIAMOND, 2001). Para cada componente do modelo, a documentação fornece a fórmula matemática, a unidade de medida e alguns comentários.

O diagrama pode ser utilizado para analisar quantitativamente os benefícios do utilizo da estação meteorológica (cenário de simulação 1) e da adoção da tecnologia de sensoriamento IoT do satélite (cenário de simulação 2). O resultado do utilizo e da adoção das duas tecnologias sobre a necessidade de água de irrigação planejada pode ser avaliado no uso de água planejado (Figura 16), no uso de energia elétrica planejado - bomba (Figura 18) e no uso de energia elétrica planejado - motor (Figura 19) por meio dos ciclos identificados e das relações entre seus componentes.

Figura 16 - Diagrama dos estoques e fluxos dos cenário de simulação - Uso de água planejado



Fonte: Autor

No diagrama dos estoques e fluxos relativos ao uso de água planejado (Figura 16), o componente exógeno necessidade de água de irrigação planejada é estimada por meio de um modelo baseado nas recomendações dos consultores especialistas em engenharia agronômica. Esse modelo utiliza a abordagem baseada no balanço hídrico ilustrada na Equação 3, os procedimentos de planejamento da irrigação, definidos pelo modelo mental do gerente da empresa agrícola, e as características do sistema de irrigação (lâmina mínima aplicável igual a 5,20 mm/ volta e a eficiência de aplicação igual a 85%). A estimativa da necessidade de água de irrigação planejada, a partir da necessidade de água da cultura, com base na Equação 1 e na Equação 2 (BROUWER; PRINS; HEIBLOEM, 1989; SAVVA; FRENKEN, 2002), e da necessidade de água de irrigação, determinada usando a abordagem baseada no balanço hídrico ilustrada na Equação 3[3], simula que o gerente utilize a tecnologia de sensoriamento IoT da estação meteorológica e adote a satélite, tecnologias ilustradas no Quadro 2. No cenário de simulação 1, uma estação meteorológica localizada na "Empresa agrícola Bahia" é utilizada; no cenário de simulação 2, utiliza-se a base de dados de satélite NASA/POWER (STACKHOUSE et al., 2018). A localização destas simulações se encontra na região do Estado da Bahia onde o clima tropical de savana é predominante (ALVARES et al., 2013). A estação meteorológica local fornece os dados de Temperatura mínima (T_{min}), Temperatura máxima ($T_{\max}$), Temperatura média (T_{m}), Radiação solar (R_{s}), Umidade relativa do ar (RH), Precipitação (P) e Velocidade do vento a uma altura de 2 metros (u_2); a base de dados do satélite NASA/POWER disponibiliza os dados de Temperatura mínima ($T_{\min}$), Temperatura máxima ($T_{\max}$), Temperatura média (T_{m}), Radiação solar extraterrestre (R_{a}), Radiação solar (R_{s}), Radiação solar de céu limpo (R_{so}), Umidade relativa do ar (RH), Precipitação (P) e Velocidade do vento a uma altura de 2 metros (u_2). O Quadro 13 resume os dados coletados em cada uma das fontes de dados.

Quadro 13 - Resumo dos dados meteorológicos

Fonte de dados	**Temperatura**	**Radiação**	**Umidade**	**Velocidade do vento**	**Precipitação**
Estação meteorológica	$T_{\min}, T_{\max}, T_{\mathrm{m}}$	R_{s}	RH	u_2	P
Satélite	$T_{\min}, T_{\max}, T_{\mathrm{m}}$	$R_{\mathrm{a}}, R_{\mathrm{s}}, R_{\mathrm{so}}$	RH	u_2	P

Fonte: Autor "adaptado de" Monteleone et al., 2020b, p. 11

[3] As estimativas da necessidade de água da cultura e da necessidade de água de irrigação foram realizadas pelo pesquisador Brenno Tondato de Faria, colega no projeto SWAMP.

Em ambos os cenários de simulação a evapotranspiração de referência, utilizando a Equação 1, a evapotranspiração da cultura, dada pela Equação 2, e a água necessária para a irrigação, com base na Equação 3, são calculadas. Os parâmetros $PERC$ e WL na Equação 3 são considerados fora de escopo, em razão da necessidade de utilização de dispositivos de sonda de solo que não são contemplados pelas tecnologias de sensoriamento IoT utilizadas nas simulações.

Em relação à volta pivô %, o gerente da empresa agrícola define uma volta igual a 100% no estágio "Início-germinação" (para manter a camada do solo húmida e facilitar a germinação da semente, o que pode resultar na necessidade de água de irrigação aplicada maior que a capacidade de campo), 50% no estágio "Início" até o fim do estágio "Maturação" (para aproveitar da irrigação no tempo de funcionamento noturno dado o vigente contrato de fornecimento de energia elétrica e o relativo custo unitário de energia elétrica nos diferentes horários durante o dia) e 0% no estágio "Secagem".

O tempo de irrigação planejado, que define o tempo de funcionamento do pivô central para aplicar a necessidade de água de irrigação planejada, é calculado com base a vazão do pivô central (igual a 347,24 m^3/ hora), a sua área irrigada (igual a 80,23 hectares) e a volta pivô %. O tempo de irrigação planejado é igual à soma do tempo de irrigação planejado noturno, tempo de irrigação planejado diurno e tempo de irrigação planejado no pico. Cada um destes tempos é calculado com base nos tempos de funcionamento (noturno das 21:00 às 6:00, diurno das 6:00 às 18:00, no pico 18:00 às 21:00) definidos a partir do contrato de fornecimento de energia eléctrica.

O uso de água planejado noturno, que determina o volume de água planejado em um dia para a irrigação durante o tempo de irrigação planejado noturno, é calculado com base na vazão do pivô central (igual a 347,24 m^3/ hora) e o tempo de irrigação planejado noturno. Da mesma forma, o uso de água planejado diurno e o uso de água planejado no pico são calculados. O uso de água é calculado também em relação à safra para planejar o volume de água acumulado (componente estoque "Uso de água planejado na safra"), com base no prazo de planejamento (semana, mês, estágio de desenvolvimento, safra).

Visto que no atual contrato de acesso à água (outorga) o órgão gestor ainda não estabelece um custo unitário de uso de água e para realizar simulações incluindo também o custo de uso de água, dados secundários são utilizados. Na construção do modelo de simulação a fonte de dados utilizada para o custo unitário de uso de água é um relatório da cobrança pelo uso da água para a irrigação na bacia hidrográfica do Rio São Francisco em 2020 (COMITÊ DA BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO SÃO FRANCISCO, 2020). A seguir da análise dos

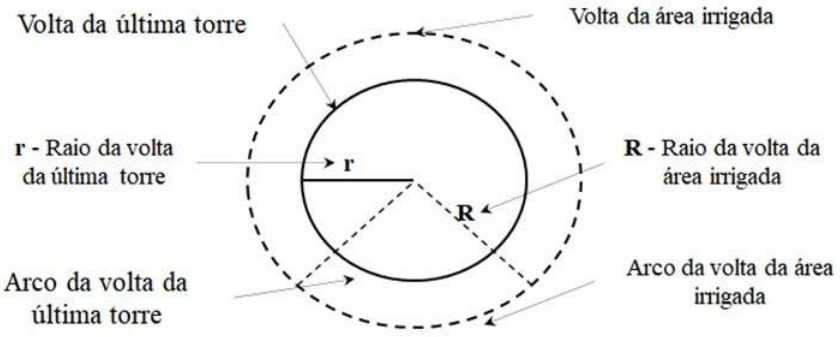
custos cobrados (relativos à cobrança para consumo analogamente ao custo de uso de energia elétrica considerado na simulação) para a irrigação de 2.402 usuários de recursos hídricos em 24 municípios no Estado da Bahia, na simulação são considerados: um custo unitário de água mínimo igual a 0,000141781 R$/ m^3; um custo unitário de água médio igual a 0,002267627 R$/ m^3; um custo unitário de água máximo igual a 0,008654488 R$/ m^3.

O custo de uso de água planejado noturno, que define o custo cobrado pelo volume de água planejado em um dia para a irrigação durante o tempo de irrigação planejado noturno, é calculado com base o custo unitário de água (custo médio igual a 0,002267627 R$/ m^3) e o uso de água planejado noturno. Da mesma forma, o custo de uso de água planejado diurno e o custo de uso de água planejado no pico são calculados. O custo de uso de água é calculado também em relação à safra para planejar o custo cobrado pelo volume de água acumulado (componente estoque "Custo de uso de água planejado na safra") com base no prazo de planejamento (semana, mês, estágio de desenvolvimento, safra).

Quanto ao diagrama dos estoques e fluxos relativos ao uso de energia elétrica planejado - bomba (Figura 18) e ao uso de energia elétrica planejado - motor (Figura 19), o uso de energia elétrica depende do uso de energia elétrica da bomba e do uso de energia elétrica do motor.

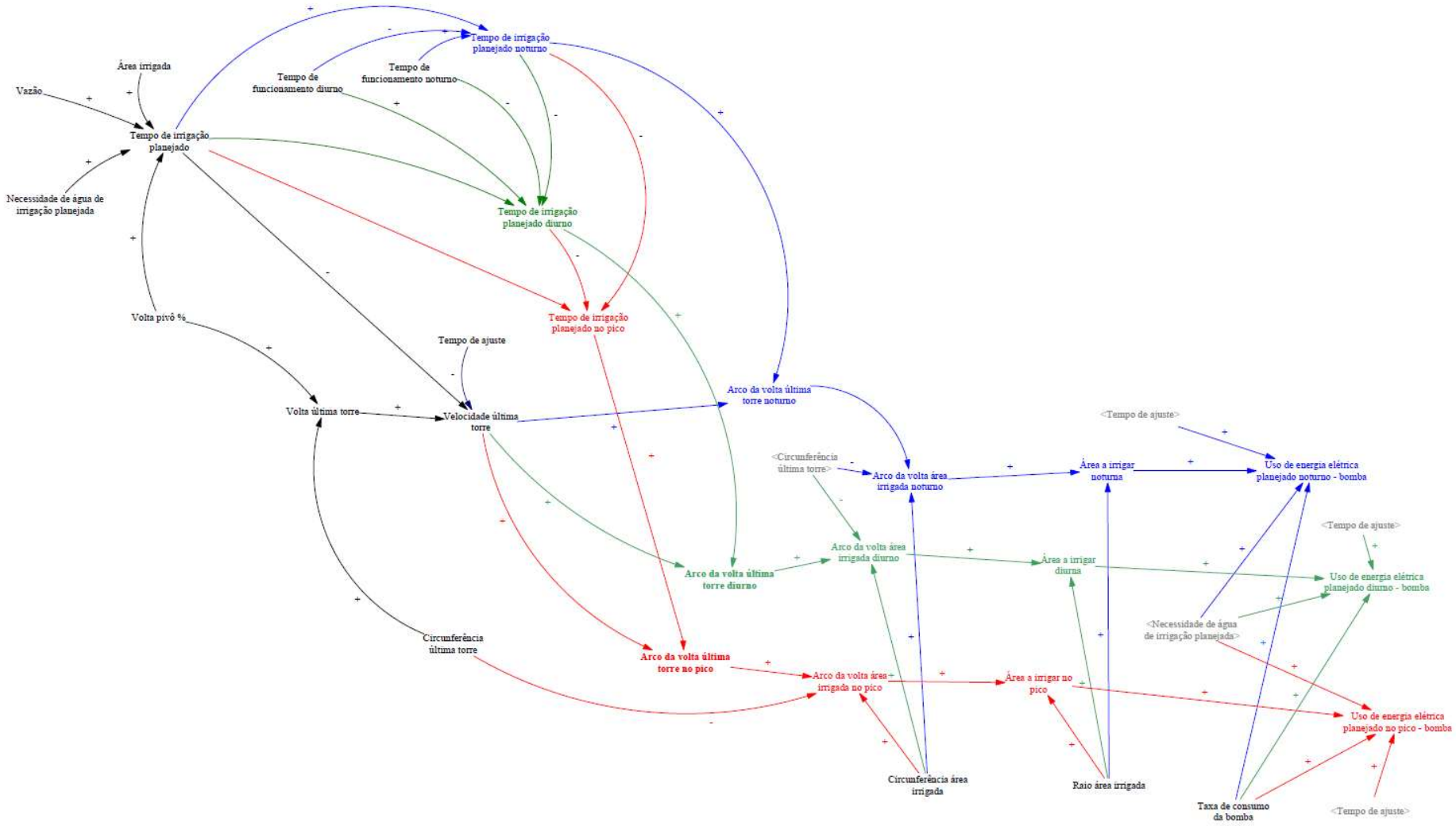
O uso de energia elétrica planejado - bomba, ilustrado na Figura 18, pode ser calculado com base na taxa de consumo da bomba, igual a 3,79 kwh/(ha*mm), que depende da área a irrigar e da necessidade de água de irrigação a aplicar. Portanto, no modelo de simulação os componentes área a irrigar noturna, área a irrigar diurna e área a irrigar no pico são incluídas. Esse cálculo é baseado nas características do sistema de irrigação (pivô central) e na sua geometria (BAIAMONTE, GIORGIO; BAIAMONTE, GABRIELE, 2019; DOMÍNGUEZ et al., 2022; EVANS, 2001). As características consideradas são ilustradas na Figura 17.

Figura 17 - Geometria e características do sistema de irrigação do pivô central



Fonte: Autor

Figura 18 - Diagrama dos estoques e fluxos dos cenário de simulação - Uso de energia elétrica planejado (bomba)

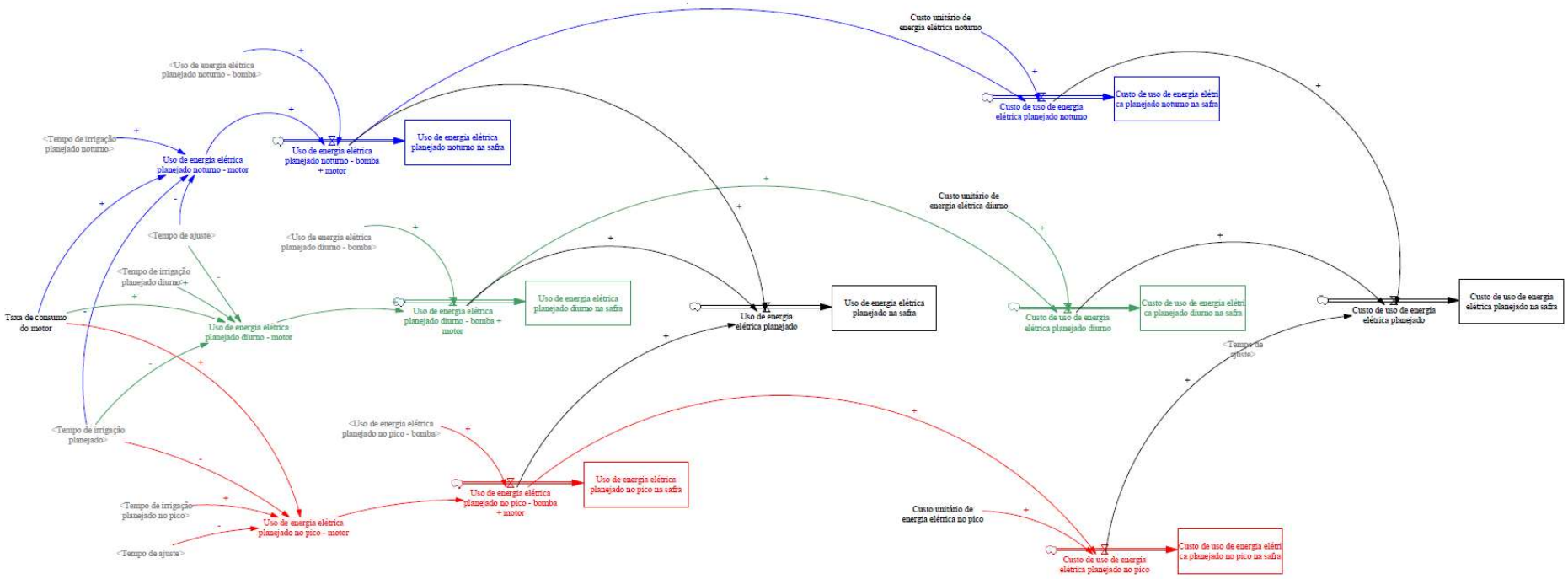


Fonte: Autor

A circunferência última torre (circunferência completada pela última torre em uma volta) é igual a 3.090,699 m e tem um raio (r) igual a 491,900 m, enquanto a circunferência área irrigada (circunferência relativa à área irrigada) mede 3.175,208 m e tem um raio (r) igual a 505,350 m. A partir das características da circunferência última torre e do tempo de irrigação planejado são calculadas a volta pivô % (% da circunferência completada pela última torre em uma volta) e a velocidade última torre (considerada a mesma para as duas circunferências no nível de agregação de pivô central, em vez do nível de cada aspersor e torre) e então são calculados o arco da volta última torre completado no tempo de irrigação planejado noturno, diurno e no pico. Com base na geometria do pivô central, de uma coroa circular e de um setor circular (BAIAMONTE, GIORGIO; BAIAMONTE, GABRIELE, 2019; DOMÍNGUEZ et al., 2022; EVANS, 2001), são calculados o arco da volta área irrigada e a área a irrigar no tempo de irrigação planejado noturno, diurno e no pico. Portanto, considerado a taxa de consumo da bomba, a área a irrigar e a necessidade de água de irrigação planejada, são calculados o uso de energia elétrica planejado noturno - bomba no tempo de irrigação planejado noturno, diurno e no pico.

Quanto ao uso de energia elétrica planejado - motor, ilustrado na Figura 19, o uso de energia elétrica planejado noturno - motor é calculado com base a taxa de consumo do motor (igual a 53,8 kwh). Dado que esse valor é fixo para cada volta e não depende da velocidade do pivô central utilizado para realizar as simulações, a taxa de consumo do motor é alocada proporcionalmente ao tempo de irrigação planejado noturno, diurno e no pico para calcular o uso de energia elétrica planejado - motor no tempo de irrigação planejado noturno, diurno e no pico. O uso de energia elétrica planejado na safra é calculado com base na acumulada do uso de energia elétrica planejado (componente estoque “Uso de energia elétrica planejado na safra”). Enfim, o custo de uso de energia elétrica planejado noturno é calculado com base no custo unitário de energia elétrica noturno e no uso de energia elétrica planejado noturno - bomba + motor. Da mesma forma o custo de uso de energia elétrica planejado diurno e o custo de uso de energia elétrica planejado no pico são calculados. O custo de uso de energia elétrica é calculado também em relação à safra para planejar o custo cobrado pela quantidade de energia elétrica acumulada (componente estoque “Custo de uso de energia elétrica planejado na safra”), com base no prazo de planejamento (semana, mês, estágio de desenvolvimento, safra).

Figura 19 - Diagrama dos estoques e fluxos dos cenário de simulação - Uso de energia elétrica planejado (motor)



Fonte: Autor

5.6.4 Resultados dos cenários de simulação

Os resultados dos cenários de simulação são ilustrados no Quadro 14, que resume os valores dos principais componentes do modelo de simulação no caso do utilizo da estação meteorológica (cenário de simulação 1) e da adoção da tecnologia de sensoriamento IoT do satélite (cenário de simulação 2) em relação à safra analisada.

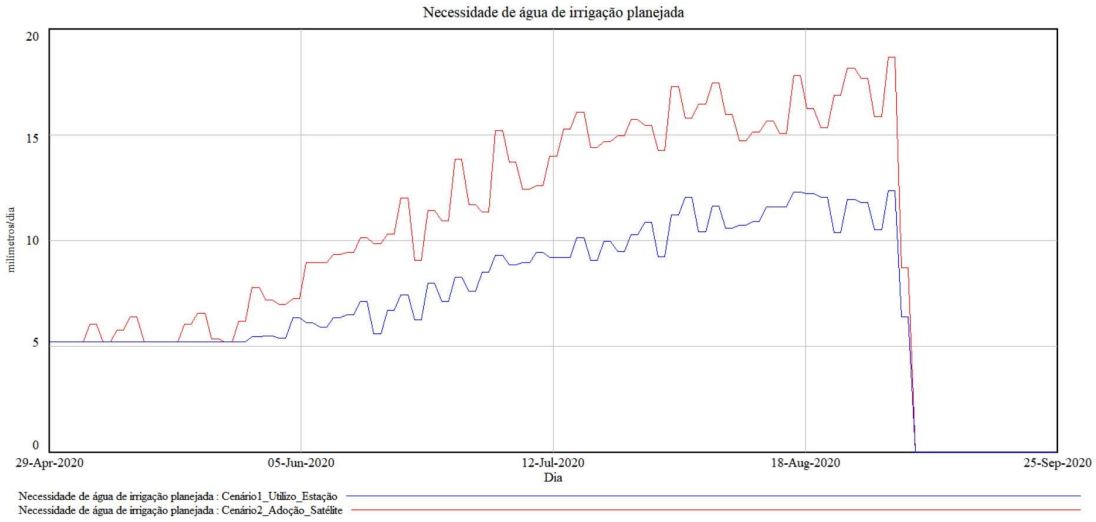
Quadro 14 - Resultados dos cenários de simulação

Componentes do modelo	**Cenário 1 - Estação meteorológica**	**Cenário 2 - Satélite**
Necessidade de água de irrigação planejada na safra	1.045,816 mm	1.475,955 mm
Tempo de irrigação planejado na safra	1.244,226 horas	1.741,145 horas
Área a irrigar na safra	5.375,381 ha	5.375,381 ha
Uso de água planejado na safra	432.045, 094 m^3	604.595,250 m^3
Custo de uso de água planejado na safra	979,718 R$	1.370,998 R$
Uso de energia elétrica planejado na safra	170.630,703 kwh	236.026,891 kwh
Custo de uso de energia elétrica planejado na safra	2.264,533 R$	5.528,083 R$

Fonte: Autor

Os resultados evidenciam que a necessidade de água de irrigação planejada na safra usa 41,13% mais água no caso da adoção do satélite em comparação com o utilizo da estação meteorológica, como ilustrado na Figura 20.

Figura 20 - Resultados dos cenários de simulação - Necessidade de água de irrigação planejada na safra



Fonte: Autor

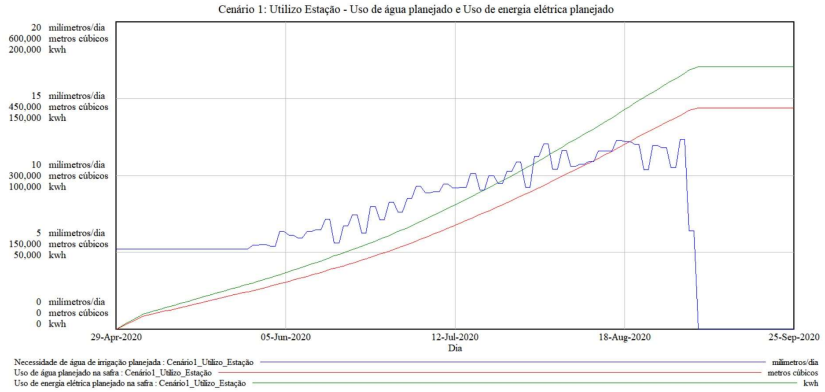
Essa diferença, que ocorre em todos os estágios de desenvolvimento a partir do “Início”, pode ser explicada por causa da superestimativa da evapotranspiração de referência em razão dos dados meteorológicos da base de dados do satélite.

Os resultados dos cenários de simulação permitem estudar as relações entre a adoção do satélite e o utilizo da estação meteorológica e os componentes do modelo de simulação. Os efeitos no uso de água planejado, no uso de energia elétrica planejado e nos relativos custos dos dois cenários são ilustrados na Figura 21, respectivamente: gráfico do uso de água planejado na safra e do uso de energia elétrica planejado na safra simulando o utilizo da estação meteorológica (Figura 21(a)), gráfico do custo de uso de água planejado na safra e do custo de uso de energia elétrica planejado na safra simulando o utilizo da estação meteorológica (Figura 21 (b)), gráfico do uso de água planejado na safra e do uso de energia elétrica planejado na safra simulando a adoção do satélite (Figura 21(c)), gráfico do custo de uso de água planejado na safra e do custo de uso de energia elétrica planejado na safra simulando a adoção do satélite (Figura 21(d)).

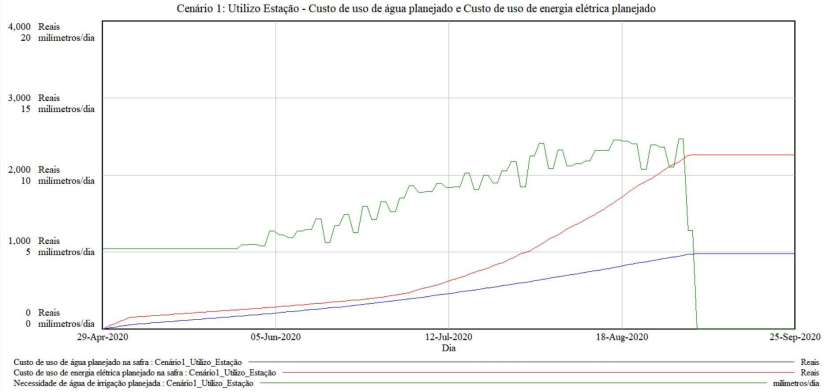
O ciclo R1 (Figura 15(a) e Figura 21(a)) esclarece a relação entre a necessidade de água de irrigação planejada e o tempo de irrigação planejado. No caso de adoção do satélite o tempo de funcionamento do pivô central para aplicar a necessidade de água de irrigação planejada resulta superestimado por um valor igual a 39,934%, principalmente em consequência do tempo de irrigação planejado diurno, responsável por um aumento de 300,207%. Ainda a operação de planejamento do tempo de irrigação determina também um tempo de irrigação planejado no pico, igual a 1,128 horas, por efeito da necessidade de irrigar em dois dias na safra. Aumentos iguais também resultam na análise da relação entre a necessidade de água de irrigação planejada e o uso de água planejado (ciclo R2 - Figura 15(a) e Figura 21(a)) e entre a necessidade de água de irrigação planejada e o custo de uso de água planejado (ciclo R3 - Figura 15(a) e Figura 21(a)) considerado que os componentes exógenos vazão e custo unitário de água são constantes.

Quanto as relações que envolvem o uso de energia elétrica, o estudo da adoção da tecnologia de sensoriamento do satélite em comparação com o utilizo da estação meteorológica é realizado por meio dos ciclos R1, R4, B1, R5 e R6. Em relação ao ciclo R4 (Figura 15(b) e Figura 21(b)), no caso de adoção do satélite a área a irrigar diurna resulta superestimada por um valor igual a 212,624%, pelo aumento do tempo de irrigação planejado diurno.

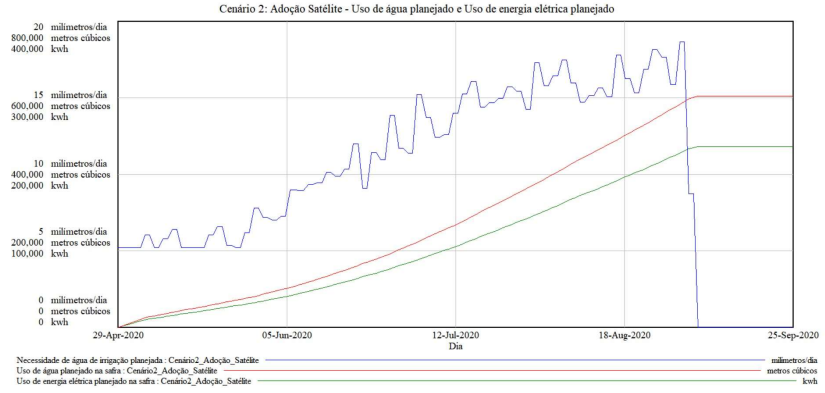
Figura 21 - Resultados dos cenários de simulação - Uso de água planejado, Uso de energia elétrica planejado e relativos custos planejados



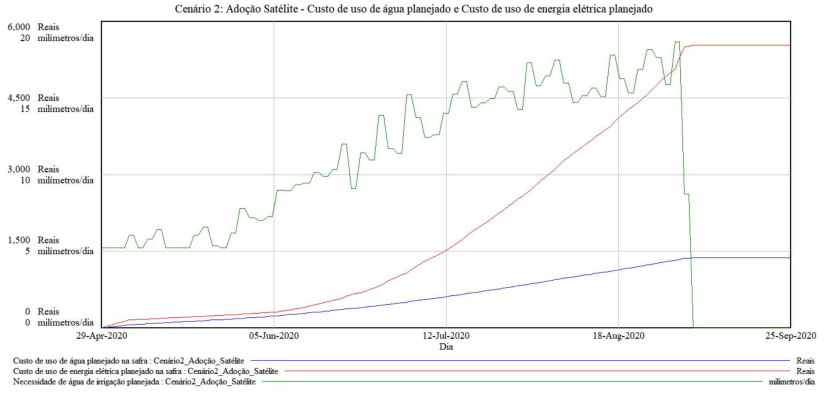
(a)



(b)



(c)



(d)

Fonte: Autor

Contudo, o planejamento da área a irrigar noturna manifesta uma redução igual a 18,399% por efeito do ciclo de balanceamento B1 (Figura 15(b) e Figura 21(b)): a superestimativa da necessidade de água de irrigação planejada no caso de adoção do satélite determina um aumento do tempo de irrigação planejado (noturno e diurno) e uma redução da velocidade do pivô planejada, dado que quanto mais lenta for a velocidade de rotação do pivô maior será a quantidade de água aplicada e dado que a circunferência última torre é constante nos dois cenários (BERNARDO; SOARES; MANTOVANI, 1982; EVANS, 2001). Consequentemente, o arco da volta última torre noturno e arco da volta área irrigada noturno resultam menores em comparação com o utilizo da estação meteorológica.

Quanto à análise do ciclo R5 (Figura 15(b), Figura 21(b) e Figura 21(c)), o uso de energia elétrica planejado na safra (quantidade de energia elétrica planejada em um dia necessária para alimentar a bomba e o motor do pivô central e para aplicar a necessidade de água de irrigação planejada) resulta superestimado por um valor igual a 38,326% no caso de adoção do satélite, principalmente por efeito do uso diurno, responsável por um aumento de 297,753%. O uso de energia elétrica planejado na safra, que é atribuído à bomba, é igual a 97,082%. O uso de energia elétrica planejado no pico na safra é igual a 151,291 kwh.

Um comportamento semelhante pode ser observado relativamente ao ciclo R6 (Figura 15(b) e Figura 21(c)). O custo de uso de energia elétrica (custo de uso de energia elétrica planejado em um dia necessário para aplicar a necessidade de água de irrigação planejada) é superior a 144,116% no caso de adoção do satélite, em razão do custo unitário de energia elétrica durante o tempo de funcionamento diurno previsto no atual contrato de fornecimento de energia elétrica. O custo de uso de energia elétrica planejado no pico na safra é igual a 255,1824 R$.

Os cenários de simulação permitem também identificar as crenças sobre as redes de causas e efeitos (STERMAN, 2000), que fundamentam o modelo mental do gerente da "Empresa agrícola Bahia" e que determinam os resultados ilustrados no Quadro 14. As crenças, que pertencem aos fatores classificados com base nos construtos da Teoria do Comportamento Planejado, são o custo unitário de energia elétrica (noturno, diurno e no pico) e o tempo de funcionamento (noturno e diurno), definidos com base no contrato de fornecimento de energia elétrica. Essa crenças explicam as relações entre a adoção do satélite e o utilizo da estação meteorológica e os componentes do modelo de simulação, que envolvem fatores abordados nas Proposições teóricas 1a e 8c.

5.6.5 Teste

Por definição todos os modelos são errados, porque são representações limitadas e simplificadas do mundo real e, portanto, eles diferem da realidade de maneiras grandes e pequenas. Contudo, a literatura disponibiliza uma ampla variedade de testes, que podem ser usados para testar o modelo, para descobrir as falhas e propor melhorias. Nessa tese os seguintes testes são utilizados: adequação de limite, avaliação de estrutura, consistência dimensional, avaliação de parâmetros, condições extremas, erro de integração, reprodução de comportamento, anomalia de comportamento, membro da família, comportamento surpresa, análise de sensibilidade e melhoria do sistema (STERMAN, 2000).

Adequação de limite

O teste de adequação de limite avalia a adequação do limite do modelo para o propósito em questão. O teste verifica se os conceitos importantes para abordar o problema são endógenos ao modelo, se o comportamento do modelo muda significativamente quando as suposições de limite são relaxadas, se as recomendações de política mudam quando o limite do modelo é estendido (STERMAN, 2000).

Para abordar o problema que o modelo analisa, os conceitos importantes do planejamento do tempo de irrigação, planejamento do uso de água e planejamento do uso de energia elétrica são endógenos ao modelo. A necessidade de água de irrigação planejada é um componente exógeno em razão do propósito da tese de estudar o comportamento do agricultor e de considerar o consultor um ator fora de escopo nesse trabalho. Portanto, o modelo de simulação não inclui o planejamento da necessidade de água de irrigação. Além disso, de acordo com a finalidade do modelo, que envolve as tecnologias de sensoriamento IoT da estação meteorológica e do satélite, também a tecnologia sonda de solo está fora de escopo. O comportamento do modelo não é esperado mudar significativamente no caso da necessidade de água de irrigação planejada fosse um componente endógeno. Ao contrário, os benefícios esperados da adoção da tecnologia sonda de solo mudariam significativamente em comparação com a adoção do satélite e o utilizo da estação meteorológica nos cenários de simulação, pela oportunidade de incluir os parâmetros $PERC$ e WL na Equação 3 e consequentemente melhorar a estimativa da necessidade de água de irrigação planejada.

Avaliação de estrutura

O teste de avaliação de estrutura pergunta se o modelo é consistente com o conhecimento do sistema real relevante para o propósito. A avaliação da estrutura enfoca o

nível de agregação e a conformidade do modelo com as realidades físicas básicas (STERMAN, 2000).

A estrutura do modelo é desenvolvida com base no diagrama IDEF0 ilustrado na Figura 14, nos resultados das entrevistas com 36 especialistas e os gerentes de 2 empresas agrícolas, nos fatores identificados na revisão da literatura, combinando conceitos de IoT, AP, Agricultura 4.0, TPB e gestão das operações de irrigação.

O nível de agregação, que considera as operações de irrigação a nível de pivô central em vez de cada aspersor e torre, é apropriado ao propósito de estudar as relações entre os componentes do planejamento da irrigação. No caso das operações de programação e execução da irrigação é oportuno considerar um nível de agregação de cada aspersor e torre.

As regras de decisão capturam o comportamento do gerente da empresa agrícola (ator em escopo no sistema), de acordo com o propósito de estudar as crenças do modelo mental do agricultor em relação à adoção de tecnologias de AP.

Consistência dimensional

A consistência dimensional é um teste básico para verificar se cada equação é dimensionalmente consistente (STERMAN, 2000).

Esse teste foi realizado usando o recurso Verificação de unidades (*Units check*) de Vensim®.

Avaliação de parâmetros

Esse teste verifica se os valores dos parâmetros são consistentes com o conhecimento descritivo e numérico relevante do sistema e se todos os parâmetros têm contrapartes do mundo real (STERMAN, 2000).

Para calcular todos os componentes exógenos, as características do sistema de irrigação (pivô central 06) são usadas, exceto para os custos unitários. O custo unitário de energia elétrica é igual à tarifa aplicada na nota fiscal mensal da conta de energia elétrica no tempo de funcionamento noturno, diurno e no pico. O custo unitário de água é definido com base em dados secundários, considerado que no atual contrato de acesso à água (outorga) o órgão gestor ainda não estabelece um custo unitário de uso de água. A fonte de dados utilizada para o custo unitário de uso de água é um relatório da cobrança pelo uso da água para a irrigação na bacia hidrográfica do Rio São Francisco (CBHSF, 2020).

Condições extremas

Os modelos devem ser robustos em condições extremas e se comportar de maneira realista. Os testes de condição extrema perguntam se os modelos se comportam de maneira

adequada quando as entradas assumem valores extremos, como zero ou infinito (STERMAN, 2000).

Cada equação do modelo foi testada durante o processo de construção e verificada durante a simulação. Em algumas equações a função IF THEN ELSE é utilizada para evitar erros em caso de valor zero nos denominadores das fórmulas.

Erro de integração

Os modelos de Dinâmica de Sistema são geralmente formulados em tempo contínuo e resolvidos por integração numérica. O pesquisador deve selecionar um método de integração numérica e um intervalo de tempo que produzam uma aproximação da dinâmica contínua subjacente precisa o suficiente para seu propósito. Os resultados do modelo não devem ser sensíveis à escolha do intervalo de tempo ou método de integração. Uma regra para encontrar o melhor intervalo de tempo que equilibra o trade-off entre precisão e capacidade computacional necessária é reduzir pela metade o intervalo de tempo e avaliar a nova precisão encontrada, se estiver perto da precisão desejada, então o intervalo de tempo pode ser definido, caso contrário, mais uma redução pode ser feita e reavaliar o erro (STERMAN, 2000).

Diferentes intervalos de tempo (*time step*) no caso de adoção do satélite e de utilizo da estação meteorológica foram testados, cortando o intervalo de tempo pela metade. Os resultados do modelo não se tornaram sensíveis à escolha do intervalo de tempo.

Reprodução de comportamento

Muitas ferramentas são disponíveis para avaliar a capacidade de um modelo de reproduzir (qualitativa e quantitativamente) o comportamento de um sistema. Mais comuns são as estatísticas descritivas para avaliar o ajuste ponto a ponto (STERMAN, 2000).

Para realizar esse teste foi escolhido o componente “Necessidade de água de irrigação planejada”, porque o gerente da empresa agrícola não gerencia as operações do planejamento da necessidade de água de irrigação, do planejamento do tempo de irrigação, do planejamento do uso de água e do uso de energia, em razão da pouca valorização e da falta de capacitação na gestão das operações. De acordo com a pesquisa realizada no projeto SWAMP (TOSCANO et al., 2019), nesse trabalho são aplicados a versão da FAO do modelo de Penman Monteith (Equação 1) e a abordagem baseada no balanço hídrico (Equação 3) para estimar a necessidade de água de irrigação, que na “Empresa agrícola Bahia” é planejada pelos consultores utilizando um modelo diferente. Portanto, para realizar o teste, uma avaliação qualitativa e quantitativa do modelo proposto foi feita com o gerente da empresa. Os resultados da estimativa da necessidade de água de irrigação planejada utilizando os dados coletados por meio da estação meteorológica

e do satélite foram considerados reproduzir o comportamento de interesse no sistema para responder à finalidade e ao propósito do modelo.

Anomalia de comportamento

As limitações de dados geralmente significam que não é possível estabelecer a significância ou a força de relações ou formulações importantes. Os testes de anomalia de comportamento examinam a importância dessas estruturas perguntando se o comportamento anômalo surge quando o relacionamento é excluído ou modificado. O comportamento anômalo gerado pela exclusão de um relacionamento fornece algumas evidências da sua importância (STERMAN, 2000).

Todos os componentes exógenos, exceto os estágios de desenvolvimento, dependem das características do sistema de irrigação (na simulação realizada, o pivô central 06), do contrato de acesso à água (outorga) e do contrato de fornecimento de energia elétrica. Portanto, para testar se o comportamento anômalo surge quando os relacionamentos envolvendo esses componentes são excluídos ou modificados, seria necessário realizar uma simulação com um pivô central diferente, ou um contrato de fornecimento de energia elétrica diferente. Além disso, em relação ao custo unitário de uso de água uma análise de sensibilidade foi conduzida com o objetivo de estudar o comportamento do sistema quando esse custo é alterado.

Membro da família

O teste de membro da família pergunta se o modelo pode gerar o comportamento de outras instâncias na mesma classe do sistema para o qual o modelo foi construído. Quanto mais diversas as instâncias de um sistema que um modelo pode representar, mais geral é a teoria que ele incorpora. Esse teste é particularmente útil quando a classe de sistemas que o modelo aborda inclui uma ampla gama de diferentes padrões de comportamento (STERMAN, 2000).

O modelo de simulação é construído com os dados coletados em um estudo de caso em profundidade na “Empresa agrícola Bahia”. Essa escolha evidencia uma limitação dessa tese em relação à replicação dos resultados discutida na seção 7. Outra questão que pode limitar a replicação dos resultados é o foco em aprofundar o modelo mental do gerente da empresa agrícola, de acordo com o objetivo da tese de estudar o comportamento do agricultor. Contudo, os componentes do modelo relativos às características do sistema de irrigação do pivô central e os procedimentos de planejamento da irrigação incluem também os resultados da análise comparativa do estudo de caso do piloto MATOPIBA. Ainda, o modelo é desenvolvido a partir de um diagrama IDEF0 de gestão das operações agrícolas desenvolvido com os dados coletados também nas 36 entrevistas com especialistas.

Comportamento surpresa

Discrepâncias entre o comportamento e a expectativa do modelo indicam que há falhas no modelo formal, no modelo mental ou em ambos. Muitas vezes as discrepâncias entre a saída do modelo e sua compreensão da dinâmica do sistema indicam defeitos no modelo formal. Ocasionalmente, é o modelo mental do pesquisador e sua compreensão dos dados que requerem revisão. Esse teste é passado quando um modelo gera um determinado comportamento, anteriormente não reconhecido, e de fato ocorre no sistema real (STERMAN, 2000).

Os resultados da simulação não apresentam discrepâncias entre o comportamento e a expectativa do modelo, para atender a sua finalidade e o seu propósito. Para evitar falhas por efeito do modelo mental e do entendimento do autor, o modelo de simulação foi verificado com o gerente da empresa agrícola em todos os seus componentes, equações e relações. Testes idênticos foram conduzidos com o apoio de um pesquisador colega no projeto SWAMP.

Análise de sensibilidade

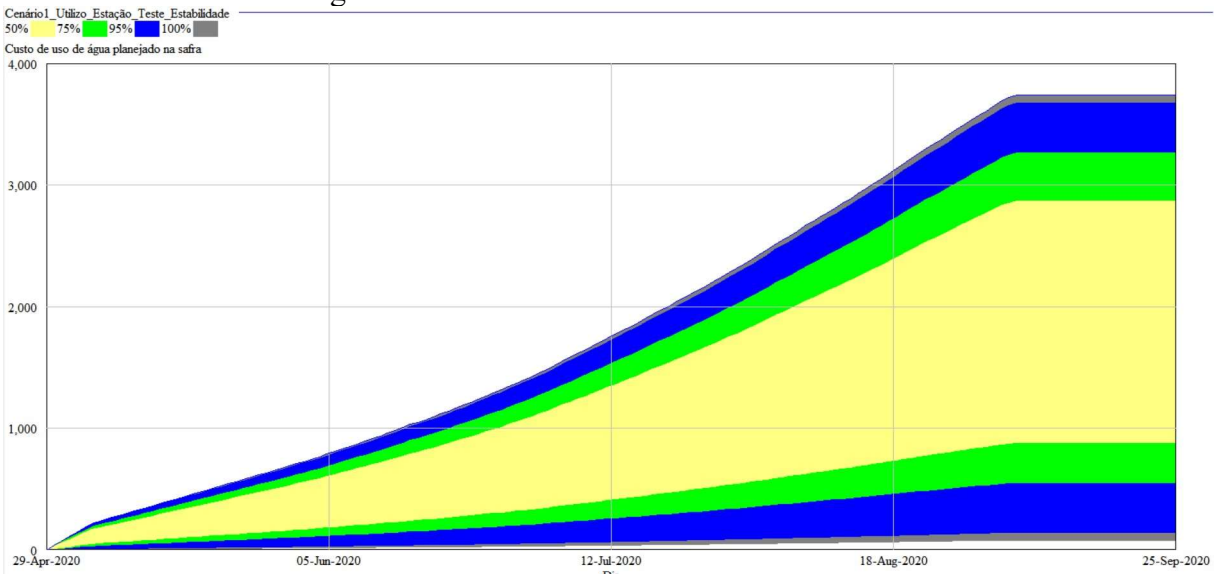
A análise de sensibilidade pergunta se as conclusões mudam de maneiras importantes para o propósito quando as suposições variam dentro da faixa plausível de incerteza. A análise de sensibilidade requer muito mais do que parâmetros variáveis. O pesquisador também deve considerar a sensibilidade dos resultados às suposições sobre os limites do modelo, às mudanças no nível de agregação e às mudanças na maneira como as pessoas tomam decisões. Ao avaliar a sensibilidade a suposições paramétricas, o pesquisador deve identificar a faixa plausível de incerteza nos valores de cada parâmetro ou relação não linear (STERMAN, 2000).

Como descrito em relação ao teste da anomalia de comportamento, todos os componentes exógenos, exceto os estágios de desenvolvimento, dependem das características do sistema de irrigação (na simulação realizada, o pivô central 06), do contrato de acesso à água (outorga) e do contrato de fornecimento de energia elétrica. Para testar a sensibilidade dos resultados é necessário realizar uma simulação com um pivô central diferente, considerar um contrato de fornecimento de energia elétrica diferente ou um outro tipo de cultivo. Contudo, uma análise de sensibilidade foi conduzida com o objetivo de estudar o comportamento do modelo ao variar do custo unitário de uso de água e investigar se as conclusões mudam de maneiras importantes, considerado que no atual contrato de acesso à água (outorga) esse custo ainda não é definido (bem como no caso do piloto MATOPIBA). O teste foi aplicado ao cenário 2 de utilizo da tecnologia de sensoriamento da estação meteorológica.

Para realizar o teste da análise de sensibilidade a fonte de dados utilizada para o custo unitário de uso de água foi um relatório da cobrança pelo uso da água para a irrigação na bacia hidrográfica do Rio São Francisco em 2020 (CBHSF, 2020). Dentro dessa base de dados foram extraídos os custos unitários de uso de água para a irrigação de 2.402 usuários de recursos

hídricos em 24 municípios no Estado da Bahia. Os resultados da análise de sensibilidade do custo de uso de água planejado na safra ao variar do custo unitário de uso de água entre um valor mínimo igual a 0,000141781 R$/m^3 e um valor máximo igual a 0,008654488 R$/m^3 são ilustrados na Figura 22.

Figura 22 - Análise de sensibilidade do custo de uso de água planejado na safra ao variar do custo unitário de uso de água



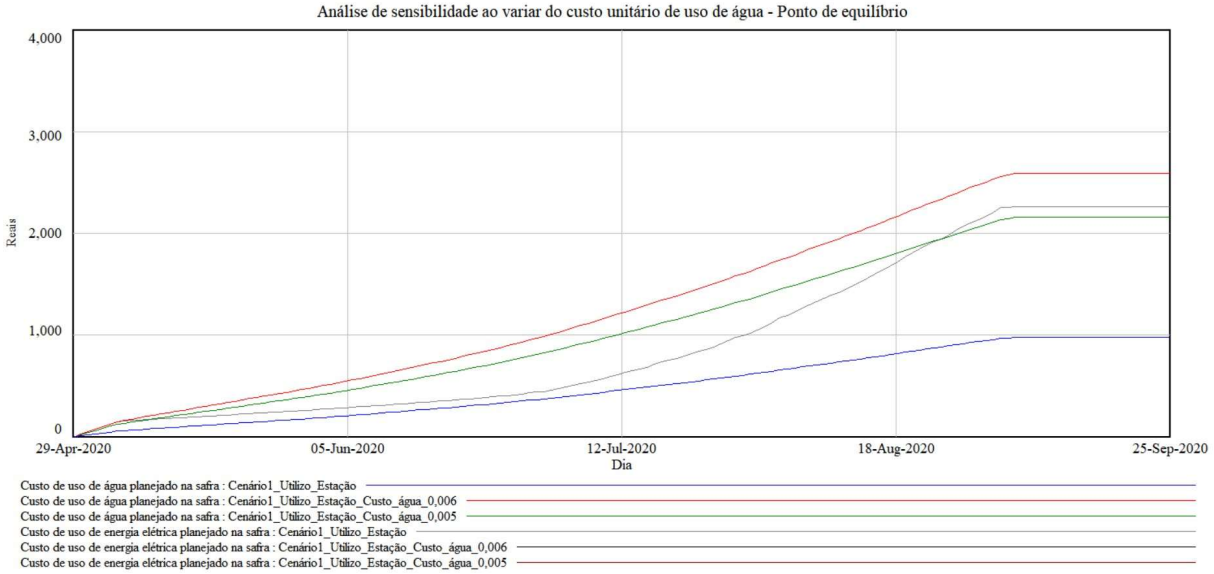
Fonte: Autor

Essa análise sugere que possa existir um ponto de equilíbrio entre o custo de uso de água planejado na safra e o custo de uso de energia elétrica planejado na safra, considerando um custo unitário de água entre 0,005 R$/m^3 e 0,006 R$/m^3. Esse resultado, ilustrado na Figura 23, evidencia que no caso de custo unitário de água igual a 0,005 R$/m^3 o custo de uso de água planejado na safra resulta 2.160,225 R$, enquanto no caso de custo unitário de água igual a 0,006 R$/m^3 o custo de uso de água planejado na safra resulta 2.592,270 R$. Portanto, ao variar do custo unitário de água nessa região, o custo de uso de água planejado na safra resulta próximo ao custo de uso de energia elétrica planejado na safra, igual a 2.264,533 R$.

A identificação desse ponto de equilíbrio revela que a cobrança pelo uso de água pode ter um impacto no modelo mental do gerente da empresa/ agricultor e consequentemente que além do custo de uso de energia elétrica também o custo de uso de água é um fator determinante na adoção de tecnologias AP no contexto de Agricultura 4.0. No caso de custo unitário de água maior do valor relativo ao ponto de equilíbrio, o custo de uso de água planejado na safra resultaria maior do custo de uso de energia elétrica planejado na safra. Portanto, o gerente da

empresa agrícola teria que revisar seu modelo mental e os procedimentos de planejamento da irrigação.

Figura 23 - Análise de sensibilidade do custo de uso de água planejado na safra ao variar do custo unitário de uso de água - Ponto de equilíbrio



Fonte: Autor

Essa mudança tem impacto na viabilidade da irrigação (MONTERO et al., 2013), como afirmado pelo gerente da "Empresa agrícola Bahia". Esse desafio é ressaltado também pelo gerente do piloto MATOPIBA: "*Em 2021 a energia subiu em torno de 33%. Com esse aumento de energia elétrica e com a cobrança pelo uso de água (sobre a qual ainda não tenho previsão de quando vai começar) a gestão da irrigação não vai ser viável para muitas culturas. Se houvesse um equilíbrio entre os dois custos de uso de água e de uso de energia e se a produção fosse eficiente, a irrigação seria viável do ponto de vista econômico*".

Além disso, a análise de sensibilidade evidencia a relação entre a adoção e o processo de aprendizagem, apresentado na Figura 11(b): os resultados ilustrados nas Figura 22 e Figura 23 afetam o modelo mental do gerente, para que ele aprenda a importância do custo de uso de água no planejamento da irrigação e inclua esse fator entre os determinantes da adoção de tecnologias de AP no contexto da Agricultura 4.0, e também em seu modelo de tomada de decisões.

Melhoria do sistema

O objetivo final da modelagem é resolver um problema. Os testes de melhoria do sistema perguntam se o processo de modelagem ajudou a mudar o sistema para melhor. Para passar no teste, o processo de modelagem deve identificar políticas que levam à melhoria, essas

políticas devem ser implementadas e o desempenho do sistema deve realmente melhorar. Na prática, avaliar o impacto de um modelo e até que ponto o processo de modelagem muda os modelos mentais e as crenças das pessoas é extremamente difícil (STERMAN, 2000).

Os resultados da simulação atingem a finalidade do modelo de estudar os benefícios relacionados ao uso de água e uso de energia elétrica, simulando que o gerente da "Empresa agrícola Bahia" adote a tecnologia de sensoriamento IoT do satélite e utilize a tecnologia da estação meteorológica. Além disso, o processo de modelagem identifica políticas que levam a melhorias relatadas pelo gerente na gestão das operações de irrigação. Dado que ele não gerencia as operações do planejamento da irrigação, incluindo o custo de uso de água planejado e o custo de uso de energia planejado, exceto que a nível de planejamento da empresa agrícola, a adoção de tecnologias de AP no contexto da Agricultura 4.0 pode disponibilizar o modelo proposto nessa tese também para apoiar a tomada de decisões na gestão das operações de irrigação, de acordo com o prazo de planejamento (semana, mês, estágio de desenvolvimento, safra). Esta oportunidade é discutida na seção 7 em relação à agenda de pesquisa futura.

6 DISCUSSÃO

Nesta seção os resultados e suas contribuições são discutidas para responder as perguntas de pesquisa e verificar se os objetivos de pesquisa são atingidos, começando pelos fatores relacionados ao comportamento do agricultor e à gestão das operações de irrigação que podem afetar a adoção de Agricultura de Precisão no contexto da Agricultura 4.0. Em seguida, discute-se o modelo proposto de gestão das operações de irrigação e os resultados dos cenários de simulação realizados para estudar as relações entre os fatores identificados na revisão da literatura, nas entrevistas com os especialistas e nos estudos de caso. Com base nos resultados empíricos, uma definição do conceito de Agricultura 4.0 no contexto pesquisado é proposta no final desta seção.

6.1 FATORES QUE PODEM AFETAR A ADOÇÃO DE AGRICULTURA DE PRECISÃO NO CONTEXTO DA AGRICULTURA 4.0

Este trabalho contribui para o conhecimento atual sobre a adoção de Agricultura de Precisão e sobre a Agricultura 4.0 ao propor um conjunto de categorias e fatores que podem afetar a adoção de AP no contexto da Agricultura 4.0 como resultado de pesquisa empírica. As categorias que impulsionam a adoção de AP no contexto da Agricultura 4.0, com foco no comportamento do agricultor e na gestão das operações de irrigação, resultam: medidas de desempenho quantitativas, medidas de desempenho qualitativas, acesso à dados, mudanças para o agricultor, mudanças para a empresa agrícola, modelos de gestão das operações inspirados à indústria, recursos, características do agricultor, características da empresa agrícola e características das tecnologias. Essas categorias e os fatores associados (ilustrados no Quadro 9 e no Quadro 10), como uso de água, contrato de fornecimento de energia elétrica, custo de energia elétrica, necessidade de água de irrigação planejada, podem influenciar a percepção do agricultor no comportamento investigado e, portanto, impactar sua intenção de adotá-lo.

De acordo com Busse et al. (2014), Edwards-Jones (2006), Thompson et al. (2019) e Walton et al. (2010), quanto maior a percepção do agricultor sobre os benefícios que pode conseguir da adoção das tecnologias de sensoriamento IoT analisadas neste trabalho (como redução do uso de água e redução do uso de energia elétrica), mais favorável é a atitude do agricultor e, consequentemente, mais forte sua intenção de adotar a AP no contexto da Agricultura 4.0. Além disso, quanto menor a percepção do agricultor em relação aos obstáculos, como capacitação na gestão das operações de irrigação, e quanto mais recursos o agricultor

acredita possuir, como tecnologias de sensoriamento IoT, maior é sua percepção de controle e, consequentemente, mais forte sua intenção de adotar.

Os fatores identificados, além de permitir responder a primeira pergunta de pesquisa, fornecem também um progresso para o conhecimento já que eles possibilitam superar as lacunas identificadas na literatura relacionadas à falta de fatores concernentes o comportamento do agricultor e a gestão das operações de irrigação, temas poucos explorados para explicar a adoção de AP. Esses resultados respondem também as sugestões de Pivoto (2018) e Jørgensen (2018). As categorias e os fatores, classificados de acordo com os construtos da Teoria do Comportamento Planejado, ampliam o entendimento dos fatores determinantes da adoção da AP na era 4.0 e facilitam o estabelecimento de soluções operacionais, em consequência da proposta de adotar o modelo de gestão das operações de irrigação ilustrado nas Figura 12, Figura 13 e Figura 14. Portanto, essas categorias e esses fatores contribuem a explicar o potencial ainda inexplorado da AP para as operações de irrigação.

Ainda, o conjunto de fatores responde também à agenda de pesquisa sugerida por Silveira; Lermen e Amaral (2021) a respeito dos fatores sociológicos e psicológicos que influenciam a adoção de novas tecnologias originárias da Agricultura 4.0 e dos fatores necessários para fomentar o uso destas tecnologias nas empresas agrícolas.

De acordo com Ajzen (1991), os fatores específicos do domínio são importantes para obter uma compreensão completa do comportamento investigado. Neste estudo, exemplos desses fatores são: tamanho da empresa agrícola, estimativa da necessidade de água da cultura, acesso à dados agronômicos, recursos - fonte de água, planejamento da irrigação, controle da irrigação, no domínio da agricultura; acesso à dados operacionais (contrato de acesso à água (outorga), contrato de fornecimento de energia elétrica), planejamento da irrigação, controle da irrigação, recursos - sistema de gestão da irrigação, no domínio da gestão das operações; tecnologias de sensoriamento IoT e acesso à dados agronômicos, no domínio IoT.

Além de benefícios e oportunidades, a adoção de AP no contexto da Agricultura 4.0 exige mudanças para o agricultor e mudanças para a empresa agrícola. O agricultor precisa possuir capacitação técnica e gerencial, como relatado pelos especialistas 2 , 3 , 9, 23, 24, 25 e 35, e mudar seu modelo mental, de acordo com os especialista 1, 29 e 11, a fim de passar de uma gestão baseada na experiência para uma gestão baseada em dados, que o agricultor pode acessar através de dispositivos de sensoriamento IoT e através da adoção de modelos de gestão das operações inspirados à indústria. Ainda, os especialistas 13, 15, 26 e 29 acrescentam que a empresa agrícola precisa introduzir uma administração baseada na gestão das operações e nas funções básicas de planejamento, implantação e controle. Outro fator classificado nas mudanças

para a empresa agrícola que pode afetar a adoção estudada, e que representa uma das principais dificuldades a superar, é a qualificação da mão de obra, de acordo com os especialistas 13, 15, 18, 21 e 28. Os desafios referentes a capacitação e a qualificação da mão de obra surgem também dos dois estudos de caso realizados.

É importante ressaltar que as mudanças relacionadas à adoção estudada devem ser gradativas, como destacado pelos especialistas 1, 8, 11, 13, 16, 21 e 35. A adoção de tecnologias de AP no contexto da Agricultura 4.0 não é um caminho único e o agricultor não adota todas as tecnologias envolvidas ao mesmo tempo, mas por exemplo pode utilizar inicialmente um satélite e depois um drone, de acordo com os especialistas 1 e 35 e com a proposta evolutiva do Quadro 2.

6.2 MODELO PROPOSTO DE GESTÃO DAS OPERAÇÕES DE IRRIGAÇÃO

A organização dos fatores identificados em um modelo, construído utilizando a técnica IDEF0 (NIST, 1993), contribui a representar a gestão das operações de irrigação e as relações entre os fatores em forma estruturada, de acordo com Slack; Chambers e Johnston (2010) e Bochtis; Sorensen e Kateris (2018). Considerando a falta de teoria sobre a Agricultura 4.0 (BERTOGLIO et al., 2021; SPONCHIONI et al., 2019; ZAMBON et al., 2019) e a lacuna na literatura relativa à falta de fatores concernentes a gestão das operações, este modelo contribui para o conhecimento sobre a adoção de AP e sobre a Agricultura 4.0 ao propor relações entre esses fatores a fim de explicar a adoção. Essas relações são representadas durante a construção do modelo, decomposto em quatro funções ilustradas na Figura 13: planejamento da irrigação, programação da irrigação, execução da irrigação e controle da irrigação.

Em contraste com pesquisas anteriores sobre a irrigação, o modelo proposto distingue entre planejamento e programação. Considerando aspectos terminológicos (CIURANA et al., 2008), planejamento e programação podem ter um significado diferente na literatura sobre a irrigação. Alguns autores usam a “programação da irrigação” (*irrigation scheduling*) para indicar o volume de água de irrigação que deve ser aplicado à cultura e quando esta água deve ser fornecida (BROUWER; HEIBLOEM, 1986), para atender a um objetivo de gestão, que envolve custos de irrigação, custo de água, custo de energia, capacidade de aplicação de água, eficiência de irrigação e produtividade da cultura (HOWELL, 1996) e com base em diferentes abordagens (por exemplo, medição da água do solo, sensoriamento de estresse em plantas) (JONES, 2004). Alguns autores usam o termo “planejamento da irrigação” (*irrigation planning*) para se referir ao horizonte de planejamento. De acordo com Matanga e Mariño

(1979), o planejamento da irrigação se refere à irrigação sazonal com execução da irrigação em cada dia a partir da época do plantio. Azhar e Perera (2011) se referem ao planejamento de curto prazo (7 - 14 dias) para a estimativa da demanda de água de irrigação e precipitação no período da irrigação. Almiñana et al. (2010) diferenciam entre o planejamento da irrigação por um horizonte de tempo, que geralmente é longo, e a programação da distribuição da água, que geralmente é diária. Recentemente Bochtis; Sorensen e Kateris (2018) introduzem uma diferenciação na gestão das operações agrícolas em relação ao planejamento e programação. O planejamento determina quais operações executar e com quais recursos, enquanto a programação define os horários de execução das operações selecionadas.

Em contraste, em um sistema da indústria, o planejamento envolve a determinação do tipo e quantidade de produtos a ser produzidos em um período de tempo futuro, enquanto a programação envolve a alocação das operações para os recursos junto com os horários de início e fim específicos em cada período (VENKATESWARAN; SON, 2005). As decisões de alocação para os recursos de produção são o foco principal da programação da produção (GRAVES, 1981).

Portanto, o modelo proposto diferencia entre planejamento da irrigação e programação da irrigação de acordo com a inspiração para os modelos de planejamento e controle das operações (fator relacionado à Proposição teórica 6), com a literatura sobre a técnica IDEF0 (CIURANA et al., 2008; MACKULAK, 1984; VENKATESWARAN; SON, 2005) e com as citações dos especialistas 4, 5, 10 e 15. Este modelo complementa o trabalho recente de Bochtis; Sorensen e Kateris (2018) que não concentram seus estudo sobre a gestão das operações de irrigação. A estrutura do modelo de quatro funções destaca os recursos envolvidos em cada função, seu papel na execução das operações, as interfaces entre as funções em termos de entradas e saídas, as regras que regem a execução das operações. Um exemplo para ilustrar essa diferença é fornecido pelo gerente do piloto MATOPIBA, que, no caso do planejamento da irrigação do "*pivô central 8*", recebe a informação "*tempo de irrigação planejado é igual a semana de novembro de 2019 a janeiro de 2020*". Quanto à programação da irrigação, a relativa função no primeiro dia de novembro de 2019 informa o gerente que o "*pivô central 8*" será acionado na janela de tempo "*a partir das 21:00 do primeiro dia de novembro de 2019 e terminando às 6:00 do segundo dia de novembro de 2019*", com base nos procedimentos de programação da irrigação. Este agendamento é replicado para todos os dias de irrigação na safra.

O modelo de gestão das operações de irrigação também atende à sugestão de Jørgensen (2018). As categorias e os fatores identificados contribuem a explicar o potencial ainda

inexplorado da AP para as operações de irrigação. Além disso, a inspiração para a Indústria 4.0 leva a considerar algumas vantagens que podem ser introduzidas na irrigação, como melhorias no planejamento e controle, que estão relacionadas à categoria medidas de desempenho qualitativas. A formulação do modelo inclui também os fatores associados aos desafios analisados no Quadro 3. No que diz respeito à interação entre as operações do campo e os sistemas biologicamente ativos (JØRGENSEN, 2018), as tecnologias de sensoriamento IoT permitem monitorar o desenvolvimento da cultura ao longo de seus estágios, mitigando assim o risco e a incerteza relativos as operações agrícolas nesse ambiente. Desta forma, os dados coletados por meio de estação meteorológica e satélite podem ser usados para apoiar o processo de tomada de decisões do agricultor desafiado pela incerteza e risco do ambiente.

A exploração da adoção de AP no contexto da Agricultura 4.0 leva a expandir as possibilidades da IoT no domínio das tecnologias de AP, uma vez que a IoT também pode ser estudada sob a perspectiva da gestão das operações de irrigação. A disponibilidade e adoção de diferentes tecnologias de sensoriamento IoT permitem gerenciar as operações de irrigação em termos de acesso à dados, planejamento e controle das operações, medidas de desempenho, em comparação com a gestão atual nas empresas agrícolas estudadas. Além disso, o foco no comportamento do agricultor e em suas percepções, relacionadas às vantagens e desvantagens da adoção dessas tecnologias, permite desenvolver essas possibilidades de acordo com as necessidades do agricultor (MONTELEONE et al., 2020b).

6.3 RELAÇÕES ENTRE OS FATORES IDENTIFICADOS NO MODELO PROPOSTO - RESULTADOS DOS ESTUDOS DE CASO

Os resultados dos estudos de caso, além de complementar a proposta do conjunto de categorias e fatores que podem afetar a adoção de AP no contexto da Agricultura 4.0 ilustrado no Quadro 10, permitem também estudar as relações entre alguns fatores. Nessa seção as relações entre a adoção e os fatores nível educacional, capacitação, acesso à dados e recursos (pessoas - consultores) são discutidas.

Na literatura sobre a adoção de Agricultura de Precisão os autores utilizam termos diferentes para se referir à necessidade de o agricultor possuir capacidades e conhecimento (CHIAVENATO, 2014) das tecnologias para adotá-las e utilizá-las. Esses termos incluem os fatores capacitação (*training*, *qualification*) (BARNES et al., 2019a, 2019b; KENDALL et al., 2017; SKEVAS; KALAITZANDONAKES, 2020), qualificação (*skill*) (FRANCO; SINGH; PRAVEEN, 2018), habilidades (*skills*) (BARNES et al., 2019b; FRANCO; SINGH;

PRAVEEN, 2018; GALIOTO; RAGGI; VIAGGI, 2017; JOCHINKE et al., 2007; KENDALL et al., 2017), capacidades (*capabilities*) (KENDALL et al., 2017), formação e treinamento (*training*) (BARNES et al., 2019b; KENDALL et al., 2017; PINTO; FERREIRA; TEIXEIRA, 2017; SKEVAS; KALAITZANDONAKES, 2020), conhecimento (ANTONINI et al., 2018).

As capacidades e o conhecimento podem também ser adquiridos pelo agricultor através de consultores (FOUNTAS et al., 2005; LI et al., 2020; REICHARDT; JURGENS, 2009; SILVA; MORAES; MOLIN, 2011) e serviços de assistência técnica (PINTO; FERREIRA; TEIXEIRA, 2017; SKEVAS; KALAITZANDONAKES, 2020; SOARES FILHO; CUNHA, 2015).

A literatura sobre a Agricultura 4.0 também está começando a abordar esse tema de pesquisa e explorar as competências específicas dos consultores agrícolas em meio à transição para a Agricultura 4.0 (CHARATSARI et al., 2021) e os novos métodos e modelos de educação para o desenvolvimento das capacidades e conhecimento que a Agricultura 4.0 requer para os agricultores (POGORELSKAIA; VÁRALLYAI, 2020). Charatsari et al. (2021) afirmam que também os consultores enfrentam mudanças em relação às capacidades e conhecimento necessários para trabalhar no contexto da Agricultura 4.0.

Igualmente os especialistas entrevistados ressaltam a importância e o papel dos fatores capacitação e consultores. O agricultor tem que se capacitar para adotar as tecnologias de AP no contexto da Agricultura 4.0, como relatado pelos especialistas 2, 3, 24 e 25 e de acordo com a Proposição teórica 3a. O agricultor pode também contratar serviços de consultores como oportunidade para apoiar as empresas agrícolas no planejamento da irrigação, segundo os especialistas 11, 12, 17, 32 e a Proposição teórica 8d.

Utilizando os fatores nível educacional, capacitação, acesso à dados e recursos (pessoas - consultores) em relação à adoção de tecnologias de AP no contexto da Agricultura 4.0 (fatores abordados nas Proposições teóricas 2, 3a, 8d e 9), os resultados empíricos permitem estudar as relações entre esses fatores nas duas empresas agrícolas do piloto MATOPIBA e da “Empresa agrícola Bahia”. Esses resultados são ilustrados no Quadro 15.

Em relação à capacitação técnica, os dois gerentes possuem capacidades e conhecimento da irrigação e das tecnologias de Agricultura de Precisão, já que eles são formados em Engenharia Agronômica e que participam de cursos de formação. Contudo, na “Empresa agrícola Bahia” o planejamento da necessidade de água de irrigação é realizado com o apoio de consultores, que definem a necessidade de água da cultura e a necessidade de água de irrigação planejada. Ao contrário, no caso do piloto MATOPIBA o gerente planeja também esses dois fatores. Como consequência, um efeito de menor conhecimento que o gerente da “Empresa

agrícola Bahia" tem sobre os dados agronômicos em comparação com o gerente do piloto MATOPIBA pode ser observado. A coleta de dados para realizar o estudo de caso e construir o modelo de simulação foi completada graças ao apoio dos consultores, enquanto o gerente do piloto MATOPIBA possui o completo conhecimento sobre os dados agronômicos, apesar do sistema de gestão da irrigação das duas empresas ser desenvolvido pelo mesmo fornecedor.

Quadro 15 - Estudo das relações entre os fatores nos dois estudos de caso

Fatores	**Piloto MATOPIBA**	**Empresa agrícola Bahia**
Nível educacional	✓	✓
Capacitação técnica (engenharia agronômica)	✓	✓
Capacitação gerencial (gesto das operações)		
Acesso à dados agronômicos	✓	✓
Acesso à dados operacionais	✓	✓
Recursos (pessoas - consultores)		✓
Recursos (hardware - sistema de gestão da irrigação)	✓	✓
Recursos (insumos - água e energia elétrica)	✓	✓

Fonte: Autor

Como relatado pelo especialista 11 e como observado no caso do gerente da "Empresa agrícola Bahia", a terceirização das operações de irrigação pode levar a uma perda de controle pelo agricultor. Ainda, o especialista 12 destaca que a terceirização está crescendo muito na agricultura: "*Os produtores vão encontrar dificuldades porque muitos deles não têm o tempo para se dedicar ao planejamento da irrigação, ou até mesmo ter o conhecimento necessário para fazer as análises dos dados e gerar um planejamento mais adequado. Então, está crescendo muito a terceirização nesse setor, através de serviços contratados ou de consultores técnicos ou via cooperativa que fornecem os equipamentos e ao mesmo tempo a consultoria aos produtores*". Portanto, o agricultor pode perder o controle sobre uma operação, e também os relativos dados, no caso da sua terceirização (LANKFORD; PARSA, 1999; LAU; ZHANG, 2006).

Os dois gerentes têm uma baixa capacitação gerencial na gestão das operações de irrigação, dado que eles não cursaram disciplinas nessa área nas Universidades em que estudaram. Ainda, nas duas empresas agrícolas não é disponível o mapeamento da gestão das operações de irrigação e não são adotados modelos de planejamento e controle da irrigação. O acesso à dados é dificultado pela falta de integração entre as bases de dados agronômicos no sistema de gestão da irrigação e as bases de dados operacionais, em particular os custo de uso de água e custo de uso de energia elétrica nos respetivos contratos. Ambos os gerentes são apoiados por consultores para a gestão do relacionamento com as empresas fornecedoras dos

dois insumos, água e energia elétrica. Além disso, os dois gerentes não fazem diferença entre os termos, conceitos e operações de planejamento da irrigação e de programação da irrigação.

A literatura sobre a gestão das operações enfatiza o papel da função gestão das operações para planejar, programar, executar e controlar as operações agrícolas para produzir os bens ou serviços demandados pelo cliente. Além disso, a literatura destaca as relações entre recursos, materiais processados e materiais produzidos (BOCHTIS; SORENSEN; KATERIS, 2018; SCARPELLI; BATALHA, 2001; SLACK; CHAMBERS; JOHNSTON, 2010).

A respeito do mercado de educação que prepara os futuros agricultores no Brasil, é importante ressaltar que em relação às Diretrizes Curriculares Nacionais para o curso de graduação em Engenharia Agronômica ou Agronomia, uma disciplina de gestão das operações agrícolas não é incluída no núcleo de conteúdos profissionais essenciais. Esse núcleo pode ser complementado por um núcleo de conteúdos profissionais específicos inserido no contexto do projeto pedagógico de um curso, para permitir atender às peculiaridades locais e regionais e, quando couber, caracterizar o projeto institucional com identidade própria (MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO, 2021. Por exemplo, na grade das disciplinas dos cursos de graduação atendidos pelo Departamento de Engenharia Agrícola da Universidade Federal de Viçosa uma disciplina de gestão das operações agrícolas não é presente (UNIVERSIDADE FEDERAL DE VIÇOSA, 2021a). Enquanto, na grade curricular de Engenharia Agronômica - ESALQ/USP, duas disciplinas das diretrizes de Engenharia de Produção são incluídas: Administração de Logística e da Cadeia de Suprimentos e Administração e Controle da Produção (ESCOLA SUPERIOR DE AGRICULTURA “LUIZ DE QUEIROZ,” 2021b). Quanto à comunidade de Economia Agrícola, referência para a revisão sistemática da literatura sobre a adoção de tecnologias de AP, disciplinas que incluem temas concernentes a gestão das operações são incluídas nas grades curriculares dos cursos de graduação, como no caso do curso em Agronegócio do Departamento de Economia Rural da Universidade Federal de Viçosa (disciplinas de Administração da Produção, Operações e Materiais no Agronegócio; Gestão da Cadeia de Suprimentos) (UNIVERSIDADE FEDERAL DE VIÇOSA, 2021b) e no caso do curso de graduação em Ciências Econômicas da ESALQ/USP (disciplinas de Administração de Logística e da Cadeia de Suprimentos; Administração e Controle da Produção) (ESCOLA SUPERIOR DE AGRICULTURA “LUIZ DE QUEIROZ,” 2021a).

Também os especialistas entrevistados destacam que a gestão das operações de irrigação é uma lacuna na formação e nas capacidades dos agricultores no Brasil, como relatado pelos especialistas 2, 10, 15 e 20. O especialista 20 ressalta o desafio da formação e capacitação do agricultor referente as capacidades e conhecimento necessários para o planejamento da

irrigação: "*A grande questão é que os agricultores e produtores possuem diferentes níveis intelectuais. Então, um produtor tem escolaridade mínima e outro produtor tem um ensino superior completo na área da agricultura. Esses produtores são engenheiros agrônomos, engenheiros agrícolas, enfim eles estão vinculados a área agrícola. E têm produtores que são da área de administração que têm um conhecimento muito pequeno sobre a área agrícola. Então, dentro do planejamento agrícola a questão da capacitação e do conhecimento do produtor é fundamental para facilitar qualquer atividade agrícola, desde adubação até o planejamento da lâmina de irrigação*".

Portanto, os resultados dos dois estudos de caso apresentam dois modelos de capacitação: em relação à capacitação técnica a "Empresa agrícola Bahia" adota um modelo de terceirização pelo apoio dos consultores no planejamento da necessidade de água de irrigação, enquanto o gerente do piloto MATOPIBA administra todas as operações de irrigação. Quanto à capacitação gerencial, os dois gerentes têm uma baixa capacitação na gestão das operações de irrigação. Essas conclusões preliminares devem ser analisadas com relação à necessidade de mudanças para o agricultor e mudanças para a empresa agrícola para a adoção das tecnologias de AP no contexto da Agricultura 4.0, com o objetivo de explorar o modelo de capacitação do agricultor e o modelo organizacional da empresa agrícola para apoiar a adoção.

Contudo, esses resultados empíricos não podem ser generalizados, em razão do escopo do projeto de tese, apresentado na seção 2, e das limitações dessa tese discutidas na próxima seção. Logo, pesquisa futura é proposta para explorar o modelo de capacitação do agricultor e o modelo organizacional da empresa agrícola para a adoção de AP no contexto da Agricultura 4.0. Com o propósito de abordar essa área de pesquisa com uma visão holística, é recomendado estudar outros fatores que podem afetar o modelo de capacitação do agricultor e o modelo organizacional da empresa agrícola e considerados fora de escopo dessa tese. Esses fatores são relatados pelos especialistas entrevistados, como a disponibilidade de fornecedores no mercado (especialista 27). Outros fatores, como o acesso ao mercado das tecnologias (KENDALL et al., 2017; SOARES FILHO; CUNHA, 2015), o acesso ao mercado dos financiamentos (GALIOTO; RAGGI; VIAGGI, 2017) e o acesso ao mercado de educação (FRANCO; SINGH; PRAVEEN, 2018) resultam da literatura sobre a adoção de tecnologias de AP.

6.4 RELAÇÕES ENTRE OS FATORES IDENTIFICADOS NO MODELO PROPOSTO - RESULTADOS DOS CENÁRIOS DE SIMULAÇÃO

Os resultados dos cenários de simulação apresentados na seção 5.6 permitem resolver o problema especificado na fase de construção do modelo: quais relações de causa e efeito existem entre os fatores identificados no planejamento da necessidade de água de irrigação, planejamento do tempo de irrigação, planejamento do uso de água e planejamento do uso de energia elétrica; qual é o efeito na adoção de AP no contexto da Agricultura 4.0 e quais políticas é possível sugerir para direcionar a adoção. Ainda, esses achados contribuem para o desenvolvimento de teoria sobre a adoção de Agricultura de Precisão no contexto da Agricultura 4.0, e também para um melhor entendimento do que é a Agricultura 4.0 (BERTOGLIO et al., 2021; SPONCHIONI et al., 2019; ZAMBON et al., 2019).

A simulação investiga a relação entre alguns fatores, ilustrados na Figura 14, codificados nas categorias medidas de desempenho quantitativas (necessidade de água de irrigação planejada, uso de água, uso de energia, custo de uso de água, custo de uso de energia), acesso à dados (acesso à dados agronômicos, acesso à dados operacionais), mudanças para o agricultor (modelo mental), modelos de gestão das operações inspirados à indústria (modelos de planejamento e controle das operações), recursos (fontes de água, insumos - água, insumos - energia, hardware - estação meteorológica e satélite, hardware - sistema de gestão da irrigação, pessoas - gerentes). Os resultados da simulação explicam as relações de causa e efeito entre esses fatores envolvidos nas operações de planejamento do tempo de irrigação, planejamento do uso de água e planejamento do uso de energia elétrica.

Esses resultados revelam que a adoção da tecnologia de sensoriamento IoT do satélite e o utilizo da tecnologia da estação meteorológica (fatores relacionados à Proposição teórica 8c), conforme ilustrado no Quadro 14, afetam o uso de água planejado e o uso de energia elétrica planejado (fatores abordados na Proposição teórica 1a) e os componentes do modelo representados no diagrama dos estoques e fluxos nas Figura 16, Figura 18 e Figura 19. Na operação de planejamento do tempo de irrigação, os fatores tempo de funcionamento noturno e tempo de funcionamento diurno, definidos com base no contrato de fornecimento de energia elétrica, e as características do sistema de irrigação (vazão e área irrigada do pivô central) determinam o tempo de irrigação planejado. Em relação ao planejamento do uso de água, o tempo de irrigação planejado e as características do sistema de irrigação (vazão) determinam o uso de água planejada, enquanto o custo de uso de água planejado é calculado também com base no custo unitário de água. Quanto ao planejamento do uso de energia elétrica, o tempo de irrigação planejado e a área a irrigar definem o uso de energia elétrica, enquanto o custo de uso de energia elétrica planejado é calculado também com base o custo unitário de energia elétrica, indicado no contrato de fornecimento de energia elétrica. Então, os fatores relacionados ao

planejamento do tempo de irrigação, do uso de água e do uso de energia elétrica podem influenciar a percepção do agricultor e, portanto, afetar sua intenção de adotar as tecnologias de AP no contexto da Agricultura 4.0, dado que a adoção de tecnologia de sensoriamento IoT tem impacto na estimativa da necessidade de água de irrigação planejada que afeta o tempo de irrigação planejado e em seguida o uso de água planejado, o custo de uso de água planejado, o uso de energia elétrica planejado e o custo de uso de energia elétrica planejado.

As relações de causa e efeito entre os mencionados fatores são discutidas também na literatura. A aplicação da irrigação por meio do sistema do pivô central exige a consideração de questões energéticas além da eficiência hídrica. O uso de água e o uso de energia têm importância crescente na agricultura devido à disponibilidade reduzida de água e ao aumento dos custos de energia, que determinam a viabilidade da agricultura irrigada em muitas áreas do mundo (MORENO et al., 2012). O contrato de fornecimento de energia elétrica desempenha um papel essencial no planejamento do tempo de irrigação e do uso de energia elétrica. As normas de fornecimento de energia elétrica da concessionária, e suas tarifas de energia, definem o tempo de funcionamento do sistema de irrigação, que durante certas horas é mais oneroso do que outras. Portanto, é importante controlar o tempo de irrigação para evitar períodos de altos custos de energia (BERNARDO; SOARES; MANTOVANI, 1982; MORENO et al., 2012). Além do bombeamento do sistema de irrigação, a energia elétrica é fundamental também para alimentar as tecnologias de AP (MUÑOZ-GARCÍA; HERNÁNDEZ-CALLEJO, 2021).

Também o contrato de acesso à água (outorga) desempenha um papel essencial no planejamento do tempo de irrigação, além do planejamento do uso de água, de acordo com Allen et al. (2005) e Evett et al. (2020). Ainda, as características do sistema de irrigação desempenham um papel essencial no planejamento do tempo de irrigação, dado que essas características afetam o custo de aplicação de água para a irrigação (MONTERO et al., 2013). Características como vazão e volume de água aplicada afetam o uso de energia elétrica, portanto pode-se esperar que uma redução do volume de água aplicado exija ainda menos energia para o bombeamento (JACKSON; KHAN; AHMAD, 2007).

As relações de causa e efeito investigadas nos cenários de simulações são suportadas também pelos resultados das entrevistas com os especialistas, que evidenciam o papel essencial desempenhado pelo contrato de fornecimento de energia elétrica no planejamento do tempo de irrigação, e consequentemente no planejamento do uso de água e do uso de energia elétrica. Os benefícios esperados da adoção são afetados pelo contrato de fornecimento de energia elétrica, que estabelece tarifas diferenciadas pela manhã, pelo uso a tarde ou a noite, como relatado pelo especialista 23. De acordo com os especialistas 11, 20, 23 e 36, o planejamento da irrigação é

afetado pelo contrato de fornecimento de energia elétrica, que define o fornecimento em termos de acesso, volume e custo de uso. O especialista 20 acrescenta que os fatores uso de energia elétrica e custo de uso de energia elétrica são fundamentais para determinar a demanda energética necessária para a irrigação. Além disso, os especialistas 25, 34, 35 e 36 destacam que o contrato de acesso à água (outorga) é essencial no planejamento do uso de água já que o contrato determina a autorização pelo uso de água, em termos de acesso, disponibilidade, volume e custo de uso.

Quanto aos estudos de caso, nas duas empresas agrícolas, em relação ao planejamento da irrigação, o tempo de irrigação é planejado com o objetivo de minimizar o uso de energia elétrica em razão do seu alto custo diurno comparado com o noturno, no contrato de fornecimento de energia elétrica. Além disso, o contrato de acesso à água (outorga) vigente ainda não inclui um custo unitário de água.

Portanto, os resultados dos cenários de simulação permitem resolver o problema que o modelo analisa identificando as relações de causa e efeito entre os fatores no planejamento da necessidade de água de irrigação, planejamento do tempo de irrigação, planejamento do uso de água e planejamento do uso de energia elétrica.

No que se refere à resposta sobre o efeito na adoção estudada, o gerente da "Empresa agrícola Bahia" não teria a intenção de adotar a tecnologia de sensoriamento do satélite para as operações de planejamento do tempo de irrigação, planejamento do uso de água e planejamento do uso de energia elétrica, com base nos resultados dos cenários de simulação. Esses resultados permitem responder também à sugestão de Jørgensen (2018). As categorias e os fatores, classificados de acordo com os construtos da TPB, ampliam o entendimento dos fatores determinantes da adoção de AP na era 4.0 e facilitam o estabelecimento de soluções operacionais, em consequência da proposta de adotar o modelo de gestão das operações de irrigação ilustrado nas Figura 12, Figura 13 e Figura 14. Portanto, essas categorias e esses fatores contribuem a explicar o potencial ainda inexplorado da AP para as operações de irrigação.

Os resultados sugerem também políticas para direcionar a adoção. O modelo de simulação desenvolvido pode ser útil para analisar o impacto da inclusão do custo de uso de água no modelo mental do gerente da "Empresa agrícola Bahia" e consequentemente na adoção de AP no contexto da Agricultura 4.0. A análise de sensibilidade apresentada na seção 5.6.5 mostra que ao variar do custo unitário de água, o custo de uso de água planejado na safra atinge um valor significativo em comparação com o custo de uso de energia elétrica planejado na safra. Essa análise de sensibilidade sugere a existência de um ponto de equilíbrio entre esses dois

custos planejados. Portanto, pode-se supor que essa mudança afeta o modelo mental do gerente da empresa agrícola, e, consequentemente, que além do custo de uso de energia elétrica também o custo de uso de água é um fator determinante na adoção de tecnologias AP no contexto de Agricultura 4.0. Essa mudança tem impacto na viabilidade da irrigação, de acordo com Montero et al. (2013), com os gerentes da "Empresa agrícola Bahia e também do piloto MATOPIBA.

Além disso, os resultados da análise de sensibilidade evidenciam a relação entre a adoção e a aprendizagem como estímulo para mudanças no modelo mental do agricultor, de acordo com o processo ilustrado na Figura 11 (STERMAN, 2000). A aprendizagem pode mudar as crenças (FISHBEIN; AJZEN, 2010) do agricultor, afetar as suas futuras intenções e ações e, consequentemente, desempenhar um papel importante na adoção de tecnologias AP no contexto de Agricultura 4.0. Portanto, esses resultados sugerem que pesquisa futura é necessária para estudar o modelo de gestão das operações de irrigação considerando também o custo de uso de água como variável a minimizar, além do custo de uso de energia elétrica.

Ainda, os resultados destacam o papel dos insumos, água e energia, na gestão operacional, além do impacto econômico. Na literatura sobre a adoção de AP, é enfatizada a importância dos custos dos insumos relativamente aos benefícios percebidos pelo agricultor em termos de redução de custos (BUSSE et al., 2014; EDWARDS-JONES, 2006; THOMPSON et al., 2019). O impacto na gestão econômica é citado também pelos especialistas nas entrevistas. Além do ponto de vista econômico, o contrato de fornecimento de energia elétrica tem uma grande importância para a gestão operacional, dado que determina o tempo de irrigação planejado, fator que resulta fundamental na relação de causa e efeito entre planejamento da necessidade de água de irrigação e planejamento do uso dos insumos, água e energia elétrica.

Quanto ao contrato de acesso à água (outorga) das empresas agrícolas dos estudos de caso, considerado que o custo de uso de água de irrigação, os tempo e volume de captação ainda não são regulamentados (o órgão gestor da bacia hidrográfica local está colocando dispositivos de medição da vazão para cada ponto de captação), pesquisa futura é necessária para estudar as relações de causa e efeito dos fatores tempo e volume de captação de água no modelo de simulação proposto.

Este trabalho também contribui para a discussão sobre a Agricultura 4.0, visto que o agricultor tem a oportunidade de adotar tecnologias de sensoriamento IoT que melhoram o acesso aos dados e o planejamento das operações de irrigação, em linha com a literatura sobre a Agricultura 4.0 (BRAUN; COLANGELO; STECKEL, 2018). Consequentemente, a Agricultura 4.0 permite que o agricultor fortaleça a gestão das operações de irrigação, transformando o modelo operacional tradicional, muitas vezes baseado na experiência, em um

modelo digital de uso intensivo de dados (SPANAKI; KARAFILI; DESPOUDI, 2019). Contudo, pesquisa futura é necessária para estudar os fatores fora do escopo desse projeto de tese, como preço da tecnologia (por exemplo preço de uma estação meteorológica em comparação com o acesso gratuito à dados de satélite), características da empresa agrícola (por exemplo localização da empresa agrícola - outros Estados no Brasil, tamanho da empresa agrícola - empresa familiar), acesso ao mercado (acesso ao mercado das tecnologias, acesso ao mercado dos financiamentos, acesso ao mercado de educação) e para estudar a relação com outras tecnologias de sensoriamento IoT como a sonda de solo.

6.5 PROPOSTA DE UMA DEFINIÇÃO DO CONCEITO DE AGRICULTURA 4.0

Este trabalho contribui para o avanço do conhecimento também sobre a Agricultura 4.0 ao propor um conjunto de fatores concernentes o comportamento do agricultor e a gestão das operações de irrigação, como resultado de pesquisa empírica e superando o limite que a Agricultura 4.0 ainda é restrita e adiada na teoria (ZAMBON et al., 2019). Os resultados empíricos contribuem para responder à sugestão de Sponchioni et al. (2019) sobre uma análise mais aprofundada necessária para compreender o que é a Agricultura 4.0 e a sugestão de Bertoglio et al. (2021) sobre mais contribuições necessárias para definir sua definição e limites claramente, e também incluir a perspectiva da gestão das operações de irrigação na definição de Agricultura 4.0. Em linha com a definição de Agricultura de Precisão (ISPA, 2019, p. 1), a definição de Internet das Coisas formulada por Atzori; Iera e Morabito (2017, p. 141), a definição de Agricultura 4.0 proposta por Sponchioni et al. (2019, p. 146), ilustradas no Quadro 16, e as tecnologias de sensoriamento IoT apresentadas no Quadro 2, a Agricultura 4.0 neste trabalho é:

> Uma estratégia de gestão, evolução da agricultura de precisão, realizada através da coleta, integração e análise automatizada de dados temporais, espaciais e individuais, coletados por tecnologias de sensoriamento IoT e recursos agrícolas, possibilitando desta forma a geração de conhecimento, para apoiar o desenho de aplicativos para o processo de tomada de decisões do agricultor na gestão das operações de irrigação (MONTELEONE et al., 2020b, p. 21).

A interconexão entre as tecnologias de sensoriamento IoT (como satélite, estação meteorológica, sonda de solo, drone) e os recursos agrícolas (como bomba e pivô central) suporta o desenho de aplicativos, como a estimativa da necessidade de água da cultura, a alocação de recursos, a definição da sequência de operações de irrigação, o controle do estado

da irrigação e o cálculo de medidas de desempenho. Esses aplicativos permitem ao agricultor tomar decisões sobre o planejamento, a programação, a execução e o controle da irrigação.

Quadro 16 - Definições de Agricultura de Precisão, de IoT e de Agricultura 4.0

Definição de AP	**Definição de IoT**	**Definição de Agricultura 4.0**
A Agricultura de Precisão é uma estratégia de gerenciamento que reúne, processa e analisa dados temporais, espaciais e individuais e os combina com outras informações para apoiar as decisões de gerenciamento de acordo com a variabilidade estimada para melhorar a eficiência no uso de recursos, produtividade, qualidade, rentabilidade e sustentabilidade da produção agrícola.	*A Internet das Coisas é uma estrutura conceitual que aproveita a disponibilidade de dispositivos heterogêneos e soluções de interconexão, bem como objetos físicos aumentados, fornecendo uma base de informações compartilhada em escala global, para apoiar o desenho de aplicativos envolvendo no mesmo nível virtual pessoas e representações de objetos*.	*Agricultura 4.0 é a evolução da Agricultura de Precisão, realizada por meio da coleta, integração e análise automatizadas de silos de dados previamente separados provenientes do campo, sensores de equipamentos e outras fontes de terceiros, habilitada pelo uso de tecnologias inteligentes e digitais da Indústria 4.0, possibilitando dessa forma a geração de conhecimento, para apoiar o agricultor na tomada de decisões na empresa agrícola*.

Fonte: Autor "adaptado de" Monteleone et al., 2020b, p. 21

Embora neste trabalho o objetivo da pesquisa seja estudar o comportamento do agricultor relativo à adoção de uma inovação, na seção 7 o estudo da extensão do modelo de gestão das operações ao comportamento "tomada de decisões na irrigação" é proposto como pesquisa futura. Essa proposta é justificada em razão do comportamento "tomada de decisões na irrigação" acontecer após a adoção e dos fatores em comum entre os identificados no modelo proposto. Essa comunalidade é presente em muitos autores na literatura (BOCHTIS; SORENSEN; KATERIS, 2018; GARCÍA-VILA; FERERES, 2012; GLEN, 1987; JØRGENSEN, 2018; ZHAI et al., 2020) e também nas respostas dos especialistas entrevistados. Portanto, nesse trabalho é proposta uma definição de Agricultura 4.0 mais abrangente que inclui o processo de tomada de decisões, conceito abordado nas definições de AP (ISPA, 2019) e Agricultura 4.0 (SPONCHIONI et al., 2019).

Esta definição destaca também o papel fundamental da IoT na evolução da Agricultura de Precisão para a Agricultura 4.0.

Em consequência da natureza exploratória desse trabalho, os resultados das entrevistas com os especialistas abordam outros temas de pesquisa no conceito de Agricultura 4.0, além da gestão das operações, Agricultura de Precisão, IoT e Industria 4.0, como desenvolvimento sustentável (especialistas 1, 24, 25, 26, 30, 31 e 34), agricultura digital (especialistas 8, 9, 15, 17, 18, 25 e 32), automação (especialistas 1, 17, 26 e 31). O desenvolvimento sustentável

engloba vários temas, como segurança alimentar, consumo sustentável, uso sustentável de recursos hídricos, recursos limitados, inclusão social. Alguns desses temas são incluídos na agenda de pesquisa futura proposta na seção 7.

De acordo com Klerkx, Jakku e Labarthe (2019), Bertoglio et al. (2021) e os especialistas 8, 9, 15 e 17, a definição proposta deve ser também analisada par entender melhor como a Agricultura 4.0 se encaixa no conceito mais abrangente de Agricultura Digital.

7 LIMITAÇÕES E AGENDA DE PESQUISA FUTURA

Os resultados das simulações realizadas no piloto MATOPIBA (publicados em Monteleone et al. (2020b)) e na "Empresa agrícola Bahia" representam as primeiras aplicações empíricas do conjunto de fatores e do modelo de gestão das operações de irrigação propostos neste trabalho. Com base nos resultados atingidos e discutidos, nas proposições teóricas formuladas na seção 5.4 e no escopo do projeto de tese ilustrado na seção 2, nessa seção as limitações do trabalho são discutidas para identificar propostas de pesquisa futura. Considerando a natureza exploratória desse projeto de tese, uma agenda de pesquisa futura é formulada como resultado da discussão das limitações e sugerida pelos dados coletados nas entrevistas, com os especialistas e com os dois gerentes, e pelos cenários de simulação. A agenda proposta, que envolve os fatores e os componentes classificados fora de escopo ne seção 2, é ilustrada no Quadro 17. Para cada pesquisa futura é indicado também o nível decisório que tem influências na tomada de decisões sobre a adoção pelo agricultor: nível micro - empresa agrícola, nível médio - ecossistema de uma empresa agrícola, nível macro - bacia hidrográfica ou perímetro irrigado.

Quadro 17 - Agenda de pesquisa futura

Componentes	**Fatores**	**Nível decisório**	**Pesquisas futuras**
Unidade de análise	Tamanho da empresa agrícola - empresa industrial, nível educacional, capacitação, acesso à dados, recursos (pessoas - consultores)	Micro	***Pesquisa futura 1***. Estudo do modelo de capacitação e do modelo organizacional das empresas agrícolas industriais para a adoção de tecnologias de AP no contexto da Agricultura 4.0 com foco a gestão das operações.
	Tamanho da empresa agrícola - empresa familiar	Micro	***Pesquisa futura 2***. Estudo das relações entre a adoção e o fator tamanho da empresa agrícola - empresa familiar no modelo de gestão das operações de irrigação.
	Localização da empresa agrícola	Micro	***Pesquisa futura 3***. Estudo da adoção de tecnologias de AP no contexto da Agricultura 4.0 com foco a gestão das operações e o comportamento do agricultor na Itália.
	Fatores relacionados também as outras operações agrícolas	Micro, médio, macro	***Pesquisa futura 4***. Estudo da adoção de tecnologias de AP no contexto da Agricultura 4.0 com foco a extensão do modelo de gestão das operações de irrigação as outras operações agrícolas.
Construtos da TPB	Fatores relacionados ao construto Norma Subjetiva e fora de escopo do modelo de simulação	Médio	***Pesquisa futura 5***. Exploração dos fatores relevantes para a adoção de tecnologias de AP no contexto da Agricultura 4.0, em relação ao ecossistema da empresa agrícola.

Continua...

Conclusão.

Componentes	Fatores	Nível decisório	Pesquisas futuras
Comportamento	Fatores relacionados à tomada de decisões na gestão das operações de irrigação	Micro, médio	***Pesquisa futura 6***. Estudo da adoção de tecnologias de AP no contexto da Agricultura 4.0 com foco na tomada de decisões na gestão das operações de irrigação.
	Fatores relacionados à difusão de tecnologias de AP no contexto da Agricultura 4.0	Macro	***Pesquisa futura 7***. Estudo dos fatores relevantes para a difusão de tecnologias de AP no contexto da Agricultura 4.0 com foco no comportamento do agricultor e na gestão das operações de irrigação.
Fatores determinantes da adoção	Recursos (hardware - sonda de solo, drone), tecnologias de sensoriamento	Micro	***Pesquisa futura 8***. Estudo do modelo de gestão das operações de irrigação no caso de adoção das tecnologias da sonda de solo e do drone.
	Fatores relacionados à modelos de gestão colaborativa inspirados à indústria	Macro	***Pesquisa futura 9***. Estudo da aplicação do modelo de gestão das operações de irrigação proposto a gestão compartilhada de recursos hídricos.
Definição de Agricultura 4.0	Fatores relacionados ao desenvolvimento sustentável	Micro, médio, macro	***Pesquisa futura 10***. Exploração da adoção de tecnologias de AP para a irrigação no contexto da Agricultura 4.0 em relação ao desenvolvimento sustentável.

Fonte: Autor

Pesquisa futura 1. Em relação ao componente unidade de análise e ao fator tamanho da empresa agrícola - empresa industrial (fator abordado na Proposição teórica 10), este trabalho, realizado no âmbito do projeto SWAMP, envolveu o piloto MATOPIBA e a "Empresa agrícola Bahia" no Brasil. De acordo com Voss, Tsikriktsis e Frohlich (2002), dois estudos de caso em profundidade foram conduzidos. Essa escolha é uma limitação dessa tese a respeito da replicação dos resultados (EISENHARDT, 1989; VOSS; TSIKRIKTSIS; FROHLICH, 2002), especialmente relativamente às relações, analisadas na seção 5.3, entre a adoção de tecnologias de AP no contexto da Agricultura 4.0 e os fatores nível educacional, capacitação, acesso à dados e recursos (pessoas - consultores) (fatores abordados nas Proposições teóricas 2, 3a, 8d, 9). Considerado o fator tamanho da empresa agrícola - empresa industrial das empresas envolvidas nos estudos de caso, pesquisa futura é sugerida para estudar se os resultados podem ser replicados e generalizados e para investigar o modelo de capacitação do agricultor e o modelo organizacional das empresas agrícolas industriais para a adoção, no Estado da Bahia e em outros Estados no Brasil.

Pesquisa futura 2. Quanto ao componente unidade de análise e ao fator tamanho da empresa agrícola - empresa familiar (fator relacionado à Proposição teórica 10), no contexto desse projeto de tese dois estudos de caso sobre produtores de açaí no Estado do Pará foram

desenvolvidos, cujos resultados foram apresentados em Monteleone et al. (2020b). De acordo com a literatura sobre a adoção de AP (BERNARDI; INAMASU, 2014; BORGHI et al., 2016; PAUSTIAN; THEUVSEN, 2017; VECCHIO et al., 2020b) e como relatados pelos especialistas 10 e 17, a adoção de tecnologias de AP no contexto da Agricultura 4.0 é afetada pelas características da empresa agrícola, como o tamanho da empresa agrícola - empresa familiar. Como exemplo, o especialista 10 afirma que: "*A aplicação das ferramentas incluídas no conceito de Agricultura 4.0, pelo menos no Brasil, vai ter velocidades diferentes, segundo as regiões do país, segundo as características da propriedade e do agricultor, segundo os tipos de produto*". Pesquisa futura é sugerida para continuar esse estudo também em outros tipos de cultura (fator relacionado à Proposição teórica 10), além do açaí, e investigar as relações entre a adoção e o fator tamanho da empresa agrícola - empresa familiar no modelo de gestão das operações de irrigação. Essa proposta aborda temas de pesquisa comuns a ***Pesquisa futura 11*** sobre o desenvolvimento sustentável concernente a adoção de AP no contexto da Agricultura 4.0, como a inclusão social.

Pesquisa futura 3. A respeito do componente unidade de análise e do fator localização da empresa agrícola (fator relacionado à Proposição teórica 10), nesse trabalho entrevistas com especialistas no Brasil foram realizadas. Além disso, no contexto desse projeto de tese 9 entrevistas com especialistas na Itália foram conduzidas, com o objetivo de complementar o estudo de caso realizado no piloto na Itália, apresentado em Monteleone et al. (2020b), e contribuir para a generalização dos resultados dessa tese em outros contextos, em termos de fatores identificados e modelo de gestão das operações de irrigação (FLICK, 2009; HOME et al., 2014). Portanto, para aumentar a validade externa dos resultados atingidos, pesquisa futura é proposta para aplicar a abordagem multimétodo deste trabalho na Itália envolvendo entrevistas com especialistas e estudos de caso em empresas agrícolas.

Pesquisa futura 4. O modelo de gestão das operações de irrigação ilustrado na Figura 13 é proposto como estrutura conceitual para direcionar estudos futuros visando investigar as relações de causa e efeito entre os fatores envolvidos na adoção de AP no contexto da Agricultura 4.0. Além disso, os estudos de caso e as entrevistas com os especialistas evidenciam as conexões entre a irrigação e outras operações agrícolas. Alguns especialistas afirmam que a adoção de AP no contexto da Agricultura 4.0 para a irrigação deve ser vista como complementar:

"*Eu acredito que quando o agricultor considera a irrigação, ele tem que complementar ela com outras atividades e a Agricultura 4.0 ajuda isso*", especialista 24, e integrada com as outras operações agrícolas:

> "Não faz sentido o agricultor adotar uma tecnologia que demanda muito investimento só para a irrigação e esquecer as outras etapas da produção agrícola. O agricultor pode utilizar as tecnologias de Agricultura de Precisão em todas as outras etapas da gestão agronômica", especialista 29;
> "No planejamento da irrigação o agricultor precisa considerar também a pressão ambiental, porque quando ele irriga é maior a pressão por danos ambientais. Se o agricultor colocar água em excesso, ele pode causar uma série de problemas, doenças nas plantas, lixiviação de contaminantes", especialista 26.

Também a literatura sobre a irrigação evidencia a integração entre as operações agrícolas. Por exemplo, os pivôs centrais fornecem um excelente veículo para aplicar alguns produtos químicos e fertilizantes para atender exatamente aos requisitos da planta. Em algumas áreas com solos muito leves, até 80% do fertilizante de nitrogênio é aplicado através do sistema de pivô central. Benefícios substanciais de qualidade da colheita e controle de pragas podem ser obtidos ao usar este método (EVANS, 2001; EVANS et al., 2013). O agricultor deve levar em consideração que algumas operações e decisões são interligadas. Por exemplo, o momento do plantio da cultura e a sua colheita afetam o rendimento da safra; questões como a rotação das culturas são intimamente relacionadas ao plantio e à colheita; decisões sobre o que deve ser cultivado e a porção total de terra agrícola a ser dedicada a cada cultura devem considerar decisões semelhantes a ser tomadas nas safras subsequentes; a irrigação para culturas concorrentes é uma questão importante de planejamento agrícola quando a água é escassa (LOWE; PRECKEL, 2004). Ainda, muitas operações agrícolas, como preparação da semeadura e colheita precisam ser executadas em uma ordem específica. Cada operação tem um número de condições agronômicas que devem ser satisfeitas em um campo antes que a operação possa ser executada de maneira eficiente e efetiva. A avaliação dessas condições é incluída na operação de preparação do campo (EDWARDS et al., 2015).

Portanto, com inspiração também em Bochtis; Sørensen; Busato (2014, p. 71), em Jørgensen (2018, p. 99) e no modelo ilustrado na Figura 2, esse trabalho propõe um modelo de gestão integrada das operações agrícolas que expande o campo de estudo da irrigação e que envolve fatores abordados nas Proposições teóricas 4c e 6. Esse modelo de gestão integrada, ilustrado na Figura 24, oferece uma visão holística da gestão das operações agrícolas fundamentada nos três pilares agronômicos do sistema de produção de uma empresa agrícola (cultura, solo e clima), para alcançar o potencial produtivo da cultura.

Figura 24 - Modelo de gestão integrada das operações agrícolas



Estágios de desenvolvimento do milho				Início - germinação	Início	Desenvolvimento	Floração e frutificação	Maturação		
Gestão de outras operações agrícolas		Planejamento antes da safra	Preparação campo, dessecação, adubação, semeadura	Adubação, controle pragas	Adubação, controle pragas	Adubação, controle pragas	Controle pragas	Controle pragas	Secagem, controle risco fogo	Colheita
Gestão das operações de irrigação	Planejamento	✓		✓	✓	✓	✓	✓		
	Programação			✓	✓	✓	✓	✓		
	Execução			✓	✓	✓	✓	✓		
	Controle			✓	✓	✓	✓	✓		

Fonte: Autor

O modelo é fundamentado nos estágios de desenvolvimento da cultura do milho utilizados nos cenários de simulação realizados na "Empresa agrícola Bahia". A Figura 24 enfatiza a integração entre os três pilares agronômicos e as operações de irrigação e também com outras operações agrícolas, como destacado pelos especialistas 11, 20, 21, 24 e 25. Por exemplo, o especialista 24 afirma que: "*A irrigação é uma área nobre dentro da propriedade porque é responsável da gestão de um dos fatores limitantes para as plantas, a disponibilidade de água. E passa a ser muito importante o manejo de solo, o manejo da agricultura de precisão, o desempenho das máquinas agrícolas, uma semeadura de qualidade, um controle fitossanitário preciso, porque o agricultor está otimizando os fatores. Portanto, é inútil otimizar um fator, a água, e negligenciar os outros. Eu sempre vi na irrigação uma grande oportunidade para que o agricultor buscasse a excelência na otimização de todos os recursos*". Portanto, é proposta uma pesquisa futura para estudar a adoção de tecnologias de AP no contexto da Agricultura 4.0 com foco na extensão do modelo de gestão das operações de irrigação as outras operações agrícolas.

Pesquisa futura 5. Na exploração dos fatores relevantes para a adoção de Agricultura de Precisão no contexto da Agricultura 4.0, o construto TPB "Norma Subjetiva" foi considerado fora de escopo. Na construção do modelo de simulação de Dinâmica de Sistema também outros fatores, associados aos construtos Atitude e Controle Comportamental Percebido, foram

considerados fora de escopo, como o planejamento da necessidade de água de irrigação, na "Empresa agrícola Bahia" realizado com o apoio de consultores. Pesquisa futura é sugerida para incluir o preditor "Norma Subjetiva" na exploração e investigar a relação entre o agricultor e os atores que operam no ecossistema da empresa agrícola (incluídos os consultores). Essa proposta, cujos primeiros resultados são apresentados no modelo ilustrado no Apêndice A, é focada na análise dos fatores identificados por meio das entrevistas com os especialistas e considerados fora de escopo da tese (como o acesso ao mercado das tecnologias, acesso ao mercado dos financiamentos, acesso ao mercado de educação - fatores relacionados às Proposições teóricas 3f, 9, 10 e 11) e fora de escopo do modelo de simulação (como o planejamento da necessidade de água de irrigação) e seus impactos na adoção.

Pesquisa futura 6. Na fundamentação teórica (BOCHTIS; SORENSEN; KATERIS, 2018; JØRGENSEN, 2018; SAIZ-RUBIO; ROVIRA-MÁS, 2020; WILLOCK et al., 1999; ZHAI et al., 2020) e nos resultados das entrevistas com os especialistas e dos estudos de caso são presentes fatores em comum entre adoção e tomada de decisões na gestão das operações de irrigação. Por exemplo, a relação entre estimativa da necessidade de água de irrigação e uso de água pode afetar também a tomada de decisões na gestão do planejamento, programação, execução e controle da irrigação. Outro exemplo é citado pelo especialista 8: "*Com a adoção da Agricultura 4.0, a tomada de decisões relativa ao planejamento da irrigação acaba sendo mais facilitada uma vez que o agricultor tem muito mais informações para gerenciar a empresa agrícola de uma forma geral. Por exemplo através de estações meteorológicas instaladas na empresa o agricultor pode saber se em um determinado local choveu e controlar a umidade do solo*". O especialista 14 acrescenta que: "*O agricultor pode tomar uma decisão mais precisa em relação ao tempo de irrigação e de vazão, porque ele pode trabalhar com sensores que fornecem essa precisão nas informações para a sua tomada de decisões. O agricultor pode planejar o sistema de irrigação para que a irrigação seja mais efetiva*".

Dado que os gerente das empresas agrícolas envolvidos nos dois estudos de caso não gerenciam as operações do planejamento da irrigação, incluindo o custo de uso de água planejado e o custo de uso de energia planejado, exceto que a nível de planejamento da empresa agrícola, a adoção de tecnologias de AP no contexto da Agricultura 4.0 pode disponibilizar o modelo proposto nessa tese também para apoiar a tomada de decisões na gestão das operações de irrigação, de acordo com o prazo de planejamento (semana, mês, estágio de desenvolvimento, safra). Pesquisa futura é sugerida para estudar a adoção de tecnologias de AP no contexto da Agricultura 4.0 com foco na tomada de decisões na gestão das operações de

irrigação. Essa pesquisa pode ser realizada envolvendo também os atores que atuam no ecossistema da empresa agrícola, como seus fornecedores e clientes.

Pesquisa futura 7. Em relação ao componente comportamento, a difusão, processo pelo qual uma inovação é disseminada entre vários indivíduos (FISHER et al., 2000), foi considerada fora de escopo na exploração dos fatores relevantes para a adoção de AP no contexto da Agricultura 4.0. Pesquisa futura é necessária para investigar os fatores relevantes para a difusão de tecnologias de AP no contexto da Agricultura 4.0 concernentes o comportamento do agricultor e a gestão das operações de irrigação. Um resultado preliminar utilizando os dados coletados nas primeiras entrevistas exploratórias com os especialistas é um modelo de simulação para a análise de políticas de difusão da Agricultura de Precisão no contexto da Agricultura 4.0 apresentado no congresso SOBER 2021 e ilustrado no Apêndice B.

Pesquisa futura 8. De acordo com a abordagem gradativa na adoção de tecnologias de AP no contexto da Agricultura 4.0 (fator relacionado à Proposição teórica 5), descrita nas seção 5.2 e na seção 6.1, e de acordo com a finalidade do modelo de simulação, que envolve as tecnologias da estação meteorológica e do satélite, as tecnologias da sonda de solo e do drone (fatores abordados nas Proposições teóricas 2d e 8b) foram consideradas fora de escopo nesse projeto de tese. Ainda, no modelo de balanço hídrico ilustrado na Equação 3 o componente $PERC$, que representa as perdas por percolação ou infiltração, foi colocado fora de escopo dos cenários de simulação. Portanto, pesquisa futura é proposta para estudar o modelo de gestão das operações de irrigação no caso de adoção das tecnologias da sonda de solo e do drone.

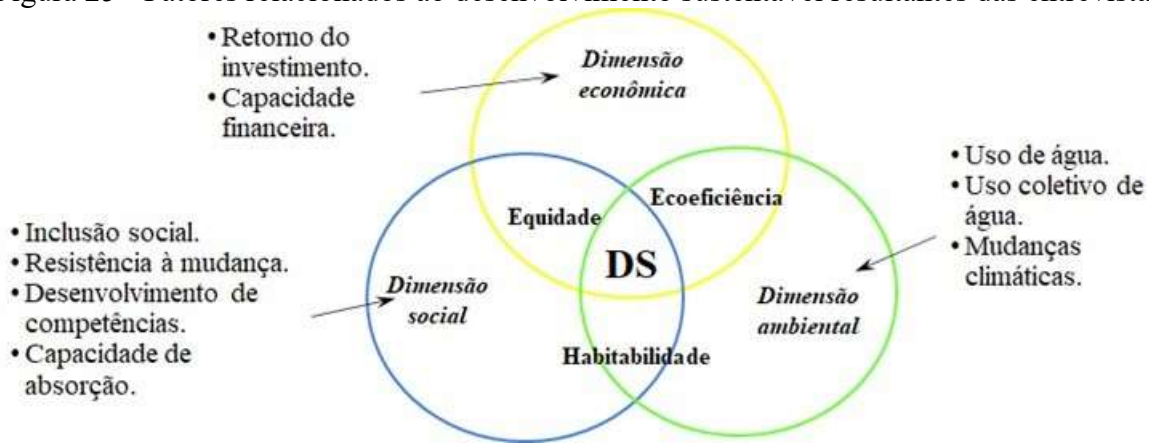
Pesquisa futura 9. A respeito das oportunidades para o agricultor a seguir da adoção de AP no contexto da Agricultura 4.0 com foco no planejamento e controle das operações de irrigação, os especialistas 25, 31, 34 e 36 mencionam os modelos de gestão colaborativa (fator relacionado à Proposição teórica 7). A adoção desses modelos permite superar alguns desafios inerentes o planejamento e controle da operações de irrigação no caso de gestão compartilhada de recursos hídricos, como a garantia de disponibilidade de água ao longo de uma safra para o agricultor. A sugestão de adotar um modelo de gestão inspirado à indústria (fator abordado na Proposição teórica 6) dos especialistas 4, 5, 10 e 15 para a irrigação leva a considerar outros modelos amplamente difundidos, como o Planejamento de Vendas e Operações (*Sales and Operations Planning* - S&OP). O S&OP é o planejamento de longo prazo dos níveis de produção relativos às vendas dentro da estrutura de um sistema de planejamento e controle de fabricação. O principal objetivo do S&OP é equilibrar a oferta agregada e a demanda agregada, através de atualizações mensais do plano de negócios anual (OLHAGER; RUDBERG; WIKNER, 2001; THOMÉ et al., 2012). A inspiração para o modelo S&OP sugere a ideia de

pesquisa de explorar a possibilidade de superar os desafios relativos à comunicação escassa e ineficaz entre demanda e oferta de água em uma bacia hidrográfica. Essa ideia envolve fatores que podem ser uteis para superar o desafio de equilibrar a oferta de água (água compartilhada gerenciada pelo órgão gestor do recurso hídrico) e a demanda de água (usuários da água, entre eles os agricultores para a irrigação). Pesquisa futura é proposta para estudar a aplicação do modelo de gestão das operações de irrigação à gestão de bacias hidrográficas e perímetros irrigados, utilizando modelos de gestão colaborativa inspirados à indústria (fator abordado na Proposição teórica 7).

Pesquisa futura 10. Quanto à definição de Agricultura 4.0, considerando a natureza exploratória desse trabalho, os resultados das entrevistas abordam também o tema de pesquisa do desenvolvimento sustentável, de acordo com os especialistas 1, 24, 25, 26, 30, 31 e 34. Alguns fatores identificados por meio da análise das entrevistas podem ser classificados de acordo com o modelo dos três pilares do desenvolvimento sustentável (SEGERKVIST et al., 2020), ilustrado na Figura 25.

Esses fatores são: retorno do investimento, capacidade financeira da empresa agrícola, conflitos pelo acesso aos recursos hídricos (sustentabilidade econômica); inclusão social, resistência à mudança, desenvolvimento de competências, capacidade de absorção, conflitos pelo acesso aos recursos hídricos (sustentabilidade social); uso de água, uso coletivo de água, mudanças climáticas, disponibilidade de recursos hídricos, recursos hídricos limitados, erosão dos recursos hídricos (sustentabilidade ambiental).

Figura 25 - Fatores relacionados ao desenvolvimento sustentável resultantes das entrevistas



Fonte: Autor

Esses resultados empíricos preliminares sugerem a proposta de uma pesquisa futura para explorar a adoção de tecnologias de AP para a irrigação no contexto da Agricultura 4.0 em relação ao desenvolvimento sustentável de uma empresa agrícola ou de um grupo de empresas.

8 CONCLUSÕES

Os objetivos deste trabalho foram explorar os fatores que podem afetar a adoção de Agricultura de Precisão no contexto da Agricultura 4.0, propor um modelo de gestão das operações de irrigação para entender e formalizar as relações entre a adoção e os fatores identificados (na revisão da literatura, nas entrevistas com os especialistas e nos estudos de caso), realizar cenários de simulação para estudar as relações entre esses fatores e propor uma definição do conceito de Agricultura 4.0 com base nos resultados empíricos.

Na literatura pouca atenção ainda é prestada aos fatores concernentes o comportamento do agricultor e a gestão das operações de irrigação para explicar a adoção de AP pelo agricultor no contexto da Agricultura 4.0. Para atingir os objetivos do trabalho e superar essas lacunas de pesquisa, uma metodologia exploratória multimétodos, que combina uma abordagem indutiva com uma dedutiva, foi adotada. Essa metodologia consiste em revisão sistemática da literatura, entrevistas com especialistas, estudos de caso, técnica de modelagem e simulação.

Para identificar as categorias e os fatores, a comparar com a fundamentação teórica e os resultados da revisão sistemática, 36 entrevistas com especialistas no Brasil e estudos de caso em profundidade uma 2 empresas agrícolas localizadas no Estado da Bahia foram conduzidos. Os resultados da pesquisa empírica levaram a identificação de um conjunto de categorias e fatores classificados com base nos construtos da Teoria do Comportamento Planejado, que podem afetar a adoção de AP no contexto da Agricultura 4.0, e a formalização dessas categorias e fatores em um modelo de gestão das operações de irrigação. 2 cenários de simulação foram construídos com dados coletados na "Empresa agrícola Bahia", considerando a cultura do milho e o sistema de irrigação do pivô central, para estudar as relações de causa e efeito entre os fatores envolvidos no planejamento da irrigação e a adoção da tecnologia de sensoriamento IoT do satélite e o utilizo da tecnologia da estação meteorológica.

Os resultados dos cenários de simulação permitem estudar as relações de causa e efeito entre os fatores identificados no planejamento do tempo de irrigação, planejamento do uso de água e planejamento do uso de energia elétrica e permitem também sugerir a intenção de não adotar a tecnologia de sensoriamento do satélite.

As categorias e os fatores identificados nessa tese contribuem a ampliar o entendimento dos fatores determinantes da adoção de AP na era 4.0 acrescentando o comportamento do agricultor e a gestão das operações a literatura. As categorias e fatores concernentes a gestão das operações de irrigação facilitam também o estabelecimento de soluções operacionais,

graças a proposta de adotar o modelo de gestão das operações de irrigação e contribuem a explicar o potencial ainda inexplorado da AP para as operações de irrigação.

A organização dos fatores identificados em um modelo, construído utilizando a técnica IDEF0, contribui a representar a gestão das operações de irrigação e as relações entre os fatores em forma estruturada. Considerando a falta de teoria sobre a Agricultura 4.0 e as lacunas identificadas na literatura, este modelo contribui para o conhecimento sobre a adoção de Agricultura de Precisão e sobre a Agricultura 4.0 ao propor relações entre esses fatores a fim de explicar a adoção de AP no contexto da Agricultura 4.0. Em contraste com pesquisas anteriores sobre a irrigação, o modelo proposto distingue entre planejamento e programação.

Os resultados dos estudos de caso possibilitam também estudar as relações entre a adoção e os fatores nível educacional, capacitação, acesso à dados e recursos (pessoas - consultores). Esses resultados evidenciam a adoção de um modelo de terceirização relativo à capacitação técnica na "Empresa agrícola Bahia", pelo apoio dos consultores.

Os resultados das simulações permitem estudar as relações de causa e efeito entre os fatores envolvidos no planejamento do tempo de irrigação, planejamento do uso de água e planejamento do uso de energia elétrica. Os resultados sugerem também políticas para direcionar a adoção. A análise de sensibilidade mostra que ao variar do custo unitário de água, o custo de uso de água planejado na safra atinge um valor significativo em comparação com o custo de uso de energia elétrica planejado na safra. Essa análise de sensibilidade evidencia a relação entre a adoção e o processo de aprendizagem como estímulo para mudanças no modelo mental do gerente da empresa agrícola no planejamento da irrigação. Os resultados evidenciam o papel dos insumos, água e energia, na gestão operacional, além do impacto econômico pela oportunidade de redução de custos, dado que os relativos contratos de acesso e fornecimento resultam fundamentais na relação de causa e efeito entre planejamento da necessidade de água de irrigação e planejamento do uso dos insumos.

Com base nos resultados empíricos uma definição de Agricultura 4.0 é proposta que destaca o papel fundamental das tecnologias de sensoriamento IoT na evolução da Agricultura de Precisão para a Agricultura 4.0 e na transformação do modelo tradicional das operações de irrigação, muitas vezes baseado na experiência, em um modelo digital de uso intensivo de dados. Este trabalho também contribui para a discussão sobre a Agricultura 4.0, visto que o agricultor tem a oportunidade de adotar tecnologias de sensoriamento IoT que melhoram o acesso aos dados e o planejamento das operações de irrigação, transformando o modelo operacional tradicional.

Além de contribuições teóricas, esta tese apresenta também uma contribuição prática. O modelo de gestão das operações de irrigação proposto pode ser útil para apoiar o processo de tomada de decisões do agricultor na gestão das operações. De acordo com a literatura, o modelo proposto pode ser utilizado também para o desenvolvimento de um sistema de gestão da irrigação que integre a gestão agronômica de uma cultura e as operações de planejamento, programação, execução e controle da irrigação.

Considerando a natureza exploratória desse projeto de tese, uma agenda de pesquisa futura é proposta como resultado da discussão das limitações e sugerida pelos dados coletados nas entrevistas, com os especialistas e com os dois gerentes, pelas proposições teóricas formuladas com a abordagem indutiva e pelos cenários de simulação. A agenda proposta aborda os fatores e os componentes considerados fora de escopo nesse estudo, como modelo de capacitação e modelo organizacional das empresas agrícolas industriais para a adoção, tamanho da empresa agrícola - empresa familiar, estudo da adoção na Itália, outras operações agrícolas, ecossistema da empresa agrícola, tomada de decisões na gestão das operações de irrigação, difusão de tecnologias de AP, adoção das tecnologias da sonda de solo e do drone, gestão compartilhada de recursos hídricos, Agricultura 4.0 e desenvolvimento sustentável. A agenda de pesquisa inclui também a proposta de um modelo de gestão integrada das operações agrícolas fundamentada nos três pilares agronômicos.

REFERÊNCIAS

ABT, V.; VIGIER, F.; SCHNEIDER, M. Enterprise Business Modelling Languages Applied to Farm Enterprise: A Case Study for IDEF0, GRAI Grid, and AMS Languages. *In*: PAPAJORGJI, P. J.; ARDALOS, P. M. **Advances in modeling agricultural systems**. first ed. New York: Springer, Boston, MA, 2009. p. 167–191.

ADAMIDES, G. et al. Smart farming techniques for climate change adaptation in Cyprus. **Atmosphere**, v. 11, n. 6, p. 1–17, 2020.

ADEYEMI, O. et al. Dynamic neural network modelling of soil moisture content for predictive irrigation scheduling. **Sensors**, v. 18, n. 10, p. 3408, 2018.

ADNAN, N. et al. Adoption of green fertilizer technology among paddy farmers: A possible solution for Malaysian food security. **Land Use Policy**, v. 63, p. 38–52, 2017.

ADRIAN, M. A.; NORWOOD, S. H.; MASK, P. L. Producers' perceptions and attitudes toward precision agriculture technologies. **Computers and Electronics in Agriculture**, v. 48, p. 256–271, 2005.

AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS – ANA. **O comitê de bacia hidrográfica. O que é e o que faz?** 2011. Disponível em: <https://www.gov.br/ana/pt-br/todos-os-documentos-do-portal/documentos-sas/cadernos-de-capacitacao>. Acesso em: 1 jan. 2022.

AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS E SANEAMENTO BÁSICO. **Atlas irrigação. Uso da Água na Agricultura Irrigada**. 2021. Disponível em: <http://atlasirrigacao.ana.gov.br>. Acesso em: 19 dez. 2021.

AJZEN, I. The Theory of Planned Behavior. **Organizational behavior and human decision processes**, v. 50, n. 2, p. 179–211, 1991.

AJZEN, I. **Constructing a Theory of Planned Behavior questionnaire**. 2006. Disponível em: <http://people.umass.edu/aizen/tpb.measurement.pdf>. Acesso em: 13 set. 2019.

AJZEN, I. **The Theory of Planned Behavior: A Bibliography**. 2021a. Disponível em: <https://people.umass.edu/aizen/tpbrefs.html>. Acesso em: 5 jan. 2021.

AJZEN, I. **Frequently Asked Questions**. 2021b. Disponível em: <https://people.umass.edu/aizen/faq.html>. Acesso em: 5 jan. 2021.

AJZEN, I.; FISHBEIN, M. **Belief, Attitude, Intention, and Behavior: An Introduction to Theory and Research**. First ed. Reading, MA: Addison-Wesley, 1975. p. 1-578.

AKIMOWICZ, M. et al. An introduction to mixed methods research in agricultural economics: The example of farm investment in Ontario's Greenbelt, Canada. **Journal of Rural Studies**, v. 61, n. May, p. 162–174, 2018.

ALBIN, S. **Building a System Dynamics Model Part 1: Conceptualization**. 1997. Disponível em: <https://ocw.mit.edu/courses/sloan-school-of-management/>. Acesso em: 2 jan. 2021.

ALLEN, R. G. et al. Crop evapotranspiration-Guidelines for computing crop water requirements-FAO Irrigation and drainage paper 56. **Fao, Rome**, v. 300, n. 9, p. D05109, 1998.

ALLEN, R. G. et al. A Landsat-based energy balance and evapotranspiration model in Western US water rights regulation and planning. **Irrigation and Drainage Systems**, v. 19, p. 251–268, 2005.

ALMIÑANA, M. et al. WISCHE: A DSS for water irrigation scheduling. **Omega**, v. 38, n. 6, p. 492–500, 2010.

ALVARES, C. A. et al. Köppen's climate classification map for Brazil. **Meteorologische Zeitschrift**, v. 22, n. 6, p. 711–728, 2013.

ANTOLINI, L. S.; SCARE, R.; DIAS, A. **Adoption of Precision Agriculture Technologies by Farmers: A Systematic Literature Review and Proposition of an Integrated Conceptual Framework**. *In*: IFAMA World Conference Scientific Research Symposium, 2015, Saint Paul, Minnesota, USA. **Anais**... Saint Paul: International Food and Agribusiness Management Association, 2015. p. 1-17.

ANTONINI, R. C. et al. Adoção E Uso Da Agricultura De Precisão Na Região Das Missões Do Rio Grande Do Sul. **Holos**, v. 4, p. 106–121, 2018.

ARAÚJO, T. D. O. de et al. A model to support fluid transitions between environments for mobile augmented reality applications. **Sensors**, v. 19, n. 19, p. 4254, 2019.

ARMITAGE, C. J.; CONNER, M. Efficacy of the Theory of Planned Behaviour: A meta-analytic review. **British Journal of Social Psychology**, v. 40, p. 471–499, 2001.

ASARE, E.; SEGARRA, E. Adoption and extent of adoption of georeferenced grid soil sampling technology by cotton producers in the southern US. **Precision Agriculture**, v. 19, n. 6, p. 992–1010, 2018.

ATZORI, L.; IERA, A.; MORABITO, G. The Internet of Things: A survey. **Computer Networks**, v. 54, n. 15, p. 2787–2805, 2010.

ATZORI, L.; IERA, A.; MORABITO, G. Understanding the Internet of Things: definition, potentials, and societal role of a fast evolving paradigm. **Ad Hoc Networks**, v. 56, n. October 2017, p. 122–140, 2017.

AUBERT, B. A.; SCHROEDER, A.; GRIMAUDO, J. IT as enabler of sustainable farming: An empirical analysis of farmers' adoption decision of precision agriculture technology. **Decision Support Systems**, v. 54, n. 1, p. 510–520, 2012.

AUSTIN, E. J. et al. Empirical models of farmer behaviour using psychological, social and economic variables. Part II: Nonlinear and expert modelling. **Agricultural Systems**, v. 58, n. 2, p. 225–241, 1998.

AYERDI GOTOR, A. et al. Precision farming uses typology in arable crop-oriented farms in northern France. **Precision Agriculture**, v. 21, n. 1, p. 131–146, 2020.

AZHAR, A. H.; PERERA, B. J. C. Prediction of rainfall for short term irrigation planning and scheduling-case study in Victoria, Australia. **Journal of Irrigation and Drainage Engineering**, v. 137, n. 7, p. 435–445, 2011.

BAGHERI, N.; BORDBAR, M. Solutions for fast development of precision agriculture in Iran. **Agricultural Engineering International: CIGR Journal**, v. 16, n. 3, p. 119–123, 2014.

BAIAMONTE, Giorgio; BAIAMONTE, Gabriele. Using rotating sprinkler guns in centre-pivot irrigation systems. **Irrigation and Drainage**, v. 68, n. 5, p. 893–908, 1 dez. 2019.

BALA, B. K. et al. Simulation of Crop-Irrigation Systems. **Agricultural Systems**, v. 27, p. 51–65, 1988.

BALAFOUTIS, A. T.; EVERT, F. K. V.; FOUNTAS, S. Smart Farming Technology Trends: Economic and Environmental Effects, Labor Impact, and Adoption Readiness. **Agronomy**, v. 10, p. 743, 2020.

BANKS, J. et al. **Discrete-Event System Simulation**. Fourth ed. Hoboken, New Jersey, USA: Pearson, 2004.

BARNES, A. et al. Influencing factors and incentives on the intention to adopt precision agricultural technologies within arable farming systems. **Environmental Science and Policy**, v. 93, n. September 2018, p. 66–74, 2019a.

BARNES, A. P. et al. Exploring the adoption of precision agricultural technologies: A cross regional study of EU farmers. **Land Use Policy**, v. 80, n. November 2017, p. 163–174, 2019b.

BARRATT, M.; KULL, T. J.; SODERO, A. C. Inventory record inaccuracy dynamics and the role of employees within multi-channel distribution center inventory systems. **Journal of Operations Management**, v. 63, n. March 2017, p. 6–24, 2018.

BARRETT, H.; ROSE, D. C. Perceptions of the Fourth Agricultural Revolution: What's In, What's Out, and What Consequences are Anticipated? **Sociologia Ruralis**. 2020. DOI: https://doi.org/10.1111/soru.12324.

BATTE, T.; ARNHOLT, M. W. Precision farming adoption and use in Ohio: case studies of six leading-edge adopters. **Computers and Electronics in Agriculture**, v. 38, p. 125–139, 2003.

BAUR, I.; DOBRICKI, M.; LIPS, M. The basic motivational drivers of northern and central European farmers. **Journal of Rural Studies**, v. 46, p. 93–101, 2016.

BEIER, G. et al. Industry 4.0: How it is defined from a sociotechnical perspective and how much sustainability it includes – A literature review. **Journal of Cleaner Production**, v. 259, p. 120856, 2020.

BENBASAT, B. I. The Case Research Strategy in Studies of Information Systems. **MIS quarterly**, v. 11, n. 3, p. 369–386, 1987.

BERGEVOET, R. H. M. **Entrepreneurship of Dutch dairy farmers**. 2005. 192 f. Tese de Doutorado (Mansholt Graduate School) - Wageningen University, Wageningen, The Netherlands, 2005. Disponível em: <https://library.wur.nl/>. Acesso em: 14 jan. 2022.

BERNARDI, A. C. DE C.; INAMASU, R. Y. Adoção da agricultura de precisão no Brasil. In: **Agricultura de precisão: resultados de um novo olhar**. Brasília: Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária - EMBRAPA, 2014. p. 559–577.

BERNARDO, S.; SOARES, A.; MANTOVANI, E. **Manual de Irrigação**. Primeira ed. Viçosa, MG, Brasil: Universidade Federal de Viçosa, 1982.

BERNHARDT, H. et al. Challenges for agriculture through industry 4.0. **Agronomy**, v. 11, n. 10, 1 out. 2021.

BERTOGLIO, R. et al. The Digital Agricultural Revolution: A Bibliometric Analysis Literature Review. **IEEE Access**, v. 9, p. 134762–134782, 2021.

BETTIGA, D.; LAMBERTI, L. Exploring the adoption process of personal technologies: A cognitive-affective approach. **Journal of High Technology Management Research**, v. 28, n. 2, p. 179–187, 2017.

BIANCHI, C. G.; FIGUEIREDO, J. C. B. DE. Characteristics of Brazilian scientific research on diffusion of innovations in business administration. **RAI Revista de Administração e Inovação**, v. 14, n. 4, p. 311–320, 2017.

BIJTTEBIER, J. et al. Adoption of non-inversion tillage across Europe : Use of a behavioural approach in understanding decision making of farmers. **Land Use Policy**, v. 78, n. September 2017, p. 460–471, 2018.

BOCHTIS, D. D.; SØRENSEN, C. G. C.; BUSATO, P. Advances in agricultural machinery management: A review. **Biosystems Engineering**, v. 126, p. 69–81, 2014.

BOCHTIS, D.; SORENSEN, C. A. G.; KATERIS, D. **Operations Management in Agriculture**. First ed. Cambridge, Massachusetts, USA: Academic Press, Elsevier, 2018.

BOGNER, A.; LITTIG, B.; MENZ, W. **Interviewing Experts**. First ed. Houndmills, Basingstoke, Hampshire, England: Palgrave MacMillan, 2009.

BOLFE, E. L. et al. **Agricultura digital no Brasil: tendências, desafios e oportunidades: resultados de pesquisa online**. 2020. Disponível em: <https://www.embrapa.br>. Acesso em: 17 jan. 2021.

BOOCH, G.; RUMBAUGH, J.; JACOBSON, I. **The Unified Modeling Language user guide**. 6th. ed. Reading, Massachusetts, USA: Addison Wesley, 2000.

BORGES, J. A. R.; OUDE LANSINK, A. G. J. M.; EMVALOMATIS, G. Adoption of innovation in agriculture: A critical review of economic and psychological models. **International Journal of Innovation and Sustainable Development**, v. 13, n. 1, p. 36–56, 2019.

BORGHI, E. et al. Adoption and Use of Precision Agriculture in Brazil: Perception of Growers and Service Dealership. **Journal of Agricultural Science**, v. 8, n. 11, p. 89, 2016.

BRAMLEY, R. G. V.; OUZMAN, J. Farmer attitudes to the use of sensors and automation in fertilizer decision-making: nitrogen fertilization in the Australian grains sector. **Precision Agriculture**, v. 20, n. 1, p. 157–175, 2018.

BRAUN, A. T.; COLANGELO, E.; STECKEL, T. Farming in the Era of Industrie 4.0. **Procedia CIRP**, v. 72, p. 979–984, 2018.

BRINKHOFF, J. et al. **WiField, an IEEE 802.11-based agricultural sensor data gathering and logging platform**. *In*: Eleventh International Conference on Sensing Technology (ICST), 2017, Sydney, New South Wales, Australia. **Anais**... Sydney: IEEE, 2017. p. 1-6.

BROUWER, C.; HEIBLOEM, M. **Irrigation Water Management: Irrigation Water Needs**, Training manuals on irrigation. Rome, Italy: FAO, 1986. Disponível em: <https://www.fao.org/>. Acesso em: 27 nov. 2020.

BROUWER, C.; PRINS, K.; HEIBLOEM, M. **Irrigation Water Management: Irrigation Scheduling Training manual**, Training manuals on irrigation. Rome, Italy: FAO, 1989. Disponível em: <https://www.fao.org/>. Acesso em: 27 nov. 2020.

BUCCI, G.; BENTIVOGLIO, D.; FINCO, A. Factors affecting ict adoption in agriculture: A case study in Italy. **Quality - Access to Success**, v. 20, n. S2, p. 122–129, 2019.

BUCHLEITER, B. G. W.; HEERMANN, D. F. Using computers to manage irrigation systems. **Journal of Water Resources Planning and Management**, v. 112, n. 3, p. 354–365, 1986.

BURTON, R. J. F. Reconceptualising the "behavioural approach" in agricultural studies: A socio-psychological perspective. **Journal of Rural Studies**, v. 20, n. 3, p. 359–371, 2004.

BUSSE, M. et al. Innovation mechanisms in German precision farming. **Precision Agriculture**, v. 15, n. 4, p. 403–426, 2014.

BUXMANN, P.; HESS, T.; RUGGABER, R. Internet of Services. **Business & Information Systems Engineering**, v. 1, n. September, p. 341–342, 2009.

CALERA, A. et al. Remote sensing for crop water management: From ET modelling to services for the end users. **Sensors**, v. 17, n. 5, p. 1–25, 2017.

CAMPOS, R. F. D. A.; CUNHA, D. A. D.; BUENO, N. P. Disseminação de informações em sistemas socioecológicos : análise de um modelo híbrido de Dinâmica de Sistemas e Modelagem Baseada em Agentes. **Nova Economia**, v. 30, n. 1, p. 257–286, 2020.

CARRARO, N. C.; GODINHO FILHO, M.; OLIVEIRA, E. C. DE. Technologies of the Industry 4.0: Perspectives of Application in the Brazilian Agribusiness. **International Journal of Advanced Engineering Research and Science**, v. 6, n. 7, p. 319–330, 2020.

CARRER, M. J.; SOUZA FILHO, H. M. de; BATALHA, M. O. Factors influencing the adoption of Farm Management Information Systems (FMIS) by Brazilian citrus farmers. **Computers and Electronics in Agriculture**, v. 138, p. 11–19, 2017.

CHAN, F. T. S. Performance Measurement in a Supply Chain. **The International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, v. 21, p. 534–548, 2003.

CHARATSARI, C. et al. Farm advisors amid the transition to Agriculture 4.0: Professional identity, conceptions of the future, and future-specific competencies. **Sociologia Ruralis**, 23 nov. 2021.

CHENG-LEONG, A.; PHENG, K. L.; LENG, G. R. K. IDEF: A comprehensive modelling methodology for the development of manufacturing enterprise systems. **International Journal of Production Research**, v. 37, n. 17, p. 3839–3858, 1999.

CHEVALIER, A. et al. A Multi Agent System for Precision Agriculture. *In*: BUSONIU, L.; TAMÁS, L. **Handling Uncertainty and Networked Structure in Robot Control**. First ed. Cham, Switzerland: Springer, 2015. p. 361–386.

CHIAVENATO, I. **Gestão de pessoas**. 4° ed. Barueri, SP, Brasil: Editora Manole Ltda., 2014.

CID-GARCIA, N. M.; BRAVO-LOZANO, A. G.; RIOS-SOLIS, Y. A. A crop planning and real-time irrigation method based on site-specific management zones and linear programming. **Computers and Electronics in Agriculture**, v. 107, p. 20–28, 2014.

CIRANI, C. B. S.; MORAES, M. A. F. D. de. Inovação na indústria sucroalcooleira paulista: Os determinantes da adoção das tecnologias de agricultura de precisão. **Revista de Economia e Sociologia Rural**, v. 48, n. 4, p. 543–565, 2010.

CISTERNAS, I. et al. Systematic literature review of implementations of precision agriculture. **Computers and Electronics in Agriculture**, v. 176, n. July, p. 105626, 2020.

CIURANA, J. et al. A model for integrating process planning and production planning and control in machining processes. **Robotics and Computer-Integrated Manufacturing**, v. 24, n. 4, p. 532–544, 2008.

COMITÊ DA BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO SÃO FRANCISCO. **Bacia Rio São Francisco - Lista de usuários cobrados em 2020**. 2020. Disponível em: <https://cdn.agenciapeixevivo.org.br>. Acesso em: 30 nov. 2021.

CONNER, M. Extending not retiring the theory of planned behaviour: a commentary on Sniehotta, Presseau and Araújo-Soares. **Health Psychology Review**, v. 40, n. 9, p. 39–48, 2014.

CORALLO, A.; LATINO, M. E.; MENEGOLI, M. **Agriculture 4.0: How Use Traceability Data to Tell Food Product to the Consumers**. *In***:** 2020 9th International Conference on Industrial Technology and Management (ICITM). 2020, Oxford, United Kingdom. **Anais**... Oxford: IEEE, 2020. p. 197-201.

CÓRCOLES, J. et al. **Evaluation of irrigation systems by using benchmarking techniques**. *In*: XVIIth World Congress of the International Commission of Agricultural and Biosystems Engineering (CIGR). 2010, Québec City, Canada. **Anais**… Québec City: Canadian Society for Bioengineering, 2010. p. 1-12.

COTTER, M.; ASCH, F. Editorial: Smallholder targeted Agriculture 4.0 in temperature limited cropping systems. **Journal of Agronomy and Crop Science**, v. 206, n. 4, p. 421–422, 2020.

CRESWELL, J. W.; CRESWELL, J. D. **Research design: Qualitative, quantitative, and mixed methods approaches**. Fourth ed. Thousand Oaks, California, USA: Sage publications, 2014.

CULOT, G. et al. Behind the definition of Industry 4.0: Analysis and open questions. **International Journal of Production Economics**, v. 226, n. August 2018, p. 107617, 2020.

DABERKOW, S. G.; BRIDE, W. D. M. C. Farm and Operator Characteristics Affecting the Awareness and Adoption of Precision Agriculture Technologies in the US. **Precision Agriculture**, v. 4, p. 163–177, 2003.

DABERKOW, S. G.; MCBRIDE, W. D. **Adoption of Precision Agriculture Technologies by U.S. Corn Producers**. *In*: Fourth International Conference on Precision Agriculture. 1999, St. Paul, Minnesota, USA. **Anais**... St. Paul: American Society of Agronomy, Crop Science Society of America, Soil Science Society of America, 1999. p. 1821-1831.

D'ANTONI, J. M.; MISHRA, A. K.; JOO, H. Farmers' perception of precision technology: The case of autosteer adoption by cotton farmers. **Computers and Electronics in Agriculture**, v. 87, p. 121–128, 2012.

DAVIS, F. D. Perceived Usefulness, Perceived Ease of Use, and User Acceptance of Information Technology. **MIS Quarterly**, v. 13, n. 3, p. 319–340, 1989.

DAVIS, J. P.; EISENHARDT, K. M.; BINGHAM, C. B. Developing theory through simulation methods. **Academy of Management Review**, v. 32, n. 2, p. 480–499, 2007.

DHUNGEL, R. et al. Comparison of latent heat flux using aerodynamic methods and using the Penman–Monteith method with satellite-based surface energy balance. **Remote Sensing**, v. 6, n. 9, p. 8844–8877, 2014.

DIAMOND, A. **Building a System Dynamics Model Part II: Formulation. The Fruit Fly System**. 2001. Disponível em: <https://ocw.mit.edu/courses/sloan-school-of-management/>. Acesso em: 2 jan. 2021.

DOMÍNGUEZ, A. et al. Center pivot irrigation capacity effects on maize yield and profitability in the Texas High Plains. **Agricultural Water Management**, v. 261, 1 mar. 2022.

DORA, M. et al. **Lean manufacturing to lean agriculture: It's about time**. *In*: 2015 Industrial and Systems Engineering Research Conference. 2015, Nashville, Tennessee, USA. **Anais**... Nashville: Institute of Industrial and Systems Engineers (IISE), 2015. p. 633-642.

DRUSCH, M. et al. Sentinel-2: ESA's optical high-resolution mission for GMES operational services. **Remote sensing of Environment**, v. 120, p. 25–36, 2012.

EARL, R.; THOMAS, G.; BLACKMORE, B. S. The potential role of GIS in autonomous field operations. **Computers and Electronics in Agriculture**, v. 25, p. 107–120, 2000.

EDWARDS, G. et al. Optimised schedules for sequential agricultural operations using a Tabu Search method. **Computers and Electronics in Agriculture**, v. 117, p. 102–113, 2015.

EDWARDS-JONES, G. Modelling farmer decision-making: Concepts, progress and challenges. **Animal Science**, v. 82, n. 6, p. 783–790, 2006.

EISENHARDT, K. M. Building Theories from Case Study Research. **Academy of Management Review**, v. 14, n. 4, p. 532–550, 1989.

EISENHARDT, K. M.; GRAEBNER, M. E. Theory Building from Cases: Opportunities and Challenges. **Organizational Research Methods**, v. 50, n. 1, p. 25–32, 2007.

ESCOLA SUPERIOR DE AGRICULTURA "LUIZ DE QUEIROZ." **Grade curricular de Ciências Econômicas**. 2021a. Disponível em: <https://uspdigital.usp.br>. Acesso em: 23 dez. 2021.

ESCOLA SUPERIOR DE AGRICULTURA "LUIZ DE QUEIROZ." **Grade curricular de Engenharia Agronômica**. 2021b. Disponível em: <https://uspdigital.usp.br>. Acesso em: 23 dez. 2021.

EVANS, R. G. **Center pivot irrigation**. 2001. Disponível em: <https://www.ars.usda.gov/>. Acesso em: 22 dez. 2021.

EVANS, R. G. et al. Adoption of site-specific variable rate sprinkler irrigation systems. **Irrigation Science**, v. 31, n. 4, p. 871–887, 2013.

EVANS, R. G.; KING, B. A. **Site-specific sprinkler irrigation in a water limited future**. *In*: 5th National Decennial Irrigation Conference Proceedings. 2010, Phoenix, Arizona USA. **Anais**... Phoenix: American Society of Agricultural and Biological Engineers, 2010. p. 493-504.

EVETT, S. R. et al. Past, present, and future of irrigation on the U.S. great plains. **Transactions of the ASABE**, v. 63, n. 3, p. 703–729, 2020.

FABREGAS, R.; KREMER, M.; SCHILBACH, F. Realizing the potential of digital development: The case of agricultural advice. **Science**, v. 366, n. 6471, 2019.

FAROOQ, M. S. et al. Role of iot technology in agriculture: A systematic literature review. **Electronics**, v. 9, n. 2, p. 319, 2020.

FEDER, G.; UMALI, D. L. The adoption of agricultural innovations: a review. **Technological forecasting and social change**, v. 43, n. 3–4, p. 215–239, 1993.

FERREIRA, J. O.; BATALHA, M. O.; DOMINGOS, J. C. Integrated planning model for citrus agribusiness system using systems dynamics. **Computers and Electronics in Agriculture**, v. 126, p. 1–11, 1 ago. 2016.

FILIPPINI, R. Operations management research: some reflections on evolution, models and empirical studies in OM. **International Journal of Operations & Production Management**, v. 17, n. 7, p. 655–670, 1997.

FINGER, R.; SWINTON, S. M.; BENNI, N. EL. Precision Farming at the Nexus of Agricultural Production and the Environment. **Annual Review of Resource Economics**, v. 11, n. 1, p. 313–335, 2019.

FISHBEIN, M.; AJZEN, I. **Predicting and changing behavior: The reasoned action approach**. First ed. New York: Taylor & Francis Group, 2010.

FISHER, D. K. et al. Understanding technology adoption through system dynamics modeling: Implications for agribusiness management. **International Food and Agribusiness Management Review**, v. 3, n. 3, p. 281–296, 2000.

FLICK, U. **An introduction to qualitative research**. Fourth ed. London, UK: SAGE Publications Limited, 2009.

FLYNN, B. B. et al. Empirical research methods in operations management. **Journal of Operations Management**, v. 9, n. 2, p. 250–284, 1990.

FONTENELLE, T. H. et al. **Levantamento da agricultura irrigada por pivôs centrais no Brasil**. 2. ed. rev. ampl. Brasília, Brasil: Agência Nacional de Águas, Embrapa Milho e Sorgo, 2019.

FORRESTER, J. W. **Industrial Dynamics**. First ed. Cambridge, Massachusetts, USA: The Massachusetts Institute of Technology, 1961.

FOUNTAS, S. et al. Farmer Experience with Precision Agriculture in Denmark and the US Eastern Corn Belt. **Precision Agriculture**, v. 6, p. 121–141, 2005.

FRANCO, D.; SINGH, D. R.; PRAVEEN, K. V. Evaluation of Adoption of Precision Farming and its Profitability in Banana Crop. **Indian Journal of Economics and Development**, v. 14, n. 2, p. 225–234, 2018.

GALIOTO, F.; RAGGI, M.; VIAGGI, D. Assessing the potential economic viability of precision irrigation: A theoretical analysis and pilot empirical evaluation. **Water**, v. 9, n. 12, 2017.

GALLARDO, R. K. et al. Perceptions of precision agriculture technologies in the U.S. fresh apple industry. **HortTechnology**, v. 29, n. 2, p. 151–162, 2019.

GARCÍA-TEJERO, I. F. et al. Assessing the crop-water status in almond (Prunus dulcis mill.) trees via thermal imaging camera connected to smartphone. **Sensors**, v. 18, n. 4, p. 1050, 2018.

GARCÍA-VILA, M.; FERERES, E. Combining the simulation crop model AquaCrop with an economic model for the optimization of irrigation management at farm level. **European Journal of Agronomy**, v. 36, n. 1, p. 21–31, 2012.

GARDEZI, M.; BRONSON, K. Examining the social and biophysical determinants of U.S. Midwestern corn farmers' adoption of precision agriculture. **Precision Agriculture**, v. 21, n. 3, p. 549–568, 2019.

GASPAR, M.; JULIAO, J. **Impacts of Industry 4.0 on Operations Management: Challenges for Operations Strategy**. *In*: 7th International Conference on Industrial Engineering and Applications. 2020, Bangkok, Thailand. **Anais**... Bangkok: IEEE, 2020. p. 82-87.

GASSON, R. Goals and values of farmers. **Journal of Agricultural Economics**, n. 3, p. 521–542, 1973.

GIAGLIS, G. M. A taxonomy of business process modeling and information systems modeling techniques. **International Journal of Flexible Manufacturing Systems**, v. 13, n. 2, p. 209–228, 2001.

GILBERT, N.; TROITZSCH, K. **Simulation for the Social Scientist**. Second ed. Maidenhead, Berkshire, England: McGraw-Hill Education, 2005.

GLEN, J. J. Mathematical Models in Farm Planning: a Survey. **Operations Research**, v. 35, n. 5, p. 641–666, 1987.

GRABOWSKI, P. et al. Assessing adoption potential in a risky environment: The case of perennial pigeonpea. **Agricultural Systems**, v. 171, n. July 2018, p. 89–99, 2019.

GRAVES, S. C. Review of Production Scheduling. **Operations Research**, v. 29, n. 4, p. 646–675, 1981.

GREASLEY, A. **A comparison of system dynamics and discrete event simulation**. *In*: Summer Computer Simulation Conference, SCSC 2009. 2009, Istanbul, Turkey. **Anais**... Istanbul: Society for Modeling & Simulation International, 2009. p. 83-87.

GRIFFIN, T. W. et al. Farm's sequence of adoption of information-intensive precision agricultural technology. **Applied Engineering in Agriculture**, v. 33, n. 4, p. 521–527, 2017.

GRILICHES, Z. Hybrid Corn: An Exploration in the Economics of Technological Change. **Econometrica**, v. 25, n. 4, p. 501–522, 1957.

GROHER, T. et al. Status quo of adoption of precision agriculture enabling technologies in Swiss plant production. **Precision Agriculture**, n. 0123456789, 2020.

GUEST, G.; BUNCE, A.; JOHNSON, L. How Many Interviews Are Enough?: An Experiment with Data Saturation and Variability. **Field Methods**, v. 18, n. 1, p. 59–82, 2006.

GUILLÉN-NAVARRO, M. Á.; PEREÑÍGUEZ-GARCÍA, F.; MARTÍNEZ-ESPAÑA, R. **IoT-based system to forecast crop frost**. *In*: 13th International Conference on Intelligent Environments. 2017. Seoul, Korea. **Anais**... Seoul: IEEE, 2017. p. 28-35.

GUNAL, M. M. Simulation and the Fourth Industrial Revolution. In: GUNAL, M. M. **Simulation for Industry 4.0**. First ed. Cham, Switzerland: Springer Nature, 2019. p. 1–17.

GUO, P.; DUSADEERUNGSIKUL, P.; NOF, S. Y. Agricultural cyber physical system collaboration for greenhouse stress management. **Computers and Electronics in Agriculture**, v. 150, n. June 2017, p. 439–454, 2018.

HAIR, J. F.; PAGE, M.; BRUNSVELD, N. **Essentials of Business Research Methods**. Third ed. New York, NY, USA: Taylor & Francis, 2016.

HARRISON, J. R.; CARROLL, G. R.; CARLEY, K. M. Simulation modeling in organizational and management research. **Academy of Management Review**, v. 32, n. 4, p. 1229–1245, 2007.

HART, C. **Doing a literature review**. London, United Kingdom: SAGE Publications, 1998.

HASSAN ZADEH, A.; AFSHARI, H.; RAMAZANI KHORSHID-DOUST, R. Integration of process planning and production planning and control in cellular manufacturing. **Production Planning and Control**, v. 25, n. 10, p. 840–857, 2014.

HERMANN, M.; PENTEK, T.; OTTO, B. **Design Principles for Industrie 4.0 Scenarios: A Literature Review**. Dortmund, Germany: Design Principles for Industrie 4.0 Scenarios: A Literature Review. 2015. p. 1-16.

HILL, R. W.; ALLEN, R. G. Simple irrigation scheduling calendars. **Journal of Irrigation and Drainage Engineering - ASCE**, v. 122, n. 2, p. 107–111, 1996.

HOME, R. et al. Motivations for implementation of ecological compensation areas on Swiss lowland farms. **Journal of Rural Studies journal**, v. 34, p. 26–36, 2014.

HORNBAKER, R. H.; ESTES, C. B. Interfacing simulation models for predicting profitability of irrigated gain sorghum. **Computers & Industrial Engineering**, v. 10, n. 4, p. 315–323, 1986.

HOWELL, T. A. Irrigation scheduling research and its impact on water use. **American Society of Agricultural Engineers**, v. Proceeding, n. Nov. 3-6, p. 21–33, 1996.

HOWELL, T. A. Enhancing Water Use Efficiency in Irrigated Agriculture. **Agronomy journal**, v. 93, n. 2, p. 281–289, 2001.

HU, Q. et al. Understanding farmer's forecast use from their beliefs, values, social norms, and perceived obstacles. **Journal of Applied Meteorology and Climatology**, v. 45, n. 9, p. 1190–1201, 2006.

HUDSON, D.; HITE, D. Producer willingness to pay for precision application technology: Implications for government and the technology industry. **Canadian Journal of Agricultural Economics**, v. 51, n. 1, p. 39–53, 2003.

HUH, W. T.; LALL, U. Optimal crop choice, irrigation allocation, and the impact of contract farming. **Production and Operations Management**, v. 22, n. 5, p. 1126–1143, 2013.

HUNSAKER, D. J. et al. Estimating cotton evapotranspiration crop coefficients with a multispectral vegetation index. **Irrigation science**, v. 22, n. 2, p. 95–104, 2003.

HÜTTEL, S.; LEUCHTEN, M. T.; LEYER, M. The Importance of Social Norm on Adopting Sustainable Digital Fertilisation Methods. **Organization and Environment**, 2020.

IGLESIAS, N. C.; BULACIO, P.; TAPIA, E. **Internet of agricultural machinery: Integration of heterogeneous networks**. *In*: International Conference on Industrial Technology. 2020, Buenos Aires, Argentina**. Anais**... Buenos Aires: IEEE, 2020. p. 785-790.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA - IBGE. **Censo Agropecuário 2017**. 2017. ed. Rio de Janeiro, RJ, Brasil: Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística, 2017.

INTERNATIONAL SOCIETY FOR PRECISION AGRICULTURE - ISPA. **Precision Ag Definition**. 2019. Disponível em: <https://www.ispag.org/about/definition>. Acesso em: 7 maio. 2020.

ISGIN, T. et al. Using count data models to determine the factors affecting farmers' quantity decisions of precision farming technology adoption. **Computers and Electronics in Agriculture**, v. 62, n. 2, p. 231–242, 2008.

JABRO, J. D. et al. Irrigation scheduling based on wireless sensors output and soil-water characteristic curve in two soils. **Sensors**, v. 20, n. 5, p. 1336, 2020.

JACKSON, T. M.; KHAN, S.; AHMAD, A. **Exploring Energy Productivity for a Groundwater Dependent Irrigated Farm Using a System Dynamics Approach**. *In*: International Congress on Modelling And Simulation. 2007, Christchurch, New Zealand. **Anais**... Christchurch: Modelling and Simulation Society of Australia and New Zealand, 2007. p. 156-162.

JEON, S. M.; KIM, G. A survey of simulation modeling techniques in production planning and control (PPC). **Production Planning and Control**, v. 27, n. 5, p. 360–377, 2016.

JOCHINKE, D. C. et al. The adoption of precision agriculture in an Australian broadacre cropping system-Challenges and opportunities. **Field Crops Research**, v. 104, n. 1–3, p. 68–76, 2007.

JOHNSON, R. B. et al. Toward a Definition of Mixed Methods Research. **Educational Researcher**, v. 33, n. 7, p. 14–26, 2007.

JONES, H. G. Irrigation scheduling: Advantages and pitfalls of plant-based methods. **Journal of Experimental Botany**, v. 55, n. 407, p. 2427–2436, 2004.

JØRGENSEN, M. H. Agricultural field production in an 'industry 4.0' concept. **Agronomy Research**, v. 16, n. 1, p. 94–102, 2018.

JU, C.; SON, H. IL. Modeling and Control of Heterogeneous Agricultural Field Robots Based on Ramadge-Wonham Theory. **IEEE Robotics and Automation Letters**, v. 5, n. 1, p. 48–55, 2020.

JUMMAN, A. **Using System Dynamics to explore the poor uptake of irrigation scheduling technologies in a commercial sugarcane community in South Africa**. 2016. 165 f. Tese de Doutorado (Christchurch, New Zealand) - Christchurch, New Zealand, Pietermaritzburg, South Africa, 2016. Disponível em: <https://researchspace.ukzn.ac.za/ >. Acesso em: 5 out. 2019.

KAGERMANN, H.; WAHLSTER, W.; HELBIG, J. **Recommendations for implementing the strategic initiative INDUSTRIE 4.0**. 2013. Frankfurt, Germany: ACATECH - National Academy of Science and Engineering. Disponível em: <https://en.acatech.de/>. Acesso em: 22 set. 2020.

KAMIENSKI, C. et al. Smart water management platform: IoT-based precision irrigation for agriculture. **Sensors**, v. 19, n. 2, p. 276, 2019.

KATAMREDDY, S. et al. **Closed loop process control for precision farming: An Agriculture 4.0 perspective**. *In*: 30th Irish Signals and Systems Conference. 2019, Maynooth, Ireland **Anais**... Maynooth: IEEE, 2019. p. 1-6.

KENDALL, H. et al. Precision Agriculture in China: Exploring Awareness, Understanding, Attitudes and Perceptions of Agricultural Experts and End-Users in China. **Advances in Animal Biosciences**, v. 8, n. 2, p. 703–707, 2017.

KESKIN, M.; SAY, S. M.; GÖRÜCÜ KESKIN, S. Evaluation of a low-cost GPS receiver for precision agriculture use in adana province of Turkey. **Turkish Journal of Agriculture and Forestry**, v. 33, n. 1, p. 79–88, 2009.

KESKIN, M.; SEKERLI, Y. E. Awareness and adoption of precision agriculture in the Cukurova region of Turkey. **Agronomy Research**, v. 14, n. 4, p. 1307–1320, 2016.

KESWANI, B. et al. Improving weather dependent zone specific irrigation control scheme in IoT and big data enabled self driven precision agriculture mechanism. **Enterprise Information Systems**, p. 1–22, 2020.

KHAN, S.; YUFENG, L.; AHMAD, A. Analysing complex behaviour of hydrological systems through a system dynamics approach. **Environmental Modelling and Software**, v. 24, n. 12, p. 1363–1372, 2009.

KHANAL, A. R. et al. Modeling post adoption decision in precision agriculture: A Bayesian approach. **Computers and Electronics in Agriculture**, v. 162, n. March, p. 466–474, 2019.

KIM, C. H. et al. The complementary use of IDEF and UML modelling approaches. **Computers in Industry**, v. 50, n. 1, p. 35–56, 2003.

KIM, Y.; EVANS, R. G.; IVERSEN, W. M. Remote sensing and control of an irrigation system using a distributed wireless sensor network. **IEEE transactions on instrumentation and measurement**, v. 57, n. 7, p. 1379–1387, 2008.

KINGS, D.; ILBERY, B. The environmental belief systems of organic and conventional farmers: Evidence from central-southern England. **Journal of Rural Studies**, v. 26, n. 4, p. 437–448, 2010.

KLERKX, L.; JAKKU, E.; LABARTHE, P. A review of social science on digital agriculture, smart farming and agriculture 4.0: New contributions and a future research agenda. **NJAS - Wageningen Journal of Life Sciences**, v. 90, p. 100315, 2019.

KLERKX, L.; ROSE, D. Dealing with the game-changing technologies of Agriculture 4.0: How do we manage diversity and responsibility in food system transition pathways? **Global Food Security**, v. 24, p. 100347, 2020.

KNOLL, F. J.; CZYMMEK, V. The German Vision of Industry 4.0 Applied in Organic Farming. **Automation in Agriculture - Securing Food Supplies for Future Generations**, 2018.

KOECH, R.; LANGAT, P. Improving irrigation water use efficiency: A review of advances, challenges and opportunities in the Australian context. **Water**, v. 10, n. 12, p. 1771, 2018.

KONG, Q. et al. Development of a responsive optimisation framework for decision-making in precision agriculture. **Computers and Chemical Engineering**, v. 131, 2019.

KOUTSOS, T.; MENEXES, G. Economic, agronomic, and environmental benefits from the adoption of precision agriculture technologies: A systematic review. **International Journal of Agricultural and Environmental Information Systems**, v. 10, n. 1, p. 40–56, 2019.

KUSIAK, A.; NICK LARSON, T.; WANG, J. (RAY). Reengineering of design and manufacturing processes. **Computers and Industrial Engineering**, v. 26, n. 3, p. 521–536, 1994.

KUŠOVÁ, D.; TĚŠITEL, J.; BOUKALOVÁ, Z. Willingness to adopt technologies of precision agriculture: A case study of the Czech Republic. **WIT Transactions on Ecology and the Environment**, v. 220, p. 109–117, 2017.

KUTTER, T. et al. The role of communication and co-operation in the adoption of precision farming. **Precision Agriculture**, v. 12, n. 1, p. 2–17, 2011.

LAMB, D. W.; FRAZIER, P.; ADAMS, P. Improving pathways to adoption: Putting the right P' s in precision agriculture. **Computers and Electronics in Agriculture**, v. 61, p. 4–9, 2008.

LAMBERT, D. M.; PAUDEL, K. P.; LARSON, J. A. Bundled adoption of precision agriculture technologies by cotton producers. **Journal of Agricultural and Resource Economics**, v. 40, n. 2, p. 325–345, 2015.

LANE, D. C. The emergence and use of diagramming in system dynamics: A critical account. **Systems Research and Behavioral Science**, v. 25, n. 1, p. 3–23, 2008.

LANKFORD, W. M.; PARSA, F. Outsourcing: a primer. **Management Decision**, v. 37, n. 4, p. 310–316, 1999.

LANZA CASTILLO, G. M.; ENGLER, A.; WOLLNI, M. Planned behavior and social capital: Understanding farmers' behavior toward pressurized irrigation technologies. **Agricultural Water Management**, v. 243, p. 106524, 2021.

LARSON, J. A. et al. Factors affecting farmer adoption of remotely sensed imagery for precision management in cotton production. **Precision Agriculture**, v. 9, n. 4, p. 195–208, 2008.

LÄTTILÄ, L.; HILLETOFTH, P.; LIN, B. Hybrid simulation models - When, why, how? **Expert Systems with Applications**, v. 37, n. 12, p. 7969–7975, 2010.

LAU, K. H.; ZHANG, J. Drivers and obstacles of outsourcing practices in China. **International Journal of Physical Distribution and Logistics Management**, v. 36, n. 10, p. 776–792, 2006.

LENCSÉS, E.; TAKÁCS, I.; TAKÁCS-GYÖRGY, K. Farmers' perception of precision farming technology among Hungarian farmers. **Sustainability**, v. 6, n. 12, p. 8452–8465, 2014.

LI, W. et al. A hybrid modelling approach to understanding adoption of precision agriculture technologies in Chinese cropping systems. **Computers and Electronics in Agriculture**, v. 172, p. 105305, 2020.

LIU, Y. et al. From Industry 4.0 to Agriculture 4.0: Current Status, Enabling Technologies, and Research Challenges. **IEEE Transactions on Industrial Informatics**, v. 17, n. 6, p. 4322–4334, 1 jun. 2021.

LIU, Z.; XU, Q. An automatic irrigation control system for soilless culture of lettuce. **Water**, v. 10, n. 11, p. 1692, 2018.

LLEIDA UNIVERSITY. **Precision Agriculture definitions**. 2020. Disponível em: <http://www.grap.udl.cat/en/presentation/pa_definitions.html>. Acesso em: 31 jul. 2020.

LOWE, T. J.; PRECKEL, P. V. Decision technologies for agribusiness problems: A brief review of selected literature and a call for research. **Manufacturing and Service Operations Management**, v. 6, n. 3, p. 201–208, 2004.

LOWENBERG-DEBOER, J.; ERICKSON, B. Setting the record straight on precision agriculture adoption. **Agronomy Journal**, v. 111, n. 4, p. 1552–1569, 2019.

LUNA-REYES, L. F.; ANDERSEN, D. L. Collecting and analyzing qualitative data for system dynamics: Methods and models. **System Dynamics Review**, v. 19, n. 4, p. 271–296, 2003.

LUWES, N. J.; OGOCHUKWU, J. C.; RSKOTSOANE, B. P. Automatic Guided Vehicle that detects Dactylopius Opuntiae in Cactus Pears. **Journal of Physics: Conference Series**, v. 1577, n. 1, p. 012022, 2020.

LYNNE, G. D. et al. Conservation technology adoption decisions and the theory of planned behavior. **Journal of Economic Psychology**, v. 16, n. 4, p. 581–598, 1995.

MACAL, C. M.; NORTH, M. J. **Tutorial on agent-based modeling and simulation part 2: how to model with agents**. *In*: Winter Simulation Conference. 2006, Monterey, California, USA. **Anais**... Monterey: INFORMS, 2006. p. 73-83.

MACAL, C. M.; NORTH, M. J. Tutorial on agent-based modelling and simulation. **Journal of Simulation**, v. 4, n. 3, p. 151–162, 2010.

MACKULAK, G. T. High level planning and control: An IDEF0 analysis for airframe manufacture. **Journal of Manufacturing Systems**, v. 3, n. 2, p. 121–133, 1984.

MACQUEEN, K. M. et al. Team-based codebook development: structure, process, and agreement. **Handbook for team-based qualitative research**, p. 119–135, 2008.

MANCINI, A.; FRONTONI, E.; ZINGARETTI, P. **Satellite and UAV data for Precision Agriculture Applications**. *In*: International Conference on Unmanned Aircraft Systems. 2019, Atlanta, GA, USA. **Anais**... Atlanta: IEEE, 2019a. p. 491-497.

MANCINI, A.; FRONTONI, E.; ZINGARETTI, P. **Challenges of multi/hyper spectral images in precision agriculture applications**. *In*: IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. 2019, Bogor, West Java, Indonesia. **Anais**... Bogor: IOP Publishing Ltd, 2019b. p. 012001.

MANDEL, K. Graphical process description-views and diagrams. **International Journal of Computer Integrated Manufacturing**, v. 3, n. 5, p. 314–327, 1990.

MARRA, M. C. et al. Estimating the demand and willingness-to-pay for cotton yield monitors. **Precision Agriculture**, v. 11, n. 3, p. 215–238, 2010.

MASON, M. Sample size and saturation in PhD studies using qualitative interviews. **Forum Qualitative Sozialforschung**, v. 11, n. 3, 2010.

MATANGA, G. B.; MARIÑO, M. A. Irrigation planning: 1. Cropping pattern. **Water Resources Research**, v. 15, n. 3, p. 672–678, 1979.

MATESE, A. et al. Platforms for Precision Viticulture. **Remote Sensing**, v. 7, p. 2971–2990, 2015.

MATHIESON, K. Predicting User Intentions: Comparing the Technology Acceptance Model with the Theory of Planned Behavior. **Information Systems Researchrmation**, p. 173–192, 1991.

MCBRATNEY, A. B. et al. Future Directions of Precision Agriculture. **Precision Agriculture**, v. 6, p. 7–23, 2005.

MEREDITH, J. Building operations management theory through case and field research. **Journal of Operations Management**, v. 16, n. 4, p. 441–454, 1998.

MEREDITH, J. R.; KAPLAN, B.; RATURI, A. Alternative research paradigms in operations. **Journal of Operations Management**, v. 8, n. 4, p. 297–326, 1989.

MEUSER, M.; NAGEL, U. The expert interview and changes in knowledge production. In: **Interviewing Experts**. First ed. London, UK: Palgrave Macmillan, 2009. p. 17–42.

MICHELS, M.; VON HOBE, C. F.; MUSSHOFF, O. A trans-theoretical model for the adoption of drones by large-scale German farmers. **Journal of Rural Studies**, v. 75, p. 80–88, 2020.

MILES, M. B.; HUBERMAN, A. M. **Qualitative data analysis: an expanded sourcebook**. Second ed. SAGE Publications, 1994.

MILLER, N. J. et al. Farm adoption of embodied knowledge and information intensive precision agriculture technology bundles. **Precision Agriculture**, v. 20, n. 2, p. 348–361, 2019.

MILLS, J. et al. Engaging farmers in environmental management through a better understanding of behaviour Theory of Planned Behaviour. **Agriculture and Human Values**, v. 34, n. 2, p. 283–299, 2017.

MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO. **Diretrizes Curriculares Nacionais para o curso de graduação em Engenharia Agronômica ou Agronomia, Resolução N° 1 de2 de fevereiro de 2006**. 2021. Disponível em: <http://portal.mec.gov.br>. Acesso em: 23 dez. 2021.

MINTERT, J. et al. **The challenges of precision agriculture: is big data the answer?** *In*: Southern Agricultural Economics Association (SAEA) Annual Meeting. 2016, San Antonio, Texas, USA. **Anais**... San Antonio: SAEA - Southern Agricultural Economics Association, 2016. p. 1-8.

MIRANDA, B. S.; YAMAKAMI, A.; RAMPAZZO, P. C. B. **A New Approach for Crop Rotation Problem in Farming 4.0**. *In*: Doctoral Conference on Computing, Electrical and Industrial Systems. 2019, Costa de Caparica, Portugal. **Anais**... Costa de Caparica: Advanced Doctoral Conference on Computing, Electrical and Industrial Systems, 2019. p. 99-111.

MONTELEONE, S. et al. **Exploração da adoção de Agricultura de Precisão no contexto da Agricultura 4.0: proposta de um modelo conceitual**. *In*: XXIII SemeAD Seminários em Administração. 2020, São Paulo, Brasil. **Anais**... São Paulo: SemeAD, 2020a. p. 1-17.

MONTELEONE, S. et al. Exploring the Adoption of Precision Agriculture for Irrigation in the Context of Agriculture 4.0: The Key Role of Internet of Things. **Sensors**, v. 20, n. 24, p. 7091, 11 dez. 2020b.

MONTELEONE, S. et al. **Proposta de um modelo de simulação para análise de políticas de difusão da agricultura irrigada de precisão no contexto da Agricultura 4.0**. *In*: 59º Congresso da Sociedade Brasileira de Economia, Administração e Sociologia Rural - SOBER. 2021, Brasília, Brasil. **Anais**... Brasília: SOBER - Sociedade Brasileira de Economia, Administração e Sociologia Rural, 2021. p. 1-20.

MONTERO, J. et al. Analysis of water application costs with a centre pivot system for irrigation of crops in Spain. **Irrigation Science**, v. 31, n. 3, p. 507–521, 1 maio 2013.

MORECROFT, J. A critical review of diagramming tools for conceptualizing feedback system models. **Dynamica**, v. 8, n. 1, 1982.

MORECROFT, J.; ROBINSON, S. **Explaining Puzzling Dynamics: Comparing the Use of System Dynamics and Discrete- Event Simulation**. *In*: 23rd International Conference of the System Dynamics Society. 2005, Boston, USA. **Anais**... Boston: The System Dynamics Society, 2005. p. 1-32.

MORENO, G.; SUNDING, D. L. Joint estimation of technology adoption and land allocation with implications for the design of conservation policy. **American Journal of Agricultural Economics**, v. 87, p. 1009–1019, 2005.

MORENO, M. A. et al. Optimal design of center pivot systems with water supplied from wells. **Agricultural Water Management**, v. 107, p. 112–121, maio 2012.

MORRIS, C.; POTTER, C. Recruiting the new conservationists: Farmers' adoption of agri-environmental schemes in the U.K. **Journal of Rural Studies**, v. 11, n. 1, p. 51–63, 1995.

MULLA, D. J. Twenty five years of remote sensing in precision agriculture: Key advances and remaining knowledge gaps. **Biosystems Engineering**, v. 114, n. 4, p. 358–371, 2013.

MUÑOZ-GARCÍA, M. A.; HERNÁNDEZ-CALLEJO, L. Photovoltaics and Electrification in Agriculture. **Agronomy**, v. 12, n. 1, p. 44, 26 dez. 2021.

NAPIER, T. L.; ROBINSON, J.; TUCKER, M. Adoption of precision within three Midwest watersheds. **Journal of Soil and Water Conservation**, v. 55, n. 2, p. 135–141, 2000.

NASH, E. et al. Development of a model of data-flows for precision agriculture based on a collaborative research project. **Computers and Electronics in Agriculture**, v. 6, p. 25–37, 2009.

NATIONAL INSTITUTE OF STANDARDS AND TECHNOLOGY - NIST. **Draft Federal Information Processing Standards Publication 183: announcing the standard for Integration Definition for Function Modeling (IDEF0)**. 1993. Disponível em: 9<www.idef.com/wp-content/uploads/2016/02/idef0.pdf>. Acesso em: 15 abr. 2018.

NICOLAI, T.; RESATSCH, F.; MICHELIS, D. **The Web of augmented physical objects**. *In*: 4th Annual International Conference on Mobile Business. 2005, Sydney, Australia. **Anais**... Sydney: IEEE Computer Society, 2005. p. 340-346.

NOI PARLIAMO ITALIANO. **Il bambino e le stelle marine**. 2017. Disponível em: < http://parliamoitaliano.altervista.org/il-bambino-e-le-stelle-marine/>. Acesso em: 4 out. 2017.

NORAN, O. S. **Business Modelling: UML vs. IDEF**. 2000. Disponível em: <http://www.cit.gu.edu.au/~noran>. Acesso em: 19 dez. 2020.

NOURI, A.; SAGHAFIAN, B. Agent-Based Modeling for Evaluation of Crop Pattern and Water Management Policies. **Water Resources Management**, v. 33, n. 11, p. 3707–3720, 2019.

OCA MUNGUIA, O. M. de; LLEWELLYN, R. The Adopters versus the Technology: Which Matters More when Predicting or Explaining Adoption? **Applied Economic Perspectives and Policy**, v. 42, n. 1, p. 80–91, 2020.

OFORI, E.; GRIFFIN, T.; YEAGER, E. Duration analyses of precision agriculture technology adoption: what's influencing farmers' time-to-adoption decisions? **Agricultural Finance Review**, v. 80, n. 5, p. 647–664, 2020.

OJHA, T.; MISRA, S.; RAGHUWANSHI, N. S. Wireless sensor networks for agriculture: The state-of-the-art in practice and future challenges. **Computers and Electronics in Agriculture**, v. 118, p. 66–84, 2015.

OLHAGER, J.; RUDBERG, M.; WIKNER, J. Long-term capacity management: Linking the perspectives from manufacturing strategy and sales and operations planning. **International Journal of Production Economics**, v. 69, p. 215–225, 2001.

OSAKI, M.; BATALHA, M. O. Optimization model of agricultural production system in grain farms under risk, in Sorriso, Brazil. **Agricultural Systems**, v. 127, p. 178–188, 2014.

O'SHAUGHNESSY, S. A. et al. Identifying advantages and disadvantages of variable rate irrigation: An updated review. **Applied Engineering in Agriculture**, v. 35, n. 6, p. 837–852, 2019.

O'SHEA, R. et al. **Understanding farmers: From adoption to attitudes**. *In*: 166th EAAE Seminar Sustainability in the Agri-Food Sector. 2018, Galway, Ireland. **Anais**... Galway: EAAE - European Association of Agricultural Economists, 2018. p. 1-26.

PALLOTTINO, F. et al. Science mapping approach to analyze the research evolution on precision agriculture: world, EU and Italian situation. **Precision Agriculture**, v. 19, n. 6, p. 1011–1026, 2018.

PANNELL, D. J. A. et al. Understanding and promoting adoption of conservation practices by rural landholders. **Australian Journal of Experimental Agriculture**, v. 46, p. 1407–1424, 2006.

PAPPA, I. C.; ILIOPOULOS, C.; MASSOURAS, L. What determines the acceptance and use of electronic traceability systems in agri-food supply chains? **Journal of Rural Studies**, v. 58, p. 123–135, 2018.

PATHAK, H. S.; BROWN, P.; BEST, T. A systematic literature review of the factors affecting the precision agriculture adoption process. **Precision Agriculture**, v. 20, n. 6, p. 1292–1316, 2019.

PATTON, M. Q. **Qualitative Research & Evaluation Methods**. 3. ed. Thousand Oaks, California, USA: Sage Publications, 2002.

PAUDEL, K. P. et al. Modeling multiple reasons for adopting precision technologies: Evidence from U.S. cotton producers. **Computers and Electronics in Agriculture**, v. 175, p. 105625, 2020.

PAULHUS, D. L. Measurement and Control of Response Bias. In: ROBINSON, J. P.; SHAVER, P. R.; WRIGHTSMAN, L. S. **Measures of Personality and Social Psychological Attitudes**. Third ed. New York, NY, USA: Academic Press, Inc., 1991. p. 17–59.

PAUSTIAN, M.; THEUVSEN, L. Adoption of precision agriculture technologies by German crop farmers. **Precision Agriculture**, v. 18, n. 5, p. 701–716, 2017.

PAXTON, K. W. et al. Intensity of precision agriculture technology adoption by cotton producers. **Agricultural and Resource Economics Review**, v. 40, n. 1, p. 133–144, 2011.

PEREIRA, L. S. et al. Crop evapotranspiration estimation with FAO56: Past and future. **Agricultural Water Management**, v. 147, p. 4–20, 2015.

PERERA, T.; LIYANAGE, K. Methodology for rapid identification and collection of input data in the simulation of manufacturing systems. **Simulation Practice and Theory**, v. 7, n. 7, p. 645–656, 2000.

PICCAROZZI, M.; AQUILANI, B.; GATTI, C. Industry 4.0 in management studies: A systematic literature review. **Sustainability**, v. 10, n. 10, p. 1–24, 2018.

PIERPAOLI, E. et al. Drivers of Precision Agriculture Technologies Adoption: A Literature Review. **Procedia Technology**, v. 8, p. 61–69, 2013.

PIGNATTI, E.; CARLI, G.; CANAVARI, M. What really matters? A qualitative analysis on the adoption of innovations in agriculture. **Journal of Agricultural Informatics**, v. 6, n. 4, p. 73–84, 2015.

PINEDO, M. L. **Scheduling: theory, algorithms and systems**. Fifth ed. Berlin, Germany: Springer, 2008.

PINO, G. et al. Determinants of Farmers' Intention to Adopt Water Saving Measures: Evidence from Italy. **Sustainability**, v. 9, n. 1, p. 77, 2017.

PINTO, H. E.; FERREIRA, M. D. P.; TEIXEIRA, S. M. Adoção de tecnologias em agricultura de precisão por produtores de soja em Goiás e Distrito Federal. **Espacios**, v. 38, n. 31, p. 6, 2017.

PIVOTO, D. **Smart Farming: concepts, applications, adoption and diffusion in southern Brazil**. 2018. 216 f. Tese de Doutorado (Programa de Pós-Graduação em Agronegócios do Centro de Estudos e Pesquisa em Agronegócio) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, RS, Brasil, 2018. Disponível em: <https://www.lume.ufrgs.br/handle/10183/178439>. Acesso em: 18 out. 2018.

PLUCHINOTTA, I.; PAGANO, A.; TSOUKIÀS, A. A system dynamics model for supporting decision-makers in irrigation water management. **Journal of Environmental Management**, v. 223, p. 815–824, 2018.

POGORELSKAIA, I.; VÁRALLYAI, L. Agriculture 4.0 and the role of education. **Journal of Agricultural Informatics**, v. 11, n. 1, 17 jul. 2020.

PURWANDOKO, P. B. et al. Design framework of a traceability system for the rice agroindustry supply chain in West Java. **Information**, v. 10, n. 10, p. 218, 2019.

RAHMANDAD, H.; STERMAN, J. D. Reporting guidelines for simulation-based research in social sciences. **System Dynamics Review**, v. 28, n. 4, p. 396–411, 2012.

RAJ, A. et al. Barriers to the adoption of industry 4.0 technologies in the manufacturing sector: An inter-country comparative perspective. **International Journal of Production Economics**, v. 224, p. 107546, 2020.

RECIO, B.; RUBIO, F.; CRIADO, J. A. A decision support system for farm planning using AgriSupport II. **Decision Support Systems**, v. 36, n. 2, p. 189–203, 2003.

REICHARDT, M. et al. Dissemination of precision farming in Germany: and training activities. **Precision Agriculture**, v. 10, n. 6, p. 525–545, 2009.

REICHARDT, M.; JURGENS, C. Adoption and future perspective of precision farming in Germany: results of several surveys among different agricultural target groups. **Precision Agriculture**, v. 10, n. 1, p. 73–94, 2009.

REIMER, A. P.; THOMPSON, A. W.; PROKOPY, L. S. The multi-dimensional nature of environmental attitudes among farmers in Indiana: Implications for conservation adoption. **Agriculture and Human Values**, v. 29, n. 1, p. 29–40, 2012.

REIMER, A. P.; WEINKAUF, D. K.; PROKOPY, L. S. The influence of perceptions of practice characteristics: An examination of agricultural best management practice adoption in two Indiana watersheds. **Journal of Rural Studies**, v. 28, n. 1, p. 118–128, 2012.

RENZI, S.; KLOBAS, J. E. **Using the Theory of Planned Behavior with qualitative research**: Dondena working papers. Working Paper No. 12. 2008. Milan, Italy: Università Bocconi. 2008. p. 1-28.

REZAEI-MOGHADDAM, K.; SALEHI, S. Agricultural specialists' intention toward precision agriculture technologies: Integrating innovation characteristics to technology acceptance model. **African Journal of Agricultural Research**, v. 5, n. 11, p. 1191–1199, 2010.

ROBERT, P. C. Precision agriculture: a challenge for crop nutrition management. **Plant and Soil**, n. Figure 2, p. 143–149, 2002.

ROBERTSON, M. J. et al. Adoption of variable rate fertiliser application in the Australian grains industry: Status, issues and prospects. **Precision Agriculture**, v. 13, n. 2, p. 181–199, 2012.

ROGERS, E. M. **Diffusion of innovations**. Third ed. New York, NY, USA: Macmillan Publishing Co., Inc., 1983.

ROMERO, R. et al. Research on automatic irrigation control: State of the art and recent results. **Agricultural Water Management**, v. 114, p. 59–66, 2012.

ROSE, D. C. et al. Agriculture 4.0: Making it work for people, production, and the planet. **Land Use Policy**, v. 100, p. 104933, 2021.

ROSE, D. C.; CHILVERS, J. Agriculture 4.0: Broadening Responsible Innovation in an Era of Smart Farming. **Frontiers in Sustainable Food Systems**, v. 2, p. 1–7, 2018.

SAIZ-RUBIO, V.; ROVIRA-MÁS, F. From smart farming towards agriculture 5.0: A review on crop data management. **Agronomy**, v. 10, n. 2, 2020.

SANTOS, J. B.; D'ANTONE, S. Reinventing the wheel? A critical view of demand-chain management. **Industrial Marketing Management**, v. 43, n. 6, p. 1012–1025, 2014.

SAVVA, A. P.; FRENKEN, K. **Crop Water Requirements and Irrigation SchedulingEncyclopedia of Water**: Irrigation Manual. Module 4. 2002. Harare, Zimbabwe: Water Resources Development and Management Officers, FAO Sub-Regional Office for East and Southern Africa. 2002. p. 1-132.

SCARPELLI, M.; BATALHA, M. O. **Gestão agroindustrial: uma proposta de agenda de pesquisa**. *In*: Encontro Nacional de Engenharia de Produção. 2001, Salvador, BA, Brasil. **Anais**... Salvador: ABEPRO - Associação Brasileira de Engenharia de Produção, 2001. p. 1-7.

SCHOLL, H. J. **Agent-based and system dynamics modeling: A call for cross study and joint research**. *In*: Proceedings of the Hawaii International Conference on System Sciences. 2001, Maui, HI, USA. **Anais**... Maui: IEEE, 2001. p. 1-8.

SCHWAB, K. **The Fourth Industrial Revolution**. First ed. Geneva, Switzerland: World Economic Forum, 2016.

SEGERKVIST, K. A. et al. Research on environmental, economic, and social sustainability in dairy farming: A systematic mapping of current literature. **Sustainability**, v. 12, n. 12, 1 jul. 2020.

SHARMA, R.; PARHI, S.; SHISHODIA, A. **Industry 4.0 Applications in Agriculture: Cyber-Physical Agricultural Systems (CPASs)**. *In*: Lecture Notes in Mechanical Engineering. 2021, Kerala, India. **Anais**... Kerala: Springer Singapore, 2021. p. 807-813.

SILVA, C. F.; MORAES, M. A. F. de; MOLIN, P. Adoption and use of precision agriculture technologies in the sugarcane industry of São Paulo state, Brazil. **Precision Agriculture**, v. 12, n. 1, p. 67–81, 2011.

SILVEIRA, F. da; LERMEN, F. H.; AMARAL, F. G. An overview of agriculture 4.0 development: Systematic review of descriptions, technologies, barriers, advantages, and disadvantages. **Computers and Electronics in Agriculture**, v. 189, p. 106405, 24 ago. 2021.

SIMÕES, A. R. P. **The dynamic impacts of farm-level technology adoption on production, prices and profitability in Brazil's dairy supply chain**. 2018. 124 f. Tese de Doutorado (Programa de Pós-Graduação em Economia Aplicada) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG, Brasil, 2018. Disponível em: <https://www.locus.ufv.br/bitstream/123456789/24141/1/texto%20completo.pdf>. Acesso em: 30 nov. 2018.

SKEVAS, T.; KALAITZANDONAKES, N. Farmer awareness, perceptions and adoption of unmanned aerial vehicles: Evidence from Missouri. **International Food and Agribusiness Management Review**, v. 23, n. 3, p. 469–485, 2020.

SLACK, N.; CHAMBERS, S.; JOHNSTON, R. **Operations management.** Sixth ed. Harlow, Essex, England: Pearson Education Limited, 2010.

SMART WATER MANAGEMENT PLATFORM. **Proposal: Smart Water Management Platform (SWAMP)**. 2017. Brussels Belgium: European Commission, Community Research and Development Information Service (CORDIS), Horizon 2020 Framework Program, 2017. p. 1-128.

SNIEHOTTA, F. F.; PRESSEAU, J.; ARAÚJO-SOARES, V. Time to retire the theory of planned behaviour. **Health Psychology Review**, v. 8, n. 1, p. 1–7, 2014.

SOARES FILHO, R.; CUNHA, J. P. A. R. da. Agricultura de precisão: Particularidades de sua adoção no sudoeste de goiás - Brasil. **Engenharia Agricola**, v. 35, n. 4, p. 689–698, 2015.

SOK, J. et al. Farmer Behaviour as Reasoned Action: A Critical Review of Research with the Theory of Planned Behaviour. **Journal of Agricultural Economics**, v. 72, n. 2, p. 388–412, 2020.

SPANAKI, K.; KARAFILI, E.; DESPOUDI, S. **Data Sharing in Agriculture 4.0: Applications of AI for Access Control Decisions**. *In*: 26th EurOMA Conference. 2019, Helsinki, Finland. **Anais**... Helsinki: EurOMA - European Operations Management Association, 2019. p. 1-10.

SPONCHIONI, G. et al. **The 4.0 revolution in agriculture: a multi-perspective definition**. ***In*: XXIV Summer School "Francesco Turco" - Industrial Systems Engineering platforms.** 2019, Brescia, Italy. **Anais**... Brescia, Italy: Department of Industrial and Mechanical Engineering - University of Brescia, Department of Management, Information and Production Engineering - University of Bergamo, 2019. p; 143-149.

STACKHOUSE, P. W. et al. **POWER Release 8.0.1 (with GIS Applications) Methodology (Data Parameters, Sources, Validation)**. 2018. Disponível em: <https://power.larc.nasa.gov/>. Acesso em: 11 jul. 2020.

STERMAN, D. J. **Business dynamics: Systems Thinking and Modeling for a Complex World**. First ed. New York, NY, USA: McGraw-Hill Higher Education, The McGraw-Hill Companies, 2000.

STERMAN, J. et al. System dynamics perspectives and modeling opportunities for research in operations management. **Journal of Operations Management**, v. 39–40, p. 1–5, 2015.

STRIJKER, D.; BOSWORTH, G.; BOUTER, G. Research methods in rural studies: Qualitative, quantitative and mixed methods. **Journal of Rural Studies**, v. 78, p. 262–270, 2020.

SUBEDI, A.; CHÁVEZ, J. L. Crop evapotranspiration (ET) estimation models: a review and discussion of the applicability and limitations of ET methods. **Journal of Agricultural Science**, v. 7, n. 6, p. 50, 2015.

SUTHERLAND, L. Environmental grants and regulations in strategic farm business decision-making: A case study of attitudinal behaviour in Scotland. **Land Use Policy**, v. 27, p. 415–423, 2010.

SUTHERLAND, L. "Effectively organic": Environmental gains on conventional farms through the market? **Land Use Policy**, v. 28, n. 1107, p. 815–824, 2011.

SYMEONAKI, E.; ARVANITIS, K.; PIROMALIS, D. A context-aware middleware cloud approach for integrating precision farming facilities into the IoT toward agriculture 4.0. **Applied Sciences**, v. 10, n. 3, p. 813, 2020.

TAKÁCSNÉ GYÖRGY, K. et al. Precision agriculture in Hungary: assessment of perceptions and accounting records of FADN arable farms. **Studies in Agricultural Economics**, v. 120, n. 1, p. 47–54, 2018.

TAMIRAT, T. W.; PEDERSEN, S. M.; LIND, K. M. Farm and operator characteristics affecting adoption of precision agriculture in Denmark and Germany. **Acta Agriculturae Scandinavica Section B: Soil and Plant Science**, v. 68, n. 4, p. 349–357, 2018.

TAYLOR, S.; TODD, P. A. Understanding information technology usage: A test of competing models. **Information Systems Research**, v. 6, n. 2, p. 144–176, 1995.

TEY, Y. S.; BRINDAL, M. Factors influencing the adoption of precision agricultural technologies: A review for policy implications. **Precision Agriculture**, v. 13, n. 6, p. 713–730, 2012.

TEY, Y. S.; BRINDAL, M. A meta-analysis of factors driving the adoption of precision agriculture. **Precision Agriculture**. v. 23, p. 353–372, 2022.

THOMÉ, A. M. T. et al. Sales and operations planning: A research synthesis. **International Journal of Production Economics**, v. 138, n. 1, p. 1–13, jul. 2012.
THOMPSON, N. M. et al. Farmer perceptions of precision agriculture technology benefits. **Journal of Agricultural and Applied Economics**, v. 51, n. 1, p. 142–163, 2019.

TOBA, A. L.; GRIFFEL, L. M.; HARTLEY, D. S. Devs based modeling and simulation of agricultural machinery movement. **Computers and Electronics in Agriculture**, v. 177, p. 105669, 2020.

TORBETT, J. C. et al. Perceived improvements in nitrogen fertilizer efficiency from cotton precision farming. **Computers and Electronics in Agriculture**, v. 64, n. 2, p. 140–148, 2008.

TORRE NETO, A. et al. **Deliverable D5.01 Pilot Specification**: Deliverable SWAMP project. 2018. Disponível em: <http://swamp-project.org/wp-content/uploads/2020/01/SWAMP-D5.01-Pilot-Specification_final.pdf>. Acesso em: 11 dez. 2020.

TOSCANO, A. et al. **Deliverable D3.1 Water Need Estimation**: WP3. Deliverables: WP3 – Estimation & optimization services. 2019. Brussels Belgium: European Commission, Community Research and Development Information Service (CORDIS), Horizon 2020 Framework Program, 2019. p. 1-43.

TRANFIELD, D.; DENYER, D.; SMART, P. Towards a Methodology for Developing Evidence-Informed Management Knowledge by Means of Systematic Review. **British Journal of Management**, v. 14, n. 3, p. 207–222, 2003.

UNIVERSIDADE FEDERAL DE VIÇOSA. **Currículo do Curso em Agronegócio**. 2021a. Disponível em: <https://www.agg.ufv.br/matriz-curricular>. Acesso em: 23 dez. 2021.

UNIVERSIDADE FEDERAL DE VIÇOSA. **Disciplinas de graduação do Departamento de Engenharia Agrícola**. 2021b. Disponível em: <https://dea.ufv.br/ensino/graduacao/>. Acesso em: 23 dez. 2021.

USECHE, P.; BARHAM, B. L.; FOLTZ, J. D. Trait-based adoption models using ex-ante and ex-post approaches. **American Journal of Agricultural Economics**, v. 95, n. 2, p. 332–338, 2013.

USHA, K.; SINGH, B. Potential applications of remote sensing in horticulture-A review. **Scientia Horticulturae**, v. 153, p. 71–83, 2013.

VALÍN, M. I. et al. DEPIVOT: A model for center-pivot design and evaluation. **Computers and Electronics in Agriculture**, v. 87, p. 159–170, set. 2012.

VAN DYKE PARUNAK, H.; SAVIT, R.; RIOLO, R. L. **Agent-Based Modeling vs. Equation-Based Modeling: A Case Study and Users' Guide**. *In*: International Workshop on Multi-Agent Systems and Agent-Based Simulation. 1998, Paris, France. **Anais**... Paris: Springer, 1998. p. 2-17.

VAN ELDEREN, E. Scheduling farm operations. **European Journal of Operational Research**, v. 4, n. 1, p. 19–23, 1980.

VECCHIO, Y. et al. Adoption of precision farming tools: The case of italian farmers. **International Journal of Environmental Research and Public Health**, v. 17, n. 3, 2020a.
VECCHIO, Y. et al. Adoption of precision farming tools: A context-related analysis. **Land Use Policy**, v. 94, p. 104481, 2020b.

VENKATESWARAN, J.; SON, Y. **Distributed and Hybrid Simulations for Manufacturing Systems and Integrated Enterprise**. *In*: IIE Annual Conference. 2004, Houston, Texas, USA. **Anais**... Houston: Institute of Industrial and Systems Engineers, 2004. p. 1-6.

VENKATESWARAN, J.; SON, Y. J. Hybrid system dynamic - Discrete event simulation-based architecture for hierarchical production planning. **International Journal of Production Research**, v. 43, n. 20, p. 4397–4429, 2005.

VERNADAT, F. B. Enterprise modeling and integration (EMI): Current status and research perspectives. **Annual Reviews in Control**, v. 26, p. 15–25, 2002.

VIANA, J. M. **Gestão, Operação e Manutenção de Perímetros Irrigados**: Curso de Gestão, Operação e Manutenção de Perímetros Irrigados. 2016. Fortaleza, CE, Brasil: Ministério do Meio Ambiente, Agência Nacional de Águas, Instituto de Pesquisa e Inovação na Agricultura Irrigada. 2016. p. 1-34.

VOSS, C.; TSIKRIKTSIS, N.; FROHLICH, M. Case research in operations management. **International Journal of Operations and Production Management**, v. 22, n. 2, p. 195–219, 2002.

WALTON, J. C. et al. Grid soil sampling adoption and abandonment in cotton production. **Precision Agriculture**, v. 11, n. 2, p. 135–147, 2010.

WATCHARAANANTAPONG, P. et al. Timing of precision agriculture technology adoption in US cotton production. **Precision Agriculture**, v. 15, n. 4, p. 427–446, 2014.

WEERSINK, A.; FULTON, M. Featured Article Limits to Profit Maximization as a Guide to Behavior Change. **Applied Economic Perspectives and Policy**, v. 42, n. 1, p. 67–79, 2020.

WELTZIEN, C. Digital agriculture - or why agriculture 4.0 still offers only modest returns. **Landtechnik**, v. 71, n. 2, p. 66–68, 2016.

WHITMAN, Larry; HUFF, Brian; PRESLEY, Adrien. **Structured models and dynamic systems analysis: the integration of the IDEF0/IDEF3 modeling methods and discrete**

event simulation. *In*: 29th conference on Winter simulation. 1997, Atlanta, Georgia, USA. **Anais**... Atlanta: IEEE Computer Society, 1997. p. 518-524.

WIJNGAARD, P. J. M. A heuristic for scheduling problems, especially for scheduling farm operations. **European Journal of Operational Research**, v. 37, p. 127–135, 1988.

WILLOCK, J. et al. The Role of Attitudes and Objectives in Farmer Decision Making: Business and Environmentally- Oriented Behaviour in Scotland. **Journal of Agricultural Economics**, v. 50, n. 2, p. 286–303, 1999.

WINBERG, S. **Towards Incorporating Industry 4.0 Practices and Hybridized Jobs within the Agricultural Sector**. *In*: 11th International Conference on Mechanical and Intelligent Manufacturing Technologies, ICMIMT. 2020, Cape Town, South Africa. **Anais**...Cape Town: IEEE, 2020. p. 207–212.

WOLFERT, S.; GOENSE, D.; SØRENSEN, C. A. G. **A future internet collaboration platform for safe and healthy food from farm to fork**. *In*: Annual SRII Global Conference, SRII. 2014, San Jose, CA, USA. **Anais**... San Jose: 2014. p. 266–273.

WRIGHT, R. W. et al. How to Write a Systematic Review. **Clinical Orthopaedics and Related Research**, v. 455, p. 23–29, 2007.

YAHYA, N. Agricultural 4.0: Its implementation toward future sustainability. In: YAHYA, N. **Green Urea**: For Future Sustainability. First ed. Singapore: Springer Nature, 2018. cap. 5, p. 125–145.

YIN, R. K. **Estudo de caso: planejamento e métodos**. Segunda ed. Porto Alegre: Bookman, 2001.

ZAMBON, I. et al. Revolution 4.0: Industry vs. agriculture in a future development for SMEs. **Processes**, v. 7, n. 1, p. 36, 2019.

ZHAI, Z. et al. Decision support systems for agriculture 4.0: Survey and challenges. **Computers and Electronics in Agriculture**, v. 170, p. 105256, 2020.

GLOSSÁRIO

A

Abordagem comportamental: abordagem que se concentra nos motivos, valores e atitudes que determinam os processos de tomada de decisões dos agricultores individuais (BURTON, 2004; OCA MUNGUIA; LLEWELLYN, 2020; MORRIS; POTTER, 1995).

Agricultura familiar: agricultura caracterizada pela gestão da propriedade compartilhada pela família e pela atividade produtiva agropecuária como principal fonte geradora de renda (IBGE, 2017).

Atitude: resposta positiva ou negativa em relação à um objeto-atitude (onde o objeto-atitude pode ser uma pessoa, ideia, conceito ou objeto físico). As atitudes são formadas por aquilo que um indivíduo percebe como verdadeiro sobre o objeto-atitude (WILLOCK et al., 1999).

B

Bacia hidrográfica: região compreendida por um território e por diversos cursos de água, em que a água é utilizada por usos múltiplos, seja para abastecimento urbano, irrigação agrícola, uso industrial, geração de energia elétrica ou usos ambientais para manter a vida dos ecossistemas (AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS, 2011).

C

Capacidade de inovação: capacidade do agricultor de introduzir mudanças ou novas ideias na forma como algo é feito (BERGEVOET, 2005).

Código: bloco de construção da teoria, ou de modelos, e base sobre a qual repousam os argumentos do pesquisador, de acordo com a pergunta de pesquisa. Os códigos adicionam informações ao texto (em vez de reduzi-lo) por meio de um processo de interpretação que simultaneamente divide o texto em pedaços significativos de segmentos. Os códigos ligam as características do texto (por exemplo, palavras, frases, diálogo) às construções do pesquisador (MACQUEEN et al., 2008).

Compatibilidade de uma tecnologia de Agricultura de Precisão: tecnologia que combina bem com os valores, padrões e necessidades percebidas de um agricultor (PATHAK; BROWN; BEST, 2019).

Complexidade de um sistema: complexidade que surge das interações entre os componentes do sistema ao longo do tempo (STERMAN, 2000).

Complexidade de uma tecnologia de AP: facilidade de uso ou opinião dos produtores quanto à facilidade de uso da tecnologia (PATHAK; BROWN; BEST, 2019).

Componente exógeno: componente cujos valor não é afetado diretamente pelo sistema (ALBIN, 1997).

Componente endógeno: componente envolvido nos ciclos causais do sistema (ALBIN, 1997).

Construto: uma variável latente que pode ser definida em termos conceituais, mas não pode ser medida diretamente ou medida sem erro (SOK et al., 2020).

Crença: informação que as pessoas têm sobre um comportamento, suas prováveis consequências, as expectativas normativas de outras pessoas e os prováveis impedimentos ao seu desempenho. Ao medir essas crenças, o pesquisador ganha intuições sobre a base cognitiva subjacente, ou seja, pode explorar por que as pessoas mantêm certas atitudes, normas subjetivas e percepções de controle comportamental (AJZEN, 2006).

D

Disposição: o termo intenção se refere à prontidão para se envolver em um comportamento, um construto que incorpora conceitos como disposição, expectativa comportamental e tentativa (FISHBEIN; AJZEN, 2010).

E

Estabelecimento agropecuário: unidade de produção dedicada, total ou parcialmente, à exploração agropecuária, florestal ou aquícola, independentemente de seu tamanho (IBGE, 2017).

G

Generalização: transferência de resultados da pesquisa para situações e populações que não fazem parte do contexto de pesquisa (FLICK, 2009).

Gestão das operações: atividade de gestão dos recursos que produzem e entregam produtos e serviços, alterando entradas em saídas usando um processo de “entrada-transformação-saída” (SLACK; CHAMBERS; JOHNSTON, 2010).

Gestão das operações (agricultura): a gestão das operações na agricultura lida com o desenho, planejamento, programação e execução de operações humanas e de máquinas (BOCHTIS; SORENSEN; KATERIS, 2018).

M

Modelo: uma simplificação da realidade. Um bom modelo inclui os elementos que têm amplo efeito e omite os elementos secundários que não são relevantes para o nível de abstração fornecido (BOOCH; RUMBAUGH; JACOBSON, 2000).

Modelo mental: na Dinâmica de Sistemas, o termo "modelo mental" inclui as crenças sobre as redes de causas e efeitos que descrevem como um sistema opera, junto com o limite do modelo (quais variáveis são incluídas e quais são excluídas) e o horizonte de tempo relevante - seu enquadramento ou articulação de um problema (STERMAN, 2000).

N

Não linearidade: o efeito raramente é proporcional à causa e o que acontece localmente em um sistema geralmente não se aplica a regiões distantes. A não linearidade muitas vezes surge da física básica dos sistemas. A não linearidade também surge quando vários fatores interagem na tomada de decisões (STERMAN, 2000).

O

Operação (na agricultura): uma operação na agricultura é geralmente vista como o elo entre recursos, materiais processados e materiais produzidos. As operações agrícolas podem, por exemplo, ser semeadura, fertilização, tratamento de plantas, irrigação e colheita (BOCHTIS; SORENSEN; KATERIS, 2018; JØRGENSEN, 2018).

P

Perímetro irrigado: área dividida em vários lotes para a produção agrícola irrigada. Possui uma infraestrutura de irrigação de uso comum que serve para levar a água do rio a todos os lotes. Essa infraestrutura é composta por canais, drenos, estradas, redes elétricas, estações de bombeamento e adutoras. Com a criação e organização de perímetros é possível produzir alimentos com eficiência hídrica em regiões que antes a terra não era tão facilmente cultivável, gerando fonte de renda até mesmo com a exportação de produtos agrícolas (VIANA, 2016).

Política (na Dinâmica de Sistemas): regra que determina como as decisões operacionais do dia a dia são tomadas. Política é uma declaração formal que fornece a relação entre as fontes de informação e os fluxos de decisão resultantes (FORRESTER, 1961).

S

Saturação teórica: ponto em que nenhuma nova informação é observada nos dados (GUEST; BUNCE; JOHNSON, 2006).

Saturação de dados: ponto na coleta e análise de dados quando novas informações produzem pouca ou nenhuma mudança no livro dos códigos (GUEST; BUNCE; JOHNSON, 2006).

Sensoriamento remoto: termo geral que descreve o ato de coletar dados à distância (USHA; SINGH, 2013).

Sistema: grupo de objetos que são unidos em alguma interação e interdependência para a realização de algum propósito (BANKS et al., 2004).

Sistema - estado de um sistema: coleção de variáveis necessárias para descrever o sistema a qualquer momento, em relação aos objetivos do estudo (BANKS et al., 2004).

T

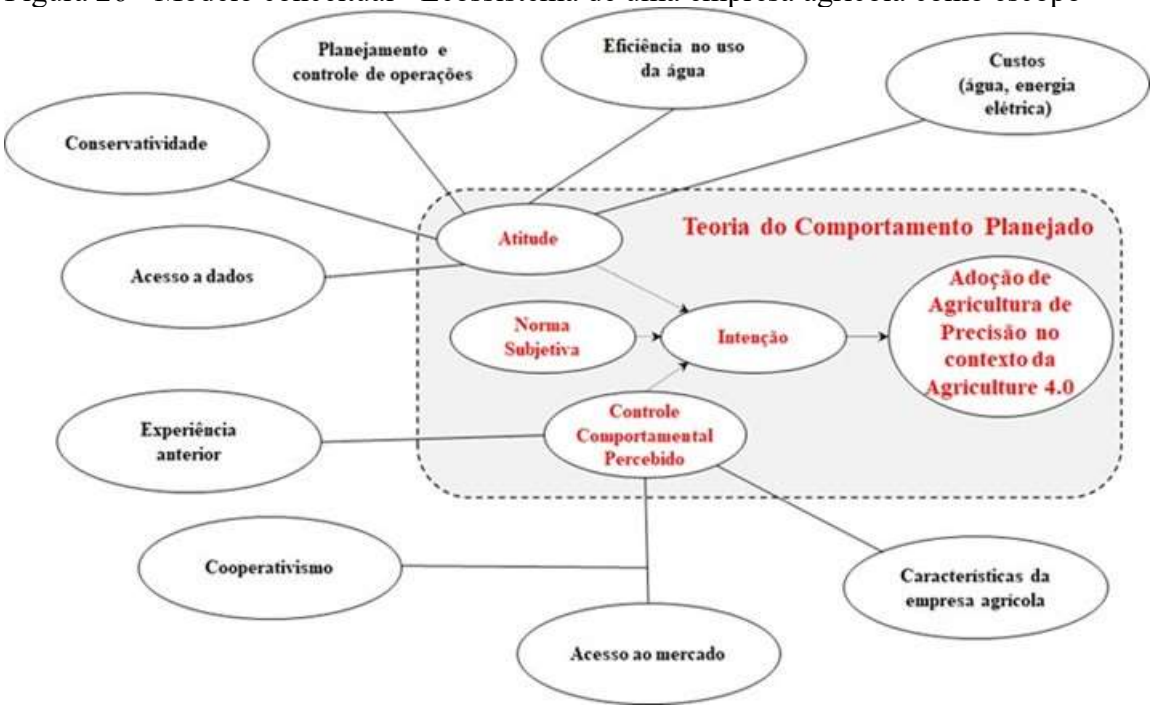
Triangulação de várias fontes de dados (em um estudo de caso): o princípio predominante na coleta de dados é o uso de várias fontes de evidências, ou seja, evidências provenientes de duas ou mais fontes, mas que convergem em relação ao mesmo conjunto de fatos ou descobertas. Isso leva ao conceito de triangulação: fundamento lógico para se utilizar várias fontes de evidências (YIN, 2001).

Triangulação de métodos: a triangulação significa que os pesquisadores têm diferentes perspectivas sobre um assunto em estudo ou ao responder a perguntas de pesquisa. Essas perspectivas podem ser fundamentadas na utilização de diversos métodos e/ ou em diversas abordagens teóricas. A triangulação (de diferentes métodos ou tipos de dados) deve permitir um principal excedente de conhecimento, que vai além do conhecimento possibilitado por uma abordagem (FLICK, 2009).

Triangulação de resultados: múltiplas perspectivas são combinadas para permitir a triangulação dos resultados de cada método e para fornecer uma compreensão mais completa e mais profunda do tópico pesquisado (JOHNSON et al., 2007).

APÊNDICE A - Modelo conceitual - Ecossistema de uma empresa agrícola como escopo

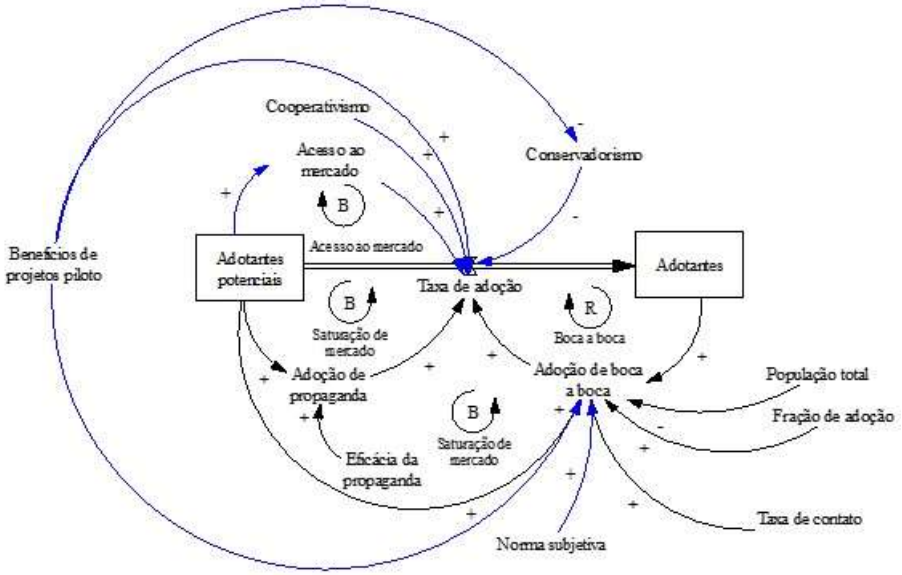
Figura 26 - Modelo conceitual - Ecossistema de uma empresa agrícola como escopo



Fonte: Autor “adaptado de” Monteleone et al., 2020a, p. 7

APÊNDICE B - Modelo de simulação para a análise de políticas de difusão da agricultura de precisão no contexto da agricultura 4.0

Figura 27 - Modelo de simulação para a análise de políticas de difusão da Agricultura de Precisão no contexto da Agricultura 4.0



Fonte: Autor “adaptado de” Monteleone et al., 2021, p. 11

APÊNDICE C - Questionário utilizado nas entrevistas com os especialistas

Prezado(a) Senhor/ Sra., esta guia ilustra o objetivo desta entrevista, o contexto do qual a pesquisa se insere e as perguntas propostas.

O objetivo é realizar uma entrevista sobre a adoção da Agricultura de Precisão no contexto da Agricultura 4.0.

As informações resultantes serão incluídas na pesquisa em andamento neste projeto.

Na organização dos resultados, serão mantidos o anonimato e o sigilo, preservando-se os nomes das pessoas, organizações e empresas consultadas.

A lista a seguir reúne as perguntas sobre o tema estudado, às quais peço a gentileza de responder.

Quadro 18 - Questionário a ser utilizado nas entrevistas com os especialistas

Pergunta de abertura	Qual é o ponto de vista do/ a senhor/ ra sobre a Agricultura 4.0?
Construtos da TPB	**Perguntas**
Atitude	Quais são as vantagens da adoção de AP para a irrigação no contexto da Agricultura 4.0?
	Quais são as desvantagens da adoção de AP para a irrigação no contexto da Agricultura 4.0?
	O que acha das mudanças que um agricultor precisa fazer para adotar a AP para a irrigação no contexto da Agricultura 4.0?
Norma Subjetiva	Existem pressões sociais que podem levar um agricultor a adotar a AP para a irrigação no contexto da Agricultura 4.0?
	Quais atores podem pressionar um agricultor a adotar a AP para a irrigação no contexto da Agricultura 4.0?
Controle Comportamental Percebido	Quais fatores ou circunstâncias facilitariam um agricultor a adotar a AP para a irrigação no contexto da Agricultura 4.0?
	Quais fatores ou circunstâncias dificultariam um agricultor a adotar a AP para a irrigação no contexto da Agricultura 4.0?
	Quais informações acha são necessárias, para um agricultor, para adotar a AP para a irrigação no contexto da Agricultura 4.0?
Perguntas adicionais	O planejamento das operações agrícolas é um processo fácil para um agricultor? Se sim, por qual razão? Se não, quais são as dificuldades?
	Quais informações são necessárias para o planejamento das operações agrícolas?
	O controle das operações agrícolas é um processo fácil para um agricultor? Se sim, por qual razão? Se não, quais são as dificuldades?
	Quais informações são necessárias para o controle das operações agrícolas?

Fonte: Autor

APÊNDICE D - Protocolo e questionário utilizados nos estudos de caso

Prezado(a) Senhor/ Sra., esta guia ilustra o objetivo desta entrevista, o contexto do qual a pesquisa se insere e as perguntas propostas.

O objetivo é realizar uma entrevista sobre o tema adoção de tecnologias da informação inovadoras para a agricultura.

As informações resultantes serão incluídas na pesquisa em andamento neste projeto.

Na organização dos resultados o anonimato e a confidencialidade serão mantidos, preservando o nome das pessoas, organizações e empresas consultadas.

A lista a seguir reúne as perguntas sobre o tema pesquisado, às quais peço a gentileza de responder.

Quadro 19 - Questionário a ser utilizado nas entrevistas com os gerentes das empresas agrícolas

Construtos da TPB	**Perguntas**
Perguntas de abertura	Qual é o tamanho dos campos cultivados na empresa agrícola do/ a Senhor/ a? Qual é a distância entre a casa do agricultor e os campos de cultivo? Qual é a distância entre o galpão das máquinas agrícolas e os campos de cultivo? Como o/ a Senhor/ a acessa a água? Como o/ a Senhor/ a controla o uso da água? Qual sistema de irrigação o/ a Senhor/ a possui na empresa agrícola? Como o/ a Senhor/ a selecionou qual sistema de irrigação usar?
Atitude	O/ a Senhor/ a está considerando alguma mudança no sistema de irrigação? Como o Senhor toma a decisão? O/ a Senhor/ a já ouvi falar de sensores e de uso de drones? O que acha? Pode ser útil? Porque sim, por que não?
Norma Subjetiva	Existem indivíduos ou grupos de pessoas que pensam que o Senhor/ a deve adotar sensores e drones?
Controle Comportamental Percebido	Quais fatores ou circunstâncias facilitariam que o/ a Senhor/ a adotasse sensores e drones? Quais fatores ou circunstâncias dificultariam que o/ a Senhor/ a adotasse sensores e drones? Quais informações o/ a Senhor/ a acredita são necessárias para adotar sensores e drones?
Perguntas adicionais	O planejamento das operações agrícolas é um processo fácil para o/ a Senhor/ a? Se sim, por qual razão? Se não, quais são as dificuldades? Quais informações são necessárias para o planejamento das operações agrícolas? O controle das operações agrícolas é um processo fácil para o/ a Senhor/ a? Se sim, por qual razão? Se não, quais são as dificuldades? Quais informações são necessárias para o controle das operações agrícolas? Como o/ a Senhor/ a decide quando irrigar e quando desligar o sistema de irrigação?

Fonte: Autor

APÊNDICE E - Resultados da revisão sistemática da literatura

E.1 ETAPAS DA REVISÃO SISTEMÁTICA

A revisão da literatura consiste em duas etapas, de acordo com Hair; Page e Brunsveld (2016) e Creswell, J. W. e Creswell, J. D. (2014).

A primeira etapa corresponde a uma revisão sistemática da literatura para identificar temas e tendências em relação à adoção de Agricultura de Precisão. Em 16 de agosto de 2019 a base de dados Scopus foi explorada, utilizando a palavra-chave "*Precision Agriculture*" no título, resumo e palavras-chave. 6.265 documentos foram encontrados. A combinação de palavras-chave "*Precision Agriculture*", "*adoption*" e "*factor*" no título, resumo e palavras-chave levou a identificar 57 documentos. Destes, 19 documentos foram leitos na integra e utilizados. O resultado desse primeiro esforço foi identificar os fatores que afetam a adoção de AP e destacar que os fatores relacionados ao comportamento do agricultor e à gestão das operações eram pouco utilizados na literatura. A primeira etapa evidenciou também que os métodos de pesquisa qualitativa entrevistas com especialistas e estudos de caso e a Teoria do Comportamento Planejado eram pouco aplicados na literatura. No mesmo dia, foi realizada uma pesquisa na base de dados Scopus com a palavra-chave "*Agriculture 4.0*" no título, resumo e palavras-chave, que identificou 15 documentos. Considerada a incipiente literatura sobre a adoção de AP no contexto da Agricultura 4.0, os resultados da revisão da primeira etapa foram utilizados para formular um questionário e realizar as primeiras entrevistas exploratórias com especialistas. As conclusões da primeira etapa são incluídas nos resultados da segunda etapa.

Considerando os resultados promissores dessas entrevistas e o lento avanço do conhecimento sobre a adoção de AP no contexto da Agricultura 4.0, uma segunda etapa foi planejada em agosto de 2020. Em 4 de agosto de 2020 foi realizada a coleta de dados para conduzir uma revisão sistemática da literatura com os seguintes objetivos: mapear a literatura existente (TRANFIELD; DENYER; SMART, 2003); distinguir o que foi feito do que precisava ser feito e identificar na literatura os fatores relevantes para o tópico em estudo (WRIGHT et al., 2007); conseguir uma visão holística sobre os fatores que afetam a adoção em estudo (CRESWELL, J. W.; CRESWELL, J. D., 2014); esclarecer as perguntas de pesquisa e o método de pesquisa do projeto de tese (HAIR; PAGE; BRUNSVELD, 2016; TRANFIELD; DENYER; SMART, 2003); sintetizar e ganhar uma nova perspectiva (com base nos resultados, um perspectiva focada no comportamento do agricultor e na gestão das operações), aprimorar e adquirir o vocabulário do assunto (WRIGHT et al., 2007).

A revisão sistemática da literatura foi realizada com o apoio de bases de dados bem consolidadas: Scopus e Web of Science (escolhidas para a ampla cobertura de disciplinas e

periódicos científicos) e IEEE Xplore (escolhida por ser referência no campo das tecnologias de informação e comunicação). O Google Acadêmico foi utilizado para estender a pesquisa de publicações potencialmente úteis que não foram indexadas nas fontes mencionadas acima (CISTERNAS et al., 2020) e para aplicar a abordagem "bola de neve".

Os seguintes campos de pesquisa foram utilizados: título, resumo e palavras-chave, no caso de Scopus; tópico (pesquisa o título, resumo, as palavras-chave do autor) no caso de Web of Science; metadados (que incluem o resumo, termos de índice e dados de citação bibliográfica como título do documento, autor), no caso de IEEE Xplore.

Os tipos de documentos pesquisados e utilizados foram: artigos publicados em periódicos científicos, artigos publicados em anais de congressos, dissertações e teses. As publicações não acadêmicas (literatura cinzenta) não foram incluídas na revisão, dado que em 2020 os artigos abordando o assunto da Agricultura 4.0 e publicados em revistas cientificas aumentaram de número. Em 14 de setembro de 2020, na base de dados Scopus, 69 documentos que mencionavam o termo "*Agriculture 4.0*" e 12 que mencionavam o termo "*Farming 4.0*", no título, resumo ou palavras-chave, foram encontrados. A pesquisa realizada em 16 de agosto de 2019 resultou em apenas 15 documentos mencionando o termo "*Agriculture 4.0*" em Scopus.

A busca foi restrita a publicações em inglês ou português, portanto, a revisão sistemática pode resultar enviesada (*biased*) a favor de estudos publicados nestes idiomas e pode excluir pesquisas regionais importantes publicadas em outros idiomas (PALLOTTINO et al., 2018). Nenhuma restrição de tempo foi definida para obter uma visão histórica do campo (SANTOS; D'ANTONE, 2014).

E.2 CRITÉRIOS DE INCLUSÃO E EXCLUSÃO

Os termos "*Precision Agriculture*" e "*Precision Farming*" são usados indistintamente por vários autores, como Paudel et al. (2020), Paustian e Theuvsen (2017), Robert (2002). Contudo, o autor decidiu usar ambas as palavras-chave para conduzir uma revisão mais completa e rigorosa. Os fatores que influenciam a adoção de AP dependem do tipo de tecnologia investigada (GROHER et al., 2020). A tecnologia de AP objeto do projeto SWAMP é a Irrigação de Precisão (KAMIENSKI et al., 2019). Contudo, para conseguir uma visão mais completa dos fatores relacionados à adoção, os seguintes termos, referentes às tecnologias de AP, foram incluídas na revisão da literatura: "*remote sensing*", "*variable rate*", "*yield mapping*", "*yield monitoring*", "*soil monitoring*", "*soil sampling*", "*electrical conductivity*", "*auto guidance*", "*Global Positioning System*" (GPS), "*Geographical Information System*"

(GIS), "*Global Navigation Satellite Systems*" (GNSS) (LOWENBERG-DEBOER; ERICKSON, 2019; PATHAK; BROWN; BEST, 2019; TEY; BRINDAL, 2012). Dentro da categoria sensoriamento remoto (*remote sensing*), que inclui também aeronaves e satélites, é presente também a tecnologia UAV, que é a mais recente ferramenta adicionada ao conjunto de tecnologias de AP (MICHELS; VON HOBE; MUSSHOFF, 2020). A adoção de máquinas autônomas é uma área de crescente desenvolvimento ao longo da linha das tecnologias de AP (FINGER; SWINTON; BENNI, 2019). No caso de "*Precision Irrigation*", os documentos que também continham os termos "*variable rate*" ou "*remote sensing*" no texto foram selecionados, como por exemplo o trabalho de Galioto; Raggi e Viaggi (2017), considerando que o termo amplamente usado "*Precision Irrigation*" tem muitas definições que nem sempre incluem considerações específicas do local (EVANS; KING, 2010). O número de documentos identificados nas bases de dados para cada termo de pesquisa usado é ilustrado na Tabela 2.

Tabela 2 - Número de documentos identificados nas bases de dados para cada termo de pesquisa usado

Grupo	**Palavras-chave**	**Scopus**	**Web of Science**	**IEEE Xplore**	**Total**
Agricultura de Precisão	Precision Agriculture	7.621	5.092	1.159	13.872
	Precision Farming	2.045	1.378	243	3.666
	Precision Irrigation	553	369	74	996
Tecnologias de AP	Remote sensing	243.470	118.488	98.048	460.006
	Variable rate	7.133	3.559	1.946	12.638
	Yield mapping	403	277	16	696
	Yield monitoring	419	257	68	744
	Soil monitoring	814	630	126	1.570
	Soil sampling	4.066	2.788	66	6.920
	Electrical conductivity	122.719	108.028	9.084	239.831
	Auto guidance	52	37	4	93
	GPS	69.591	19.713	33.102	122.406
	GIS	422	137	35	594
	GNSS	11.147	5.864	3.651	20.662

Fonte: Autor

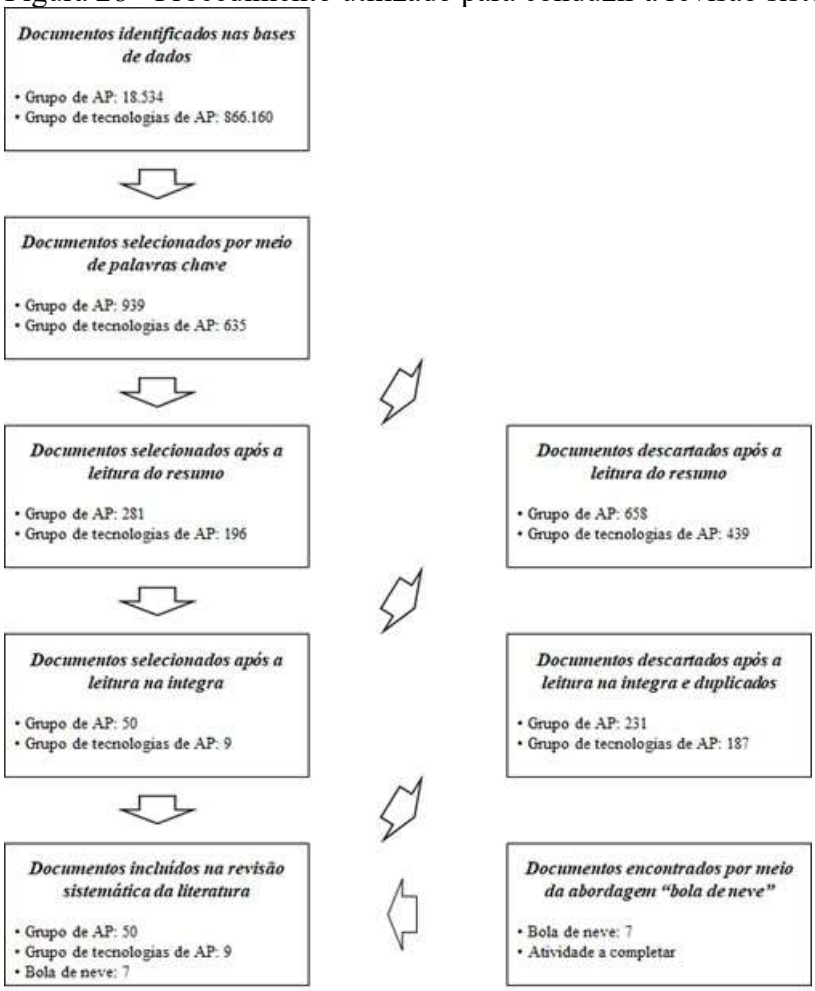
A combinação de palavras-chave no grupo da Agricultura de Precisão produziu 18.534 documentos, enquanto a combinação de palavras-chave no grupo das tecnologias de AP resultou em 866.160 documentos.

Em seguida, as seguintes palavras-chave foram utilizadas nos documentos do grupo da AP: "*Precision Agriculture*" e "*adoption*", "*Precision Farming*" e "*adoption*", "*Precision Irrigation*" e "*adoption*"; e as seguintes palavras-chave foram utilizadas nos documentos do grupo das tecnologias de AP: "*remote sensing*" e "*agriculture*" e "*adoption*"; "*variable rate*" e "*agriculture*" e "*adoption*", "*yield mapping*" e "*agriculture*" e *"adoption*", "*yield monitoring*" e "*agriculture*" e "*adoption*", "*soil monitoring*" e "*agriculture*" e "*adoption*", "*soil sampling*" e "*agriculture*" e "*adoption*", "*electrical conductivity*" e "*agriculture*" e "*adoption*", "*auto guidance*" e "*agriculture*" e "*adoption*", "*Global Positioning System*" e "*agriculture*" e "*adoption*"; "*Geographical Information System*" e "*agriculture*" e "*adoption*", "*Global Navigation Satellite Systems*" e "*agriculture*" e "*adoption*". A combinação dessas palavras-chave no grupo da Agricultura de Precisão produziu 939 documentos, enquanto a combinação de palavras-chave no grupo das tecnologias de AP resultou em 635 documentos.

Nesses documentos selecionados o resumo foi lido, para verificar se os termos "*factor*", "*drivers*" ou "*determinants*" eram utilizados e se o objetivo de pesquisa era relevante para a adoção de AP ou de tecnologias de AP. Os documentos consistentes com estes critérios foram selecionados: 281 documentos no grupo da AP e 196 documentos no grupo das tecnologias de AP. Os documentos que não atenderam aos critérios mencionados acima, além de utilizarem um idioma diferente do inglês ou português, foram descartados. Ainda, de acordo com o tipo de agricultura em escopo ilustrado no Quadro 1, também os documentos contendo os termos "*livestock*", "*dairy agriculture*", "*dairy farming*", "*greenhouse farming*", "*ornamental agriculture*" e "*fish farming*" foram descartados.

Os documentos selecionados foram lidos na integra e na revisão sistemática os documentos consistentes com os seguintes critérios foram incluídos: objetivo de pesquisa focado no estudo dos fatores concernentes a adoção da AP ou das tecnologias de AP, pesquisa empírica ou revisão sistemática da literatura. A fim de fornecer uma visão mais completa do tema (PIERPAOLI et al., 2013), os estudos tanto na abordagem ex-post quanto ex-ante foram incluídos. 50 documentos no grupo da AP e 9 documentos no grupo das tecnologias de AP foram identificados como estreitamente relacionados ao assunto desta revisão. Os documentos que não atenderam aos critérios mencionados acima e os documentos duplicados foram descartados. Na fase de leitura, a abordagem "bola de neve", a partir das referências e citações, foi adotada, possibilitando a busca por mais 7 documentos consistentes com os critérios utilizados na revisão. Portanto, 66 documentos resultaram incluídos na revisão sistemática da literatura, cujo procedimento utilizado é ilustrado na Figura 28.

Figura 28 - Procedimento utilizado para conduzir a revisão sistemática da literatura



Fonte: Autor

E.3 EXTRAÇÃO DOS DADOS

Para cada documento selecionado, onze dados extraídos dos documentos são registrados, incluindo os fatores que afetam a adoção da AP e das tecnologias de AP resultantes da revisão: autores, ano de publicação, fonte, tipo de documento (periódico científico, conferência, capítulo de livro), língua, comunidades acadêmicas, tecnologias de AP, fatores que afetam a adoção de AP (classificados com base nos construtos da Teoria do Comportamento Planejado: Intenção, Atitude, Norma Subjetiva, Controle Comportamental Percebido e fatores antecedentes), método de pesquisa, teoria, abordagem ex-ante/ ex-post.

Em analogia com Pathak, Brown e Best (2019), foram identificados os construtos, crenças e fatores antecedentes da TPB, descritos, mencionados ou capturados como dados de pesquisa apresentados em cada documento selecionado. Os dados foram extraídos manualmente. A identificação dos componentes da TPB no texto dos documentos selecionados

foi subjetiva. Para cada componente as características de definição e os fatores encontrados na revisão sistemática que podem estar relacionados à cada componente são descritos a seguir.

A intenção do indivíduo de realizar um determinado comportamento é o fator central na TPB (AJZEN, 1991), também no caso de estudos dirigidos a agricultores (MATHIESON, 1991). A intenção é uma indicação da prontidão da pessoa para realizar um comportamento, que incorpora conceitos como disposição, expectativa comportamental e tentativa (FISHBEIN; AJZEN, 2010). Os fatores encontrados na revisão sistemática e que podem ser relacionados à intenção são: intenção de adotar AP e tecnologias de AP (ADRIAN; NORWOOD; MASK, 2005; BARNES et al., 2019a; LI et al., 2020); intenção futura de utilizar sensores (BRAMLEY; OUZMAN, 2018); disposição dos agricultores para adotar tecnologias de AP (KUŠOVÁ; TÉŠITEL; BOUKALOVÁ, 2017); intenção de adotar tecnologia à taxa variável para a aplicação de insumos (ANTOLINI; SCARE; DIAS, 2015); disposição para pagar para adaptar os monitores de produtividade aos colhedores de algodão ou para comprar um monitor de produtividade (MARRA et al., 2010); intenção de usar a AP e prontidão para recomendar a tecnologia a outros usuários (REICHARDT et al., 2009); probabilidade percebida de adotar tecnologias AP nos próximos cinco anos (NAPIER; ROBINSON; TUCKER, 2000); disposição para pagar pela tecnologia de AP, sob a premissa de que uma disposição mais alta está diretamente relacionada à uma maior probabilidade de adoção (HUDSON; HITE, 2003).

A atitude em relação ao comportamento se refere ao grau em que uma pessoa tem uma avaliação favorável ou desfavorável do comportamento (AJZEN, 1991). Um indivíduo tem uma atitude positiva para executar um determinado comportamento se acredita que as vantagens (benefícios, resultados positivos esperados) superam as desvantagens (custos, resultados negativos previstos) (FISHBEIN; AJZEN, 2010). A atitude é relacionada as crenças comportamentais do indivíduo (AJZEN, 1991), que representam as informações que o indivíduo tem sobre um comportamento e suas prováveis consequências (AJZEN, 2006). Os fatores encontrados na revisão sistemática e que podem ser relacionados à atitude são: benefícios percebidos (ADRIAN; NORWOOD; MASK, 2005; AUBERT; SCHROEDER; GRIMAUDO, 2012; BERNARDI; INAMASU, 2014; TEY; BRINDAL, 2012); benefícios esperados (BRAMLEY; OUZMAN, 2018; LI et al., 2020); desvantagens (BARNES et al., 2019a, 2019b; VECCHIO et al., 2020b); fatores atitudinais como atitude de confiança (ADRIAN; NORWOOD; MASK, 2005; MICHELS; VON HOBE; MUSSHOFF, 2020); conscientização como pré-condição para a adoção (VECCHIO et al., 2020b); atitude positiva/ incerta em relação aos resultados (BARNES et al., 2019b); percepção da importância das

tecnologias da AP (ANTOLINI; SCARE; DIAS, 2015; D'ANTONI; MISHRA; JOO, 2012); avaliações pessoais e subjetivas sobre os benefícios (BERNARDI; INAMASU, 2014).

A Norma Subjetiva é a pressão social percebida para executar ou não executar o comportamento. A SN é relacionada às crenças normativas do indivíduo (AJZEN, 1991), que representam as informações que o indivíduo tem sobre um comportamento e as expectativas de outras pessoas (AJZEN, 2006). Os fatores encontrados na revisão sistemática e que podem ser relacionados à SN são: variáveis que medem a influência de atores externos, como por exemplo consultores e outros agricultores (BARNES et al., 2019a); influência social, que reflete a influência de fatores externos nas atitudes e na intenção comportamental (LI et al., 2020); voluntariedade percebida, que captura o grau em que a adoção da tecnologia de AP é vista como uma questão de escolha pessoal, ao invés de pressão externa (AUBERT; SCHROEDER; GRIMAUDO, 2012); pressão de desenvolvimento, que considera se um agricultor enfrenta uma pressão de crescimento urbano ao redor de sua empresa (TEY; BRINDAL, 2012); pressão percebida pelo agricultor, incluindo a reação de concorrentes ou colegas (REICHARDT et al., 2009); opinião de vizinhos e amigos, que pode influenciar a tomada de decisões nas empresas agrícolas, incluindo a adoção de inovações (PATHAK; BROWN; BEST, 2019).

O Controle Comportamental Percebido representa a facilidade ou dificuldade de realizar o comportamento e reflete a experiência passada, bem como impedimentos e obstáculos, recursos e oportunidades disponíveis. O PBC é relacionado ao conjunto apropriado de crenças de controle sobre o comportamento (AJZEN, 1991), que representam as informações que o indivíduo tem sobre um comportamento e os prováveis impedimentos ao seu desempenho (AJZEN, 2006). Os fatores encontrados na revisão sistemática e que podem ser relacionados ao PBC são: recursos e oportunidades, como fontes de informações sobre as tecnologias de AP (por exemplo revendedores, consultores, serviços de extensão, outros agricultores, Internet, mídia de notícias, associação de produtores) (ASARE; SEGARRA, 2018; DABERKOW; MCBRIDE, 1999; WATCHARAANANTAPONG et al., 2014) e disponibilidade de recursos para usar a tecnologia de AP (AUBERT; SCHROEDER; GRIMAUDO, 2012); barreiras e obstáculos, como acesso às infraestruturas necessárias, à software e hardware, aos equipamentos (BAGHERI; BORDBAR, 2014); necessidade de um nível mais alto de habilidades de gestão, relação entre custo da tecnologia de AP e tamanho da empresa agrícola, preços atuais viáveis para empresas maiores (JOCHINKE et al., 2007); exigência de mão de obra altamente qualificada (GALIOTO; RAGGI; VIAGGI, 2017).

Os fatores antecedentes (*backward factors*) podem influenciar as crenças que as pessoas têm (FISHBEIN; AJZEN, 2010). Um fator antecedente influencia o comportamento

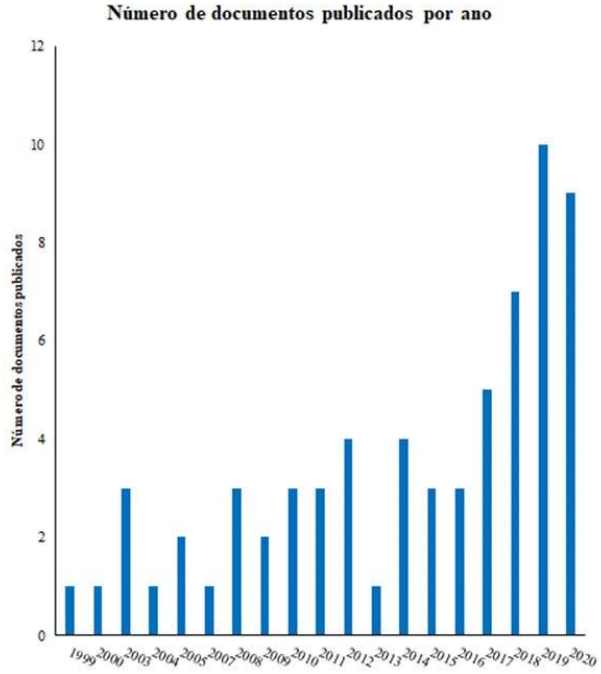
indiretamente, por seus efeitos nas crenças comportamentais, normativas e/ ou de controle, e também pode moderar as relações entre os construtos da teoria (SOK et al., 2020). Exemplos de fatores antecedentes são: idade, gênero, educação e experiência anteriores (FISHBEIN; AJZEN, 2010). Os fatores encontrados na revisão sistemática e que podem ser relacionados aos fatores antecedentes são: características do agricultor, como idade e nível de educação (BARNES et al., 2019b; BUCCI; BENTIVOGLIO; FINCO, 2019; KUTTER et al., 2011; LARSON et al., 2008; PAUSTIAN; THEUVSEN, 2017; PAXTON et al., 2011; TAMIRAT; PEDERSEN; LIND, 2018; WALTON et al., 2010); características da empresa agrícola, como tamanho e renda da empresa (BERNARDI; INAMASU, 2014; HUDSON; HITE, 2003; MARRA et al., 2010; PAUSTIAN; THEUVSEN, 2017; PIERPAOLI et al., 2013; REICHARDT et al., 2009); características das tecnologias de AP, como compatibilidade da tecnologia com práticas e rotinas de trabalho (AUBERT; SCHROEDER; GRIMAUDO, 2012).

E.4 ANÁLISE DOS DADOS

Um total de 66 documentos são analisados nesta revisão sistemática. O número de documentos publicados por ano é ilustrado na Figura 29.

O primeiro documento foi publicado em 1999. A figura mostra um crescimento do número dos documentos publicados por ano: em 2020 (até dia 4 de agosto) 9 documentos foram publicados, enquanto 10 documentos em 2019. Esse resultado evidencia o interesse dos pesquisadores sobre o tema dos fatores determinantes da adoção de AP nas empresas agrícolas, como afirmado por Ofori; Griffin e Yeager (2020).

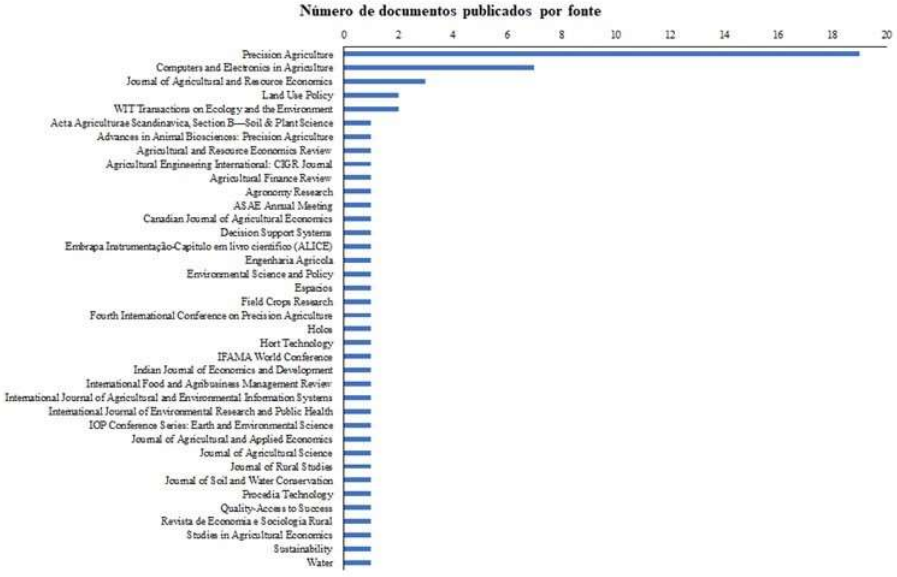
Figura 29 - Número de documentos publicados por ano



Fonte: Autor

Quanta as fontes, dos 66 documentos, 60 foram publicados em periódicos científicos, 5 em conferências e 1 em capítulo de livro. 18 documentos foram publicados no periódico *Precision Agriculture*, 7 no periódico *Computers and Electronics in Agriculture*, enquanto os restantes 35 em 24 periódicos, como ilustrado na Figura 30.

Figura 30 - Número de documentos publicados por fonte



Fonte: Autor

Esta análise evidencia a importância desses dois periódicos em relação ao diálogo de pesquisa sobre os fatores determinantes da adoção de AP nas empresas agrícolas.

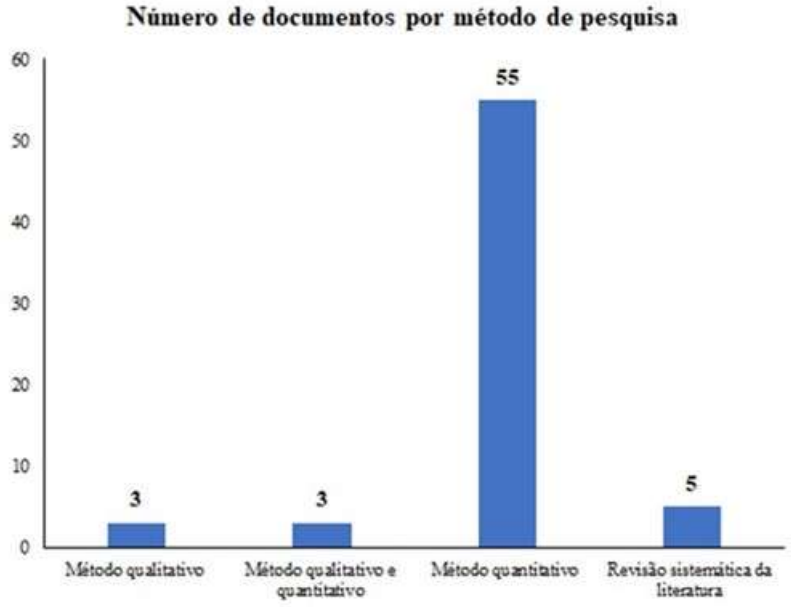
No que refere às comunidades acadêmicas, 49 documentos podem ser classificados na comunidade das Ciências Agrarias (incluindo Agricultura, Desenvolvimento Rural, agência governamentais de pesquisa como Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (EMBRAPA) no Brasil, Organização de Pesquisa Científica e Industrial da Commonwealth (CSIRO - *Commonwealth Scientific and Industrial Research Organisation*) na Australia e Departamento de agricultura dos EUA), dos quais 23 abrangem Economia Agrícola. 7 documentos incluem pesquisadores de Administração, 2 também de Engenharia e 1 Tecnologia da informação na agricultura. Outras comunidades das Ciências Sociais, como Psicologia e Sociologia aparecem em 3 documentos. 12 documentos podem ser considerados multidisciplinares, sendo que alguns autores pertencem tanto às Ciências Agrarias, quanto à Administração, Ciências Sociais, Engenharia e Economia. Esses resultados podem sugerir um escasso interesse da comunidade de Administração para a pesquisa sobre a adoção de AP, mas ao mesmo tempo também uma dificuldade de envolver pesquisadores de outras comunidades, além das Ciências Agrarias, em estudos sobre a adoção de AP. Ainda, as comunidades dos autores de cada documento podem explicar os métodos de pesquisa e as teorias utilizadas pelos pesquisadores.

A respeito das tecnologias de AP, em 51 documentos os autores citam as tecnologias consideradas nos estudos, enquanto 15 documentos não especificam as tecnologias. Contudo, na maioria dos documentos (56 sobre 66) os fatores relacionados às características técnicas das tecnologias não são considerados nas pesquisas. Destes 51 documentos, em 38 as tecnologias são definidas pelos autores como foco da pesquisa. Mesmo assim, em esses 38 trabalhos só 7 consideram fatores tecnológicos, como por exemplo complementaridade entre tecnologias de AP (LAMBERT; PAUDEL; LARSON, 2015) e incompatibilidade de máquinas de diferentes fabricantes (REICHARDT; JURGENS, 2009). Isso pode sugerir que os fatores relacionados aos tipos de tecnologias não são considerados como determinantes da adoção de AP, pela maioria dos autores selecionados. Durante a análise dos documentos são encontradas tecnologias não incluídas nos estudos de Lowenberg-Deboer e Erickson (2019), (Pathak, Brown e Best (2019), Tey e Brindal (2012) utilizados como referência. Portanto a lista das tecnologias de AP **é** atualizada com resultado da revisão sistemática e as seguintes tecnologias são adicionadas: barra de luz (*light bar*) (BATTE; ARNHOLT, 2003; BERNARDI; INAMASU, 2014; BORGHI et al., 2016; ISGIN et al., 2008; KOUTSOS; MENEXES, 2019; OFORI; GRIFFIN; YEAGER, 2020; PINTO; FERREIRA; TEIXEIRA, 2017; SOARES FILHO; CUNHA, 2015); controlador automático de seções (*automated section control*) (OFORI;

GRIFFIN; YEAGER, 2020); robôs agrícolas (*agricultural robots*) (PATHAK; BROWN; BEST, 2019); mapeamento de planta (*plant mapping*) (PAXTON et al., 2011); modelo digital de elevação (*digital elevation model*) (BRAMLEY; OUZMAN, 2018).

Quanto aos métodos de pesquisa, a Figura 31 ilustra o número de documentos por método. Em 55 documentos os autores aplicam métodos de pesquisa quantitativos, enquanto em 3 documentos métodos qualitativos. Um método quantitativo e qualitativo é aplicado em 3 documentos. Em 5 documentos os autores realizam uma revisão sistemática da literatura. Os métodos qualitativos aplicados são entrevistas semiestruturadas e estudos de caso. As entrevistas são utilizadas para identificar os usos das tecnologias de AP na empresa agrícola e seus fatores determinantes da adoção, bem como seus benefícios percebidos pelos agricultores (AYERDI GOTOR et al., 2020), e para analisar a importância das estratégias de comunicação e cooperação dos agricultores na adoção de AP e sua relação com os atributos da empresa agrícola (KUTTER et al., 2011).

Figura 31 - Número de documentos por método de pesquisa



Fonte: Autor

Enquanto o método do estudo de caso é escolhido para coletar informações, sobre a adoção e uso de AP dos adotantes iniciais, que podem ser úteis para futuros adotantes (BATTE; ARNHOLT, 2003). Os trabalhos que adotam métodos misto de pesquisa combinam entrevistas semiestruturadas e estatísticas descritivas, para explorar as barreiras percebidas para a adoção de AP e os possíveis fatores que podem facilitar o futuro uso (KENDALL et al., 2017); levantamento, perguntas abertas, análise econômica de custos e análise das Forças, Fraquezas,

Oportunidades e Ameaças (*Strengths, Weaknesses, Opportunities and Threats analysis* – SWOT), para avaliar as taxas de adoção de AP e documentar os desafios e oportunidades que essas tecnologias apresentam (JOCHINKE et al., 2007); método Delphi, mesa redonda, análise SWOT, experimento de campo e simulação para avaliar a viabilidade econômica da Irrigação de Precisão (GALIOTO; RAGGI; VIAGGI, 2017).

O método de pesquisa quantitativo mais aplicado resulta ser o levantamento (52 documentos de 55). Apenas em 3 documentos os dados são coletados através de bases de dados secundárias. Ainda, o levantamento é utilizado em conjunto com modelos de regressão em 33 documentos. Os autores aplicam diferentes tipos de modelos de regressão, embora o modelo logístico seja o mais utilizado (18 documentos de 33). Em 5 documentos dos 52 que utilizam o método levantamento, o questionário é complementado com algumas perguntas abertas. Outros métodos quantitativos aplicados de análise de dados são: análise estatística descritiva (10 documentos), equações estruturais (2 documentos), análise multivariada (3 documentos), entre outros.

Em relação às teorias, em 47 documentos os autores não especificam qual teoria é aplicada. Contudo em 25 documentos os autores aplicam modelos de regressão. Com referência às teorias para desenvolver modelos usados para analisar as decisões dos agricultores de adotar uma inovação (abordadas na seção 3.4), a TPB é aplicada apenas em 1 trabalho para identificar padrões de adoção de AP, a fim de obter uma compreensão detalhada dos problemas existentes com as tecnologias de AP e descobrir os principais pré-requisitos para melhorar a adoção (REICHARDT et al., 2009). Ainda, a TAM é aplicada em 5 documentos: em conjunto com a TPB por Reichardt et al. (2009); para estudar a complexidade da adoção de AP a fim de desenvolver políticas e iniciativas adequadas para a adoção (AUBERT; SCHROEDER; GRIMAUDO, 2012); para conduzir uma revisão sistemática da literatura (ANTOLINI; SCARE; DIAS, 2015; PIERPAOLI et al., 2013); para demonstrar o impacto da percepção e das características atitudinais dos agricultores na decisão de adoção das tecnologias de AP (ADRIAN; NORWOOD; MASK, 2005).

No que se refere à teoria da utilidade, os autores de 3 trabalhos citam essa teoria: para determinar se as oportunidades percebidas da tecnologia de direção automática aumentam a probabilidade de adotar (D'ANTONI; MISHRA; JOO, 2012); para avaliar as perspectivas dos produtores de quatro tecnologias-chave de AP em termos dos benefícios que elas fornecem para as empresas agrícolas (THOMPSON et al., 2019); para avaliar os fatores que influenciaram os produtores de algodão a adotar o sensoriamento remoto para aplicação de insumos a taxa variável (LARSON et al., 2008). As outras teorias mencionadas são as seguintes: a Difusão da

Inovação (*Diffusion of Innovation* - DOI) aplicada em 2 pesquisa (NAPIER; ROBINSON; TUCKER, 2000; ROBERTSON et al., 2012), a Teoria Unificada de Aceitação e Uso de Tecnologia adaptada (*Unified Theory of Acceptance and Usage of Technology* - UTAUT) (LI et al., 2020), o Modelo de Determinantes de Difusão, Disseminação e Implementação de Inovações (*Model of Determinants of Diffusion, Dissemination, and Implementation of Innovations* - MDDDII) (PATHAK; BROWN; BEST, 2019).

Em relação à abordagem ex-ante ou ex-post, 54 trabalhos utilizam a abordagem ex-post, 7 ex-ante, enquanto 5 ex-post e ex-ante. Quanto às pesquisas conduzidas ex-ante, as seguintes teorias e métodos de pesquisa são utilizados para cada documento: UTAUT e método quantitativo, para explorar a conscientização dos agricultores do norte da China e suas intenções em relação à adoção de tecnologias de AP (LI et al., 2020); teoria não especificada, método qualitativo e quantitativo (método Delphi, mesa redonda, análise SWOT, experimento de campo e simulação) para avaliar a viabilidade econômica potencial da Irrigação de Precisão (GALIOTO; RAGGI; VIAGGI, 2017); teoria não especificada, método quantitativo, para avaliar os fatores eficazes na adoção de AP e descobrir soluções práticas para o seu desenvolvimento (BAGHERI; BORDBAR, 2014); teoria não especificada, método quantitativo, para estimar a demanda e a disposição a pagar para adaptar ou comprar um monitor de produtividade (MARRA et al., 2010); teoria não especificada, método quantitativo, para demonstrar o impacto da percepção e das características atitudinais dos agricultores na decisão de adoção das tecnologias de AP (ADRIAN; NORWOOD; MASK, 2005); teoria não especificada, método quantitativo, para analisar a disposição de pagar pela tecnologia de AP (HUDSON; HITE, 2003); DOI e método quantitativo, para prever a intenção de adotar AP nos próximos cinco anos (NAPIER; ROBINSON; TUCKER, 2000).

APÊNDICE F - Perfis dos especialistas entrevistados

Quadro 20 - Perfis dos especialistas entrevistados

Especialista	**Perfil**
Especialista 1	Engenheiro agrônomo, pesquisador, mais de 20 anos de experiência em gestão do agronegócio.
Especialista 2	Economista, pesquisador, mais de 20 anos de experiência em economia agrícola.
Especialista 3	Engenheiro agrônomo, pesquisador, mais de 20 anos de experiência em economia agrícola.
Especialista 4	Engenheiro, pesquisador, 15 anos de experiência em gestão das operações.
Especialista 5	Administrador, pesquisador, mais de 20 anos de experiência em gestão das operações.
Especialista 6	Administrador, pesquisador, 10 anos de experiência em gestão do agronegócio e gestão das operações.
Especialista 7	Engenheiro agrônomo, pesquisador, 5 anos de experiência em gestão do agronegócio.
Especialista 8	Engenheiro agrônomo, pesquisador, 10 anos de experiência em agricultura de precisão.
Especialista 9	Engenheiro, pesquisador, mais de 20 anos de experiência em agricultura de precisão
Especialista 10	Engenheiro, pesquisador, mais de 20 anos de experiência em gestão das operações.
Especialista 11	Engenheiro agrônomo, pesquisador, mais de 20 anos de experiência em irrigação e gestão de recursos hídricos.
Especialista 12	Economista, pesquisador, mais de 20 anos de experiência em economia agrícola e adoção de inovações.
Especialista 13	Engenheiro agrônomo, pesquisador, de 20 anos de experiência em gestão do agronegócio e adoção de inovações.
Especialista 14	Engenheiro, pesquisador, 10 anos de experiência em gestão das operações e adoção de inovações.
Especialista 15	Engenheiro, pesquisador, 10 anos de experiência em pesquisador especialista em economia agrícola e adoção de inovações.
Especialista 16	Economista, pesquisador, mais de 20 anos de experiência em economia agrícola.
Especialista 17	Engenheiro agrônomo, pesquisador, mais de 20 anos de experiência em irrigação, gestão de recursos hídricos e agricultura de precisão.
Especialista 18	Engenheiro agrônomo, pesquisador, mais de 20 anos de experiência em agricultura de precisão e irrigação.
Especialista 19	Economista, pesquisador, 10 anos de experiência em economia agrícola.
Especialista 20	Engenheiro agrônomo, pesquisador, 10 anos de experiência em irrigação e gestão de recursos hídricos.
Especialista 21	Administrador, pesquisador, 10 anos de experiência em gestão do agronegócio.
Especialista 22	Engenheiro, pesquisador, 10 anos de experiência em gestão do agronegócio.
Especialista 23	Engenheiro agrônomo, pesquisador, 10 anos de experiência em irrigação e gestão de recursos hídricos.
Especialista 24	Engenheiro agrônomo, pesquisador, mais de 20 anos de experiência em agricultura de precisão e irrigação.

Continua...

Conclusão.

Especialista	**Perfil**
Especialista 25	Engenheiro agrônomo, pesquisador, mais de 20 anos de experiência em irrigação e gestão de recursos hídricos.
Especialista 26	Engenheiro agrônomo, pesquisador, mais de 20 anos de experiência em irrigação e gestão de recursos hídricos.
Especialista 27	Engenheiro agrônomo, pesquisador, 10 anos de experiência em agricultura de precisão.
Especialista 28	Engenheiro agrônomo, pesquisador, 20 anos de experiência em irrigação e gestão de recursos hídricos.
Especialista 29	Administrador, pesquisador, 5 anos de experiência em gestão do agronegócio.
Especialista 30	Administrador, pesquisador, 5 anos de experiência em irrigação e gestão de recursos hídricos.
Especialista 31	Administrador, pesquisador, 20 anos de experiência em gestão do agronegócio.
Especialista 32	Engenheiro agrônomo, pesquisador, 10 anos de experiência em agricultura de precisão.
Especialista 33	Administrador, pesquisador, 20 anos de experiência em gestão do agronegócio.
Especialista 34	Engenheiro agrônomo, pesquisador, mais de 20 anos de experiência em irrigação e gestão de recursos hídricos.
Especialista 35	Engenheiro agrônomo, pesquisador, 10 anos de experiência em irrigação e gestão de recursos hídricos.
Especialista 36	Engenheiro agrônomo, pesquisador, mais de 20 anos de experiência em irrigação e gestão de recursos hídricos.

Fonte: Autor

APÊNDICE G - Fatores e categorias que afetam a adoção resultantes das entrevistas com os especialistas

Quadro 21 - Fatores e categorias que afetam a adoção resultantes das entrevistas com os especialistas - Seleção de citações

Construtos da TPB	**Citações dos especialistas => trechos com tópicos semelhantes**	**Fatores**	**Categorias**
Atitude (vantagens, benefícios, resultados positivos esperados)	"A imagem geral da irrigação é que o agricultor consome muita água, isso não é adequado. O agricultor usa a água, os agricultores que irrigam usam a água e a devolvem na maioria das vezes limpa, na forma de transpiração", especialista 26.	Uso de água	Medidas de desempenho quantitativas
	"Em relação às informações necessárias para o planejamento da irrigação, o básico é a disponibilidade de água, a vazão, o balanço hídrico para entender o quanto que o agricultor pode irrigar, o custo para usar a água e o custo para colocar a água onde o agricultor precisa, o custo de demanda energética para colocar a água", especialista 36.	Necessidade de água da cultura, custo de uso de água, custo de uso de energia	Medidas de desempenho quantitativas
	"A adoção de tecnologias mais avançadas na utilização do uso de água pode gerar grandes vantagens como a própria melhor utilização desse recurso", especialista 33.	Uso de água	Medidas de desempenho quantitativas
	"Quanto à outorga para acesso à água, o produtor paga uma tarifa fixa que dá direito ao uso de água, nos perímetros irrigados sociais. Nos perímetros profissionais, além da tarifa fixa, ele paga por cada metro cúbico de água usado. A tarifa fixa serve para manutenção do perímetro porque a agricultura utiliza bombas e sistema pressurizado", especialista 23.	Custo de uso de água	Medidas de desempenho quantitativas
	"A adoção de Agricultura de Precisão no contexto da Agricultura 4.0 permitirá saber exatamente quanta água, onde, de que forma, em que horas, em que local. E com outro fator importante, o custo de energia elétrica. Então isso vira em benefício de uma maior produtividade,". especialista 1.	Uso de água, custo de uso de energia, produtividade	Medidas de desempenho quantitativas
	"A primeira coisa é o uso racional de água e com isso o uso racional de energia que é algo que está encarecendo e que é uma parcela importante do custo de produção e de insumos, também a mão de obra", especialista 25.	Custo de produção	Medidas de desempenho quantitativas
	"Então pensando na Agricultura de Precisão a grande vantagem é o uso otimizado de água, em termos de aplicação da quantidade de água necessária que a cultura precisa. E poder variar isso por consequência ao longo do pivô central, aplicar mais água onde precisa, economizar onde não precisa. Também se espera que isso gere uma produtividade melhor, também evitando o estresse hídrico", especialista 32.	Necessidade de água da cultura, Uso de água a taxa variável, produtividade	Medidas de desempenho quantitativas
	"Uma mudança que tem acontecido é a valorização do uso eficiente de água. Então, hoje em conformidade com as outorgas para o acesso à água, os produtores têm que colocar um medidor de vazão que eles estão usando", especialista 11.	Uso de água, vazão	Medidas de desempenho quantitativas
	"O agricultor pode ter informação do solo também, hoje têm sensores que fazem a medição da umidade do solo por exemplo, com isso ele tem uma espécie de mapa daquela área. Então o agricultor pode fazer um aplicação da água a taxa variável e economizar água", especialista 8.	Uso de água a taxa variável	Medidas de desempenho quantitativas

Continua...

...Continuação

Construtos da TPB	Citações dos especialistas => trechos com tópicos semelhantes	Fatores	Categorias
	"A adoção de Agricultura 4.0 permite aumentar a produtividade dos insumos. Então, nesse caso você pode utilizar menos água com o mesmo produto, menos input que seria água e ter o mesmo output. Permite também obter informações que vão facilitar o controle, um conjunto de informações sobre a disponibilização de água, como as condições de solo, umidade", especialista 12.	Produtividade	Medidas de desempenho quantitativas
	"Eu vejo uma questão forte de eficiência no uso de água e de outros recursos. Então mais eficiência nos insumos o que naturalmente pode impactar em redução de custo de produção e dado o preço de venda do produto em melhor lucratividade para as propriedades. Eu acho que a Agricultura 4.0 pode ter um papel importante na eficiência e via a eficiência na sustentabilidade", especialista 15.	Uso de água, lucro, custo de produção	Medidas de desempenho quantitativas
Atitude (vantagens, benefícios, resultados positivos esperados)	"Em uma grande área, onde por exemplo um pivô central é usado, o agricultor pode aumentar a competência de gestão por meio de sensores, que fornecem dados para criar um mapa daquela área e aplicar uma irrigação a taxa variável", especialista 8.	Benefícios de gestão	Medidas de desempenho qualitativas
	"Eu acho que quando uma tecnologia oferece um conhecimento que o produtor ainda não tinha, o conhecimento do que ocorre no seu sistema de produção, e se ele entende aquilo como um diferencial para a gestão, para o aumento de produtividade, para a melhoria de qualidade, eu acho que esse fator reduz o custo de produção", especialista 17.	Benefícios de gestão	Medidas de desempenho qualitativas
	"Para o agricultor adotar, acho que o principal fator é mostrar os benefícios, mostrar quanto ele vai melhorar os seus processos, vai otimizar seus processos, vai poder racionalizar os custos", especialista 36.	Benefícios de gestão	Medidas de desempenho qualitativas
	"Com a adoção da Agricultura 4.0, o planejamento de irrigação é mais facilitado uma vez que o agricultor tem muito mais informações para gerenciar a empresa agrícola, por exemplo estações meteorológicas com que o agricultor pode saber se um determinado local choveu, saber a umidade do solo", especialista 8.	Melhorias no planejamento da irrigação	Medidas de desempenho qualitativas
	"O planejamento da irrigação tem se tornado mais factível de ser planejado. O agricultor sai de uma operação muitas vezes baseada na experiência, e começa a ganhar uma metodologia e um conjunto de dados que tornam este planejamento mais automatizado, mais científico, mais fácil de ser operacionalizado", especialista 35.	Melhorias no planejamento da irrigação	Medidas de desempenho qualitativas
	"O controle vai se tornar muito mais detalhado. Então em termos de gastos de água o agricultor vai conseguir criar parâmetros para medir a eficiência do uso de água .... o uso foi igual à x litros de água e o retorno de crescimento ou de produtividade da safra resultou y", especialista 29.	Melhorias no controle da irrigação	Medidas de desempenho qualitativas
Atitude (vantagens, benefícios, resultados positivos esperados)	"A adoção de Agricultura 4.0 também tem uma vantagem importante, que consiste no agricultor ter dados organizados", especialista 25.	Acesso à dados	Acesso à dados

Continua...

... Continuação

Construtos da TPB	Citações dos especialistas => trechos com tópicos semelhantes	Fatores	Categorias
	"Então essa atividade ter de ser feito antes, com base na janela, na janela de tempo, no nível de água no solo, na disponibilidade de água, na necessidade de cada cultura, no ciclo da cultura", especialista 1.	Acesso à dados agronômicos	Acesso à dados
	"O agricultor tem camadas de dados, características do solo, evapotranspiração, precipitação. Todos esses dados podem ser usados para calcular quanta água é necessária", especialista 7.	Acesso à dados agronômicos	Acesso à dados
	"E precisa ver se o agricultor tem a água, se ele é o dono da fonte, se a fonte está na sua propriedade. Mas se o agricultor está num canal de irrigação coletivo, na tubulação coletiva nem sempre a água está disponível. Entra o lado da demanda de água que é irrigação, entra o lado da oferta de água. Numa bacia o agricultor precisa ter conhecimento de hidrologia, de gestão de recursos, e informar com antecedência o usuário que ele vai ter disponível tantos metros cúbicos de água, tal dia para que ele faça então o manejo de irrigação baseado nessa informação e faça ajustes para que possa irrigar naquele dia que a cultura precisa, em que ele vai ter água", especialista 26.	Acesso à dados agronômicos, acesso à dados operacionais	Acesso à dados
	"O agricultor precisa desde a caracterização do tipo de solo, todas as informações físico hídricas, definir qual que é a caixa d'água do solo, qual a quantidade de água disponível, a capacidade de água e as informações de clima. Uma vez que ele tem essas informações, vai passar para a demanda hídrica da cultura caracterizando-a em função da evapotranspiração. Então o agricultor precisa dados desses 3 pilares: a relação água solo, planta e atmosfera são fundamentais para o agricultor definir a lâmina de irrigação", especialista 20.	Acesso à dados agronômicos, acesso à dados operacionais	Acesso à dados
	"No caso de gestão coletiva, um dos principais desafios que afetam o planejamento da irrigação é se não tiver dentro de uma comunidade um planejamento adequado, se o agricultor não tiver um conhecimento de quanto cada um vai utilizar os recursos hídricos", especialista 27.	Acesso à dados operacionais	Acesso à dados
	"Em relação às informações necessárias para o planejamento da irrigação, o básico é a disponibilidade de água. Agora o agricultor tem tecnologia e conhecimento suficiente de balanços hídricos para entender o quanto que pode irrigar. E hoje, como é obrigatório ter uma autorização do estado, seja de domínio da união ou de domínio do estado, é obrigatório ter uma autorização e essa autorização tem que ter uma coerência de demanda, de vazão. Então a informação básica é saber qual é a disponibilidade e se ela está autorizada", especialista 36.	Acesso à dados operacionais	Acesso à dados
	"Dependendo da bacia hidrográfica, o agricultor tem muitos problemas de conflito de água, por exemplo, a água às vezes não está disponível na mesma quantidade o tempo todo. Cada produtor tem uma certa quantidade de água que ele pode retirar, para poder fazer uma irrigação. E têm leis que gerenciam isso tudo. A água é um recurso escasso e o agricultor deve usar ela de forma mais eficiente e otimizado possível. Então o agricultor não deve irrigar de qualquer jeito, mas na quantidade certa, na hora certa e no local certo", especialista 8.	Acesso à dados operacionais	Acesso à dados
	"Eu acho que hoje os agricultores têm uma limitação muito grande que a questão do recurso água. Por mais que o Brasil hoje tenha uma grande disponibilidade, nós sabemos que em inúmeras regiões esse recurso hoje já passa por um controle muito maior. Então à adoção de tecnologias mais avançadas na própria utilização do uso de água pode gerar grandes vantagens como a melhor utilização desse recurso", especialista 33.	Acesso à dados operacionais	Acesso à dados

Continua...

... Continuação

Construtos da TPB	Citações dos especialistas => trechos com tópicos semelhantes	Fatores	Categorias
Atitude (vantagens, benefícios, resultados positivos esperados)	"O agricultor tem que se preparar, tem que estar atualizado com as informações técnicas, com os equipamentos. Naturalmente dependendo do tamanho dele: se for um pequeno produtor de morango, não é a mesma coisa se for um produtor maior, de café irrigado, que tem equipes de trabalho. Então, qualquer seja o nível da operação, o agricultor tem que estar treinado, capacitado", especialista 3.	Capacitação	Mudanças para o agricultor
	"No Brasil tem ainda uma grande parcela da produção que é feita por produtores com uma baixa capacitação. A capacitação de recursos humanos é um fator que vai ser problemático na adoção", especialista 16.	Capacitação	Mudanças para o agricultor
	"Em relação às mudanças, acho que a tecnologia tem que ter adaptação para perfis diferentes de produtores, o tamanho, o tipo de equipamento", especialista 14.	Capacitação	Mudanças para o agricultor
	"Com certeza nós precisamos conscientizar muito, como o manejo da irrigação deve ser feito, para que o agricultor faça irrigação e não molhação, ainda é muito pouco adotado. O agricultor precisa internalizar isso, ele precisa se capacitar, precisa entender o que é irrigação, o que é agricultura irrigada. Irrigar não é molhar, irrigar não é agricultura de sequeiro mais água. Ele tem que fazer manejo de irrigação e manejo de irrigação é uma prática cultural, como adubar, como controlar pragas, doenças e plantas invasoras", especialista 26.	Capacitação, capacitação técnica, modelo mental	Mudanças para o agricultor
	"A grande questão é que existem agricultores de diferentes níveis intelectuais, o produtor que tem escolaridade mínima e um produtor que tem um ensino superior completo, que são da área da agricultura, que são engenheiros agrônomos, engenheiros agrícolas. E têm produtores que são da área de administração que têm um conhecimento muito pequeno sobre essa área. Então dentro do planejamento agrícola essa questão da capacitação e a questão do conhecimento do produtor é fundamental para facilitar qualquer atividade agrícola, desde adubação até o planejamento de qual vai ser a lâmina de irrigação", especialista 20.	Capacitação, capacitação técnica	Mudanças para o agricultor
	"A área de administração, de gestão, em que o planejamento está inserido, não é uma atividade que o agricultor valorize e, portanto, porque ele não valoriza ele não conhece, e porque ele não conhece é difícil. Então eu acho que tem uma mudança que é a formação, e que talvez melhore com as novas gerações, comparado com a geração antiga, de pessoas mais velhas", especialista 10.	Capacitação, capacitação gerencial	Mudanças para o agricultor
	"Para planejar, o agricultor precisa ser formado e a formação dele é ainda muito baixa", especialista 2.	Capacitação gerencial	Mudanças para o agricultor
	"Na área das operações, haverá uma questão de gestão: a qualificação do agricultor para adotar, entender e utilizar as novas tecnologias", especialista 5.	Capacitação gerencial	Mudanças para o agricultor
	"Eu acho que talvez a formação e a capacitação técnica sejam um pilar importante nesse processo de adoção, que não é simplesmente transferir uma tecnologia, pacotes tecnológicos, mas é adaptar essas tecnologias aos contextos locais e entender que a tecnologia precisa de um conjunto de fatores inclusive a capacidade de gestão. É inútil pensar que haverá uma agricultura super técnificada sem ter capacidade de gestão, gestão também é tecnologia e eu acho que isso talvez não esteja claro para todos os atores envolvidos. Mas sobretudo não está claro para o agricultor que ele precisa antes de tudo pensar como está gerenciando, gerenciando as finanças e ao trabalho com agricultores, comunidades extrativistas por exemplo", especialista 22.	Capacitação técnica, capacitação gerencial	Mudanças para o agricultor

Continua...

...Continuação

Construtos da TPB	Citações dos especialistas => trechos com tópicos semelhantes	Fatores	Categorias
	"O planejamento é complexo. Precisa melhorar o seu nível de administração. Isso ainda é uma falha entre os agricultores. Os grandes produtores fazem bem a gestão. Estão conectados com bolsas de valores, com os mercados muito facilmente. Os médios pequenos não sabem gerir o seu negócio, ele sabe às vezes muito bem produzir. Mas eles não sabem comercializar, muitos deles têm prejuízo porque não planejaram bem. Ele não sabe bem para que vai vender, não sabe a exigência do mercado dele. Então ele tem essas dificuldades, ele precisa ser treinado também para essa questão de gestão", especialista 26.	Capacitação gerencial	Mudanças para o agricultor
	"Nós estamos falando de dados, de planejamento, da necessidade de integrar sistemas dentro de uma empresa agrícola, porque o agricultor precisa coletar dados, avaliar esses dados para identificar as diferentes, as heterogeneidades presentes na propriedade rural e depois ele precisa planejar o seu sistema de produção para trabalhar de acordo com essas heterogeneidades", especialista 15.	Capacitação gerencial	Mudanças para o agricultor
	"Acho que têm mudanças na gestão, no processos produtivos e até mesmo mudanças de paradigma do agricultor. Os produtores rurais têm que ter uma mudança em termos de tecnologia, porque é diferente considerar um produtor altamente tecnológico, para ele implantar a Agricultura de Precisão é supernatural. Se considerar um agricultor familiar que tem um hectare de terra, como ele vai mudar a cabeça. mesmo que ele tenha acesso a crédito, mesmo que ele consiga os recursos financeiros. Então um fator de mudança de paradigma social é muito importante na cabeça do produtor agrícola", especialista 29.	Modelo mental	Mudanças para o agricultor
	"Um produtor costumado tem uma mão de obra formada. Muitas vezes o produtor vê isso como uma desvantagem que atrapalha o dia a dia dele, porque ele tem que atualizar muitas coisas. Eu não o vejo como desvantagem, essa é uma quebra de inercia", especialista 11.	Modelo mental	Mudanças para o agricultor
	"A vantagem evidentemente é grande, de o agricultor ter dados, principalmente para gerenciar um recurso que é caro e é bastante complicado, que é a água, para gerenciar os seus sistemas de irrigação e deixar de molhar e passar a gerenciar o fornecimento de água para a planta", especialista 13.	Modelo mental, gestão da irrigação	Mudanças para o agricultor
	"Às vezes mensurar os benefícios é um pouco difícil, o agricultor acaba negligenciando o potencial que esse pacote tecnológico tem para auxiliar", especialista 24.	Modelo mental, gestão baseada em dados	Mudanças para o agricultor
	"A própria formação das pessoas, por exemplos os agrônomos, não basta mais pensar com a fisiologia, o que consigam saber de ciclos ou armazenagem, ou até de comercialização. Agora o agricultor tem uma serie de dados, que por si só não significam nada e que ele tem necessariamente aprender a ler esses dados, e transformar esses dados em conhecimento, em informação, em ação, curativa, preventiva", especialista 1.	Modelo mental, gestão baseada em dados	Mudanças para o agricultor
	"Em relação ao planejamento ser fácil ou difícil, esse é um dos caminhos para começar a falar de Agricultura 4.0. Eu não vou dizer que ele é fácil, mas que tem se tornado mais factível de ser planejado. O agricultor sai de uma operação que muitas vezes ela era baseada na experiência, e ela começa a ganhar uma metodologia e um conjunto de dados à disposição que tornam este planejamento mais automatizado, mais científico, mais fácil de ser operacionalizado. É claro, tudo depende do porte, da região, mas é uma tendência", especialista 35.	Modelo mental, gestão baseada em dados	Mudanças para o agricultor

Continua...

...Continuação

Construtos da TPB	Citações dos especialistas => trechos com tópicos semelhantes	Fatores	Categorias
	"Primeiro acho se tecnificar mais, se preparar para assimilar essa tecnologia. É um ponto de vista interessante quando analisar os agricultores que têm em torno de 40 anos para a frente, que já têm uma certa dificuldade de assimilar, de usar o aplicativo para fazer o manejo da irrigação, de acreditar que o uso de um sensor vai melhorar a eficiência e não basicamente o olhar dele, a experiência dele. Então talvez para esses agricultores essa assimilação, com preparo, uma tecnificação talvez seja um ponto de choque de cultura, na minha visão e isso pode complicar um pouco a adoção. E o grande problema é ensinar isso, tentar passar essa inovação, essa tecnologia para alguém que confia na sua experiência", especialista 23.	Modelo mental, gestão baseada em dados	Mudanças para o agricultor
	"O agricultor usa a experiência, hoje a maioria dos agricultores usam a experiência que eles têm, o histórico, a experiência do campo que tem disparado a irrigação. E cada vez mais o uso de informações de satélite, dados de evapotranspiração são usadas para apoiar as decisões dele. Mas hoje é muito ainda a experiência", especialista 9.	Modelo mental, gestão baseada em dados	Mudanças para o agricultor
	"Se o agricultor irriga muito, ele viabiliza um uso muito mais intensiva do solo. Além dos recursos em água, o Brasil nunca se preocupa com água porque sempre choveu muito e sempre achou que a água é um recurso inesgotável. E já está percebendo cada vez mais que é um recurso finito. Então se o agricultor não tem um planejamento bem-feito no uso desses recursos, ele vai acabar com eles. Ainda, se viabiliza uma agricultura muito mais intensiva que, além de acabar com a água, pode também acabar com o solo", especialista 31.	Modelo mental, gestão baseada em dados	Mudanças para o agricultor
	"Eu penso que a informação necessária é exatamente essa garantia de ter disponibilidade hídrica ao longo de uma safra porque tem anos que chove mais e não tem problema, mas os anos que chove menos começa aparecer agricultor dizendo "mas vocês me disseram que tinha essa vazão e está me faltando água no rio, o rio baixou tanto que não tem mais". Então eu vejo que isso essa informação faz um pouco de falta e ainda tem alguns agricultores que acreditam "O rio está, é interminável, não vai acabar nunca", especialista 36.	Modelo mental, gestão baseada em dados	Mudanças para o agricultor
	"O agricultor vai adotar se ele vai buscar lucro, na minha opinião. Ele não vai buscar enquanto não vai encontrar lucro. Não é só ele, é todo mundo, que só faz as coisas se tiver vantagem econômica, se não tiver não vai fazer", especialista 28.	Modelo mental, gestão baseada em dados	Mudanças para o agricultor
	"Eu acho que não é um controle fácil dependendo da tecnologia que ele adota. Hoje, até mesmo advindo da própria Agricultura de Precisão, esse tipo de controle vai se tornar muito mais detalhado. Em termos de gastos da água ele vai conseguir até mesmo criar parâmetros para medir a eficiência daquele gasto de água que gerou. Então na Agricultura de Precisão eu acho que ele consegue adotar isso. Se ele não tem nenhum tipo de tecnologia para fazer essa mensuração, dificilmente esse controle está na gestão do produtor. Agora se ele tiver uma tecnologia muito bem estruturada, ele vai conseguir detalhar muitas informações", especialista 29.	Modelo mental, gestão baseada em dados	Mudanças para o agricultor
	"Muitas vezes o produtor não sabe quanto custa a produção dele, não tem gestão de custo. Qualquer tecnologia que ele coloca, inovadora, pode levar a uma visão distorcida da realidade", especialista 3.	Modelo mental, gestão da empresa agrícola como negócio	Mudanças para o agricultor

Continua...

...Continuação

Construtos da TPB	Citações dos especialistas => trechos com tópicos semelhantes	Fatores	Categorias
	"Nós sabemos o quanto o agricultor ainda é muito informal nas suas atividades, ele não trata a propriedade como um negócio. Nós percebemos assim se ele não tem uma clareza dos seus custos, das suas receitas, é muito difícil pensar, ou tentar convencer alguém, que uma nova tecnologia vai gerar um bom resultado", especialista 32.	Modelo mental, gestão da empresa agrícola como negócio	Mudanças para o agricultor
Atitude (vantagens, benefícios, resultados positivos esperados)	"O planejamento é complexo e o agricultor precisa melhorar o seu nível de administração. Isso ainda é uma falha entre os agricultores: gestão, principalmente gestão de comércio. Só os grandes produtores fazem isso bem. Estão conectados com bolsas de valores, com os mercados muito facilmente. Os médios e pequenos não sabem gerir o seu negócio, eles sabem às vezes produzir muito bem. Mas eles não sabem comercializar e muitos deles têm prejuízo porque não planejaram bem. Então nós estamos falando em planejamento, o agricultor não sabe bem para que vai vender, a exigência do mercado. Então ele precisa ser treinado também para a gestão", especialista 26.	Gestão da empresa agrícola	Mudanças para a empresa agrícola
	"Também depende de mudanças no sentido organizacional, mecanismos de controle, monitoramento e indicadores de eficiência, de desempenho, da gestão, que não vai ser feita da mesma forma", especialista 29.	Gestão da empresa agrícola	Mudanças para a empresa agrícola
	"Nós estamos falando da necessidade de integrar sistemas dentro de uma empresa agrícola, porque o agricultor precisa coletar dados, avaliar esses dados para identificar as heterogeneidades presentes na propriedade e depois ele precisa planejar o seu sistema de produção para trabalhar de acordo com essas heterogeneidades. É uma atividade que não é tão simples e sobretudo para os agricultores que não têm um nível de qualificação alto e que também têm dificuldade com a mão de obra", especialista 15.	Gestão da empresa agrícola	Mudanças para a empresa agrícola
	"O planejamento não é fácil para o agricultor e também para o técnico agrícola e para o agrônomo, porque ele não tem formação para essa atividade. O agricultor entende pouco de engenharia de operações, e muitas vezes quem aconselha o agricultor também, não tem essa formação" especialista 10.	Gestão das operações	Mudanças para a empresa agrícola
	"Acho que, a gestão da propriedade rural como uma empresa, a gestão operacional e administrativa, acho que de forma geral deixa a desejar bastante. Então, acho que a gestão, de forma geral, de operações e da propriedade é uma lacuna, um desafio para o agricultor de forma geral", especialista 6.	Gestão das operações	Mudanças para a empresa agrícola
	"A dificuldade de lidar com o homem do campo, não estou falando mais do tomador de decisão, do empreendedor, mas muitas vezes a mão de obra, aquele que vai realmente ter acesso a essa informação, eu acho que esse é um gargalo, vejo como desvantagem, como um novo desafio de qualificar a mão de obra no campo para essas novas tecnologias", especialista 21.	Qualificação da mão de obra	Mudanças para a empresa agrícola
	"O agricultor não vai adotar uma tecnologia e não vai utilizar plenamente, dependendo também de mão de obra especializada que o agricultor vai precisar. Se não disponibilizar dessa qualificação, vai ser difícil adotar e usar", especialista 18.	Qualificação da mão de obra	Mudanças para a empresa agrícola
	"Eu acho a Agricultura 4.0 inevitável porque hoje cada vez mais na agricultura se busca um controle. É claro que dentro de um país como o Brasil, em que o Norte é diferente do Sul, vão existir ritmos distintos para a implantação. Mas a qualificação da mão de obra vai sei fundamental para qualquer empresa agrícola", especialista 28.	Qualificação da mão de obra	Mudanças para a empresa agrícola

Continua...

...Continuação

Construtos da TPB	Citações dos especialistas => trechos com tópicos semelhantes	Fatores	Categorias
Controle Comportamental Percebido (impedimentos e obstáculos, recursos e oportunidades disponíveis)	"Em relação às informações necessárias para o planejamento das operações, como na indústria, o agricultor precisa ter os tempos, os custos, as atividades, ter um fluxograma de processo, um mapeamento de processo. E nada de isso é feito na agricultura", especialista 10.	Modelos de planejamento e controle das operações	Modelos de gestão das operações inspirados à indústria
	"Existem ferramentas de planejamento, clássicas da indústria, que o agricultor poderia considerar, utilizar o PERT e o COM, por exemplo, para fazer planejamento. Para contabilizar os custos, o agricultor poderia usar um sistema de custeio ABC, por exemplo, para fazer planejamento. O agricultor usa um sistema muito primário, muito fácil", especialista 10.	Modelos de planejamento e controle das operações	Modelos de gestão das operações inspirados à indústria
	"Eu acho que o agricultor não consegue fazer a programação como na indústria, um PCP no nível de fábrica, porque têm fatores que o agricultor não controla, por exemplo o clima. Mas, eu acho que com a curva de aprendizagem do agricultor, como ele faz isso desde sempre, ele acaba vendo o processo e substitui um pouco o PCP de fábrica: Melhor não plantar hoje, vou plantar amanhã. Não vou semear hoje, vou semear amanhã, por conta de precipitações", especialista 4.	Modelos de planejamento e controle das operações	Modelos de gestão das operações inspirados à indústria
	"Em relação ao planejamento das operações agrícolas, quando comparamos a produção no sistema industrial e agrícola, os processos são muito semelhantes, excluindo a questão climática", especialista 5.	Modelos de planejamento e controle das operações	Modelos de gestão das operações inspirados à indústria
	"O controle pode ser fácil se o agricultor tem os equipamentos, as informações, se ele tem o processo de gestão da irrigação, as informações necessárias para que a gestão seja *juste-in-time*, em tempo real. Um modelo como esse faz muita diferença, por exemplo adotar um monitoramento das motobombas de irrigação em remoto. Então o agricultor vai precisar ter as informações sobre a eficiência da irrigação, sobre quanto irrigar e quando irrigar", especialista 34.	Modelos de gestão colaborativa	Modelos de gestão das operações inspirados à indústria
	"Eu penso que a informação necessária é exatamente a garantia de ter disponibilidade hídrica ao longo de uma safra porque tem anos que chove mais e não tem problema, mas os anos que chove menos começa aparecer agricultor dizendo "mas vocês me disseram que tinha essa vazão e está me faltando água no rio, o rio baixou tanto que não tem mais". Uma questão que acho deve ser enfrentada é o agricultor disponibilizar de um sistema de monitoramento das informações que avise com certa antecedência sobre a disponibilidade de água para a irrigação nos diferentes ciclos sazonais anuais", especialista 36.	Modelos de gestão colaborativa	Modelos de gestão das operações inspirados à indústria

Continua...

...Continuação

Construtos da TPB	Citações dos especialistas => trechos com tópicos semelhantes	Fatores	Categorias
	Em relação ao planejamento da irrigação, acho que o agricultor tem que ter um bom conhecimento da disponibilidade de água, o que significa o nível dos lençóis freáticos. E também um conhecimento relativo aos outros agricultores, portanto, um planejamento que na verdade deve ser em conjunto e não deve ser a nível individual de cada agricultor", especialista 31.	Modelos de gestão colaborativa	Modelos de gestão das operações inspirados à indústria
Controle Comportamental Percebido (impedimentos e obstáculos, recursos e oportunidades disponíveis)	"Precisa ver se o agricultor tem água, se ele é o dono da fonte, se a fonte está na sua propriedade. Mas se o agricultor está num canal de irrigação coletivo, nem sempre a água está disponível. Entra a demanda e a oferta de água. Numa bacia o agricultor precisa ter conhecimento de gestão de recursos", especialista 26.	Recursos (insumos – fontes de água, água)	Recursos
	"Hoje, conforme as outorgas de água, os grandes produtores têm que colocar um medidor de vazão que eles estão usando. Anteriormente, a medição da vazão era nos rios, nos poços, a nível de uso macro. Hoje o órgão gestor está exigindo que cada agricultor tem uma medição, aqui no sistema de gestão hídrica, de uma bacia, de uma região. Então, existe uma pressão dos órgãos de gestão para que o produtor coloca o sistema de medição, mas também transmita os dados de vazão para o sistema do gestor", especialista 11.	Recursos (insumos – água, hardware – sistema de medição)	Recursos
	"Quanto à outorga para acesso à água, o produtor paga uma tarifa fixa que dá direito ao uso de água, sem controle do volume, nos perímetros irrigados sociais. Nos perímetros profissionais, além da tarifa fixa, ele paga por cada metro cúbico de água usado, a tarifa fixa serve para manutenção do perímetro irrigado porque a agricultura utiliza bombas e sistema pressurizado. Por exemplo existem tarifas diferenciadas, o agricultor tem uma tarifa para uso pela manhã, uma tarifa pelo uso da tarde ou noite", especialista 23.	Recursos (insumos – água)	Recursos
	"No Brasil, existe o dizer que para a irrigação o agricultor precisa energia em qualidade, quantidade, preço adequado e no Brasil ele tem tudo ao contrário: pouca disponibilidade, custo alto e qualidade baixa", especialista 11.	Recursos (insumos – energia)	Recursos
	"Um fator muito importante para a agricultura irrigada é o custo de energia elétrica, principalmente se considerar a agricultura de maior porte, em que os picos de energia são muito grandes. A Agricultura 4.0 é extraordinária para maximizar o efeito de todos os insumos com menos custos", especialista 1.	Recursos (insumos – energia)	Recursos
	"Dependendo do tipo de cultura que está sendo cultivada o agricultor pode ter economia de água, economia de energia e uma melhor qualidade do produto", especialista 17.	Recursos (insumos – energia)	Recursos
	"O agricultor tem que ver a vantagem, qual seria a diminuição de custos, o bombeamento da água para fazer uma aplicação localizada e ver uma economia de energia", especialista 18.	Recursos (insumos – energia)	Recursos
	"O planejamento é um processo fácil porque os agricultores disponibilizam de equações consolidadas e conhecimento da disponibilidade hídrica do local, o custo de água que o agricultor vai ter, o custo de energia", especialista 27.	Recursos (insumos – energia)	Recursos
	"Uma questão que acho deve ser enfrentada é o agricultor disponibilizar de um sistema de monitoramento das informações que avise com certa antecedência sobre a disponibilidade de água para a irrigação nos diferentes ciclos sazonais anuais", especialista 36.	Recursos (hardware – sistema de gestão da irrigação)	Recursos

Construtos da TPB	Citações dos especialistas => trechos com tópicos semelhantes	Fatores	Categorias
	"Os grandes produtores têm normalmente mão de obra especializada e precisam de consultoria que ajude os produtores no planejamento. É muito difícil o pessoal da empresa agrícola cuidar da integração de solo, água, clima, planta e fatores operacionais", especialista 11.	Recursos (pessoas – consultores)	Recursos
	"A Agricultura de Precisão é complexa e o ponto negativo é que o produtor que vai adotar essas tecnologias precisa de um especialista, de um consultor ou de uma prestação de serviços", especialista 17.	Recursos (pessoas – consultores)	Recursos
	"O planejamento consiste em uma recomendação do consultor. Eu acredito que é meio fácil porque as informações são meio tabeladas", especialista 32 .	Recursos (pessoas – consultores)	Recursos
Fatores antecedentes	"Em relação às mudanças, acho que a tecnologia tem que ter adaptação para perfis diferentes de produtores em termos de tamanho, grau de instrução, tipo de equipamento, mão de obra ", especialista 14.	Nível educacional	Características do agricultor
	"O que eu acho que dificulta qualquer inovação, qualquer adoção de tecnologia é o fato que nós profissionais estamos caminhando para uma forma de atuação muito dependente da ciência da computação e da engenharia de comunicação. O futuro, ou a possibilidade de êxito, está nas gerações mais novas, que estão muito mais familiarizadas com essas tecnologias que permeiam o mundo da inovação. Então a maior dificuldade é os agricultores entender, ter noção, ser familiarizar como as tecnologias inovadoras. As inovações envolvem um conhecimento de ciência da computação e de matemática, e por isso os agricultores terão que ser orientados e assessorados por profissionais que tenham esse conhecimento", especialista 17.	Idade, familiaridade com tecnologias, nível educacional	Características do agricultor
	"Primeiro acho se tecnificar mais, se preparar para assimilar essa tecnologia. É um ponto de vista interessante se consideramos os agricultores que têm em torno de 40 anos para a frente e que já têm uma certa dificuldade de assimilar, de usar os aplicativos para fazer o manejo da irrigação, de acreditar que o uso de um sensor vai melhorar a eficiência e não basicamente o olhar dele, a experiência. Talvez para esses agricultores com idade um pouco mais, essa assimilação e tecnificação sejam um ponto de choque, de cultura. O grande problema vai ser ensinar isso, tentar passar essa inovação para quem confia na sua experiência", especialista 23.	Idade, experiência em agricultura	Características do agricultor
	"A adoção vai depender do nível educacional, econômico e social do agricultor", especialista 18.	Nível educacional	Características do agricultor
	"Em relação aos desvantagens, eu acho também a capacidade de gerir esse sistema. Se pegar os índices educacionais, de formação e treinamento, ele vai dos grandes centros, dos meios rurais, vai diminuir. Pode-se encontrar qualidade altíssima em grandes centros e vai afastar-se desses grandes", especialista 19.	Nível educacional, capacitação gerencial	Características do agricultor
	"O que está por trás da Agricultura 4.0 é principalmente a questão da digitalização. E conhecer, se aplicar e avançar é algo imprescindível, lembrando que para muitos produtores a agricultura 1.0 já seria uma boa solução. E outra ação chave é questão da capacitação da mão de obra. O que adianta o agricultor ter toda uma tecnologia se ele não cuida das pessoas que vão estar no campo implementando a tecnologia e se ele não cuida da capacitação das pessoas que vão usar os dados obtidos para tomar uma decisão", especialista 13.	Nível educacional, capacidade de absorção	Características do agricultor
	"Eu acho que vai depender do produtor agrícola, obviamente de anos de experiência que ele tem no campo, se já é de uma família de agricultores ou não, seria o primeiro, a primeira geração da família a trabalhar com essas tecnologias. Mas, se o agricultor tiver um bom conhecimento, eu acho que o planejamento da irrigação não é um processo difícil", especialista 29.	Experiência em agricultura, família de agricultores, nível educacional	Características do agricultor

Construtos da TPB	Citações dos especialistas => trechos com tópicos semelhantes	Fatores	Categorias
	"Então o perfil do agricultor varia muito de acordo com cada região do país. Investimento, acho que básico seria investimento em educação, em qualificação. A adoção passa pela educação básica, boa parte dos agricultores brasileiros não possuem o nível fundamental, eles não cursaram sequer escola técnica profissionalizantes", especialista 30.	Nível educacional	Características do agricultor
	"Eu acredito que é a questão da renda e educação, acho que são dois aspectos bastante preocupantes quando nós pensamos em adoção de tecnologia. E também o produto e a própria rentabilidade daquele produto, volume de produção", especialista 32.	Renda, nível educacional	Características do agricultor
	"Nas pesquisas temos analisado não só os fatores econômicos, mas esse conjunto de atitudes, de percepções que os produtores têm, tentando obter dele a aversão a risco e alguma indicação de que ele é um inovador.", especialista 12.	Propensão ao risco, capacidade de inovação	Características do agricultor
	"Acho que se o agricultor tiver as informações do custo-benefício, ele teria a possibilidade de decidir de adotar ou não. Isso é uma falha de comunicação, é uma falha de informação para o produtor. Os inovadores, os iniciantes são aqueles que acabam tomando esse risco, maior", especialista 14.	Propensão ao risco, capacidade de inovação	Características do agricultor
	"Toda vez que o agricultor vai adotar uma tecnologia ela envolve um risco, porque muitas vezes ele pode apostar numa tecnologia que hoje é a tecnologia de ponta, e fazer um grande investimento, e daqui a um ano essa tecnologia se mostrar obsoleta, o agricultor ter uma tecnologia melhor do vizinho produtor concorrente que não apostou no risco e que num primeiro momento foi mais conservador", especialista 35.	Propensão ao risco	Características do agricultor
	"Existem empresas agrícolas hoje altamente técnificadas que tem pessoal ligado na bolsa 24 horas por dia. E então impressionante essas propriedades muito diferentes da empresa rural, em que o agricultor trabalha muito por sentimento e pelo que o pai fez, que o avô fez. Não dá né perguntar: por que você não planta outra cultura? por que você não faz isso direito? Porque meu pai fazia assim, meu avô fazia assim e eu faço assim, eu só sei plantar cebola", especialista 25.	Conservadorismo	Características do agricultor
	"É um grande desafio para o agricultor admitir que existe uma maneira diferente de trabalhar do que o seu avo ensinou para seu pai, seu pai para ele e o agricultor para seu filho e dizer que um outro jeito é melhor ou pior", especialista 1.	Conservadorismo	Características do agricultor
	"Primeiro acho se tecnificar mais, se preparar para assimilar essa tecnologia. É um ponto de vista interessante isso se consideramos os agricultores que têm em torno de 40 anos para a frente e que já têm uma certa dificuldade de assimilar, de usar os aplicativos para fazer o manejo da irrigação, de acreditar que o uso de um sensor vai melhorar a eficiência e não basicamente o olhar dele, a experiência dele. Então talvez para esses agricultores com idade um pouco mais, essa assimilação e tecnificação talvez sejam um ponto de choque de cultura. E o grande problema vai ser ensinar isso, tentar passar essa inovação, essa tecnologia para alguém que confia na sua experiência", especialista 23.	Conservadorismo	Características do agricultor
	"Em relação às informações necessárias para um agricultor para adotar, eu acho que o agricultor precisa ver acontecer, funcionando e mostrando que aquela inovação pode ser dele", especialista 22.	Conservadorismo	Características do agricultor

Continua...

...Continuação

Construtos da TPB	Citações dos especialistas => trechos com tópicos semelhantes	Fatores	Categorias
Fatores antecedentes	"Existem empresas agrícolas hoje altamente técnificadas que tem pessoal ligado na bolsa 24 horas por dia. E então impressionante essas propriedades muito diferentes da empresa rural, em que o agricultor trabalha muito por sentimento e pelo que o pai fez, que o avô fez. Não dá né perguntar: por que você não planta outra cultura? por que você não faz isso direito? Porque meu pai fazia assim, meu avô fazia assim e eu faço assim, eu só sei plantar cebola ", especialista 25.	Tamanho da empresa agrícola (empresa familiar, empresa industrial)	Características da empresa agrícola
	"O planejamento de irrigação apresenta desafios e dificuldades para os pequenos e médios produtores, que possuem capacidade técnica limitada porque eles não têm mão de obra para fazer muita atividades e eles cuidam de muita coisa. Ao mesmo tempo, por outro lado, esses agricultores também não têm um volume de área e de produção que possibilita pagar serviços de consultoria que ele precisa. Contudo existe a oportunidade de cooperativismo, associação de produtores, então você teria um processo coletivo de aprendizado, que pode servir uma cooperativa", especialista 11.	Tamanho da empresa agrícola (empresa familiar, empresa industrial), associativismo e cooperativismo	Características da empresa agrícola
	"A gestão da irrigação é afetada também pela localização do agricultor, a depender donde a sua empresa agrícola está dentro de um perímetro irrigado. Se tiver logo na entrada d'água, ele não vai ter impacto nenhum. Agora, se estiver no final da linha, o risco de falta de água vai para ele", especialista 18.	Localização da empresa agrícola	Características da empresa agrícola
	"O planejamento é complexo, precisa-se melhorar o nível de administração da empresa agrícola, que ainda é uma falha entre os agricultores. Só os grandes produtores, os empresários, fazem bem a gestão, gestão de comércio. Estão conectados com bolsas de valores, estão conectados com os mercados muito facilmente. Os médios e pequenos não sabem gerenciar o seu negócio, ele sabe às vezes muito bem produzir. Mas eles não sabem comercializar, muitos deles têm prejuízo porque não planejaram bem. Eles não sabe bem para que vai vender, eles não bem direito a exigência do mercado deles. Então eles têm essas dificuldades, eles precisam ser treinados também para essa questão da gestão", especialista 26.	Tamanho da empresa agrícola (empresa familiar, empresa industrial)	Características da empresa agrícola
	"Eu acredito que é a questão da renda e educação, acho que são dois aspectos bastante preocupantes em relação à adoção de tecnologia. E também o produto e a rentabilidade daquele produto, volume de produção, uma série de questões", especialista 32.	Rentabilidade de produto, volume de produção	Características da empresa agrícola
	"Dependendo do cultivo o agricultor pode ter uma economia de água, economia de energia. Dependendo da espécie que está sendo cultivada se pode ter uma melhor qualidade do produto", especialista 17.	Tipo de cultura	Características da empresa agrícola
	"Será necessário um tempo de aprendizagem para que o agricultor possa internalizar esses conceitos na prática agrícola dele. Isso tem um custo, se ele trabalha com culturas de baixo valor agregado pode ser que não seja lucrativo e que ele opte por deixar esse investimento um pouco mais para frente porque a Agricultura de Precisão requer também um investimento maior inicial. Outro desafio é se a empresa agrícola está numa região com baixo nível de conflito pelo uso da água, ou seja numa região que tem abundância em termos de recursos hídricos, a Agricultura de Precisão perde um pouco da atratividade, continua sendo atrativa por conta de todas as vantagens de diminuição de custos mas ela perde um pouco atratividade por conta do investimento inicial", especialista 34.	Tipo de cultura, Localização da empresa agrícola	Características da empresa agrícola

Continua...

Conclusão.

Construtos da TPB	**Citações dos especialistas => trechos com tópicos semelhantes**	**Fatores**	**Categorias**
Fatores antecedentes	"Eu acho que o controle da irrigação não é fácil dependendo do tipo de tecnologia que ele adota. Hoje, até mesmo advindo da própria agricultura de precisão, esse tipo de controle vai se tornar muito mais detalhado. Se o agricultor não tem nenhum tipo de tecnologia para fazer a mensuração do gasto de água, dificilmente esse controle está na gestão do produtor. Eu diria que se ele não tem uma tecnologia muito específica para isso, a forma de controle que ele tem para a irrigação é custos, é o único controle que ele vai ter. Se ele tiver uma tecnologia muito bem estruturada, ele vai conseguir também detalhar o custo do equipamento, o custo de uso de água. Ele consegue medir também a eficiência do uso de água, em conjunto com todos os outros fatores, qual que foi o benefício gerado. Ele pode até verificar faixas de nível de irrigação, produtividade dependendo da cultura", especialista 29.	Tipo de tecnologia	Características das tecnologias
	"O agricultor precisa primeiro ter acesso à resultados, às tecnologias, informações sobre a Agricultura de Precisão. E uma segunda questão é as informações sobre custo-benefício, porque ele na realidade não adota ainda nada, ele vai fazer um trade-off .... se eu adotar o que tem de acontecer, se eu não adotar .... Então ele precisa de informações sobre o investimento necessário, tipo de tecnologia, o aumento ou não de produtividade, a diminuição de custos, o aumento do valor agregado", especialista 34.	Tipo de tecnologia	Características das tecnologias
	"O pequeno agricultor, muito pobre, teria que verificar os custos envolvidos nesse tipo de tecnologia", especialista 2.	Preço, tipo de tecnologia	Características das tecnologias
	"Tem o custo de produção e a escassez de empresas que podem fornecer esse tipo de tecnologias no Brasil, as empresas específicas em Agricultura 4.0 ainda são muito escassas aqui. Então, você não tem uma concorrência de mercado, você não tem um preço justo para o produtor, isso faz com que ele tem um prejuízo e que não facilite a adoção", especialista 27.	Preço	Características das tecnologias
	"A Agricultura de Precisão é complexa. Portanto, o ponto negativo é que o produtor que vai adotar precisa de um especialista, de um consultor, ou de uma prestação de serviço", especialista 17.	Complexidade	Características das tecnologias
	"Acho que as informações técnicas e gerenciais de manejo da tecnologia também são importantes, como que funciona, como que é a gestão dessa tecnologia, o que o produtor precisa fazer, o que ele não precisa fazer. Eu acho que são informações fundamentais para ele entender melhor as complexidades da tecnologia", especialista 15.	Complexidade	Características das tecnologias

Fonte: Autor

APÊNDICE H - Construção do modelo de simulação – documentação

Necessidade de água de irrigação planejada:= GET XLS DATA('Modelo_SD_Tabelas_Excel.xls', 'Necessidade água irrigação' , 'a', 'b2')
Units: milímetros/dia
Cenário1 - utilizo estação meteorológica: 'Necessidade água irrigação' , 'a', 'b2'
Cenário2 - adoção satélite: 'Necessidade água irrigação' , 'a', 'c2'.

Vazão= 347.24
Units: metros cúbicos/horas.

Área irrigada= 80.23
Units: hectares.

Volta pivô %:= GET XLS DATA('Modelo_SD_Tabelas_Excel.xls', 'Volta pivô' , 'a', 'c2')
Units: Dmnl
% da circunferência completada pela última torre em uma volta
Início -germinação 100%, secagem 0, outros estágios de desenvolvimento 50%.

Tempo de irrigação planejado = ((10*Necessidade de água de irrigação planejada*Área irrigada*Volta pivô %)/(Vazão))
Units: horas/dia
Tempo de funcionamento do pivô central para aplicar a necessidade de água de irrigação planejada. Calculado com fórmula que relaciona a lâmina a aplicar por volta e a vazão do pivô central (Equação 4).

Tempo de funcionamento noturno = 9
Units: horas/dia
Tempo de funcionamento noturno (21:00 - 6:00).

Tempo de funcionamento diurno = 12
Units: horas/dia
Tempo de funcionamento diurno (6:00 - 18:00).

Tempo de irrigação planejado noturno = IF THEN ELSE (Tempo de irrigação planejado>Tempo de funcionamento noturno , Tempo de funcionamento noturno , IF THEN ELSE (Tempo de irrigação planejado>Tempo de funcionamento noturno + Tempo de funcionamento diurno , Tempo de funcionamento diurno ,Tempo de irrigação planejado))
Units: horas/dia.

Tempo de irrigação planejado diurno = IF THEN ELSE (Tempo de irrigação planejado<Tempo de funcionamento noturno , 0 , IF THEN ELSE(Tempo de irrigação planejado>Tempo de irrigação planejado noturno :AND: Tempo de irrigação planejado<Tempo de funcionamento noturno + Tempo de funcionamento diurno, Tempo de irrigação planejado-Tempo de funcionamento noturno, Tempo de funcionamento diurno))
Units: horas/dia.

Tempo de irrigação planejado no pico = IF THEN ELSE (Tempo de irrigação planejado>Tempo de irrigação planejado noturno + Tempo de irrigação planejado diurno , Tempo de irrigação planejado-Tempo de irrigação planejado noturno-Tempo de irrigação planejado diurno , 0)
Units: horas/dia.

Uso de água planejado noturno = Vazão * Tempo de irrigação planejado noturno
Units: metros cúbicos/dia.

Uso de água planejado noturno na safra = INTEG (Uso de água planejado noturno,0)
Units: metros cúbicos
Uso de água planejado noturno acumulado durante a safra.

Uso de água planejado diurno = Vazão * Tempo de irrigação planejado diurno
Units: metros cúbicos/dia.

Uso de água planejado diurno na safra = INTEG (Uso de água planejado diurno, 0)
Units: metros cúbicos
Uso de água planejado diurno acumulado durante a safra.

Uso de água planejado no pico = Vazão*Tempo de irrigação planejado no pico

Units: metros cúbicos/dia.

Uso de água planejado no pico na safra = INTEG (Uso de água planejado no pico,0)
Units: metros cúbicos
Uso de água planejado no pico acumulado durante a safra.

Uso de água planejado = Uso de água planejado noturno + Uso de água planejado diurno + Uso de água planejado no pico
Units: metros cúbicos/dia.

Uso de água planejado na safra = INTEG (Uso de água planejado,0)
Units: metros cúbicos
Uso de água planejado acumulado durante a safra.

Custo unitário de água= 0.00226763
Units: Reais/metro cúbico
Custo unitário de água - médio = 0,002267627
Custo unitário de água - mínimo = 0,000141781
Custo unitário de água - máximo = 0,008654488.

Custo de uso de água planejado noturno = Custo unitário de água*Uso de água planejado noturno
Units: Reais/dia
Custo cobrado pelo volume de água planejado em um dia para a irrigação durante o tempo de irrigação planejado noturno.

Custo de uso de água planejado noturno na safra = INTEG (Custo de uso de água planejado noturno,0)
Units: Reais
Custo cobrado pelo volume de água acumulado durante o tempo de irrigação planejado noturno.

Custo de uso de água planejado = Custo de uso de água planejado noturno + Custo de uso de água planejado diurno +Custo de uso de água planejado no pico
Units: Reais/dia

Custo cobrado pelo volume de água planejado em um dia para a irrigação durante o tempo de irrigação planejado.

Custo de uso de água planejado na safra = INTEG (Custo de uso de água planejado,0)
Units: Reais
Custo cobrado pelo volume de água acumulado durante o tempo de irrigação planejado no safra.

Circunferência última torre= 3090.7
Units: metros.

Volta última torre = Circunferência última torre*Volta pivô %
Units: metros.

Tempo de ajuste = 1
Units: dia
Constante de tempo para ajustar o prazo de execução da irrigação (igual ao dia) ao intervalo de tempo (*time step*) no modelo.

Velocidade última torre = IF THEN ELSE (Tempo de irrigação planejado = 0 , 0 , (Volta última torre/ Tempo de irrigação planejado)/ Tempo de ajuste)
Units: metros/horas
Velocidade referida à última torre em uma volta.

Arco da volta última torre noturno = Velocidade última torre*Tempo de irrigação planejado noturno
Units: metros/dia
Arco da circunferência completado pela última torre durante o tempo de irrigação planejado noturno.

Circunferência área irrigada = 3175.21
Units: metros.

Arco da volta área irrigada noturno = (Arco da volta última torre noturno * Circunferência área irrigada) / Circunferência última torre

Units: metros/dia
Arco da circunferência relativa à área irrigada completado durante o tempo de irrigação planejado noturno.

Raio área irrigada = 505.35
Units: metros.

Área a irrigar noturna = ((Raio área irrigada * Arco da volta área irrigada noturno)/ 2)/ 10000
Units: hectares/dia
Área em que aplicar a necessidade de água de irrigação planejada durante o tempo de irrigação planejado noturno.

Taxa de consumo da bomba = 3.79
Units: kwh/ (hectares*milímetros)
Taxa relativa à área a irrigar em hectares e à necessidade de água de irrigação a aplicar em milímetros.

Uso de energia elétrica planejado noturno - bomba = (Taxa de consumo da bomba * Área a irrigar noturna * Necessidade de água de irrigação planejada) * Tempo de ajuste
Units: kwh/dia
Uso de energia elétrica planejado para a captação de água da fonte de água durante o tempo de irrigação planejado noturno.

Taxa de consumo do motor = 53.8
Units: kwh
Taxa de consumo do motor do pivô central calculada com base no tempo de movimentação de cada torre, que é fixo para cada volta e não depende da velocidade do pivô.

Uso de energia elétrica planejado noturno - motor = IF THEN ELSE (Tempo de irrigação planejado = 0 , 0 , (Taxa de consumo do motor * (Tempo de irrigação planejado noturno/ Tempo de irrigação planejado)/ Tempo de ajuste))
Units: kwh/dia

Uso de energia elétrica planejado para movimentar o pivô central durante o tempo de irrigação planejado noturno.
A taxa de consumo do motor é alocada proporcionalmente ao tempo de irrigação planejado noturno, diurno e no pico para calcular o uso de energia elétrica planejado - motor no tempo de irrigação planejado noturno, diurno e no pico.

Uso de energia elétrica planejado noturno - bomba + motor = Uso de energia elétrica planejado noturno - bomba + Uso de energia elétrica planejado noturno - motor
Units: kwh/dia
Uso de energia elétrica planejado para a aplicação da necessidade de água de irrigação planejada durante o tempo de irrigação planejado noturno.

Uso de energia elétrica planejado noturno na safra = INTEG (Uso de energia elétrica planejado noturno - bomba + motor, 0)
Units: kwh
Uso de energia elétrica planejado acumulado para a aplicação da necessidade de água de irrigação planejada durante o tempo de irrigação planejado noturno na safra.

Uso de energia elétrica planejado = Uso de energia elétrica planejado noturno - bomba + motor + Uso de energia elétrica planejado diurno - bomba + motor + Uso de energia elétrica planejado no pico - bomba + motor
Units: kwh/dia
Uso de energia elétrica planejado para a aplicação da necessidade de água de irrigação planejada durante o tempo de irrigação planejado.

Uso de energia elétrica planejado na safra = INTEG (Uso de energia elétrica planejado, 0)
Units: kwh
Uso de energia elétrica planejado acumulado para a aplicação da necessidade de água de irrigação planejada durante o tempo de irrigação planejado na safra.

Custo unitário de energia elétrica noturno:= GET XLS DATA ('Modelo_SD_Tabelas_Excel.xls', 'Custo energia noturno' , 'a', 'b2')
Units: Reais/kwh

Tarifa noturna aplicada na nota fiscal mensal da conta de energia elétrica.

Custo de uso de energia elétrica planejado noturno = Custo unitário de energia elétrica noturno * Uso de energia elétrica planejado noturno - bomba + motor
Units: Reais/dia
Custo cobrado pelo volume de energia elétrica planejado em um dia para a irrigação durante o tempo de irrigação planejado noturno, com base o custo unitário de energia elétrica noturno.

Custo de uso de energia elétrica planejado noturno na safra = INTEG (Custo de uso de energia elétrica planejado noturno, 0)
Units: Reais
Custo cobrado pelo volume de energia elétrica planejado acumulado para a irrigação durante o tempo de irrigação planejado noturno na safra.

Custo de uso de energia elétrica planejado = Custo de uso de energia elétrica planejado diurno + Custo de uso de energia elétrica planejado noturno + Custo de uso de energia elétrica planejado no pico
Units: Reais/dia
Custo de uso de energia elétrica planejado para a aplicação da necessidade de água de irrigação planejada durante o tempo de irrigação planejado.

Custo de uso de energia elétrica planejado na safra = INTEG (Custo de uso de energia elétrica planejado, 0)
Units: Reais
Custo de uso de energia elétrica planejado acumulado para a aplicação da necessidade de água de irrigação planejada durante o tempo de irrigação planejado na safra.