

INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA
GOIANO – IF GOIANO – CAMPUS RIO VERDE
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIAS AGRÁRIAS –
AGRONOMIA

USO DE SENSORES DIGITAIS E *MACHINE*
LEARNING PARA MONITORAMENTO DA AERAÇÃO DE
GRÃOS ARMAZENADOS

Autor: Weder Nunes Ferreira Junior
Orientador: Osvaldo Resende

Rio Verde- GO
Setembro – 2022

INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA
GOIANO – IF GOIANO – CAMPUS RIO VERDE
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIAS AGRÁRIAS –
AGRONOMIA

USO DE SENSORES DIGITAIS E *MACHINE*
LEARNING PARA MONITORAMENTO DA AERAÇÃO DE
GRÃOS ARMAZENADOS

Autor: Weder Nunes Ferreira Junior
Orientador: Osvaldo Resende

Tese apresentada, como parte das exigências para obtenção do título de DOUTOR EM CIÊNCIAS AGRÁRIAS – AGRONOMIA, ao programa de Pós-Graduação em Ciências Agrárias – Agronomia do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia Goiano – Campus Rio Verde – Área de Concentração em Produção Vegetal Sustentável no Cerrado.

Rio Verde – GO
Setembro – 2022



SERVIÇO PÚBLICO FEDERAL
MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
SECRETARIA DE EDUCAÇÃO PROFISSIONAL E TECNOLÓGICA
INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA GOIANO

Documentos 3/2022 - CPG-RV/DPGPI-RV/CMPRV/IFGOIANO

USO DE SENSORES DIGITAIS E *MACHINE LEARNING* PARA MONITORAMENTO DA AERAÇÃO DE GRÃOS ARMAZENADOS

Autor: Weder Nunes Ferreira Junior
Orientador: Dr. Osvaldo Resende

TITULAÇÃO: Doutorado em Ciências Agrárias-Agronomia, Área de Concentração em Produção Vegetal Sustentável no Cerrado

APROVADO em, 30 de setembro de 2022.

Prof. Dr. Osvaldo Resende (Presidente)

Prof. Dr. Jacson Zuchi (Avaliador externo)

Prof. Dr. Jose Ronaldo Quirino (Avaliador externo)

Prof. Dr. Daniel Emanuel Cabral de Oliveira (Avaliador externo)

Profª. Dra. Daniela Cabral de Oliveira (Avaliadora externa)

Documento assinado eletronicamente por:

- Daniela Cabral de Oliveira, 2021102330740078 - Discente, em 30/09/2022 18:06:56.
- José Ronaldo Quirino, José Ronaldo Quirino - Outros - Instituto Federal Goiano - Campus Rio Verde (10651417000500), em 30/09/2022 17:26:44.
- Daniel Emanuel Cabral de Oliveira, PROFESSOR ENS BASICO TECN TECNOLOGICO, em 30/09/2022 17:19:59.
- Jacson Zuchi, PROFESSOR ENS BASICO TECN TECNOLOGICO, em 30/09/2022 17:13:49.
- Osvaldo Resende, PROFESSOR ENS BASICO TECN TECNOLOGICO, em 30/09/2022 16:57:06.

Este documento foi emitido pelo SUAP em 30/09/2022. Para comprovar sua autenticidade, faça a leitura do QRCode ao lado ou acesse <https://suap.ifgoiano.edu.br/autenticar-documento/> e forneça os dados abaixo:

Código Verificador: 430780

Código de Autenticação: 3001e669c3



Sistema desenvolvido pelo ICMC/USP
Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)
Sistema Integrado de Bibliotecas - Instituto Federal Goiano

Fu Ferreira Junior, Weder
 USO DE SENSORES DIGITAIS E MACHINE LEARNING PARA
MONITORAMENTO DA AERAÇÃO DE GRÃOS ARMAZENADOS /
Weder Ferreira Junior; orientador Osvaldo Resende. --
Rio Verde, 2022.
 120 p.

 Tese (Doutorado em F383) -- Instituto Federal
Goiano, Campus Rio Verde, 2022.

 1. Termometria. 2. Umidade Relativa
intergranular. 3. Machine Learning. 4. Modelagem. I.
Resende, Osvaldo, orient. II. Título.

TERMO DE CIÊNCIA E DE AUTORIZAÇÃO PARA DISPONIBILIZAR PRODUÇÕES TÉCNICO-CIENTÍFICAS NO REPOSITÓRIO INSTITUCIONAL DO IF GOIANO

Com base no disposto na Lei Federal nº 9.610, de 19 de fevereiro de 1998, AUTORIZO o Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia Goiano a disponibilizar gratuitamente o documento em formato digital no Repositório Institucional do IF Goiano (RIIF Goiano), sem ressarcimento de direitos autorais, conforme permissão assinada abaixo, para fins de leitura, download e impressão, a título de divulgação da produção técnico-científica no IF Goiano.

IDENTIFICAÇÃO DA PRODUÇÃO TÉCNICO-CIENTÍFICA

- | | |
|--|---|
| <input checked="" type="checkbox"/> Tese (doutorado) | <input type="checkbox"/> Artigo científico |
| <input type="checkbox"/> Dissertação (mestrado) | <input type="checkbox"/> Capítulo de livro |
| <input type="checkbox"/> Monografia (especialização) | <input type="checkbox"/> Livro |
| <input type="checkbox"/> TCC (graduação) | <input type="checkbox"/> Trabalho apresentado em evento |

Produto técnico e educacional - Tipo:

Nome completo do autor:

Weder Nunes Ferreira Junior

Matrícula:

2018202320140124

Título do trabalho:

USO DE SENSORES DIGITAIS E MACHINE LEARNING PARA MONITORAMENTO DA AERAÇÃO DE GRÃOS
ARMAZENADOS

RESTRIÇÕES DE ACESSO AO DOCUMENTO

Documento confidencial: Não Sim, justifique:

O material será publicado em revistas científicas.

Informe a data que poderá ser disponibilizado no RIIF Goiano: 24 /03 /2025

O documento está sujeito a registro de patente? Sim Não

O documento pode vir a ser publicado como livro? Sim Não

DECLARAÇÃO DE DISTRIBUIÇÃO NÃO-EXCLUSIVA

O(a) referido(a) autor(a) declara:

• Que o documento é seu trabalho original, detém os direitos autorais da produção técnico-científica e não infringe os direitos de qualquer outra pessoa ou entidade;

• Que obteve autorização de quaisquer materiais incluídos no documento do qual não detém os direitos de autoria, para conceder ao Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia Goiano os direitos requeridos e que este material cujos direitos autorais são de terceiros, estão claramente identificados e reconhecidos no texto ou conteúdo do documento entregue;

• Que cumpriu quaisquer obrigações exigidas por contrato ou acordo, caso o documento entregue seja baseado em trabalho financiado ou apoiado por outra instituição que não o Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia Goiano.

Rio Verde

24 /03 /2023

Local

Data

Weder Nunes Ferreira Junior

Assinatura do autor e/ou detentor dos direitos autorais

Ciente e de acordo:

Osvaldo Resende

Assinatura do(a) orientador(a)

A todos os meus amigos e amigas.

OFEREÇO

Aos meus amados pais Eunice Abadia da
Silva e Weder Nunes Ferreira. E ao meu
irmão Welber Carlos da Silva Ferreira.

DEDICO

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiro a Deus, por ter me dado forças para persistir e conseguir alcançar esse sonho.

Ao meu Orientador, Doutor Osvaldo Resende, por todos os anos de orientação, confiança e compreensão, afinal foram mais de oito anos de parceria.

Aos Doutores Daniel Emanuel Cabral de Oliveira e Jacson Zuchi, por terem aceitado o convite de participar da banca, pelas correções e contribuições para fortalecer o trabalho.

À Doutora Daniela Cabral de Oliveira, pelas orientações e trocas de experiência em uma área totalmente nova, a de *Machine learning*, foi grande parceria. Agradeço a participação na banca e todas as contribuições.

Ao Doutor José Ronaldo Quirino, pela participação na banca e principalmente pelo suporte indispensável para execução deste projeto por meio da ligação entre o IF Goiano e a Caramuru. Estendo os agradecimentos a toda equipe da Caramuru Alimentos S/A, muitos estiveram envolvidos neste projeto, obrigado a equipe responsável pelas coletadas das amostras Elivânio Santos Rosa, Tiago Abreu de Souza, Carlos André Rodrigues Queiroz e a todos os demais.

A empresa Procer Automação LTDA, pela parceria crucial para desempenho do projeto, agradeço aos proprietários da empresa por confiarem e apoiarem o projeto, Eduardo Aguiar, Murilo Schneider e Tarcísio Selinger.

Às companheiras de trabalho Doutora Kelly Sousa e Doutora Lílian Costa, meu muito obrigado por todo apoio e companheirismo.

Um imenso agradecimento aos meus coorientados de iniciação científica por toda ajuda durante as diferentes fases do projeto: Eduarda Ribeiro, José Vitor, Jennifer, Manoel Ricardo e Jonathas. Estendo os agradecimentos à Adrielle Borges por ter ajudado

na execução de análises novas e ter transmitido seu conhecimento. Obrigado também às amigas Simone e Kênia por toda companhia e contribuição durante a execução do experimento.

Agradeço também a Luana, Érika, Wellytton, Sadraque, Alexandre, Maria Aparecida, Juliana, Eduardo, Francileni, Samuel, Jaqueline, Lígia, Diene e aos demais do Laboratório de Pós-Colheita de Produtos Vegetais, pelas inúmeras horas no laboratório na execução do experimento.

Ao Laboratório de Produtos de Origem Animal do Instituto Federal Goiano – Campus Rio Verde, onde foi possível com dedicação de sua equipe a execução de parte do experimento, e em especial o Professora Doutor Marco Antônio e seus orientados Paulo Victor e Joao Vitor Teixeira.

Aos colegas de outros laboratórios, pela troca de experiência, conhecimento e ajuda em especial à Tainara Leal e Daiane Peres.

A todos meus amigos pelos incondicionais momentos de suporte em especial à Adeliane, Natália Marques, Tâmara, Patrícia, Natália Nogueira e Francielly.

Meu muitíssimo obrigado a Flávia Gomide, pelos nossos momentos de conversa, por ter me ajudado a desacelerar e a restabelecer minha autoconfiança.

Aos professores do Programa de Pós-Graduação em Ciências Agrárias – Agronomia do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia Goiano – Campus Rio Verde, pelas contribuições e auxílio na minha formação profissional.

Ao Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia Goiano – Campus Rio Verde, pela oportunidade de aperfeiçoamento.

Ao CNPq, EMBRAPPI, FAPEG e à Capes, pelo apoio financeiro.

Muito obrigado.

BIBLIOGRAFIA DO AUTOR

WEDER NUNES FERREIRA JUNIOR, filho de Weder Nunes Ferreira e Eunice Abadia da Silva, nascido em Ituiutaba, Minas Gerais, no dia 04 de fevereiro de 1995. Coursou o ensino fundamental na Escola Municipal Manoel Alves Vilela, ingressando em 2010 no Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Triângulo Mineiro – Campus Ituiutaba, no curso Técnico em Agroindústria Integrado ao Ensino médio, finalizando no ano de 2012. Formado em Agronomia no Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia Goiano – Campus Rio Verde, foi aluno de iniciação científica no Laboratório de Pós-Colheita de Produtos Vegetais durante 3 anos. Mestre em Ciências Agrárias – Agronomia no Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia Goiano – Campus Rio Verde, na área de Concentração em Produção Vegetal Sustentável no Cerrado – Linha de Pesquisa: Fisiologia, Bioquímica, Pós-Colheita de Produtos Vegetais. Em setembro de 2018 ingressou no curso de Doutorado em Ciências Agrárias – Agronomia, na mesma linha de pesquisa do mestrado, no Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia Goiano – Campus Rio Verde. Em setembro de 2022, defendeu sua tese, parte indispensável para a obtenção do diploma de Doutor em Ciências Agrárias – Agronomia.

ÍNDICE

	Página
ÍNDICE DE TABELAS.....	ix
ÍNDICE DE FIGURAS	xii
LISTA DE SÍMBOLOS, SIGLAS, ABREVIATURAS E UNIDADES	xv
RESUMO.....	xviii
ASBTRACT.....	xx
INTRODUÇÃO	1
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	4
OBJETIVO GERAL	6
CAPÍTULO I. ESTRATÉGIAS DE AERAÇÃO MANUAL E AUTOMATIZADA DURANTE O ARMAZENAMENTO DE GRÃOS DE GIRASSOL EM SILOS.....	7
1.1. INTRODUÇÃO	9
1.2. MATERIAL E MÉTODOS	10
1.2.1. Manejo da aeração.....	10
1.2.2. Termometria	11
1.2.3. Qualidade dos grãos	12
1.2.4. Estatística.....	13
1.3. RESULTADOS E DISCUSSÃO	14
1.4. CONCLUSÃO	30
1.5. AGRADECIMENTOS	30
1.6. REFERÊNCIAS.....	30
CAPÍTULO II. TEOR DE ÁGUA DE EQUÍLIBRIO: USO DE SENSORES DE UMIDADE RELATIVA INTERGRANULAR E ISOTERMAS DE DESSORÇÃO DE DIFERENTES CULTIVARES DE SOJA.....	34
2.1. INTRODUÇÃO	36

2.2. MATERIAL E MÉTODOS	37
2.2.1. Descrição do sistema de termometria.....	37
2.2.2. Caracterização do teor de água em função da temperatura e umidade relativa	38
2.2.3. Comparativo da estimativa x determinação do teor de água dos grãos.....	40
2.2.4. Isotermas de dessecção de diferentes cultivares de soja.....	40
2.2.5. Comparação do teor de água estimado entre os modelos.....	43
2.2.6. Análise estatística	43
2.3. RESULTADOS E DISCUSSÃO	44
2.3.1. Caracterização do teor de água em função da temperatura e umidade relativa	44
2.3.2. Comparativo da estimativa x determinação do teor de água dos grãos.....	47
2.3.3. Isotermas de dessecção de diferentes cultivares de soja.....	49
2.3.4. Comparação do teor de água estimado entre os modelos.....	58
2.4. CONCLUSÃO	61
2.5. AGRADECIMENTOS	61
2.6. REFERÊNCIAS.....	61
CAPÍTULO III. ESTIMATIVA DA EFICIÊNCIA ENERGÉTICA DO PROCESSO AERAÇÃO DE GRÃOS ARMAZENADOS ATRAVÉS DE MACHINE LEARNING	67
3.1. INTRODUÇÃO	69
3.2. METODOLOGIA.....	70
3.2.1. Dados.....	70
3.2.2. Banco de dados primário	70
3.2.3. Banco de dados secundário	72
3.2.4. Obtenção dos modelos preditivos – Aprendizado de máquinas supervisionado.....	74
3.2.5. Obtenção dos <i>clusters</i> – Aprendizado de máquinas não supervisionado	75
3.2.6. Desenvolvimento da aplicação Web	76
3.2.6.1. Mineração dos dados	77
3.2.6.2. Modelagem dos dados	79
3.3. RESULTADOS E DISCUSSÃO	80
3.3.1. Eficiência da aeração.....	80
3.3.2. Aprendizado de máquinas supervisionado	83

3.3.3. Aprendizado de máquinas não supervisionado	87
3.3.4. Aplicação Web	90
3.4. CONCLUSÃO	93
3.5. AGRADECIMENTOS	93
3.6. REFERÊNCIAS.....	93
CONCLUSÃO GERAL.....	96

ÍNDICE DE TABELAS

	Página
CAPÍTULO I	
Tabela 1. Temperatura (°C), Teor de água (% b.u.), Massa específica aparente (M.E.A., kg m ³) e Índice de Peróxidos (meq O ₂ kg óleo ⁻¹) de grãos de girassol armazenados durante 90 dias em silo com aeração controlada manualmente (Silo 1) e silo com controladores automáticos de aeração (Silo 2).....	19
CAPÍTULO II	
Tabela 1. Modelos matemáticos utilizados para prever a secagem de produtos vegetais.....	42
Tabela 2. Resumo da análise de variância com os valores do quadrado médio para temperatura, umidade relativa (UR), teor de água de equilíbrio estimado (TAEE) e teor de água de equilíbrio determinado (TAED) da massa de grãos de soja armazenadas em silo metálico.....	46
Tabela 3. Valores médios da temperatura (°C), umidade relativa (%), teor de água de equilíbrio estimado (TAEE, % b.s.) e teor de água de equilíbrio determinado (TAED, % b.s.) de duas amostragens de grãos de soja armazenados em diferentes terços em silo metálico.....	47
Tabela 4. Resumo da análise de variância com os valores do quadrado médio para o teor de água de grãos de soja avaliados a partir da estimativa e determinação.....	48

Tabela 5. Valores médios do teor de água de grãos de soja obtidos a partir da estimativa do teor de água de equilíbrio (TAEE, % b.s.) e através da determinação do teor de água de equilíbrio (TAED, % b.s.).....	49
Tabela 6. Valores de atividade de água (a_w , decimal) das diferentes cultivares de soja em função do teor de água de equilíbrio (TAE, % b.s.) e da temperatura (°C).....	51
Tabela 7. Coeficientes de determinação (R^2 , %), erro médio relativo (P, %), erro médio estimado (SE, decimal) e <i>Qui</i> -quadrado (χ^2 , decimal) para os modelos ajustados às curvas das isotermas de dessorção de diferentes cultivares de soja	52
Tabela 8. Valores dos critérios de informação de Akaike (AIC) e critérios de informação bayesiano de Schwarz (BIC) para os modelos ajustados as isotermas de dessorção de cultivares de grãos de soja.....	54
Tabela 9. Valores dos coeficientes do modelo de Oswin Modificado ajustado às diferentes cultivares de soja.....	56
Tabela 10. Parâmetros estáticos do ajuste do modelo de Oswin Modificado com o valor dos coeficientes médio: erro médio relativo (P, %), erro médio estimado (SE, decimal) e <i>Qui</i> -quadrado (χ^2 , decimal) para as curvas de isotermas de dessorção de diferentes cultivares de soja	57
Tabela 11. Modelos obtidos a partir do ajuste das isotermas de diferentes cultivares de soja.....	59
Tabela 12. Resumo da análise de variância com os valores do quadrado médio para o teor de água de grãos de soja avaliados a partir das estimativas e determinação.....	60
Tabela 13. Teor de água de equilíbrio obtido a partir de diferentes métodos: estimativa pelo sistema (TAEE), estimativa pelos modelos matemáticos ajustados à diferentes cultivares de soja (TAEE mod1, mod2, mod3, mod4, mod5 e mod6), estimativa pelo modelo matemático médio (TAEE modMed) e determinado pelo método de estufa (TAED).....	61

CAPÍTULO III

Tabela 1. Resumo do tratamento dos dados para obtenção das respostas durante o processo de aeração.....	74
Tabela 2. Resultado do tratamento do banco de dados.....	82
Tabela 3. Indicadores do desempenho dos algoritmos classificadores, sendo a classificação correta das instâncias (CCI), classificação incorreta das instâncias (ICI), e	

os erros na matriz de confusão para eficiência (EF) e não eficiência (NEF) do processo de aeração.....	84
Tabela 4. Métricas para avaliação dos desempenhos dos algoritmos classificadores, sendo o coeficiente Kappa, erro relativo absoluto (RAE), raiz do erro quadrático médio (RMSE) e raiz do erro quadrático relativo (RRSE).....	87

ÍNDICE DE FIGURAS

	Página
CAPÍTULO I	
Figura 1. Sistema de termometria por termopares e digital em silos metálicos.....	13
Figura 2. Temperatura e umidade relativa externa, temperatura média da massa de grãos de girassol armazenados em silos metálicos com estratégia de aeração manual e automatizada (A); Temperatura média da massa de grãos de girassol no terço superior dos silos durante o armazenamento (B); Temperatura média da massa de grãos de girassol no terço médio dos silos durante o armazenamento (C); Temperatura média da massa de grãos de girassol no terço inferior dos silos durante o armazenamento (D).....	17
Figura 3. Teor de água (% b.u.) de grãos de girassol armazenados em silos metálicos com estratégia de aeração manual e automatizada (A); Teor de água (% b.u.) dos grãos de girassol no terço superior dos silos durante o armazenamento (B); Teor de água (% b.u.) dos grãos de girassol no terço médio dos silos durante o armazenamento (C); Teor de água (% b.u.) dos grãos de girassol no terço inferior dos silos durante o armazenamento (D).....	21
Figura 4. Massa específica aparente (kg m^{-3}) de grãos de girassol armazenados em silos metálicos com estratégia de aeração manual e automatizada (A); Massa específica aparente (kg m^{-3}) dos grãos de girassol no terço superior dos silos durante o armazenamento (B); Massa específica aparente (kg m^{-3}) dos grãos de girassol no terço médio dos silos durante o armazenamento (C); Massa específica aparente (kg m^{-3}) dos grãos de girassol no terço inferior dos silos durante o armazenamento (D).....	24
Figura 5. Índice de peróxidos ($\text{meq O}_2 \text{ kg óleo}^{-1}$) de grãos de girassol armazenados em silos metálicos com estratégia de aeração manual e automatizada (A); Índice de peróxidos	

(meq O ₂ kg óleo ⁻¹) dos grãos de girassol no terço superior dos silos durante o armazenamento (B); Índice de peróxidos (meq O ₂ kg óleo ⁻¹) dos grãos de girassol no terço médio dos silos durante o armazenamento (C); Índice de peróxidos (meq O ₂ kg óleo ⁻¹) dos grãos de girassol no terço inferior dos silos durante o armazenamento (D).....	26
Figura 6. Teor de proteína bruta (%) (A); Teor de óleo (%) (B); Índice de acidez (mg KOH g óleo ⁻¹) (C); e Índice de Iodo (mg I ₂ 100 g óleo ⁻¹) de grãos de girassol armazenados em silos metálicos com estratégia de aeração manual e automatizada.....	29

CAPÍTULO II

Figura 1. Esquema organizacional da termometria digital contendo sensores mistos de leitura de temperatura e umidade relativa.....	39
Figura 2. Isotermas de dessecção das cultivares Bônus (A), M-7739 (B), CD-2728 (C), NS-7300 (D), BRS-7960 (E) e CD-2737 (F) ajustadas ao modelo de Oswin Modificado.....	55
5	
Figura 3. Isotermas de dessecção de grãos estimado pelo modelo de Oswin Modificado com os valores médios dos coeficientes das diferentes cultivares.....	58

CAPÍTULO III

Figura 1. Esquema organizacional dos dados de temperaturas coletados de um silo com sistema de termometria digital.....	72
Figura 2. Organização do banco de dados primário.....	73
Figura 3. Banco de dados finalizado.....	75
Figura 4. Representação simplificada do projeto.....	77
Figura 5. <i>Dataset</i> após o pré-processamento.....	79
Figura 6. Análise estatística do <i>dataset</i>	79
Figura 7. Comparação das medidas de desempenho de algoritmos de classificação aplicados.....	81
Figura 8. Comportamento da temperatura da massa de grãos e ambiente para o nível S05 (A) e S04 (B) durante um processo de aeração de grãos de girassol armazenados.....	82
Figura 9. Árvore de decisão do algoritmo J48 para o processo de aeração de grãos de girassol armazenados.....	85

Figura 10. Classificações incorretas das instâncias pelo algoritmo SVM-Poly em função da eficiência da aeração (A) e em função do aquecimento direto da massa de grãos durante a aeração (B).....	86
Figura 11. Resultado da clusterização no aprendizado de máquinas não supervisionado em função do status da aeração.....	88
Figura 12. Representação dos <i>clusters</i> do aprendizado de máquinas não supervisionado em função da eficiência da aeração com o: Processo de aeração (A); Resfriamento da massa de grãos (B); Aquecimento da massa de grãos (C); Aquecimento direto à aeração (D).....	89
Figura 13. Média das métricas de avaliação do modelo.....	91
Figura 14. Matriz de correlação de Pearson.....	92
Figura 15. Tela de sistema aeração; B) site <i>web</i> disponibilizado em tempo real.....	93

LISTA DE SÍMBOLOS, SIGLAS, ABREVIATURAS E UNIDADES

%.....	Porcentagem
°C.....	Graus Celsius
^{ns}	Não significativo
&.....	Ampersand (e comercial)
χ^2	<i>Qui</i> -quadrado, decimal
\bar{a}	Média dos valores preditos
a, b, c e d.....	Coefficientes dos modelos
AIC.....	Crítérios de informação de Akaike
a_i	Valor predito para i-énésima observação
A_w	Atividade de água, decimal
Arff.....	Attribute-Relation File Format
BIC.....	Crítério de informação bayesiano de Schwarz
B.O.D.....	Biochemical oxygen demand
b.u.....	Base úmida, %
b.s.....	Base seca, %
CCI.....	Classificação correta das instâncias
cv.....	Cavalo vapor, kW
CV.....	Coefficiente de variação, %
EF.....	Eficiência
ERA.....	Erro relativo absoluto
et al.....	E outros, e colaboradores
FV.....	Fonte de variação
g.....	Grama
GLR.....	Graus de liberdade do modelo

h.....	Hora
I ₂	Iodo
ICI.....	Classificação incorreta das instâncias
kW.....	Quilowatt
KOH.....	Hidróxido de potássio
loglike.....	Logaritmo da função de verossimilhança
M.E.A.....	Massa específica aparente, kg m ⁻³
m ³	Metro cúbico
meq.....	miliequivalente
mg.....	miligrama
min.....	minuto
MLP.....	<i>Multilayer Perceptron</i>
Mod1.....	Modelo 1, referente a cultivar Bônus
Mod2.....	Modelo 2, referente a cultivar M-7739
Mod3.....	Modelo 3, referente a cultivar CD-2728
Mod4.....	Modelo 4, referente a cultivar NS-7300
Mod5.....	Modelo5, referente a cultivar BRS-7960
Mod6.....	Modelo 6, referente a cultivar CD-2728
modMed.....	Modelo médio
n.....	Número de observações
n ^o	Número, contagem
NEF.....	Não eficiência
O ₂	Dioxigênio
P.....	Erro médio relativo, %
p.....	Número de parâmetros
P01, P02, P03, P04, P05, P06, P07, P08, P09	Cabos de termometria em sequencial numérica
p _i	Valor da i-ésima observação
QM.....	Quadrado médio
R ²	Coefficiente de determinação
RF.....	<i>Random Forest</i>
RMSE.....	Raiz do erro quadrático médio

RRSE.....	Raiz do erro quadrático relativo
S/A.....	Sociedade Anônima
S01, S02, S03, S04, S05, S06 e S07	Sensores de 01 a 07 em sequencial numérica
SE.....	Erro médio estimado, decimal
SVM.....	<i>Support Vector Machine</i>
SVM-Poly....	<i>Support Vector Machine with Polynomial Kernel</i>
SVM-Radial.	<i>Support Vector Machine with Radial Kernel</i>
T.....	Temperatura, °C
TA.....	Teor de água, %.
TAED.....	Teor de água de equilíbrio determinado experimentalmente, %
TAEEd.....	Teor de água de equilíbrio estimado pela equação, %
Tambiente....	Teor de água, b.s.
TmedSensores	Teor de água inicial, b.s.
ton.....	Tonelada, kg.
Xe.....	Teor de água de equilíbrio, b.s.
Y.....	Valor experimental
Ŷ.....	Valor estimado pelo modelo

RESUMO

FERREIRA JUNIOR, WEDER NUNES. Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia Goiano, setembro de 2022. **Uso de sensores digitais para monitoramento da massa de grãos armazenados.** Orientador: Dr. Osvaldo Resende.

Os sensores digitais de temperatura e umidade relativa surgem como alternativa para monitoramento da temperatura da massa de grãos no interior de silos, apresentando simplicidade de instalação e utilização, manutenção mais simples e menos onerosa e facilidade de ser associado a automação do sistema de aeração. Assim, o objetivo da pesquisa foi estudar a eficiência de sensores digitais de temperatura orientando diferentes estratégias de aeração de grãos armazenados, verificar a eficiência e aplicabilidade de sensores digitais de umidade relativa intergranular no armazenamento de grãos, como estimar eficiência energética da aeração de grãos utilizando *Machine learning*. O experimento foi realizado em uma unidade armazenadora em dois silos metálicos verticais. A aeração nesses silos foi coordenada de forma manual no silo contendo termopares e foi automatizada no silo com sistema de termometria digital. Além dos dados da temperatura da massa de grãos, monitorou-se a qualidade dos grãos de girassol durante 90 dias de armazenamento em três alturas do silo (terços superior, médio e inferior). Para avaliar a eficiência de sensores de umidade relativa intergranular analisou-se em duas amostragens de grãos de soja no terço superior, médio e inferior do silo, para a temperatura da massa de grãos, umidade relativa intergranular, teor de água de equilíbrio estimado conforme dados coletados e teor de água dos grãos amostrados.

Realizou-se a comparação dos valores de teor de água obtidos pela estimativa do sistema usando a equação do equilíbrio higroscópico e pela determinação pelo método de estufa. Realizou-se a comparação da estimativa do teor de água de equilíbrio das diferentes equações com o método de determinação direta e estimado pelo sistema. Para investigar a eficiência energética do manejo da aeração e propor um modelo de estimativa a partir do *machine learning* utilizou-se um banco de dados do armazenamento de grãos de girassol. O banco de dados foi composto pelas informações da temperatura média do nível dos sensores, temperatura média do silo, temperatura ambiente externa, ocorrência de aeração, se houve: resfriamento, aquecimento, aquecimento direto durante aeração, e a eficiência energética do processo de aeração. A predição dos modelos pelos algoritmos e a obtenção dos *clusters*, no aprendizado de máquinas não supervisionado, respectivamente, foi processada pela ferramenta Weka 3.8.5. As estratégias de aeração influenciaram na temperatura da massa de grãos e, conseqüentemente, na qualidade do produto armazenado, principalmente no teor de água. Não se identificou influência das estratégias de aeração para o teor de proteína, óleo e índice de iodo do óleo dos grãos de girassol armazenados. A automatização da aeração contribui no aproveitamento de melhores condições climáticas para realização do processo, comparativamente ao sistema manual utilizado. As estratégias de aeração adotadas: resfriamento e conservação, apresentaram-se eficientes para amenizar a temperatura da massa de grãos no processo automatizado. O silo com aeração automatizada apresentou melhor conservação da qualidade dos grãos de girassol armazenados. O teor de água de equilíbrio estimado pelos dados fornecidos pelos sensores não diferenciou do teor de água determinado pela estufa. Os sensores digitais de temperatura e umidade relativa demonstraram-se eficientes, visto que contribuem para estimativa do teor de água de equilíbrio com precisão satisfatória. O modelo de estimativa da eficiência energética do processo de aeração demonstrou-se eficiente, identificando que durante a aeração de grãos de girassol armazenados a eficiência energética foi de 97,78%. O modelo proposto de avaliação de eficiência da aeração apresenta aplicabilidade de utilização em análises preditivas do processo. Dentre os algoritmos classificadores testados o SVM-Poly apresentou as melhores métricas e indicadores sendo esse recomendado para implementação em redes neurais.

PALAVRAS-CHAVE: Termometria, Umidade relativa intergranular, *Machine learning*, Modelagem.

ASBTRACT

FERREIRA JUNIOR, WEDER NUNES. Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia Goiano (Goiano Federal Institute of Education, Science and Technology), August 2018. **Use of digital sensors to monitor the mass of stored grains.** Advisor: Dr. Osvaldo Resende.

Digital temperature and relative humidity sensors emerge as an alternative for monitoring the grain mass temperature inside silos, as they are simple to install and use, simpler and less costly to maintain, and are easy to associate with the automation of the aeration system. Thus, the objective of the research was to study the efficiency of digital temperature sensors guiding different aeration strategies of stored grains, to verify the efficiency and applicability of digital sensors of intergranular relative humidity in the storage of grains, as well as to estimate energy efficiency of the aeration of grains. using Machine learning. The experiment was carried out in a storage unit in two metallic silos. The aeration in these silos was manually coordinated in the silo containing thermocouples, and was automated in the silo with a digital thermometry system. In addition to grain mass temperature data, the quality of sunflower grains was monitored during 90 days of storage in three silo heights (upper, middle and lower thirds). To evaluate the efficiency of intergranular relative humidity sensors, two samples of soybean grains were analyzed in the upper, middle and lower third of the silo, for grain mass temperature, intergranular relative humidity, equilibrium moisture content estimated according to data collected and moisture content of the sampled grains. The moisture content values obtained by estimating the system using the hygroscopic equilibrium

equation and by the oven method were compared. The estimation of the equilibrium moisture content of the different equations was compared with the method of direct determination and estimated by the system. To investigate the aeration management energy efficiency and propose an estimation model based on machine learning, a sunflower grain storage database was used. The database consisted of information about the average temperature of the sensors, average temperature of the silo, external ambient temperature, occurrence of aeration, if any: cooling, heating, direct heating during aeration, and the energy efficiency of the aeration process. The models prediction by the algorithms and the obtaining of the clusters, in unsupervised machine learning, respectively, were processed by the Weka 3.8.5. The aeration strategies influenced the grain mass temperature and, consequently, the quality of the stored product, mainly in the moisture content. No influence of aeration strategies was identified for protein, oil and iodine content of the stored sunflower oil. The automation of aeration contributes to the use of better climatic conditions to carry out the process, compared to the manual system used. The aeration strategies adopted: cooling and conservation, proved to be efficient to soften the grain mass temperature in the automated process. The silo with automated aeration better preserved the quality of stored sunflower seeds. The equilibrium moisture content estimated by the data provided by the sensors did not differ from the moisture content determined by the oven. Digital temperature and relative humidity sensors proved to be efficient, as they contribute to the estimation of equilibrium moisture content with satisfactory accuracy. The model for estimating the energy efficiency of the aeration process proved to be efficient, identifying that during the aeration of stored sunflower grains the energy efficiency was 97.78%. The proposed aeration efficiency assessment model has applicability for use in predictive analysis of the process. Among the classifier algorithms tested in the SVM-Poly presented the best metrics and indicators, which is recommended for implementation in neural networks.

KEYWORDS: Thermometry, Intergranular Relative Humidity, Machine Learning, Modeling.

INTRODUÇÃO

As evoluções técnicas observadas nas últimas décadas permitiram aumentar a produtividade e a produção nacional de grãos. O nível tecnológico adotado pelos agricultores brasileiros é responsável, em parte, pelo aumento da produtividade. Quanto a produção nacional, não somente o nível tecnológico é o responsável, mas o aumento da área cultivada (VENDRAMIN, 2015).

No período da colheita as condições dos grãos não são propícias para seu armazenamento, possuem teor de umidade e impurezas que ocasionam grande perda se não realizada as devidas precauções na conservação do produto (RECH, 2018). O processo de secagem é indispensável, destinado a remover o excesso de água até o limite conveniente, com responsabilidade de não alterar as propriedades físicas, químicas e biológicas do produto (WEBER, 2005).

O principal método de conservação é a aeração, que é utilizada para modificar o microclima da massa dos grãos armazenados em silos verticais ou horizontais, para evitar o crescimento de organismos vivos que prejudicam a qualidade do grão (STEIDLE NETO & LOPES, 2015). A aeração difere-se da secagem, pois o objetivo da secagem é a remoção da água do interior do produto, e para isso utiliza maiores quantidades de fluxo de ar (JONES *et al.*, 2012).

O processo de aeração de produtos armazenados é considerado um dos processos pós-colheitas mais satisfatórios, econômicos, eficiente e preventivo (SERNASALDIVAR & GARCÍA-LARA, 2015). Para Silva (2008), as técnicas de conservação de grãos fundamentam-se na manipulação dos fatores intrínsecos e extrínsecos a massa de grãos, visando à preservação da qualidade dos produtos armazenados.

A aeração é utilizada com sucesso visando o resfriamento ou melhoria das condições do armazenamento de sementes e/ou grãos com temperaturas ambientais, e as condições do ar ambiente durante as horas mais frias da noite ou do dia e nas estações mais frias do ano permitem (NAVARRO *et al.*, 2012). Seu uso tem sido concentrado primeiramente em grãos sujeitos a desenvolverem bolsões de calor, por exemplo, grãos de soja e milho, e para manter a qualidade de produtos de alto valor agregado, como sementes em geral (MAIER & NAVARRO, 2002).

Segundo Lasseran (1981), a aeração tem como objetivo principal o resfriamento e a manutenção dos grãos e num segundo momento a secagem. A aeração é o processo de injeção de ar no interior da massa, pode ser realizada com o ar em sua condição natural ou alterada quanto à temperatura ou umidade relativa do ar. No primeiro caso a aeração é empregada para buscar equalizar a temperatura da massa de grãos com a do ar ambiente. No segundo caso, é a promoção da redução da temperatura da massa de grãos a valores inferiores aos ambientais. Os grãos são maus condutores de calor, apresentam pouca troca térmica com o ambiente exterior (JUSTICE & BASS, 1978).

No entanto, a aeração não é um processo tão simples, pois alguns fatores podem comprometer a eficiência do processo, sendo a principal característica a heterogeneidade do material armazenado, propriedades físicas do grão e o nível de compactação no silo, a baixa condutividade térmica (KHATCHATORIAN *et al.*, 2016; BINELO *et al.*, 2019).

A operação de um sistema de aeração pode ser manual ou automatizada com o uso de controladores, termostatos e/ou umidostatos, que consideram, respectivamente, a temperatura e a umidade relativa do ar como parâmetros (NASCIMENTO & QUEIROZ, 2011). Com isso, torna-se muito importante estudos sobre termometria nas unidades armazenadoras, visto que o sistema possui grande influência para monitoramento das condições de armazenamento, como também podem estar relacionadas com o manejo da aeração de maneira automatizada (STEIDLE NETO & LOPES, 2015).

O sistema de aeração é fundamentado a partir de sensores de termometria que monitoram a temperatura da massa de grãos e são dispostos de forma regular nos silos. No entanto, apenas o monitoramento não é totalmente útil para a segurança do produto estocado, o sistema de termometria deve estar associado a estratégias que visem o manejo dos grãos armazenados para manter a qualidade do produto e reduzir ou prevenir a perda pós-colheita (PLUMIER & MAIER, 2021)

A instalação do sistema é feita com a fixação dos cabos em pontos estratégicos na massa de grãos (PLUMIER & MAIER, 2021). Combinado ao sistema de termometria, é

imprescindível ter o monitoramento da temperatura e da umidade relativa do ar ambiente (D'ARCE, 2011). Os termopares podem ainda indicar a estimativa do teor de água dos grãos, fator relevante para considerar a qualidade do material (PLUMIER & MAIER, 2021).

Alguns sensores mais modernos apresentam a capacidade de monitoramento da umidade relativa intergranular, sendo possível estimar o teor de água dos grãos armazenados. No entanto no Brasil, a Instrução Normativa que regulamenta o Sistema Nacional de Certificação de Unidades armazenadoras não estabelece a necessidade de monitoramento dessa condição (BRASIL, 2011), fazendo com que a situação desses sensores no país seja incipiente.

O sistema de termometria mais comum é composto por cabos de aço equipados com sensores tipo termopar ou termistor, distanciados verticalmente, geralmente entre 1,82 e 2,09 m, dependendo do tamanho do silo (PLUMIER & MAIER, 2021). Sobre o uso desses termostatos a Instrução Normativa nº 29, de 08 de junho de 2011, do MAPA delimita que o número de pontos de leitura deve ser compatível com o tipo da estrutura e a capacidade estática da unidade armazenadora. Devem apresentar, no mínimo, um ponto de leitura a cada 150 m³ de capacidade estática, sendo os pontos uniformemente distribuídos (BRASIL, 2011).

Com o tempo os sensores do tipo termopar podem se tornar imprecisos, sendo uma realidade de muitas unidades armazenadoras, em que muitos silos apresentam cabos que não funcionam, ou estejam apresentados dados inconfiáveis (PLUMIER & MAYER, 2021). Com isso, surge a necessidade de utilização de sensores mais modernos, que permitem maior controle e supervisão das condições dos grãos, para isso, sensores associados ao conceito de IoT – *internet of things* (Internet das coisas) apresentam com boa solução (AYRES et al., 2020).

Diversos trabalhos vêm sendo executado para desenvolvimento de conjuntos de termometria digital utilizando diferentes tipos de sensores, conceitos de IoT, computação em nuvem, softwares, incluindo sistemas de baixo custo (SCHIAVON *et al.*, 2019; AYRES *et al.*, 2020; LOPES *et al.*, 2022).

Sabendo-se da importância da aeração para o manejo de grãos armazenados e conseqüentemente a importância do sistema de termometria, faz-se necessário estudos que contemplem a área de inovações tecnológicas no ramo da termometria a fim de fornecer informações para produtores rurais, unidades armazenadoras, órgãos públicos de interesse, empresas privadas e pesquisadores.

Referências bibliográficas

- AYRES, G. D. J.; NASCIMENTO, J. W. B.; FRANCISCO, P. R. M. Sistema integrado de monitoramento de produtos armazenados em silos (SimSilo). In: Francisco, P. R. M. Ciência, desenvolvimento e inovação na engenharia e agronomia brasileira. EPGRAF: Campina Grande, 2020. P. 126-139.
- BINELO, M. O.; FAORO, V.; KATHATOURIAN, O. A.; ZIGANSHIN, B. Airflow simulation and inlet pressure profile optimization of a grain storage bin aeration system. **Computers and Electronics in Agriculture**, v. 164, p. 1-9, 2019.
- BRASIL, Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento (MAPA). **Instrução normativa nº 29, de 08 de junho de 2011**. Diário Oficial da União, Brasília, 2011.
- D'ARCE, M. A. B. R. Pós-colheita e armazenamento de grãos. 2011. Disponível em: <https://sinueloagropecuaria.com.br/wp-content/uploads/2016/09/armazenamento-de-graos-1.pdf> Acessado em 01 de Setembro de 2022.
- JONES, C.; CASADA, M.; LOEWER, O. J. **Drying, handling, and storage of raw commodities**. In: PHILLIPS, T. W., HAGSTRUM, D. M., CUPERUS, G. (Eds.). Stored Product Protection. Kansas State University: Manhattan, 2012; pp. 101–120.
- JUSTICE, O.L.; BASS, L.N. **Principles and practices of seed storage**. Washington: USDA/SEA.1978, 289p.
- KHATCHATOURIAN, O. A.; BINELO, M. O., FAORO, V.; TONIAZZO, N. A. Three-dimensional simulation and performance evaluation of air distribution in horizontal storage bins. **Biosystems Engineering**, v. 142, p. 42–52, 2016.
- LASSERAN, J.C. **Aeração de grãos**. Viçosa: Centro Nacional de treinamento de Armazenagem, 1981. 128p.
- LOPES, T. T.; CAMUSSO, D.; FERNANDES, C. L. M. F. Monitoramento do ar em ambientes de armazenamento de sementes usando internet das coisas e computação em nuvem. **Revista Brasileira de Mecatrônica**, v. 4, n. 4, p. 20-47, 2022.
- MAIER, D.E.; NAVARRO, S. **Chilling of grain by refrigerated air**. In: S. NAVARRO; R. ROYES (eds.) The mechanics and physics of modern grain aeration management. Boca Raton: CRC Press, p.489-560. 2002.
- NASCIMENTO, V. R. G.; QUEIROZ, M. R. Estratégias de aeração de milho armazenado: temperatura e teor de água. **Engenharia Agrícola**, v. 31, n. 4, p. 745-759, 2011.

NAVARRO, S.; NOYESM R. T.; CASADA, M.; ARTHUR, F. H. **Grain Aeration**. In: PHILLIPS, T. W., HAGSTRUM, D. M., CUPERUS, G. (Eds.). *Stored Product Protection*. Kansas State University: Manhattan, 2012; pp. 12–134.

PLUMIER, B.; MAIER, D. Effect of temperature sensor numbers and placement on aeration cooling of a stored grain mass using a 3D finite element model. **Agriculture**, v. 11, n. 3, p. 1-14, 2021.

RECH, F. L. A. **Modelagem matemática da transferência de calor em silos de soja**. Dissertação ([estrado em Modelagem Matemática]). Universidade Regional do Noroeste do Estado do Rio Grande do Sul (UNIJUI): Ijuí, 2018.

SERNA-SALDIVAR, S. O.; GARCÍA-LARA, S. **Cereals: storage**. In: B. CABALLERO, B.; FINGLAS, P.; TOLDRA, F. (Eds.). *Encyclopedia of food and health*. Amsterdam: Elsevier, 2015. pp. 712-717.

SCHIAVON, R. A.; NOGUEIRA, I. S.; BORGES, G. B.; HOLANDA, H. S.; CASTRO, K. K. Arduino uma tecnologia de baixo custo para termometria de grãos armazenados. **Brazilian Journal of development**, v. 5, n. 10, p. 18825-18839, 2019.

SILVA, J. S. E. **Secagem e Armazenamento de produtos Agrícolas**. Viçosa: Editora Aprenda Fácil. 2008. 560p.

STEIDLE NETO, A. J.; LOPES, D. C. Thermistor based system for grain aeration monitoring and control. **Computers and Electronics in Agriculture**, v. 116, s/n, p. 45-54, 2015.

VENDRAMIN, T. **Incidência de danos mecânicos e qualidade fisiológica de sementes de soja**. 2015. 32f. Dissertação (Mestrado em Ciência e Tecnologia de Sementes) apresentada à Universidade Federal de Pelotas, Pelotas, 2015.

WEBER, E. A. **Excelência em Beneficiamento e Armazenagem de Grãos**. Canoas: Salles. 2005. 586p.

OBJETIVO GERAL

Estudar a eficiência de sensores digitais de temperatura orientando diferentes estratégias de aeração de grãos armazenados, verificar a eficiência e aplicabilidade de sensores digitais de umidade relativa intergranular no armazenamento de grãos, assim como estimar eficiência energética da aeração de grãos utilizando *Machine learning*.

CAPÍTULO I. ESTRATÉGIAS DE AERAÇÃO MANUAL E AUTOMATIZADA DURANTE O ARMAZENAMENTO DE GRÃOS DE GIRASSOL EM SILOS

(Normas de acordo com a revista Ciência Agronômica)

RESUMO: Objetivou-se neste trabalho identificar a influência de estratégias de aeração manual e automatizada orientadas por sistemas de termometria por termopares e sensores digitais, respectivamente, na qualidade de grãos de girassol armazenados em diferentes alturas em silo metálico. O experimento foi realizado em uma unidade armazenadora em dois silos metálicos verticais. A aeração nesses silos foi coordenada de forma manual no silo contendo termopares e foi automatizada no silo com sistema de termometria digital. Além dos dados da temperatura da massa de grãos, monitorou-se a qualidade dos grãos de girassol durante 90 dias de armazenamento em três alturas do silo (terços superior, médio e inferior). As estratégias de aeração influenciaram na temperatura da massa de grãos e, conseqüentemente, na qualidade do produto armazenado, principalmente no teor de água. Não se identificou influência das estratégias de aeração para o teor de proteína, óleo e índice de iodo do óleo dos grãos de girassol armazenados. A automatização da aeração contribuiu no aproveitamento de melhores condições climáticas para realização do processo, comparativamente ao sistema manual utilizado. As estratégias de aeração adotadas: resfriamento e conservação, apresentaram-se eficientes para amenizar a temperatura da massa de grãos no processo automatizado. O silo com aeração automatizada apresentou melhor conservação da qualidade dos grãos de girassol armazenados. O silo com aeração controlada manualmente apresentou redução de 11,55%

no teor de água dos grãos. Os grãos armazenados no terço médio do silo tendem a apresentar melhor qualidade.

Palavras-chave: *Helianthus annuus* L. Termometria. Sensores. Termopares.

CHAPTER 1. MANUAL AND AUTOMATED AERATION STRATEGIES DURING THE STORAGE OF SUNFLOWER GRAINS IN SILOS

ABSTRACT: The objective of this paper was to identify the influence of manual and automated aeration strategies guided by thermometry systems using thermocouples and digital sensors, respectively, on the quality of sunflower grains stored at different heights in a metallic silo. The experiment was carried out in a storage unit in two metal silos, the aeration in these silos was manually coordinated in the silo containing thermocouples, and in the silo with a digital thermometry system, the aeration was automated. In addition to the grain mass temperature data, the sunflower grains quality was monitored during 90 days of storage in the upper, middle, and lower third of each silo. The aeration strategies influenced the grain mass temperature and, consequently, the quality of the stored product, mainly in the moisture content. No influence of the aeration strategies was identified for protein, oil and iodine content of the oil in the stored sunflower grains. The automation of aeration contributes to the use of better climatic conditions to carry out the process, compared to the manual system used. The adopted aeration strategies: cooling and conservation, were efficient to reduce the grain mass temperature in the automated process. The automated aeration silo better preserved the quality of the stored sunflower grains. The manually controlled aeration silo showed an 11.55% reduction in moisture content. Grains stored in the middle third of the silo tend to have better quality.

Keywords: *Helianthus annuus* L. Thermometry. Sensors. Thermocouples.

1.1. INTRODUÇÃO

Durante a pós-colheita de grãos o conjunto de técnicas adotados devem assegurar a qualidade do produto, dentre essas têm-se a secagem, e, a aeração de produtos armazenados. A aeração tem por objetivo manter a temperatura da massa de grãos e umidade relativa do ar intergranular a níveis ideais, a fim de proporcionar ao produto teor de água de equilíbrio seguro (Lopes e Steidle Neto, 2019; Panigrahi *et al.*, 2020).

A aeração é realizada utilizando o ar externo insuflando-o para o interior do silo, para isso, deve-se atentar as diferenças entre a temperatura da massa de grãos e da temperatura externa. Portanto, o clima local afeta no manejo da aeração, ou seja, as estratégias de aeração são amplamente influenciadas pelas mudanças climáticas (Lopes e Steidle Neto, 2019).

Para realização da aeração deve-se aproveitar as melhores condições do ar externo para o processo ser econômico e preservar a qualidade do produto (Panigrahi *et al.*, 2020). No estado de Goiás, Brasil, o armazenamento de grãos de girassol inicia-se com o inverno, na segunda quinzena de junho, período caracterizado por apresentar noites longas e de baixas temperaturas e umidade relativa. Deve-se aproveitar os períodos frios no início do armazenamento desse produto para conservar sua qualidade (Li *et al.*, 2020), visto que o armazenamento dos grãos de girassol costuma estender até o período de verão brasileiro.

O monitoramento da temperatura da massa de grãos durante o armazenamento é importante para viabilizar corretamente o manejo da aeração. Esse monitoramento pode ser realizado através de cabos contendo termopares ou sensores digitais. A operação de um sistema de aeração pode ser manual ou automatizada com o uso de controladores e/ou termostatos que consideram a temperatura e a umidade relativa do ar como parâmetros (Steidle Neto e Lopes, 2015).

Como o fluxo de ar da aeração ascendente os grãos presentes no terço inferior do silo tendem a resfriar primeiramente, pois essa região está mais próxima dos dutos de entrada de ar no silo (Li *et al.*, 2020). A distribuição do ar durante a aeração deve ser homogênea, sendo a uniformidade do processo afetada pelo espaçamento dos dutos, vazão do fluxo de ar, altura da coluna dos grãos, porosidade intergranular, teor de impurezas, propriedades físicas e compactação da massa de grãos (Goneli *et al.*, 2020; Panigrahi *et al.*, 2020; Rocha *et al.*, 2020).

A desuniformidade da aeração pode promover secagem excessiva em regiões próxima as saídas de ar, e ser ineficiente para outras zonas no interior do silo (Binelo *et al.*, 2019). Alterações na temperatura da massa de grãos devem ser monitoradas durante o armazenamento, pois podem indicar formação de bolsas de calor pelas alterações promovidas por insetos, microrganismos, e aumento da taxa respiratória dos grãos, afetando diretamente a quantidade e qualidade do produto armazenado (Mohapatra *et al.*, 2017).

Considerando a importância da aeração em condições seguras ao armazenamento de grãos, objetivou-se neste trabalho identificar a influência de estratégias de aeração manual e automatizada orientadas por sistemas de termometria por termopares e sensores digitais, respectivamente, na qualidade de grãos de girassol armazenados em diferentes alturas em silo metálico.

1.2. MATERIAL E MÉTODOS

1.2.1. Manejo da aeração

O armazenamento dos grãos de girassol foi realizado na safra 2018/19 durante os meses de junho a novembro de 2019, totalizando aproximadamente 130 dias. Foram utilizadas aproximadamente 6.000 toneladas de grãos de girassol divididos em dois silos verticais metálicos em uma unidade armazenadora de grãos no município de Morrinhos, Goiás, Brasil.

Cada um dos silos foi composto por um sistema de termometria específico em que os dados da temperatura da massa de grãos foram utilizados no manejo da aeração. Um dos silos foi equipado com sistema de termometria contendo 100 termopares divididos em 9 cabos, considerando o volume total do silo de 8.466,81 m³, tem-se um ponto de leitura para cada 84,7 m³ de grãos. O outro silo de mesmo volume foi equipado com 128 sensores digitais divididos em 9 cabos, apresentando um sensor para cada 66,0 m³ de grãos. Assim, a quantidade de pontos de termometria utilizados neste trabalho esteve dentro do limite mínimo exigido pela Instrução Normativa nº 29, que exige pelo menos um ponto a cada 150 m³ de volume (BRASIL, 2011).

Cada um dos silos continha dois ventiladores centrífugos de pás curvadas para frente impulsionado por motor trifásico com potência de 26 cv (19,12 kW), possibilitando um fluxo de ar (vazão específica) de aproximadamente 0,05 m³ min⁻¹ ton⁻¹ de grão. Os silos utilizados eram de fundo plano contendo área dos dutos de aeração espalhados no interior do silo. A aeração foi programada manualmente no silo contendo termopares com

auxílio de temporizadores, e no silo com sistema de termometria digital a aeração foi automatizada. Além dos dados da temperatura da massa de grãos foram monitorados os dados ambientais de temperatura e umidade relativa por meio de uma estação meteorológica para evidenciar as condições climáticas favoráveis a realização das estratégias de aeração.

Inicialmente, os primeiros 40 dias de armazenamento foram destinados ao enchimento simultâneo dos silos e paralelamente foi adotada a aeração visando o resfriamento da massa de grãos, visto que o inverno local propiciou condições favoráveis a utilização deste manejo. Os ventiladores foram ligados quando a temperatura externa se apresentou entre 3 e 4°C menor do que a média da temperatura interna, da massa de grãos, bem como em condições sem índice pluviométrico e exceto no horário de pico energético, entre 17h30 e 20h30.

Na segunda quinzena do mês de agosto a estratégia de aeração foi alterada visando a conservação dos grãos de girassol, as condições listadas no manejo da aeração visando o resfriamento foram utilizadas, sendo que a diferença entre o ar externo e a média da temperatura interna foi reduzida para 3°C para o acionamento do sistema. Além disso, foram adicionadas duas outras condições; considerar o aquecimento sensível do ar externo ao passar pelos ventiladores e o equilíbrio higroscópico dos grãos de girassol às condições do ar intergranular, evitando a secagem e o reumedecimento excessivo dos grãos.

Essa estratégia de aeração foi mantida durante os 90 dias de armazenamento dos grãos de girassol, período ao qual a qualidade do produto ficou sob monitoramento. Os dados climatológicos e os quantitativos de tempo de funcionamento dos ventiladores foram registrados e utilizados para justificar as mudanças na temperatura da massa de grãos, e quaisquer alterações na qualidade do produto.

1.2.2. Termometria

Os dois silos metálicos apresentam corpos cilíndricos e topo cônico, com diâmetro de 22 m e altura total de 26,44 m. Para o experimento utilizou-se apenas a parte cilíndrica dos silos, de aproximadamente 20 m de altura, para o armazenamento dos grãos de girassol, correspondendo ao volume aproximado de 7.675 m³. Um dos silos contou com sistema de termometria por termopares separados por 9 cabos no silo, contendo medidores distanciados entre si verticalmente a cada 1,8 m por cabo. O outro silo contou

com o sistema de termometria por sensores digitais, sendo esses divididos em 9 cabos no interior do silo, os sensores foram espaçados a cada 1,5 m ao longo do cabo (Figura 1).

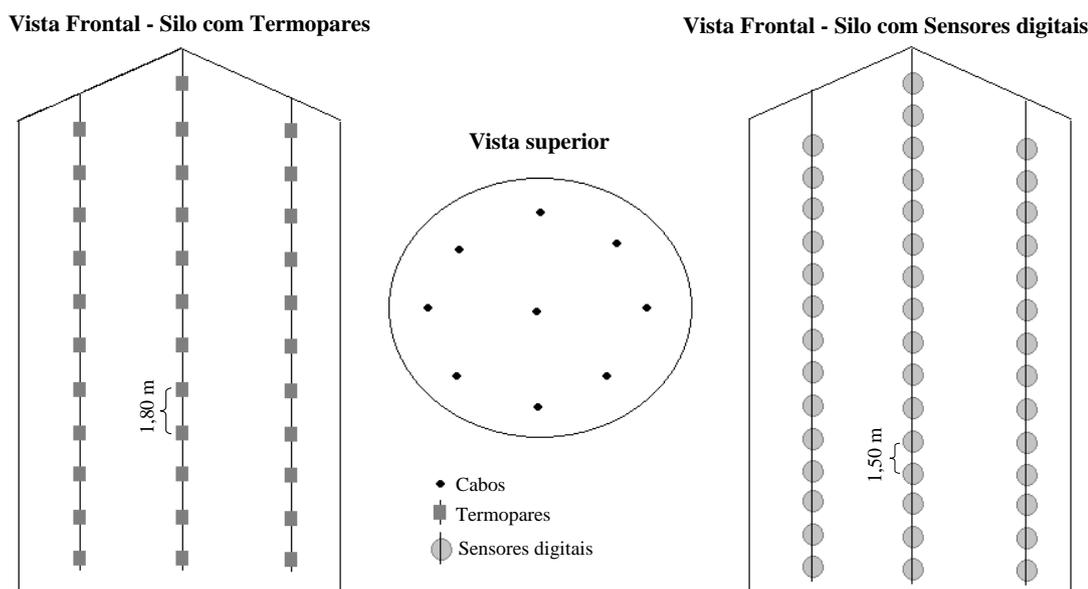


Figura 1. Sistema de termometria por termopares e digital em silos metálicos.

As alterações da temperatura da massa de grãos foram monitoradas durante 90 dias de armazenamento do girassol. Para avaliar os efeitos da mudança da temperatura da massa de grãos, em ambos os silos desconsideraram 2 metros de grãos armazenados na camada superior, totalizando em a área experimental de 18 metros que foi dividida em 3 regiões de 6 metros de altura cada uma, sendo essas denominadas como terços: superior, médio e inferior. Os diferentes terços de cada um dos silos foram comparados entre si durante o armazenamento.

As repetições experimentais foram compostas de dados de termometria agrupados em decêndios por época de armazenamento, sendo cada época de armazenamento composta por 30 dias, ou seja, cada bloco apresentou a média da temperatura da massa de grãos num período de 10 dias para cada terço dos dois silos. Com exceção da época zero em que não se utilizou a termometria dos 30 dias antecedentes, e apenas os valores agrupados de 3 dias anteriores ao início do experimento foram considerados.

1.2.3. Qualidade dos grãos

A qualidade dos grãos foi monitorada num período de 90 dias, relacionado ao tempo do uso da estratégia de aeração visando a conservação dos grãos. Coletaram 3 amostras por terço, sendo que essas foram coletadas durante todo o armazenamento nos períodos de 0, 30, 60 e 90 dias a partir do início da estratégia de aeração visando a conservação dos grãos. Foram coletadas amostras nos 3 terços (superior, médio e inferior) de cada silo,

separadamente. No terço superior as amostras foram coletadas à profundidade de 2,1 m, em cinco pontos localizados próximos aos pêndulos de termometria, compondo uma amostra composta, com o auxílio de um calador manual composto de 3 estágios. No terço médio para obter a amostra composta, os grãos também foram coletados em cinco pontos próximos aos pêndulos de termometria, sendo que estas foram retiradas na profundidade de 10,0 m com o auxílio de sonda pneumática. No terço inferior as amostras foram retiradas com auxílio de um caneco pelicano que coletou os grãos nas três saídas dos transportadores helicoidais, utilizados na descarga dos grãos, coletando amostras no intervalo de 30 segundo para compor os blocos amostrais.

Para cada coleta foram retirados, aproximadamente 5,0 kg de grãos, sendo amostras seguidas homogeneizadas e reduzidas a 1,0 kg em homogeneizador tipo Boerner. Os grãos foram analisados quanto ao teor de água, massa específica aparente, teor de óleo e proteína, e quanto a qualidade química do óleo extraído. Durante as análises das amostras avaliou-se a presença de insetos vivos, e estruturas de microrganismos perceptíveis a olho nu.

Para determinar o teor de água foi utilizado o método da estufa a $105 \pm 3^\circ\text{C}$ durante 24 h (Brasil, 2009), com 10 g por amostra. A massa específica aparente, expressa em kg m^{-3} , foi determinada por meio de um de kit peso hectolitro, em volume de um litro. A proteína bruta foi determinada pelo método que consiste na determinação do nitrogênio total (Silva e Queiroz, 2002). O teor de óleo foi extraído em Soxhlet e a partir desse, determinou-se a qualidade por meio do índice de acidez, índice de iodo e índice de peróxidos (IAL, 2008).

1.2.4. Estatística

Os dados de termometria e da qualidade dos grãos armazenados foram avaliados em esquema fatorial $2 \times 3 \times 4$, sendo dois silos com diferentes estratégias de aeração: manual (sistema de termometria por termopares) e automatizado (sistema de termometria digital), 3 regiões por silo (terços: superior, médio e inferior) e 4 tempos de armazenamento (0, 30, 60 e 90 dias), em delineamento em blocos ao acaso. Para efeito da caracterização geral da massa de grãos avaliou-se também o efeito da interação entre as estratégias de aeração (manual e automatizada) e o tempo de armazenamento, esquema fatorial 2×4 . Os dados foram analisados por meio da análise de variância, sendo as médias comparadas pelo teste de Tukey, adotando-se o nível de significância de 5%.

1.3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

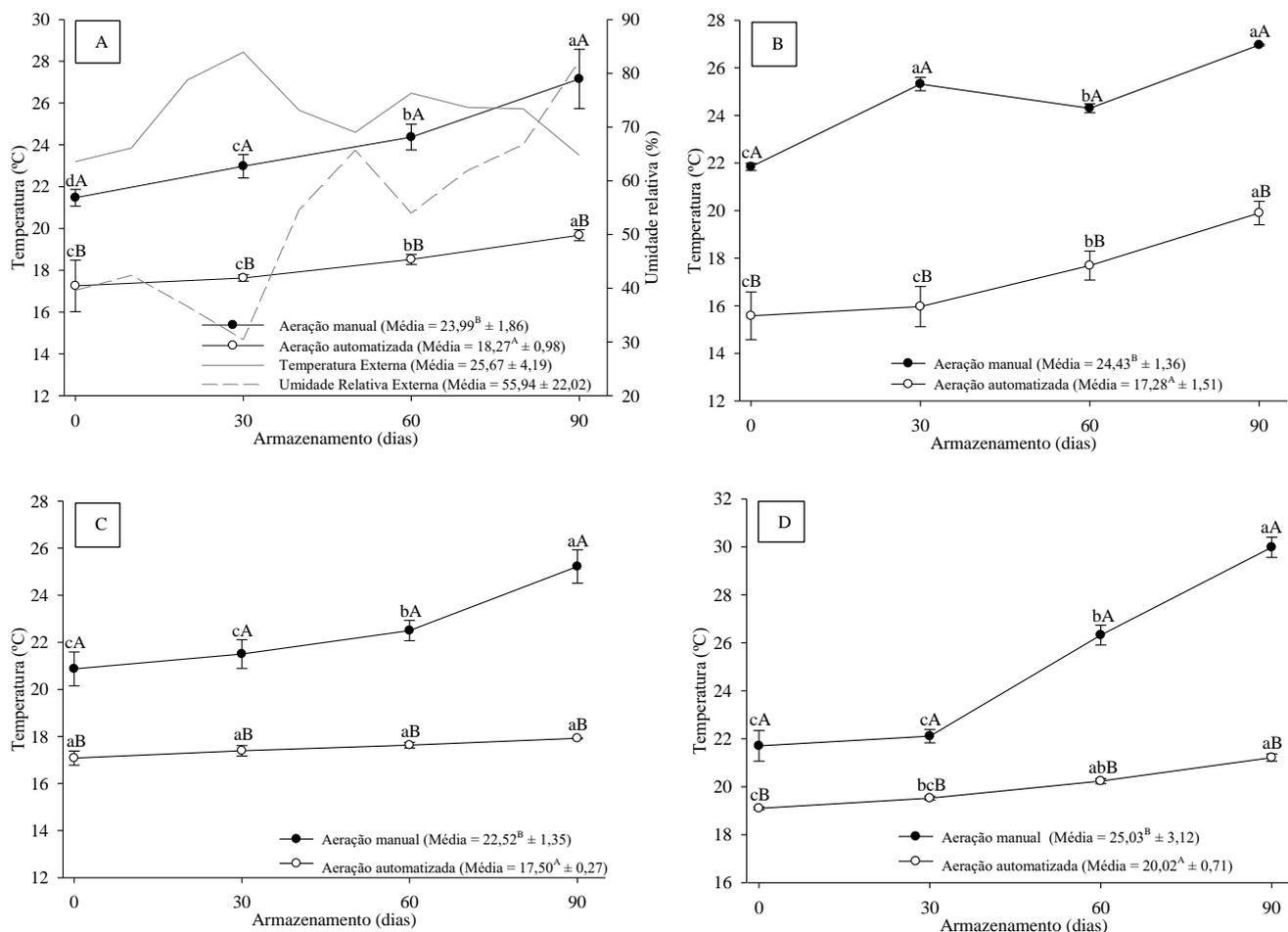
Nas condições programadas para realização do processo de aeração visando o resfriamento foram realizadas 111 horas no silo com sistema automatizado, enquanto no silo com aeração controlada de forma manual foram realizadas 73 horas de aeração, ou seja, quantidade essa 34% inferior ao silo com sistema automatizado. Justifica-se essa diferença pela utilização de um processo automatizado no silo pela presença dos sensores, cuja programação do sistema estabelece que o manejo da aeração seja dinâmico e aproveite o potencial das condições ambientes para realizar a aeração dos grãos.

Ressalta-se que no início do armazenamento a temperatura média dos grãos armazenados era de $20,1 \pm 0,73^{\circ}\text{C}$ e $18,8 \pm 0,86^{\circ}\text{C}$, com temperaturas máximas de $27,1$ e 29°C em alguns pontos na massa de grãos nos silos com sistema automatizado e manual, respectivamente, validando a necessidade de resfriamento dos grãos em ambos os silos para a temperatura e teor de água dos grãos a níveis seguros (Steidle Neto e Lopes, 2015). Ao final do período do manejo de aeração visando o resfriamento dos grãos observou-se que no silo com controlador automático a média da temperatura da massa de grãos era de $17,25 \pm 1,23^{\circ}\text{C}$ representando decréscimo de $2,8^{\circ}\text{C}$ na temperatura média do produto armazenado, durante o período de aeração. No silo operado manualmente o resultado do processo de resfriamento foi menos eficiente, visto que a média final da temperatura dos grãos foi de $21,47 \pm 0,40^{\circ}\text{C}$, representando aumento médio de $2,67^{\circ}\text{C}$ na massa de grãos.

Este resultado contraditório evidencia que o processo de aeração coordenado por colaboradores na Unidade Armazenadora demonstrou menor precisão, tampouco dinâmico no sentido de aproveitar as melhores condições para realização da aeração durante o período de armazenamento. O processo de aquecimento dos grãos no manejo de aeração pode ser atribuído à observação, por parte do funcionário, em atentar apenas na presença de pontos de aquecimento, e não em englobar na decisão de ligar os ventiladores, a observação da temperatura média do produto estocado. Além disso, quando acionados os ventiladores do silo com termopares permaneciam ligados durante todo o período noturno (00h00 a 07h30), períodos esses que nem sempre eram favoráveis à execução da aeração e que podem induzir a gasto desnecessário de energia elétrica.

Durante o período do armazenamento supervisionado, utilizando o manejo de aeração visando a conservação dos grãos, as médias da temperatura externa e da umidade relativa foram de $25,67 \pm 4,19^{\circ}\text{C}$ e $55,94 \pm 22,02$, respectivamente (Figura 2A). As

condições climáticas do ar externo demonstraram-se propícias para realizar a aeração durante a segunda quinzena do armazenamento para o silo automatizado. Durante esse período os ventiladores desse silo foram acionados por 15h24min. , em horários noturnos, em que foram visualizadas as menores temperaturas do ar, após esse período as condições não demonstraram propícias para realização da estratégia de aeração proposta.



Médias seguidas pela mesma letra minúscula para cada estratégia de aeração ao longo do armazenamento, e letras maiúsculas semelhantes entre as estratégias de aeração para cada época, não diferem entre si, a 5% de significância.

Figura 2. Temperatura e umidade relativa externa, temperatura média da massa de grãos de girassol armazenados em silos metálicos com estratégia de aeração manual e automatizada (A); Temperatura média da massa de grãos de girassol no terço superior dos silos durante o armazenamento (B); Temperatura média da massa de grãos de girassol no terço médio dos silos durante o armazenamento (C); Temperatura média da massa de grãos de girassol no terço inferior dos silos durante o armazenamento (D).

Nota-se que as 15h24min. de aeração realizadas no silo automatizado foram suficientes para manter a temperatura dos grãos durante os primeiros 30 dias de

armazenamento (Figura 2A), em que as médias das temperaturas durante esse período não diferiram entre si. Após este período, observa-se na Figura 2A aquecimento do produto, apresentando temperatura média final de $19,68 \pm 0,28^{\circ}\text{C}$, totalizando o aquecimento de $2,43^{\circ}\text{C}$ na massa de grãos durante esse período de 90 dias de armazenamento. Com esses resultados é possível validar a eficiência das estratégias de aeração adotadas para este silo, visto que a média da temperatura dos grãos de girassol foram inferiores a temperatura inicial dos grãos, de $20,1 \pm 0,73^{\circ}\text{C}$ quando se iniciou a aeração visando o resfriamento do produto.

Na Figura 2A, observa-se que nos silos com aeração manual foi observado comportamento linear crescente na temperatura da massa de grãos. Esse comportamento se deve à ausência de aeração de conservação durante esse período de armazenamento. Como o processo de aeração nesse silo foi manual não houve aproveitamento de alguns períodos noturnos favoráveis a execução do processo de aeração. A temperatura média dos grãos de girassol armazenados nesse silo foi de $27,15 \pm 1,42^{\circ}\text{C}$, indicando o aumento de $5,69^{\circ}\text{C}$ durante o período de armazenamento monitorado. Considerando a temperatura inicial durante a aeração de resfriamento o aumento foi de $8,36^{\circ}\text{C}$ desde o início do armazenamento.

Durante todo o período de armazenamento o silo com aeração automatizada apresentou temperatura inferior ao silo com aeração controlada manualmente (Figura 2A), o mesmo resultado pôde ser observado no terço superior (Figura 2B), terço médio (Figura 2C) e terço inferior (Figura 2D) desses silos. Em relação a termometria nessas regiões do silo nota-se semelhança no comportamento comparativamente a média do silo (Figura 2A), para o terço superior e inferior (Figura 2B e 2D) do silo automatizado, a temperatura se manteve constante durante os primeiros 30 dias apresentando, posteriormente um acréscimo nos demais 60 dias de armazenamento. Quando avaliadas as três regiões (Figura 2B, 2C e 2D) no silo controlado manualmente nota-se o aumento da temperatura ao longo do armazenamento, assim como visualizado na Figura 2A.

O terço médio de ambos os silos apresentou menor média da temperatura (Figura 2C), $17,50 \pm 0,27^{\circ}\text{C}$ e $22,52 \pm 1,35^{\circ}\text{C}$ para o silo com sensores e silo com termopares, respectivamente. Esse comportamento evidencia que o terço médio do silo conserva melhor as temperaturas dos grãos, esse fato se deve a baixa condutividade térmica que os grãos possuem, não trocando calor com facilidade (Bragantini, 2005). O silo automatizado manteve a temperatura constante durante os 90 dias de armazenamento no

terço médio, e para o silo com aeração controlada de forma manual houve aquecimento médio dos grãos após 30 dias de armazenamento de $1,51 \pm 0,56^{\circ}\text{C}$.

Foram observadas bolsas de calor durante os últimos 45 dias do armazenamento no terço inferior do silo cuja aeração foi coordenada manualmente, com focos de temperatura de $36,22 \pm 1,70^{\circ}\text{C}$, e notou-se na última quinzena no terço médio desse silo, com pico de temperatura de $30,67 \pm 3,27^{\circ}\text{C}$. A média da temperatura foi de $22,11 \pm 0,28^{\circ}\text{C}$ para $29,98 \pm 0,4^{\circ}\text{C}$ no terço inferior nos últimos 45 dias de armazenamento (Figura 2D), representando aquecimento aproximado de $7,87^{\circ}\text{C}$ na massa de grãos. Durante os últimos 15 dias a média da temperatura no terço médio nesse silo foi de $22,50 \pm 0,43^{\circ}\text{C}$ a $25,22 \pm 0,71^{\circ}\text{C}$ (Figura 2C). Essas zonas de aquecimento podem ser derivadas do aumento respiratório de grãos, presença de insetos e microrganismos (Mohapatra *et al.*, 2017).

Nas amostras de grãos não foram identificados insetos, no entanto, na última coleta observou-se estruturas de fungos na massa de grãos provindas dos terços inferior e médio do silo controlado manualmente, mas não foram realizadas análises microbiológicas para classificação desses microrganismos. A presença de microrganismos pode estar associada ao aumento da temperatura da massa de grãos e da atividade respiratória dos grãos de girassol (Mohapatra *et al.*, 2017). Destaca-se que não foi realizado o processo de aeração durante esse período, a média da temperatura no silo variou de $24,37 \pm 0,62^{\circ}\text{C}$ a $27,16 \pm 1,42^{\circ}\text{C}$, enquanto as médias da temperatura e umidade relativa do ar externo foram de $25,01 \pm 1,00^{\circ}\text{C}$ e $70,31 \pm 8,01\%$, respectivamente (Figura 2A). Ou seja, as condições climáticas não favoreceram o funcionamento dos ventiladores para resfriar os grãos, visto que ocorre aquecimento sensível de aproximadamente 2°C do ar ao passar pelas pás dos ventiladores.

Quando avaliadas as diferentes regiões no interior do mesmo silo nota-se que durante os primeiros 30 dias de armazenamento não é possível observar tendência concreta dos dados de termometria (Tabela 1). No silo controlado manualmente o terço superior apresenta maior média de temperatura de grãos quando comparada aos demais terços, resultado contrário é observado no mesmo período para o silo com sensores no qual o terço superior demonstrou menor temperatura. A uniformidade da temperatura do grão em silos é indicador importante do desempenho da aeração (Li *et al.*, 2020).

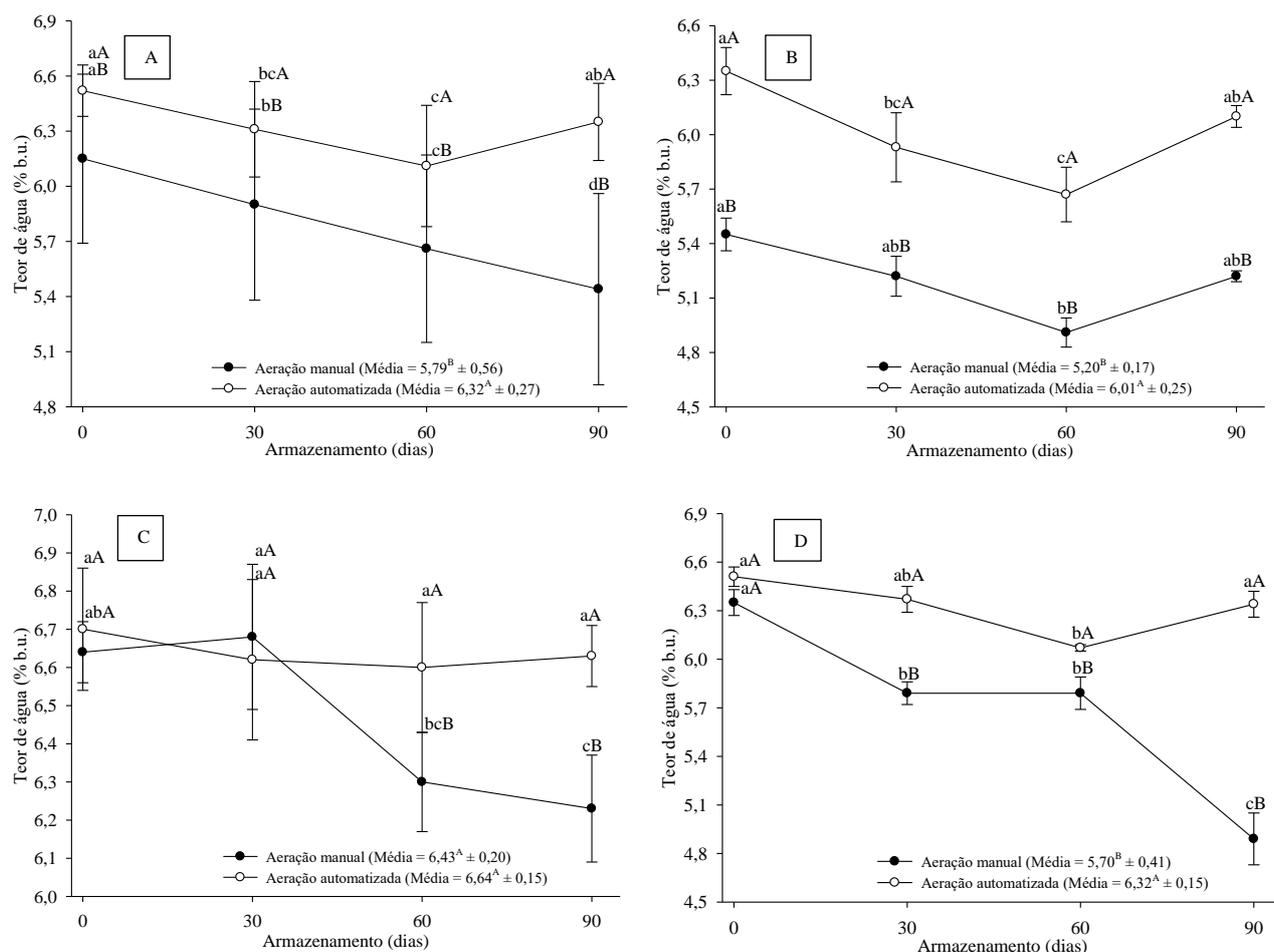
Tabela 1. Temperatura (°C), Teor de água (% b.u.), Massa específica aparente (M.E.A., kg m³) e Índice de Peróxidos (meq O₂ kg óleo⁻¹) de grãos de girassol armazenados durante 90 dias em silo com aeração controlada manualmente (Silo 1) e silo com controladores automáticos de aeração (Silo 2).

Época (dias)	Silo	Terço	Temperatura (°C)	Teor de água (% b.u.)	M.E.A. (kg m ³)	Índice de Peróxidos (meq O ₂ kg óleo ⁻¹)
0	1	Superior	21,84a	5,45b	369,25 ^a	21,86b
		Médio	20,87b	6,64a	369,28 ^a	31,22b
		Inferior	21,70ab	6,35a	366,24 ^a	57,92a
	2	Superior	15,58c	6,35b	376,84b	15,34b
		Médio	17,08b	6,70a	383,51 ^a	37,18a
		Inferior	19,10a	6,51ab	373,94b	20,60b
30	1	Superior	25,32a	5,22c	380,15 ^a	21,76b
		Médio	21,50b	6,67a	376,22ab	14,59b
		Inferior	22,11b	5,79b	371,73b	51,63a
	2	Superior	15,97c	5,93b	386,68ab	26,47a
		Médio	17,40b	6,62a	391,33 ^a	20,70a
		Inferior	19,52a	6,37a	380,47b	30,40a
60	1	Superior	24,30b	4,91c	370,22 ^a	27,96a
		Médio	22,50c	6,30a	368,81 ^a	26,48a
		Inferior	26,32a	5,78b	371,55 ^a	26,73a
	2	Superior	17,69b	5,67c	380,54b	29,63a
		Médio	17,63b	6,60a	393,35 ^a	24,80a
		Inferior	20,24a	6,07b	365,86c	30,12a
90	1	Superior	26,26b	5,22b	365,57ab	38,80a
		Médio	25,22c	6,23a	370,42 ^a	30,00a
		Inferior	29,98a	4,89c	359,59b	27,71a
	2	Superior	19,90b	6,10b	373,06b	26,66a
		Médio	17,92c	6,63a	390,28 ^a	24,43a
		Inferior	21,22a	6,34ab	369,77b	20,68a

Médias seguidas pela mesma letra minúscula na coluna para cada silo em uma determinada época, não diferem entre si, a 5% de significância.

A desuniformidade da temperatura no início do armazenamento no silo controlado manualmente pode estar associada ao tempo de aeração, visto que nesse silo o tempo foi inferior, isso pode ter influenciado no baixo resfriamento dos grãos no terço superior (Tabela 1). Além disso, o terço superior apresenta maior resistência a passagem do ar porque a maior coluna de grãos pode ter influenciado na desuniformidade da aeração. Com o decréscimo da profundidade dos grãos têm-se a redução da pressão estática e maior facilidade de passagem de ar, além disso fatores como teor de impurezas, fluxo de ar e propriedades físicas afetam na pressão estática, e conseqüente a distribuição do ar (Goneli *et al.*, 2020). Aos 60 e 90 dias de armazenamento (Tabela 1) observa-se que o terço médio apresenta menor média da temperatura dos grãos e o terço inferior apresenta maior média, em ambos os silos.

Quanto ao teor de água (Tabela 1), nota-se que a partir dos 30 dias de armazenamento maiores valores foram observados para os grãos armazenados no terço médio de ambos os silos, fato que pode estar associado a manutenção de temperaturas amenas nessa região no interior do silo (Figura 2C). O silo automatizado apresentou menor média de temperatura (Figura 2A), e, conseqüentemente, maior valor médio de teor de água, $6,32 \pm 0,27\%$ (b.u.), durante todo o período de armazenamento (Figura 3A). Baixas temperaturas também minimizam os riscos associados à deterioração de grãos e perdas de matéria seca (Lopes e Steidle Neto, 2019).



Médias seguidas pela mesma letra minúscula para cada estratégia de aeração ao longo do armazenamento, e letras maiúsculas semelhantes entre as estratégias de aeração para cada época, não diferem entre si, a 5% de significância.

Figura 3. Teor de água (% b.u.) de grãos de girassol armazenados em silos metálicos com estratégia de aeração manual e automatizada (A); Teor de água (% b.u.) dos grãos de girassol no terço superior dos silos durante o armazenamento (B); Teor de água (% b.u.) dos grãos de girassol no terço médio dos silos durante o armazenamento (C); Teor de água (% b.u.) dos grãos de girassol no terço inferior dos silos durante o armazenamento (D).

Durante o armazenamento houve redução do teor de água aos 30 e 60 dias (Figura 3A) em relação aos demais períodos no silo com aeração automatizada, no entanto o teor de água no final do armazenamento não diferiu do teor de água do início do armazenamento monitorado, apesar de visualizada a redução de 2,61%. O teor de água dos grãos do silo controlado manualmente (Figura 3A) decresceu linearmente ao longo do armazenamento, resultado este paralelamente proporcional ao aumento da temperatura

nesse silo, em que se observou aumento linear da temperatura durante o período (Figura 2A). A média de teor de água nesse foi de $5,79 \pm 0,56\%$ (b.u.), observou-se que os grãos de modo geral armazenados nesse silo demonstraram redução de até 11,55% ao longo do armazenamento.

Reduções nos teores de água em produtos armazenados são diretamente proporcionais a diminuição da massa total de produto estocado. A redução do teor de água em relação ao aumento da temperatura dos grãos era esperada visto que, sem aeração, o ar ao redor do grão atingiria o equilíbrio de temperatura e umidade relativa em poucos dias, diminuindo o teor de água de equilíbrio dos grãos com a elevação da temperatura, para a umidade relativa constante (Othman *et al.*, 2017).

Em relação ao teor de água nos diferentes terços do silo observou-se que no silo com aeração automatizada os teores de água foram predominantemente superiores em todas as regiões durante o armazenamento, com exceção do teor de água inicial nos terços inferiores e médio, bem como aos 30 dias no terço médio em que esses não diferiram entre os silos (Figuras 2B, 2C e 2D). Esses resultados indicam que as condições de umidade relativa do ar intergranular propiciaram equilíbrio higroscópico semelhante nesses grãos, visto que a temperatura nessas regiões durante o período mencionado diferiram (Figuras 2C e 2D). O equilíbrio higroscópico é o fenômeno que a temperatura e umidade relativa do ar intergranular influenciam no ganho ou perda de água do produto (Bustos-Vanegas *et al.*, 2018; Campos *et al.*, 2019, Mallek-Ayadi *et al.*, 2020).

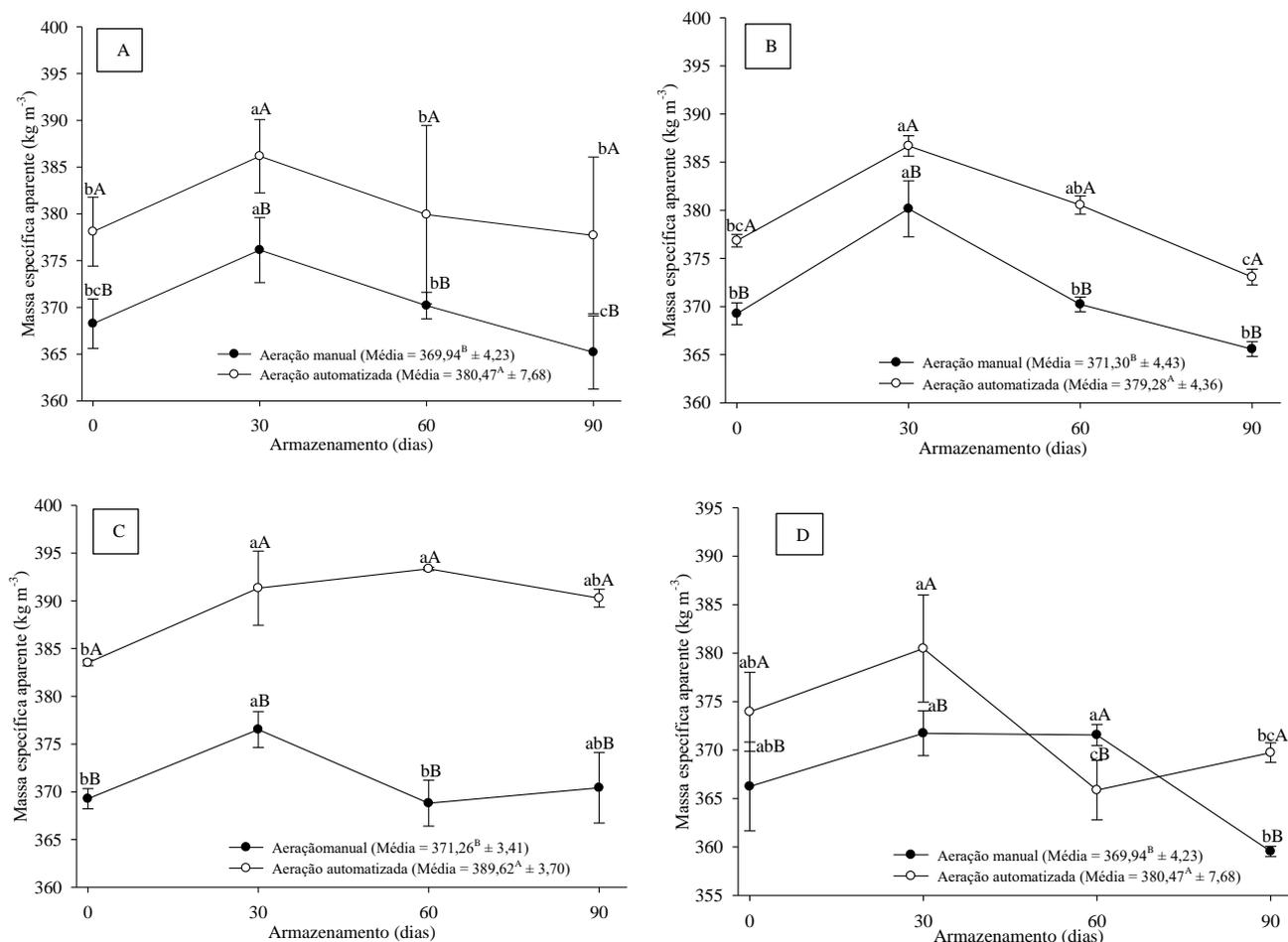
Nota-se a redução do teor de água aos 30 e 60 dias para os grãos armazenados no terço superior em ambos os silos (Figura 3B), no entanto o teor de água final dos grãos de ambos não diferiram do teor de água dos grãos no início do armazenamento. Os grãos armazenados no terço médio do silo automatizado mantiveram o teor de água durante todo o período de armazenamento (Figura 3C) mesmo comportamento descrito para temperatura nesse silo (Figura 2C). Também no terço médio foi observada a redução do teor de água dos grãos aos 60 e 90 dias de armazenamento no silo com aeração controlada manualmente, período que também foi observado aumento da temperatura da massa de grãos (Figura 2C).

O teor de água ao final do armazenamento no terço médio do silo controlado de forma manual foi 6,18% inferior ao teor de água inicial (Figura 3C), esta redução do teor de água ocorreu pela formação de bolsas de calor na última quinzena do armazenamento nessa região do silo, favorecendo a redução do teor de água. O teor de água final dos grãos também diferiu do inicial para os grãos armazenados no terço inferior do silo

(Figura 3D). Houve redução de 22,99% do teor de água nesse silo, justificando essa redução do teor de água pelo aumento da temperatura nessa região, que foi observado aumento aproximado de 7,87°C na temperatura da massa de grãos.

No terço inferior ocorreu a redução do teor de água aos 60 dias de armazenamento no silo automatizado (Figura 3D), no entanto nos 30 dias posteriores houve aumento do teor de água, não diferindo do teor de água no início do armazenamento. Esse aumento é característico de alterações do ar intergranular promovendo o equilíbrio higroscópico dos grãos (Campos *et al.*, 2019). Em relação aos grãos armazenados no terço inferior do silo com termopares nota-se que houve a redução do teor de água desse produto durante os primeiros 30 dias (Figura 3D), em que esse teor de água ficou estável durante os 30 dias posteriores, decrescendo ao final do armazenamento conforme anteriormente discutido.

Com relação aos valores da massa específica aparente esses são apresentados na Figura 4 e Tabela 1, o silo com aeração automatizada destaca-se em relação ao silo controlado manualmente o qual apresentou média geral de $380,47 \pm 7,68 \text{ kg m}^{-3}$ e $369,94 \pm 4,23 \text{ kg m}^{-3}$, respectivamente (Figura 4A). A partir dos 60 dias de armazenamento (Tabela 1) maiores valores de massa específica aparente foram determinados majoritariamente para os grãos armazenados no terço médio de ambos os silos, $389,62 \pm 3,70 \text{ kg m}^{-3}$ e $371,26 \pm 3,41 \text{ kg m}^{-3}$ para silo com aeração automatizada e manual, respectivamente (Figura 4C). Fato que pode estar associado a melhor conservação dos grãos nesse terço, principalmente em relação ao teor de água (Figura 3C). A redução da massa específica por decorrência do decréscimo do teor de água foi relatada para sementes de girassol (Smaniotto *et al.*, 2017).



Médias seguidas pela mesma letra minúscula para cada estratégia de aeração ao longo do armazenamento, e letras maiúsculas semelhantes entre as estratégias de aeração para cada época, não diferem entre si, a 5% de significância.

Figura 4. Massa específica aparente (kg m^{-3}) de grãos de girassol armazenados em silos metálicos com estratégia de aeração manual e automatizada (A); Massa específica aparente (kg m^{-3}) dos grãos de girassol no terço superior dos silos durante o armazenamento (B); Massa específica aparente (kg m^{-3}) dos grãos de girassol no terço médio dos silos durante o armazenamento (C); Massa específica aparente (kg m^{-3}) dos grãos de girassol no terço inferior dos silos durante o armazenamento (D).

Durante os 30 primeiros dias de armazenamento observou-se acréscimo nos valores da massa específica aparente dos grãos em ambos os silos no geral (Figura 4A), no terço superior (Figura 4B) e terço médio inferior (3C), não sendo visualizado aumento expressivo nos terços inferiores (3D). Como não foi observado aumento do teor de água dos grãos armazenados durante este período (Figura 3), a elevação da massa específica observada aos 30 dias, em ambos os silos, pode estar associada a heterogeneidade da amostra ou a fatores instrumentais ou aleatórios durante a execução do teste.

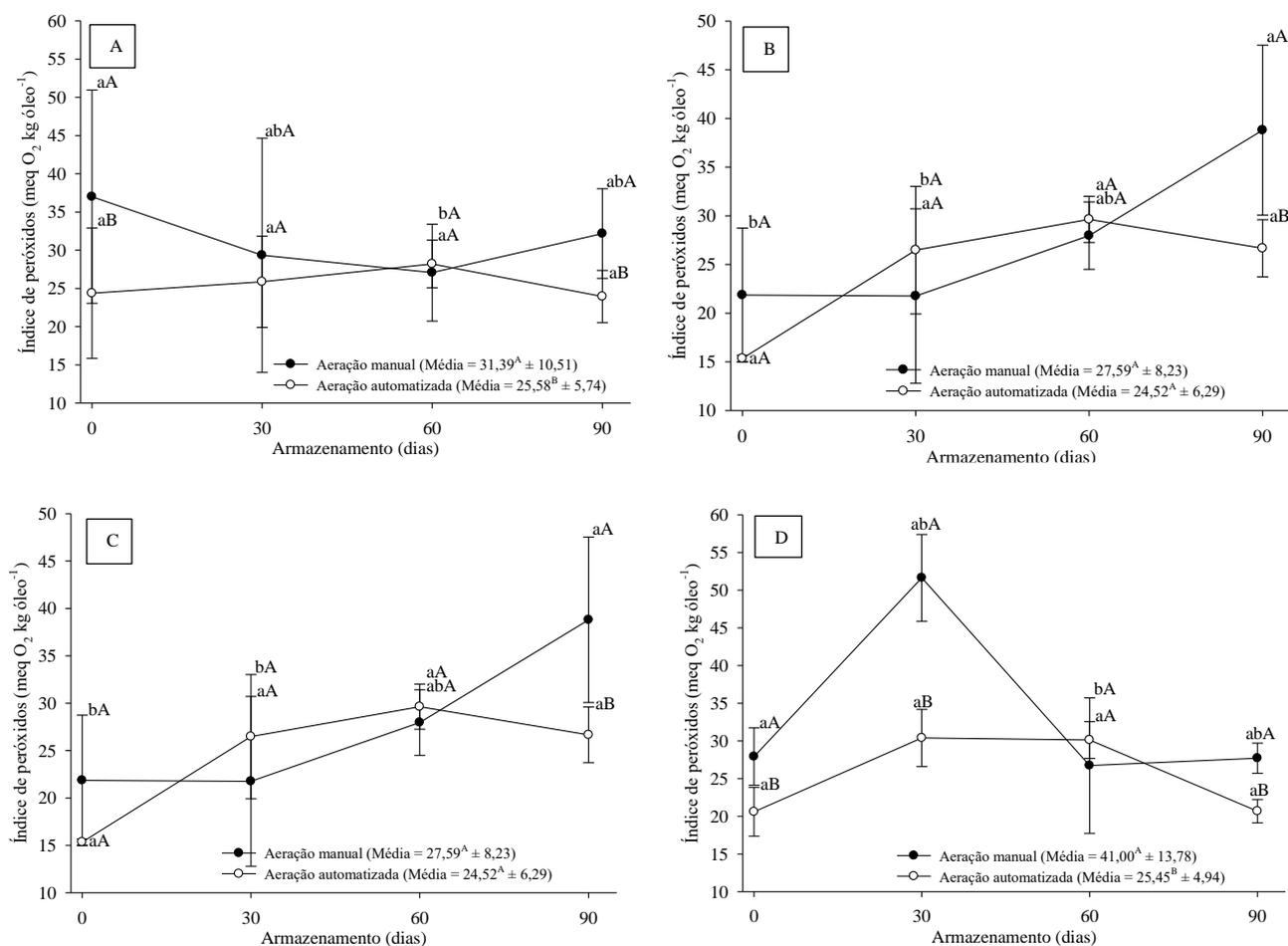
Nos diferentes terços dos silos durante o armazenamento observaram maiores valores de massa específica para os grãos armazenados no silo automatizado (Figuras 4B, 4C e 4D), fato diretamente relacionado aos maiores teores de água (Smaniotto *et al.*, 2017) obtidos no mesmo silo (Figura 3B, 3C e 3D). Exceto para os grãos armazenados aos 60 dias no terço inferior desse silo (Figura 4D), em que não foram observados fatores intrínsecos ao produto para relacionar com a alta redução da massa específica aparente, observada para as amostras coletadas nesse local do silo.

Destaca-se que apesar da predominante variação da massa específica aparente dos grãos ao longo do armazenamento, não houve diferença desta variável quando comparado os grãos do início e fim do armazenamento, tanto para os grãos de forma geral, tanto para os grãos avaliados nas três regiões nos silos (Figura 4). É importante evidenciar que a redução do teor de água visualizada no silo com aeração controlada manualmente (Figura 3) não afetou a massa específica aparente dos grãos de girassol. Esse comportamento pode estar associado a redução proporcional do volume dos grãos com a perda de massa (água), visto que quando o teor de água influencia na massa específica aparente isso ocorre pela alteração da massa do produto não ser diretamente proporcional a mudança do volume dos grãos (Bajpai *et al.*, 2019).

A qualidade do óleo extraído dos grãos armazenados está apresentada na Tabela 1 e Figura 5 por meio dos dados relacionados ao índice de peróxidos. Na Tabela 1 observa-se que a partir dos 30 dias de armazenamento esse índice padroniza-se nos diferentes terços do silo com aeração automatizada, não diferindo entre si, até o final do armazenamento, resultado semelhante foi observado a partir dos 60 dias no silo com termopares. Dessa forma, não se evidenciou para essa variável uma região no interior do silo com destaque na conservação desse índice, visto que ao longo do armazenamento as três regiões se mostraram eficientes.

Quando avaliado o efeito do armazenamento dos grãos nos dois silos, nota-se que o índice de peróxidos do óleo dos grãos diferiu entre os silos no início e no final do armazenamento (Figura 5A), em que óleos extraídos dos grãos armazenados no silo com aeração controlada manualmente apresentaram maior valor para tal índice ($31,39 \pm 10,51$ meq O_2 kg óleo⁻¹). Esses resultados corroboram com as alterações de temperatura que a massa de grãos desse silo sofreu, inicialmente durante o manejo de aeração visando o resfriamento, em que o aquecimento da massa de grãos ocorreu, expondo o produto ao aumento de 2,67°C. Popa *et al.* (2017) definiram que a temperatura tem a maior influência

sobre a oxidação do óleo de girassol, apresentando, conseqüentemente, altos valores de peróxidos.



Médias seguidas pela mesma letra minúscula para cada estratégia de aeração ao longo do armazenamento, e letras maiúsculas semelhantes entre as estratégias de aeração para cada época, não diferem entre si, a 5% de significância.

Figura 5. Índice de peróxidos (meq O₂ kg óleo⁻¹) de grãos de girassol armazenados em silos metálicos com estratégia de aeração manual e automatizada (A); Índice de peróxidos (meq O₂ kg óleo⁻¹) dos grãos de girassol no terço superior dos silos durante o armazenamento (B); Índice de peróxidos (meq O₂ kg óleo⁻¹) dos grãos de girassol no terço médio dos silos durante o armazenamento (C); Índice de peróxidos (meq O₂ kg óleo⁻¹) dos grãos de girassol no terço inferior dos silos durante o armazenamento (D).

Os valores determinados para o índice de peróxidos no presente estudo superaram o limite recomendado nas especificações do Codex Alimentarius (1999) para óleo refinado, que limita esse índice até 10 meq O₂ kg óleo⁻¹. No entanto, ressalva-se que o óleo extraído nessa pesquisa se refere ao óleo bruto extraído do grão inteiro. De acordo

com Lamas *et al.* (2018) o óleo de girassol bruto deve ser refinado antes do consumo, a fim de remover compostos que afetam características sensoriais e estabilidade do produto como ácidos graxos livres, pigmentos de cor, fosfolipídios, metais e ceras, muito desses componentes estão presentes na casca da semente, que não foi retirada para extração do óleo neste trabalho (Aluyor *et al.*, 2009; Tinto *et al.*, 2017).

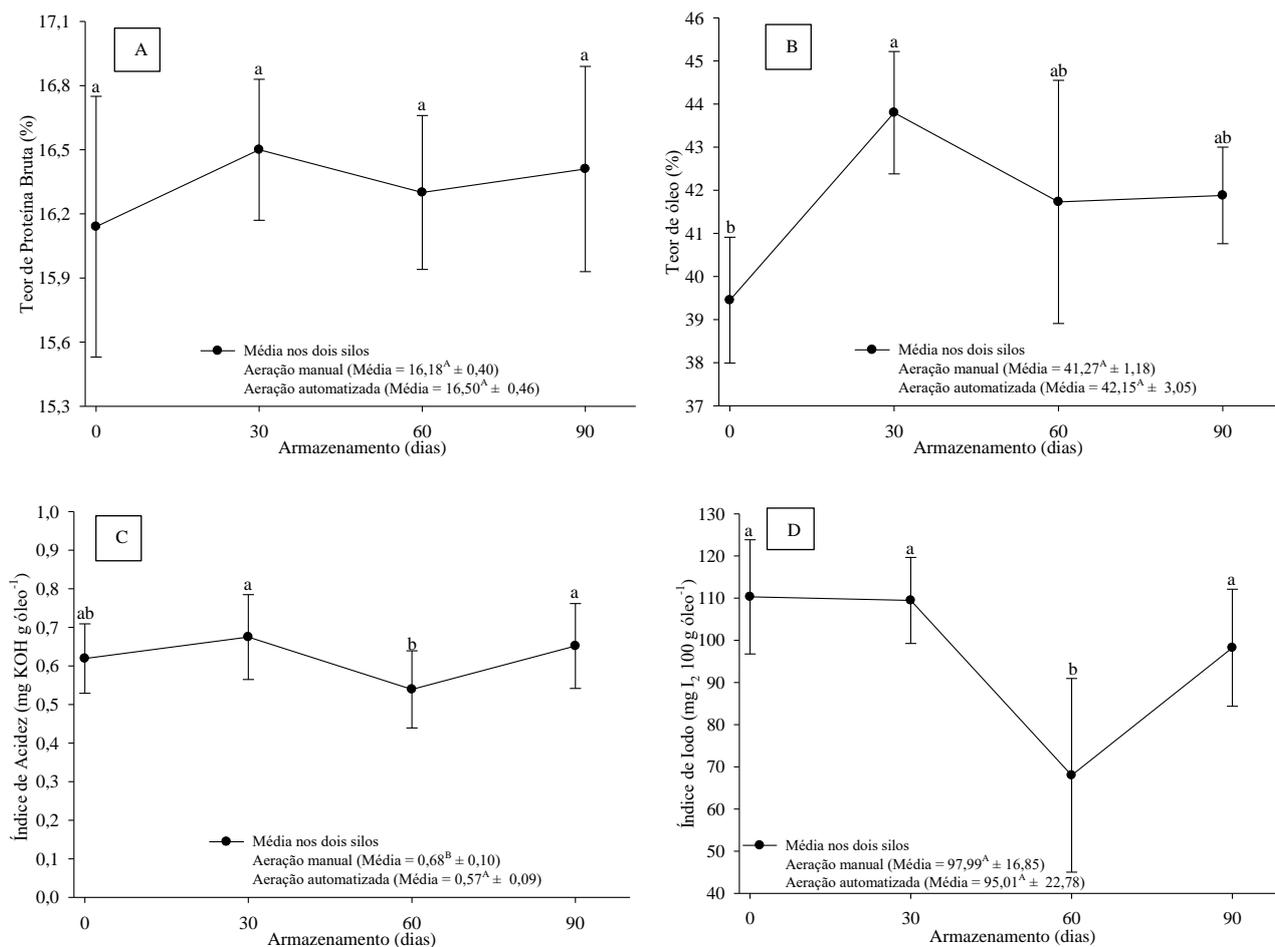
O silo com aeração automatizada demonstrou menor valor médio para o índice de peróxidos, sendo de $25,58 \pm 5,74$ meq O₂ kg óleo⁻¹, resultados semelhantes foram observados em óleos de grãos armazenados no terço inferior desse mesmo silo. De um modo geral o silo automatizado também apresentou menores valores médios para esse índice (Figura 5A) e aos 30 e 90 dias de armazenamento (Figura 5D). Comportamento não foi observado para os óleos provindos de grãos do terço superior (Figura 5B), com exceção do óleo extraído no final do armazenamento e terço médio (Figura 5C), em que os valores obtidos para tal índice não diferiu entre os silos durante o armazenamento.

O óleo extraído de grãos armazenados no terço superior do silo com aeração automatizada (Figura 5B) apresentaram estabilidade quanto ao índice de peróxido e não diferiram entre si durante o armazenamento. Tal resultado é observado quando avalia os grãos totais do silo automatizado, em que essa estabilidade também é visualizada (Figura 5A). A estabilidade do índice é visualizada durante os primeiros 60 dias do armazenamento grãos no silo com aeração coordenada manualmente (Figura 5B). No final do armazenamento é observado aumento para esse índice, podendo estar associado a instabilidade da temperatura da massa de grãos (Figura 2B), em que se observou aumento, redução e aumento sequencialmente da temperatura, podendo resultar em oxidação lipídica, que ocorre por meio de um conjunto de reações autocatalíticas que produzem muitos novos compostos (Marmesat *et al.*, 2009). Comparando os óleos do início e fim do armazenamento dos grãos, apenas o terço superior do silo controlado manualmente apresentou diferença entre si (Figura 5).

Índices de peróxidos de óleos extraídos do terço médio de ambos os silos decresceram durante os primeiros 30 dias de armazenamento (Figura 5C), observando certa estabilidade no período restante do armazenamento. Em relação ao óleo do produto estocado no terço inferior (Figura 5D) o índice de peróxidos não diferiu ao longo do armazenamento dos grãos advindos dos silos com aeração automatizada. Em contrapartida, houve elevado acréscimo do índice de peróxidos aos 30 dias de armazenamento do óleo extraído de grãos armazenados no silo com aeração controlada de forma manual, tal fato não é atribuído as condições de armazenamento, pois observou-

se aquecimento dos grãos nessa região do silo a partir dos 60 dias (Figura 2D). Nota-se na Figura 5D que a partir dos 60 dias o índice de peróxidos reduz e se estabiliza até o final do armazenamento desses grãos. O processo de oxidação é complexo, e dependente da intensidade da luz e da temperatura (Popa et al., 2017), a alteração dos valores obtidos nesta pesquisa pode estar associada a exposição dos grãos e do óleo extraído as temperaturas e luz ambiente durante o experimento.

Em relação ao teor de proteína bruta (%) (Figura 6A) não se identificou influência dos tratamentos avaliados, independentemente da estratégia de aeração manual ou automatizada adotada nos silos, da localização dos grãos no interior do silo e do tempo de armazenamento. O teor de proteína bruta determinado para grãos de girassol não diferiu, apresentando valor médio de $16,34 \pm 0,44\%$. Pode-se inferir que a temperatura média da massa de grãos não foi suficiente para favorecer a desnaturação do conteúdo proteico. Teores de proteína bruta de grãos de girassóis não processados foram retratados na literatura variando de 17,09 a 27,02%, e para grãos secos essa variação ficou entre 12,10 e 20,28%, em que se percebe a redução do conteúdo proteico em grãos secos com temperaturas superiores a 60°C (Adesina, 2018; Nascimento *et al.*, 2018), faixa de temperatura essa usada para secagem de grãos de girassol em unidades armazenadoras no Brasil.



Médias seguidas pela mesma letra minúsculas semelhantes entre as estratégias de aeração para cada época, não diferem entre si, a 5% de significância.

Figura 6. Teor de proteína bruta (%) (A); Teor de óleo (%) (B); Índice de acidez (mg KOH g óleo⁻¹) (C); e Índice de Iodo (mg I₂ 100 g óleo⁻¹) de grãos de girassol armazenados em silos metálicos com estratégia de aeração manual e automatizada.

Foi observado efeito do tempo de armazenamento para o teor de óleo (%) (Figura 6A), índice de acidez (mg KOH g óleo⁻¹) (Figura 6C), e índice de iodo (mg I₂ 100 g óleo⁻¹) (Figura 6D), ou seja, para essas variáveis a localização dos grãos no interior do silo não influenciou nos resultados, tampouco foi observada diferença para esses fatores nas estratégias de aeração manual e automatizada, com exceção do índice de acidez (Figura 6C).

Com relação ao teor de óleo (%) observou-se aumento aos 30 dias de armazenamento, que pode ter ocorrido pela heterogeneidade do material. Grãos de girassol apresentam entre 24 e 52% de óleo (Grunvald *et al.*, 2014), e no presente estudo a variação foi de 39,45 ± 1,46% a 43,80 ± 1,42%. Essa diferença pode estar associada as

origens distintas dos grãos armazenados nos silos em relação as cultivares e regiões. Nota-se que os teores de óleo reduzem ao longo do armazenamento, não diferindo do teor de óleo no início do período, bem como aos 30 dias. A redução do teor de óleo durante ao armazenamento se deve a atividade respiratória dos grãos, que conseqüentemente consome e oxida estruturas de reservas dos grãos (Araujo e Barbedo, 2017). Diferentes ambientes de armazenamento não influenciaram no teor lipídico de sementes de girassol (Abreu *et al.*, 2013), no entanto observou-se redução do teor de óleo durante o período de 12 meses. Coradi *et al.* (2017) indicaram que ocorre redução do teor lipídico de grãos de girassol quando ocorre a elevação da temperatura de armazenamento de 20 para 30°C, e redução da umidade relativa de 60 para 40%, condições essas que não foram observadas neste trabalho (Figura 2).

Para o índice de acidez do óleo extraído dos grãos de girassol armazenados, nota-se decréscimo aos 60 dias, comparativamente aos 30 e 90 dias de armazenamento. No entanto, a redução observada não diferiu do índice do óleo extraído dos grãos no início do armazenamento. O índice de acidez determinado demonstrou comportamento constante durante o armazenamento, em relação ao índice no início do armazenamento. Em relação as estratégias de aeração nos silos nota-se que na estrutura com aeração automatizada houve menor valor, $0,57 \pm 0,09$ mg KOH g óleo⁻¹, quando comparado ao silo com aeração controlada manualmente, $0,68 \pm 0,10$ mg KOH g óleo⁻¹, diferença essa pode ser justificada pela diferença da temperatura média dos grãos (Figura 2A). A influência do aumento da temperatura de armazenamento na elevação dos valores de acidez do óleo de girassol foi relatada por Moureu *et al.* (2016) e Coradi *et al.* (2017).

O óleo bruto extraído do silo com aeração controlada manualmente apresentou índice de acidez superior ao limite de 0,6 mg KOH g óleo⁻¹ para óleos refinados (Codex Alimentarius, 1999), indicando a necessidade do processamento desses óleos. A média do índice de acidez durante o armazenamento dos grãos também foi superior ao limite recomendado, $0,62 \pm 0,04$ KOH g óleo⁻¹ (Figura 6C). Em relação ao índice de iodo os valores médios foram inferiores ao estabelecido para óleos refinados pela Codex Alimentarius de 118-141 mg I₂ 100 g óleo⁻¹ (Figura 6D).

Ocorreu a redução do índice de iodo do óleo extraído de grãos armazenados aos 60 dias de armazenamento (Figura 6D), no entanto, no final do armazenamento o índice de iodo não diferiu do valor inicial. Logo, pode-se atribuir a redução do índice de iodo a fatores intrínsecos e extrínsecos ao produto. A diminuição do valor de iodo é indicador de oxidação de lipídios (Naz *et al.*, 2004). A influência da umidade relativa nos valores

do índice de iodo durante o armazenamento é descrita por Ajith *et al.* (2015), e no armazenamento com umidade relativa de 57% foi determinado o maior índice de insaturações lipídicas da castanha do caju.

1.4. CONCLUSÃO

A utilização de sistema de termometria dotado de sensores digitais contribui no manejo da aeração automatizado.

A automatização da aeração contribui no aproveitamento de melhores condições climáticas para realização do processo, comparativamente ao sistema manual utilizado.

As estratégias de aeração adotadas: resfriamento e conservação, apresentaram-se eficientes para amenizar a temperatura da massa de grãos no processo automatizado.

O silo com aeração automatizada apresentou melhor conservação da qualidade dos grãos de girassol armazenados.

O silo com aeração controlada manualmente apresentou redução de 11,55% no teor de água. Grãos armazenados no terço médio do silo tendem apresentar melhor qualidade.

1.5. AGRADECIMENTOS

Ao Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia Goiano, PROCER, CARAMURU, EMBRAPPII, CAPES, FAPEG, FINEP e CNPq pelo apoio indispensável para execução deste trabalho.

1.6. REFERÊNCIAS

ABREU, L. A. de S.; CARVALHO, M. L. M. de; PINTO, C. A. G.; KATAOKA, V. Y.; SILVA, T. T. de A. Deterioration of sunflower seeds during storage. **Journal of Seed Science**, v. 35, n. 2, p. 240-247, 2013.

ADESINA, S. A. Effect of processing of the proximate composition of sunflower (*Helianthus annuus*) seeds. **Journal of Tropical Agriculture, Food, Environment and Extension**, v. 17, n. 3, p. 27-33, 2018.

AJITH, S.; PRAMOD, S.; KUMARI, C. P.; POTTY, V. P. Effect of storage temperatures and humidity on proximate composition, peroxide value and iodine value of raw cashew nuts. **Journal of Food Science Technology**, v. 52, n. 7, p. 4631-4636, 2015.

- ALUYOR, E. O.; ALUYOR, P.; OZIGAGU, C. E. Effect of refining on the quality and composition of groundnut oil. **African Journal of Food Science**, v. 3, n. 8, p. 201-205, 2009.
- ARAUJO, A. C. F. B.; BARBEDO, C. J. Changes in desiccation tolerance and respiratory rates of immature *Caesalpinia echinata* Lam. seeds. **Journal of Seed Science**, v. 39, n. 2, p. 123-132, 2017.
- BAJPAI, A.; KUMAR, Y.; SINGH, H.; PRABHAKAR, P. K.; MEGHWAL, M. Effect of moisture content on the engineering properties of Jamun (*Syzgium cuminii*) seed. **Journal of Food Process Engineering**, v. 43, n. 2, e13325, 2019.
- BINELO, M. O.; FAORO, V.; KATHATOURIAN, O. A.; ZIGANSHIN, B. Airflow simulation and inlet pressure profile optimization of a grain storage bin aeration system. **Computers and Electronics in Agriculture**, v. 164, e104923, 2019.
- BRASIL, Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento (MAPA). **Instrução normativa n. 29, de 08 de junho de 2011**. Diário Oficial da União, Brasília, 2011.
- BRAGANTINI, C. **Alguns aspectos do armazenamento de sementes e grãos de feijão**. Documento 187, Embrapa Arroz e Feijão, 2005. 28 p.
- BUSTOS-VANEGAS, J. D.; CORRÊA, P. C.; ZEYMER, J. S.; BAPTESTINI, F. M.; CAMPOS, R. C. Moisture sorption isotherms of quinoa seeds: thermodynamic analysis. **Engenharia Agrícola**, v. 38, n. 6, p. 941-950, 2018.
- CAMPOS, R. C.; CORRÊA, P. C.; ZAIDAN, I. R.; ZAIDAN, U. R.; LEITE, R. A. Moisture sorption isotherms of sunflower seeds: thermodynamic analysis. **Ciência e Agrotecnologia**, v., e011619, 2019.
- CODEX ALIMENTARIUS. Standard for named vegetable oils: CXS: 210-1999. International Food Standards. (Revised 05/2019; Amended in 05/2019) 1999.
- CORADI, P. C.; SOUZA, A. E. M. de; BORGES, M. C. R. Z. Yield and acidity indices of sunflower and soybean oils in function of grain drying and storage. **Acta Scientiarum. Agronomy**, v. 39, n. 2, p. 255-266, 2017.
- GONELI, A. L. D.; CORRÊA, P. C.; FIGUEIREDO NETO, A.; KIRSCH, M. R. H.; BOTELHO, F. M. Static pressure drop in layers of castor bean grains. **Engenharia Agrícola**, v. 40, n. 2, p. 184-191, 2020.
- GRUNVALD, A. K.; CARVALHO, C. G. P. de; LEITE, R. S.; MANDARINO, J. M. G.; ANDRADE, C. A. de B.; SCAPIM, C. A. Predicting the oil contents in sunflower genotype seeds using near-infrared reflectance (NIR) spectroscopy. **Acta Scientiarum. Agronomy**, v. 36, n. 2, p. 233-237, 2014.

- IAL - INSTITUTO ADOLFO LUTZ. **Métodos físico-químicos para análise de alimentos**. Coord. ZENEON, O.; PASCUET, N. S.; TIGLEA, P. 4. ed. São Paulo: Instituto Adolfo Lutz, 2008. 1020 p.
- LAMAS, D. L.; CONSTENLA, D. T.; RAAB D. Effect of degumming process on physicochemical properties of sunflower oil. **Biocatalysis and Agricultural Biotechnology**, v. 6, n. 1, p. 138-143, 2018.
- LI, X.; HAN, Z.; LIN, Q.; WU, Z.; CHEN, L.; ZHANG, Q. Smart cooling-aeration guided by aeration window model for paddy stored in concrete silos in a depot of Guangzhou, China. **Computers and Electronics in Agriculture**, v. 173, e105452, 2020.
- LOPES, D. de C.; STEIDLE NETO, A. J. Effects of climate change on the aeration of stored bean in Minas Gerais State, Brazil. **Biosystems Engineering**, v. 188, n. 1, p. 155-164, 2019.
- MALLEK-AYADI, S.; BAHLOUL, N., KECHAOU, N. Mathematical modelling of water sorption isotherms and thermodynamic properties of *Cucumis melo* L. seeds. **LWT – Food Science and Technology**, v. 131, n. 1, e109727, 2020.
- MARMESAT, S.; MORALES, A.; VELASCO, J.; RUIZ-MÉNDEZ, M. V.; DOBARGANES, M. C. Relationship between changes in peroxide value and conjugated dienes during oxidation of sunflower oils with different degree of unsaturation. **Grasas Y Aceites**, v. 60, n. 2, p. 155-160, 2009.
- MOHAPATRA, D.; KUMAR, S.; KOTWALIWALE, N.; SINGH, K. K. Critical factors responsible for fungi growth in stored food grains and non-Chemical approaches for their control. **Industrial Crops & Products**, v. 108, n. 101, p. 162-182, 2017.
- MOUREU, S.; VIOLLEAU, F.; HAIMOUD-LEKHAL, D. A.; CALMON, A. Influence of storage temperature on the composition and the antibacterial activity of ozonized sunflower oil. **Ozone: Science & Engineering**, v. 38, n. 2, p. 143-149, 2016.
- NASCIMENTO, A. P. S.; BARROS, S. L.; SANTOS, N. C.; ARAÚJO, A. J. de B.; CAVALCANTI, A. S. R. de R. M.; DUARTE, M. E. M. Secagem convectiva e influência da temperatura nas propriedades físico-químicas das amêndoas de girassol comercial. **Revista Brasileira de Produtos Agroindustriais**, v. 20, n. 3, p. 227-238, 2018.
- NAZ, S.; SHEIKH, H.; SIDDIQI, R.; SAYEED, S. A. Oxidative stability of olive, corn and soybean oil under different conditions. **Food Chemistry**, v. 88, n. 2, p. 253-259, 2004.

OTHMAN, S. H.; EDWAL, S. A. M.; RISYON, N. P.; BASHA, R. K.; TALIB, R. A. Water sorption and water permeability properties of edible film made from potato peel waste. **Food Science and Technology**, v. 37, supplementary 1, p. 63-70, 2017.

PANIGRAHI, S. S.; SINGH, C. B.; FIELKE, J. CFD modelling of physical velocity and anisotropic resistance components in a peaked stored grain with aeration ducting systems. **Computers and Electronics in Agriculture**, v. 179, e105820, 2020.

POPA, M.; GLEVITZKY, I.; DUMITREL, G. A.; GLEVITZKY, M.; POPA, D. Study on peroxide values for different oils and factors affecting the quality of sunflower oil. **Scientific Papers. Series E. Land Reclamation, Earth Observation & Surveying, Environmental Engineering**, v. VI, n. 1, p. 137-143, 2017.

ROCHA, J. C. da; POHNDORF, R. S.; MENEGHETTI, V. L.; OLIVEIRA, M. de; ELIAS M. C. Effects of mass compaction on airflow resistance through paddy rice grains. **Biosystems Engineering**, v. 194, n. 1, p 28-39, 2020.

SILVA, D. J.; QUEIROZ, A. C. **Análises de alimentos: métodos químicos e biológicos**. 3.ed. Viçosa, MG: Editora UFV, 2002. 235p.

SMANIOTTO, T. A. de S.; RESENDE, O.; SOUSA, K. A. de; CAMPOS, R. C.; GUIMARÃES, D. N.; RODRIGUES, G. B. Physical properties of sunflower seeds during drying. **Semina: Ciências Agrárias**, v. 38, n. 1, 157-164, 2017.

STEIDLE NETO, A. J.; LOPES, D. de C. Thermistor based system for grain aeration monitoring and control. **Computers and Eletronics in Agriculture**, v. 116, n. 1, p. 45-54, 2015.

TINTO, W. F.; ELUFIOYE, T. O.; ROACH, J. Waxes. **In: Pharmacognosy**, eds. BADAL, S.; DELGODA, R. Academic Press, p. 443-455, 2017.

CAPÍTULO II. TEOR DE ÁGUA DE EQUÍLBRIO: USO DE SENSORES DE UMIDADE RELATIVA INTERGRANULAR E ISOTERMAS DE DESSORÇÃO DE DIFERENTES CULTIVARES DE SOJA

(Normas de acordo com a Revista Engenharia Agrícola)

RESUMO: O objetivo no presente estudo foi verificar a eficiência e aplicabilidade de sensores de umidade relativa intergranular atrelados a sensores digitais de temperatura no sistema de termometria de silos armazenando grãos de soja, paralelamente determinar as isotermas de dessecção para diferentes cultivares de soja testando uma equação média para estimativa do teor de água de equilíbrio. Analisou-se em duas amostragens de grãos de soja no terço superior, médio e inferior do silo, para a temperatura da massa de grãos, umidade relativa intergranular, teor de água de equilíbrio estimado conforme dados coletados e teor de água dos grãos amostrados. Realizou-se a comparação dos valores de teor de água obtidos pela estimativa do sistema usando a equação do equilíbrio higroscópico e pela determinação pelo método de estufa. As isotermas de dessecção de grãos de diferentes cultivares de soja foram determinadas e ajustou-se modelos matemáticos para a representação do fenômeno, sendo testada a substituição dos valores dos coeficientes por um valor médio das cultivares. Realizou-se a comparação da estimativa do teor de água de equilíbrio das diferentes equações com o método de determinação direta e estimado pelo sistema. O teor de água de equilíbrio estimado pelos dados fornecidos pelos sensores não diferenciou do teor de água determinado pela estufa. O modelo de Oswin Modificado selecionado para representar as isotermas de dessecção dos grãos das cultivares de soja. A equação com os valores médios dos coeficientes das

diferentes cultivares demonstrou-se com bom ajuste e aplicabilidade. Os sensores digitais de temperatura e umidade relativa demonstraram-se eficientes, visto que contribuem para estimativa do teor de água de equilíbrio com precisão satisfatória.

Palavras-chave: Atividade de água; Higroscopicidade; Modelagem matemática.

CHAPTER II. EQUILIBRIUM MOISTURE CONTENT: USE OF INTERGRANULAR RELATIVE HUMIDITY SENSORS AND DESORPTION ISOTHERMS OF DIFFERENT SOYBEAN CULTIVARS

ABSTRACT: The objective of the present study was to verify the efficiency and applicability of intergranular relative humidity sensors linked to digital temperature sensors in the thermometry system of silos storing soybeans, in parallel to determine the desorption isotherms for different soybean cultivars by testing an average equation for estimation of equilibrium moisture content. It was analyzed in two samples of soybean grains in the upper, middle and lower third of the silo, for the grain mass temperature, intergranular relative humidity, estimated equilibrium moisture content according to collected data and moisture content of the sampled grains. The moisture content values obtained by estimating the system using the hygroscopic equilibrium equation and by the oven method were compared. The desorption isotherms of different soybean cultivars were determined and mathematical models were adjusted to represent the phenomenon, testing the replacement of coefficient values by an average value of the cultivars. The estimation of the equilibrium moisture content of the different equations was compared with the method of direct determination and estimated by the system. The equilibrium moisture content estimated by the data provided by the sensors did not differ from the moisture content determined by the oven. The Modified Oswin model was selected to represent the desorption isotherms of soybean cultivars. The equation with the average values of the coefficients of the different cultivars was shown to have a good fit and applicability. Digital temperature and relative humidity sensors proved to be efficient, as they contribute to the estimation of equilibrium moisture content with satisfactory accuracy.

Keywords: Water activity; Hygroscopicity; Mathematical modeling.

2.1. INTRODUÇÃO

Durante o período de armazenamento dos grãos, em que os produtos devem apresentar o teor de água ideal e uniforme, é essencial o controle das condições do ar presente no espaço intergranular, com isso tem-se a aeração (OLIVEIRA *et al.*, 2007; STEIDLE NETO & LOPES, 2015). A operação de um sistema de aeração pode ser manual ou automatizada com o uso de controladores, termostatos e/ou umidostatos, que consideram, respectivamente, a temperatura e a umidade relativa do ar como parâmetros (NASCIMENTO & QUEIROZ, 2011).

De acordo com a Instrução Normativa nº 29, de 08 de junho de 2011 do Ministério da Agricultura Pecuária e Abastecimento (MAPA), as unidades armazenadoras para produtos a granel, “em nível de fazenda”, coletoras e intermediárias, devem ser dotadas de sistema de termometria, em condições operacionais adequadas (BRASIL, 2011). Para Bica *et al.* (2021) o monitoramento da temperatura da massa de grãos é importante para assegurar que estratégias sejam realizadas para evitar o aquecimento dos grãos e com isso garantir a integridade desses.

As condições psicométricas do ar, aferidas pelos termostatos na massa de grãos armazenados, podem ser alteradas em razão de processos como aumento da taxa de respiração dos grãos, presença de fungos e insetos, migração de água e desuniformidade do teor de água do produto, acarretando a perda de matéria e perda da qualidade do produto (OLIVEIRA *et al.*, 2007).

Os produtos de origem vegetal, como grãos, são higroscópicos, ou seja, possuem a capacidade de trocar de água na forma de vapor com o ambiente até que seja atingida a condição de equilíbrio. O sentido e intensidade do fluxo de vapor de água entre a massa de grãos e o ar intergranular dependerá da diferença de pressão de vapor da superfície do produto e do ar. Caso a pressão de vapor do ar seja menor ou maior ocorre, respectivamente, a secagem (dessorção) ou o umedecimento (adsorção) e caso as pressões sejam iguais têm-se o equilíbrio higroscópico (CORRÊA *et al.*, 2005 e SILVA *et al.*, 2015).

Percebe-se, portanto, a grande interferência da umidade relativa no comportamento dos grãos armazenados, incluindo sua seguridade. A IN nº 29 que regulamenta o Sistema Nacional de Certificação de Unidades Armazenadoras (BRASIL, 2011), não estabelece a necessidade de monitorar a umidade relativa do ar intergranular

nos silos. Entretanto, com o monitoramento da umidade relativa no interior dos silos associado a temperatura da massa de grãos é possível promover o manejo da aeração considerando o teor de água de equilíbrio dos grãos.

Os sensores digitais de temperatura e umidade relativa surgem como alternativa para monitoramento da temperatura da massa de grãos no interior de silos, apresentam simplicidade de instalação e utilização, manutenção mais simples e menos onerosa e facilidade de ser associado a automação do sistema de aeração. Além disso, apresentam destacada precisão nas medições de temperatura.

Com isso, o objetivo no presente estudo foi verificar a eficiência e aplicabilidade de sensores de umidade relativa intergranular atrelados a sensores digitais de temperatura no sistema de termometria de silos armazenando grãos de soja, paralelamente determinar as isotermas de dessecção para diferentes cultivares de soja testando a equação média para estimativa do teor de água de equilíbrio.

2.2. MATERIAL E MÉTODOS

2.2.1. Descrição do sistema de termometria

Foram utilizados grãos de soja na safra 2018/19 provenientes de produtores do estado de Goiás. Os grãos foram colhidos por colhedoras automotrizes, transportados por caminhões até a unidade armazenadora situada no município de Morrinhos – GO, na rodovia GO-213.

Os grãos passaram pelo processo de pré-processamento, sendo secagem e limpeza e foram armazenados em silos metálicos verticais em temperatura ambiente. O silo de formato circular possuía 22 metros de diâmetro, contabilizando 22 anéis de 0,917 m, fornecendo um corpo de 20,19 m de altura e 26,44 m de altura total.

Durante o armazenamento, houve monitoramento da temperatura da massa de grãos e da umidade relativa intergranular utilizando sensores digitais. O sistema de termometria presente no silo, foi composto por 128 sensores digitais de temperatura, sendo a estrutura composta por 9 cabos distribuídos estratégica e homogeneamente pelo silo conforme apresentado na Figura 1. Os cabos laterais compostos foram compostos por 8 pêndulos apresentando 14 sensores digitais de temperatura em cada um deles, e no cabo central foram instalados 16 sensores, totalizando 128 pontos de leitura de temperatura.

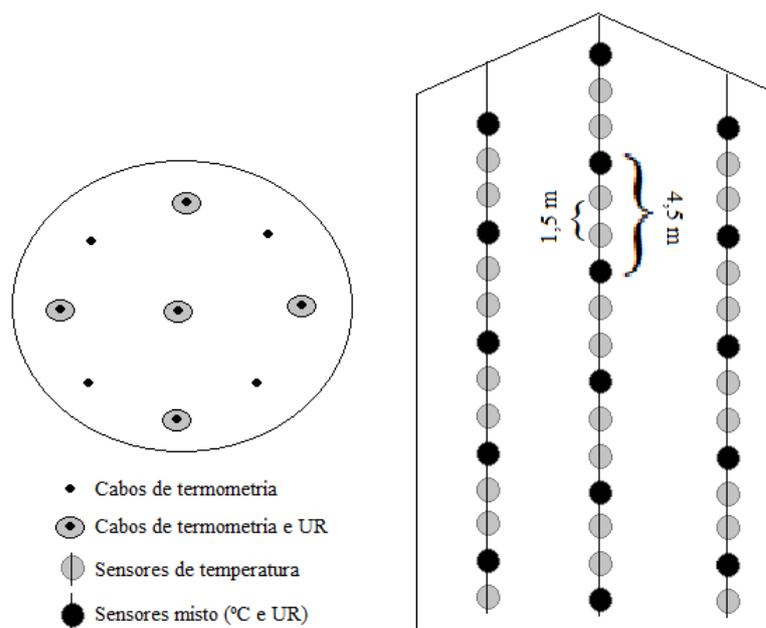


Figura 1. Esquema organizacional da termometria digital contendo sensores mistos de leitura de temperatura e umidade relativa.

Desses 128 sensores, 26 foram sensores mistos, com a capacidade de obter leituras de temperatura e umidade relativa intergranular, esses sensores foram dispostos uniformemente em 5 cabos, conforme ilustrado na Figura 1. Os sensores mistos foram distribuídos em 4 cabos laterais e 1 central, contendo 5 sensores em cada cabo lateral, e o cabo central foi composto por 6 sensores mistos. Em cada cabo os sensores digitais mistos foram distanciados verticalmente em 4,5 m, contendo um sensor misto a cada 295 m³, os sensores de temperatura espaçados em 1,5 m, apresentando um sensor de temperatura a aproximadamente 60 m³.

2.2.2. Caracterização do teor de água em função da temperatura e umidade relativa

Foram obtidos os valores da temperatura da massa de grãos e da umidade relativa intergranular de 4 dias anteriores à coleta das amostragens do produto, sendo extraídas informações dos sensores em três períodos do dia, às 6, 14 e as 20h. O silo foi dividido em três regiões (terços) a fim de separar em função da altura (superior, médio e inferior).

Para a realização das avaliações foram utilizados apenas os dados dos sensores mistos, que mensuram a temperatura e a umidade relativa, os demais sensores de temperatura não foram considerados para essa análise. O terço superior foi composto por um conjunto de 6 sensores, sendo esses agrupados em 3 duplas, representando as repetições. O terço médio era composto por 9 sensores, sendo montadas as 3 repetições

com os dados de 3 sensores em cada um. Para o terço inferior foi adotado o mesmo esquema do terço superior, visto que nesse terço também havia 6 sensores.

Para obter-se a média da temperatura e umidade relativa em cada sensor, no período das amostragens, consideraram-se os dados de leitura de 4 dias anteriores a coleta das amostras, sendo utilizados dados de três períodos por dia, conforme anteriormente descrito, totalizando 12 leituras para cada sensor. As médias do teor de água de equilíbrio estimado pelo sistema foram obtidas da mesma maneira. O sistema estima o teor de água de equilíbrio a partir de equação de teor de equilíbrio higroscópico (Equação 1), utilizando os dados de temperatura e umidade relativa intergranular, ou seja, para os mesmos pontos em que estão os sensores mistos, sendo estimado o teor de água de equilíbrio, sendo esses então selecionados.

A Equação 1 representa o modelo de Henderson Modificado (ASABE, 2007) utilizado pelo sistema dos sensores para estimar o teor de água de equilíbrio dos grãos de soja armazenados.

$$X_e = \left[\frac{\ln(1 - a_w)}{-0,00031 \cdot (T + 66,60300)} \right]^{\frac{1}{1,7459}} \quad (1)$$

em que,

X_e : Teor de água de equilíbrio, % b.s.;

a_w : Atividade de água, decimal;

T : Temperatura, °C;

Para a determinação do teor de água de equilíbrio os grãos foram coletados duas vezes com intervalo de 15 dias entre as coletas nos terços superior, médio e inferior. No terço superior as amostras foram coletadas à profundidade de 2,5 m, em cinco pontos aleatórios, formando uma amostra composta, com o auxílio de um calador manual composto de 3 estágios.

No terço médio para obter a amostra composta, os grãos também foram coletados em cinco pontos aleatórios, foram retiradas na profundidade de 10,0 m com o auxílio de sonda pneumática. No terço inferior as amostras foram retiradas com auxílio de um caneco pelicano que coletou os grãos nas três saídas dos transportadores helicoidais, utilizados na descarga dos grãos, coletando amostras no intervalo de 30 segundo para compor os blocos amostrais.

Para cada terço e coleta foram retirados, aproximadamente 5,0 kg de grãos, sendo as amostras homogeneizadas e reduzidas a 1,0 kg em homogeneizador do tipo Boerner.

Para determinar o teor de água foi utilizado o método da estufa a $105 \pm 3^\circ\text{C}$ durante 24 h (Brasil, 2009), com 10 g por amostra, em três repetições, para cada terço em cada época de amostragem.

2.2.3. Comparativo da estimativa x determinação do teor de água dos grãos

Compararam os dois métodos de avaliação do teor de água de equilíbrio, o estimado pelo sistema a partir das leituras dos sensores utilizando a Equação 1, e o determinado experimentalmente em estufa a partir da coleta das amostras (BRASIL, 2009). Para isso, foi desconsiderada a comparativa entre as duas amostragens, sendo então as repetições formadas pelas leituras dos grupos dos sensores para cada terço, conforme descrito anteriormente.

Devido a ocorrência de duas épocas de amostragens essas foram adicionadas ao cálculo da média. Ou seja, após a obtenção da média dos grupamentos dos sensores por repetição, calculou-se a média entre as mesmas repetições das duas épocas de amostragem, obtendo então a média geral por repetição.

Além da comparação entre os métodos de avaliação do teor de água de equilíbrio verificou-se a influência da localização dos grãos (superior, médio e inferior), isoladamente e em correlação ao método de avaliação do teor de água.

2.2.4. Isotermas de dessorção de diferentes cultivares de soja

Foi determinado o ajuste de modelos matemáticos para prever as isotermas de dessorção dos grãos de soja, para isso, foram utilizadas diferentes cultivares separadamente. Posteriormente, foi realizado um teste de seleção de um modelo médio para estimar o comportamento dos grãos de soja. As equações obtidas no ajuste das isotermas foram posteriormente testadas para comparar com o teor de água de equilíbrio estimado pelo sistema dos sensores digitais.

Para determinar as isotermas de dessorção foram utilizados grãos de seis cultivares de soja (BÔNUS; M-7739; CD-2728; NS-7300; BRS-7960; CD-2737) produzidos na safra 2018/2019, sendo colhidos manualmente, aproximadamente, 6 kg de cada cultivar de soja. As amostras estavam com o teor de água inicial de 22% b.s., determinado pelo método da estufa, na temperatura de $105 \pm 3^\circ\text{C}$, durante 24 h, em três repetições, de acordo com a Regra para Análise de Sementes (BRASIL, 2009).

Posteriormente, foi realizada a triagem manual dos grãos, e as amostras foram homogeneizadas em equipamento tipo Boerner, utilizando-se três passadas. Após a homogeneização, foram separadas, aproximadamente, 3 kg de grãos de soja para cada uma das seis cultivares para a determinação das isothermas.

As isothermas de dessecção foram determinadas pelo método estático-indireto em que a atividade de água (A_w) foi determinada por meio do equipamento Higropalm Model aw1. Para isso foi realizada a secagem dos grãos em estufa de ventilação forçada de ar na temperatura de 40°C, e foram padronizados em teores de água finais de 20; 18; 16; 14, 12 e 10% b.s. obtidos pelo método gravimétrico, conhecendo-se o teor de água inicial. Os teores de água foram conferidos pelo método de estufa a 105 ± 3°C, durante 24 h (BRASIL, 2009).

Para cada teor de água foram separados, aproximadamente, 45 g de grãos em três repetições e foram realizadas as leituras no equipamento HigoPalm em condições de temperaturas controladas de 10, 20, 30 e 40°C e com a atividade de água experimental variando entre 0,53 e 0,82. A calibração do equipamento foi realizada em temperatura ambiente com o produto e a precisão do mesmo é de ± 0,01% de A_w . Os grãos de soja foram acondicionados, por repetição, no interior do equipamento, e inseridos em câmaras tipo B.O.D. nas temperaturas controladas. Após a estabilização da temperatura e atividade de água procedeu-se a leitura, posteriormente determinou-se o teor de água final das amostras (BRASIL, 2009).

Aos dados experimentais de cada uma das cultivares BÔNUS, M-7739, CD-2728, NS-7300, BRS-7960, CD-2737 foram ajustados os modelos matemáticos (Tabela 1) utilizados por diferentes pesquisadores para representação da higroscopicidade de produtos agrícolas, por meio de análise de regressão não linear.

Tabela 1. Modelos matemáticos utilizados para prever o teor de água de equilíbrio higroscópico de produtos vegetais.

Designação do modelo	Modelo	
$X_e = [-1/(c \cdot T^d)] \cdot \ln[\ln(a_w)/(-a \cdot T^b)]$	Chen Clayton	(2)
$X_e = \exp[a - (b \cdot T) + (c \cdot a_w)]$	Copace	(3)
$X_e = (a+b \cdot T)/[(1-a_w)/a_w]^{\frac{1}{c}}$	Oswin Modificado	(4)
$X_e = a \cdot [a_w^b / T^c]$	Sabbah	(5)
$X_e = \exp\{a - (b \cdot T) + [c \cdot \exp(a_w)]\}$	Sigma Copace	(6)

em que,

a, b, c e d: Coeficientes que dependem do produto.

O ajuste dos modelos matemáticos foi realizado utilizando a análise de regressão não linear, pelo método Gauss Newton. A fim de verificar o grau de ajuste de cada modelo analisou-se a magnitude do coeficiente de determinação (R^2), do erro médio estimado (SE), os valores do erro médio relativo (P), o teste de *Qui*-quadrado (χ^2) ao nível de significância de 0,01 e o intervalo de confiança a 99% ($P < 0,01$).

As diferenças entre os valores experimentais, os estimados pelo modelo, juntamente com o grau de liberdade e número de observações, são utilizadas para calcular os valores do erro médio estimado (SE), erro médio relativo (P) e teste de *Qui*-quadrado (χ^2), conforme as seguintes expressões:

$$P = \frac{100}{n} \sum \frac{|Y - \hat{Y}|}{Y} \quad (7)$$

$$SE = \sqrt{\sum \frac{(Y - \hat{Y})^2}{GLR}} \quad (8)$$

$$\chi^2 = \sum \frac{(Y - \hat{Y})^2}{GLR} \quad (9)$$

em que:

Y: Valor experimental;

\hat{Y} : Valor estimado pelo modelo;

n: número de observações experimentais;

GLR: Graus de liberdade do modelo (número de observações experimentais menos o número de parâmetros do modelo).

Além dos parâmetros anteriores foram utilizados o critério de informação de Akaike (AIC) e o critério de informação de Bayesiano de Schwarz (BIC), esses foram estimados para os modelos que apresentaram bom ajuste para todas as cultivares. O AIC permite utilizar o princípio da parcimônia na escolha do melhor modelo, ou seja, segundo este critério, o modelo mais parametrizado nem sempre é o melhor (BURNHAM; ANDERSON, 2004). Valores mais baixos de AIC refletem melhor ajuste (AKAIKE, 1974), conforme apresentado na Equação 10.

$$AIC = -2 \log \text{like} + 2p \quad (10)$$

em que,

p: Número de parâmetros;

loglike: Valor do logaritmo da função de verossimilhança considerando as estimativas dos parâmetros.

O BIC também considera o grau de parametrização do modelo e, portanto, quanto menor o valor do BIC for Schwarz (1978), melhor será o ajuste do modelo, Equação 11.

$$BIC = -2 \log \text{like} + p \cdot \ln(n) \quad (11)$$

A partir do modelo selecionado para representar as isotermas de dessorção das diferentes cultivares de soja, foram obtidos os valores dos coeficientes do modelo para cada cultivar, a partir desses foi calculada a média para os determinados coeficientes. A partir dos valores médios dos coeficientes esses serão substituídos na equação do modelo e foi realizada a estimativa do modelo com as magnitudes dos coeficientes. O grau de ajuste do modelo às condições experimentais observadas para cada cultivar foi avaliado a partir da análise do erro médio relativo (P), erro médio estimado e teste de *Qui*-quadrado (χ^2) ao nível de significância de 0,01 e o intervalo de confiança a 99% ($P < 0,01$).

2.2.5. Comparação do teor de água estimado entre os modelos

As equações obtidas do modelo selecionado para estimar as isotermas de dessorção para cada uma das cultivares e da equação com os valores médios dos coeficientes, serão utilizadas para estimar os teores de água de equilíbrio dos grãos armazenados no silo metálico nos três terços (inferior, médio e superior), comparativamente com o teor de água determinado experimentalmente pelo método de estufa (BRASIL, 2009) e teor de água estimado experimental pelos sensores a partir da Equação 1. As equações foram denominadas de mod1, mod2, mod3, mod4, mod5 e mod6 sendo essas referente as cultivares Bônus, M-7739, CD-2728, NS7300, BRS-7960 e CD-2737, respectivamente. A equação com os valores médios dos coeficientes foi denominada de modMed.

A estimativa do teor de água de equilíbrio das equações foi realizada a partir dos dados dos sensores mistos, de temperatura e umidade relativa, nos mesmos períodos anteriormente descritos. Sendo desconsiderado o fator tempo de amostragem e, sendo calculada a média entre as duas amostragens.

2.2.6. Análise estatística

Para caracterização do teor de água de equilíbrio em função da temperatura e umidade relativa intergranular foi montado um esquema fatorial 2 x 3, sendo 2 amostragens e 3 terços (superior, médio e inferior), em delineamento em blocos ao acaso,

sendo analisada a temperatura da massa de grãos, umidade relativa intergranular, teor de água de equilíbrio estimado pelo sistema e teor de água determinado na amostragem.

Em relação ao comparativo da estimativa e determinação do teor de água, o experimento seguiu o esquema fatorial 2 x 3, sendo 2 métodos de avaliação do teor de água (estimado pelo sistema e determinado na amostragem) e 3 terços (superior, médio e inferior), os dados de teor de água de equilíbrio foram comparados entre os diferentes tratamentos.

A análise estatística da comparação do teor de água de equilíbrio estimado, entre os modelos, foi realizada com intuito de comparar as estimativas das diferentes equações do modelo ajustado, com os teores de água determinados na amostragem e teor de água de equilíbrio estimado pelo sistema. O esquema fatorial do experimento foi 9 x 3, sendo 9 métodos de avaliação do teor de água, através das 6 equações mod1, mod2, mod3, mod4, mod5, mod6 e modMed, com a estimativa dos sensores através da Equação 1 e, determinação do teor de água na amostragem, correlacionados aos 3 terços (superior, médio e inferior).

Os dados foram analisados por meio da análise de variância, sendo as médias comparadas pelo teste de Tukey, adotando o nível de significância de 5%. Para a análise estatística das isotermas a metodologia de avaliação dos parâmetros foi a anteriormente descrita.

2.3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

2.3.1. Caracterização do teor de água em função da temperatura e umidade relativa

Na Tabela 2 é apresentado o resumo da análise de variância para as variáveis temperatura da massa de grãos, umidade relativa intergranular, teor de água de equilíbrio estimado pelo sistema por meio da Equação 1, e teor de água de equilíbrio determinado nas amostras. Observa-se que para o fator amostragem não houve diferença para variáveis analisadas, como não houve interação para os fatores amostragem x terço. Para o fator terço, ou seja, localização dos grãos no silo, observou-se diferença pelo teste de F para todas as variáveis.

Tabela 2. Resumo da análise de variância com os valores do quadrado médio para temperatura, umidade relativa (UR), teor de água de equilíbrio estimado (TAEE) e teor de água de equilíbrio determinado (TAED) da massa de grãos de soja armazenadas em silo metálico.

FV	Temperatura	UR	TAEE	TAED
	Quadrado médio			
Amostragem	9,89 ^{ns}	0,52 ^{ns}	0,05 ^{ns}	0,02 ^{ns}
Terço	36,79 ^{**}	68,6 ^{**}	10,55 ^{**}	1,30 ^{**}
Amostragem x Terço	1,37 ^{ns}	0,38 ^{ns}	0,01 ^{ns}	0,11 ^{ns}
CV (%)	8,66	2,87	5,97	1,27
Média Geral	25,71	71,01	13,77	14,10

FV: Fonte de variação; CV: Coeficiente de variação. QM: Quadrado médio. **Significativo a 1% pelo teste de F; ^{ns}Não significativo pelo teste de F.

A média da temperatura da massa de grãos de soja no período analisado foi de 25,71°C, e essa não se diferenciou entre as amostragens (Tabela 3). A média da umidade relativa intergranular no período analisado foi de 71,01%, com estimativa de teor de água médio dos grãos de 13,77% b.s., ambos não diferindo de acordo com o tempo de amostragem. Para o teor de água determinado experimentalmente nos grãos coletados observou-se que esse não divergiu durante o período de amostragem, apresentando a média de 14,10% b.s., que indica possível estado de equilíbrio higroscópico no período (CORRÊA *et al.*, 2014).

Tabela 3. Valores médios da temperatura (°C), umidade relativa (%), teor de água de equilíbrio estimado (TAEE, % b.s.) e teor de água de equilíbrio determinado (TAED, % b.s.) de duas amostragens de grãos de soja armazenados em diferentes terços em silo metálico.

Amostragem	Temperatura	UR	TAEE	TAED
Primeira	26,45	71,18	13,81	14,14
Segunda	24,97	70,84	13,72	14,06
Terço	Temperatura	UR	TAEE	TAED
Superior	28,43 a	68,03 b	12,45 c	14,59 a
Médio	25,11 ab	70,78 ab	13,76 b	13,67 c
Inferior	23,59 b	74,73 a	15,10 a	14,04 b

Letras iguais na mesma coluna não diferem entre si pelo teste de Tukey a 5% de significância.

Na Tabela 2 é possível analisar o efeito do comportamento das variáveis analisadas em função da disposição dos grãos no silo, por meio dos diferentes terços. Observa-se que para a temperatura o terço superior apresentou a maior média comparativamente aos grãos armazenados no terço inferior, comportamento contrário foi visualizado para umidade relativa intergranular, em que, a maior média de umidade relativa intergranular foi apresentada para o terço inferior, enquanto o terço superior demonstrou menor valor.

O fato de o terço inferior apresentar menor temperatura pode ser justificado por ser a primeira porção de grãos em que o ar da aeração por insuflação passa, ou seja, tornando esse grão mais susceptível ao resfriamento do que os grãos do terço médio e superior, isso ocorre pela menor pressão estática no terço inferior em comparação aos demais terços (GONELI *et al.*, 2020).

A diferença da umidade relativa intergranular nos diferentes terços do silo pode ser justificada pela movimentação da corrente do ar por convecção (natural e forçada), isto é, o ar no interior do silo não é estático, pois ocorre a circulação no silo pela diferença de densidade entre o ar quente e o frio. Quando ocorrem casos no interior do silo como o observado na Tabela 3, em que, a temperatura do terço superior é maior aos demais terços, o ar quente dessa região tende a direcionar-se para as demais, cujas temperaturas são

inferiores. Na diferença de temperatura de ar com a temperatura da massa de grãos ocorre o arrefecimento do ar, e conseqüentemente, o aumento da umidade relativa intergranular (SAUER, 1992). Para Devilla *et al.* (2004) diferenças na temperatura podem promover a migração de umidade das áreas de altas temperaturas para as baixas temperaturas.

Conforme a Tabela 3, nota-se efeito das variáveis temperatura e umidade relativa intergranular para estimativa do teor de água através da Equação 1, em que os grãos armazenados nos três terços diferiram entre si, sendo que é possível notar maior efeito da variável UR, visto que o maior teor de água estimado foi para os grãos situados no terço inferior, seguidos pelo terço médio e superior.

Analisando o teor de água determinado, nota-se que o resultado não foi o mesmo, o terço superior apresentou grãos com maior teor de água, seguidos pelo terço inferior e por fim o terço médio. De acordo com Côrrea *et al.* (2014) e Durks *et al.* (2019) grãos estocados em grandes volumes, permanecem em constante busca do equilíbrio higroscópico com o ar circundante.

2.3.2. Comparativo da estimativa x determinação do teor de água dos grãos

Em relação a análise comparativa entre o teor de água de equilíbrio estimado pelo sistema através da Equação 1 com o teor de água determinado experimentalmente, é possível notar na Tabela 4 que apenas o método de avaliação do teor de água, isoladamente, não foi significativo pelo teste de F, o mesmo não ocorreu para o teor de água nos diferentes terços, em que houve diferença. Houve diferença para a interação entre o método de avaliação do teor de água x terço no silo.

Tabela 4. Resumo da análise de variância com os valores do quadrado médio para o teor de água de grãos de soja avaliados a partir da estimativa e determinação.

FV	QM
Método de avaliação do TA	0,30 ^{ns}
Terço	1,87*
Método de avaliação do TA x Terço	3,95**
CV (%)	4,32
Média Geral	13,93

FV: Fonte de variação; TA: Teor de água; CV: Coeficiente de variação. QM: Quadrado médio.
**Significativo a 1% pelo teste de F; *Significativo a 5% pelo teste de F; ^{ns}Não significativo pelo teste de F.

Analisando os métodos de avaliação do teor de água nos diferentes terços, houve diferença apenas no terço superior, em que o teor de água de equilíbrio estimado (Eq. 1) foi inferior (12,45% b.s.) ao teor de água de equilíbrio experimentalmente (14,59% b.s.) (Tabela 5). Observando cada método de avaliação do teor de água para os diferentes terços nota-se que o teor de água experimental não diferiu nos diferentes terços, enquanto no teor de água estimado os grãos armazenados no terço superior apresentaram menor teor de água.

Tabela 5. Valores médios do teor de água de grãos de soja obtidos a partir da estimativa do teor de água de equilíbrio (TAEE, % b.s.) e através da determinação do teor de água de equilíbrio experimental (TAED, % b.s.).

Terço	TAEE	TAED
Superior	12,45 Bb	14,59 Aa
Médio	13,76 Aa	13,67 Aa
Inferior	14,90 Aa	13,92 Aa

Letras iguais maiúsculas na mesma linha e minúsculas na mesma coluna não diferem entre si pelo teste de Tukey a 5% de significância.

É possível que a estimativa do teor de água para o terço superior (Tabela 5) pode ter apresentado algum erro, visto que os valores estão destoantes dos demais valores de teor de água, estimados e experimentais. Ressalta-se que o teor de água estimado pelo sistema é obtido a partir da estimativa matemática da correlação entre os dados dos sensores de temperatura da massa de grãos e umidade relativa intergranular por meio da Equação 1.

De acordo com a Tabela 3, a temperatura média foi de 28,43°C e a umidade relativa intergranular foi de 68,03%. Durante o período da análise foi identificada a formação de bolsa de calor na zona central do silo na faixa superior, que proporcionou o aumento de temperatura pela presença de impurezas finas na massa de grãos. Para verificação foram coletadas amostras nessa faixa central do silo, identificando a proporção de 7,22% de impurezas, além disso determinou-se o teor de água dos grãos coletadas nessa porção, apresentando média de 13,30% b.s, ou seja, esteve dentro da média estimada na Tabela 5.

A presença do alto nível de impurezas no terço superior do silo promoveu barreira para passagem do ar da aeração, além disso impurezas podem colaborar para ocorrência de insetos e processos oxidativos (DURKS *et al.*, 2019). O alto teor de impurezas, acima de 1% que é o limite estabelecido pelo MAPA (BRASIL, 2007), com o tempo promoveu aumento da taxa de respiração de grãos fazendo com que a temperatura da massa de grãos se elevasse, sendo esse período de combinação de temperatura insuficiente para chegar ao valor de equilíbrio, de acordo com Weber (2005), nem sempre o produto atingirá o equilíbrio por suas características físicas, para de fato ocorrer o equilíbrio em algumas situações demandaria um tempo impraticável, no entanto o autor ressalva que as estimativas são tendência.

Pelo método de avaliação do teor de água determinado experimentalmente os valores estavam superiores (14,59% b.s.) quando comparado aos estimados (12,59%), ou seja, produto teria que passar por processo de dessecção. Ressalta-se que o método de determinação do teor de água empregado é um método direto, que quantifica a quantidade de água na amostra a partir da extração da água (MORITZ *et al.*, 2012), portanto, apresenta satisfatória precisão.

Apesar da diferença para o teor de água estimado no terço superior para o experimental no mesmo terço, nota-se que a estimativa do teor de água pelo sistema se demonstrou eficiente, não apresentando diferença para o teor de água experimental de maneira geral. Além disso, nota-se que os sensores de umidade relativa representam bom aliado para o acompanhamento do comportamento do produto ao longo do armazenamento.

2.3.3. Isotermas de dessecção de diferentes cultivares de soja

Na Tabela 6 são apresentados os valores de atividade de água para os grãos de diferentes cultivares de soja, para a faixa de temperatura de 10 a 40°C com teor de água de equilíbrio variando de 8,6 a 20,9% b.s. Nota-se que para as cultivares analisadas, com o aumento da temperatura e incremento do teor de água de equilíbrio promovem elevação da atividade de água. Resultados semelhantes foram relatados por diferentes autores nos estudos de isotermas de grãos de sorgo granífero (FONSECA *et al.*, 2020) e sementes de cártamo (BESSA *et al.*, 2021). De acordo com Goneli *et al.* (2014) o aumento da atividade de água ocorre pela elevação do nível de vibração das moléculas no interior dos grãos, pelo aumento da temperatura.

Tabela 6. Valores de atividade de água (a_w , decimal) das diferentes cultivares de soja em função do teor de água de equilíbrio (X_e , % b.s.) e da temperatura ($^{\circ}\text{C}$).

Cultivar	Temperatura $^{\circ}\text{C}$							
	10		20		30		40	
	a_w	X_e	a_w	X_e	a_w	X_e	a_w	X_e
BÔNUS	0,561	9,002	0,572	9,190	0,665	11,846	0,569	9,108
	0,647	11,788	0,665	11,906	0,719	14,201	0,660	12,404
	0,722	14,112	0,722	14,132	0,764	16,881	0,715	13,902
	0,766	16,458	0,824	20,103	0,821	20,285	0,763	16,597
M-7739	0,589	10,450	0,605	10,374	0,589	10,332	0,586	10,146
	0,665	12,317	0,662	12,198	0,719	14,375	0,650	11,703
	0,720	14,647	0,733	14,638	0,768	16,710	0,714	14,279
	0,779	17,210	0,782	16,789	0,791	18,482	-	-
	0,802	19,053	0,794	18,782	-	-	-	-
CD-2728	0,570	10,042	0,596	10,682	0,590	9,926	0,585	9,845
	0,650	12,607	0,662	12,485	0,666	12,780	0,660	12,272
	0,711	15,535	0,728	14,849	0,720	14,400	0,711	14,333
	0,778	18,457	0,818	20,507	0,774	17,502	0,761	17,291
	0,813	20,908	-	-	0,810	20,396	0,802	20,215
NS-7300	0,571	10,179	0,594	10,213	0,599	10,179	0,589	10,054
	0,666	12,615	0,670	12,599	0,676	12,427	0,670	12,352
	0,691	13,283	0,697	13,142	0,692	12,930	0,681	12,860
	0,776	17,467	0,775	16,720	0,771	16,660	0,757	16,462
	0,810	19,280	0,815	19,245	0,801	18,929	0,785	18,660
BRS-7960	0,583	10,385	0,609	10,584	0,605	10,211	0,618	10,112
	0,659	11,892	0,670	11,909	0,666	11,810	0,654	11,660
	0,723	14,518	0,731	14,494	0,729	14,411	0,717	14,148
	0,778	17,743	0,783	17,693	0,784	17,593	0,802	19,405
	0,814	20,306	0,817	19,697	0,816	19,577	-	-
CD-2737	0,520	8,741	0,540	8,798	0,527	8,814	0,540	8,686
	0,661	12,218	0,674	12,285	0,672	12,767	0,660	12,235
	0,698	13,356	0,701	13,365	0,702	13,365	0,691	13,348
	0,735	15,323	0,739	15,374	0,741	15,349	0,730	14,960
	0,794	19,181	-	-	0,804	19,163	-	-

Na Tabela 7 estão apresentados os resultados dos parâmetros estatísticos obtidos a partir do ajuste dos diferentes modelos matemáticos as curvas das isotermas de dessorção das cultivares de soja. Para o erro médio estimado (SE) nota-se que para a cultivar CD-2728 o ajuste do modelo de Sigma Copace (6) apresentou menor valor, enquanto para as demais cultivares o modelo de Oswin Modificado (4) apresentou menores valores. Para o ajuste das curvas da cultivar CD-2728 o modelo de Oswin

Modificado (4) também apresentou valor baixo. De acordo com Draper & Smith (1998) quanto menor o valor de SE melhor é a representação do modelo para o fenômeno em estudo.

Tabela 7. Coeficientes de determinação (R^2 , %), erro médio relativo (P, %), erro médio estimado (SE, decimal) e *Qui*-quadrado (χ^2 , decimal) para os modelos ajustados às curvas das isotermas de dessorção de diferentes cultivares de soja.

Modelo	Cultivar							
	Bônus				M-7739			
	SE	P	R^2	χ^2	SE	P	R^2	χ^2
2	0,347	2,15	99,23	0,120	0,422	2,10	98,55	0,178
3	8,625	685,12	99,54	74,398	0,394	1426,02	99,54	0,155
4	0,287	1,63	99,43	0,825	0,306	1,35	99,99	0,094
5	0,488	3,17	98,35	0,238	0,487	2,69	97,92	0,237
6	30,25	190,91	99,56	915,35	0,343	1,58	98,96	0,118

Modelo	Cultivar							
	CD-2728				NS-7300			
	SE	P	R^2	χ^2	SE	P	R^2	χ^2
2	0,433	2,09	98,9	0,188	0,427	2,33	98,57	0,182
3	0,442	1500,01	98,82	0,195	0,415	1430,72	98,56	0,172
4	0,418	2,00	98,95	0,174	0,364	1,94	98,89	0,133
5	0,508	2,60	98,43	0,258	0,510	2,86	97,83	0,261
6	0,406	2,01	99,01	0,165	0,368	1,87	98,86	0,136

Modelo	Cultivar							
	BRS-7960				CD-2737			
	SE	P	R^2	χ^2	SE	P	R^2	χ^2
2	0,458	2,44	98,69	0,210	0,522	2,91	97,80	0,273
3	0,435	1463,19	98,74	0,189	0,435	1314,77	98,36	0,190
4	0,349	1,81	99,20	0,122	0,247	1,50	99,48	0,061
5	0,534	2,97	98,09	0,285	0,649	4,01	96,34	0,421
6	10,157	61,78	99,09	103,16	0,308	1,85	99,19	0,095

Com relação ao erro médio relativo (P) (Tabela 7), o modelo de Oswin Modificado (4) apresentou menor valor para o ajuste das isotermas das cultivares Bônus, M-7739, BRS-7960 e CD-2737, enquanto para as cultivares CD-2728 e NS-7300 o modelo de Sigma Copace (6) apresentou o menor valor. Modelos que apresentem valores para P inferiores a 10% podem ser utilizados para estimar as isotermas de dessorção de um produto (MOHAPATRA & RAO, 2005). No entanto, por se tratar de um valor que avalia o erro de estimativa, quanto menores os valores para este parâmetro melhor será a estimativa do modelo.

Considerando o valor de P inferior a 10% o modelo de Copace (3) não é recomendado para estimar as isotermas das diferentes cultivares do presente estudo por apresentar valor alto para o erro médio relativo (Tabela 7), como o modelo de Sigma Copace (6) não é recomendado para ser utilizado para as cultivares Bônus e BRS-7960.

Para o coeficiente de determinação R^2 (Tabela 7) todos os ajustes apresentaram grandeza superior a 97%, sendo importante ressaltar que o R^2 não pode ser utilizado sozinho para avaliação e seleção de modelos, visto que esse se baseia em valores médios positivos e negativos nos modelos não lineares, ocasionando valores extremos (MADAMBA *et al.*, 1996). O ajuste do modelo de Oswin Modificado (4) apresentou maiores valores para R^2 para todas cultivares, com exceção do ajuste das cultivares Bônus e CD-2728, em que o modelo de Sigma Copace (6) demonstrou maiores magnitudes.

Quanto ao χ^2 todos os ajustes apresentaram-se dentro do intervalo de confiança de 99% (χ^2 tabulado = 8,2604) (Tabela 7). O ajuste do modelo de Chen Clayton (2) apresentou menor *Qui*-quadrado para a cultivar Bônus, enquanto Sigma Copace (6) demonstrou menor valor para esse parâmetro no ajuste da cultivar CD-2728, enquanto para as demais cultivares o ajuste de Oswin Modificado (4) apresentou os menores valores para χ^2 , de acordo Gunhan *et al.* (2005) quanto menor o valor deste parâmetro melhor será o ajuste do modelo aos dados experimentais.

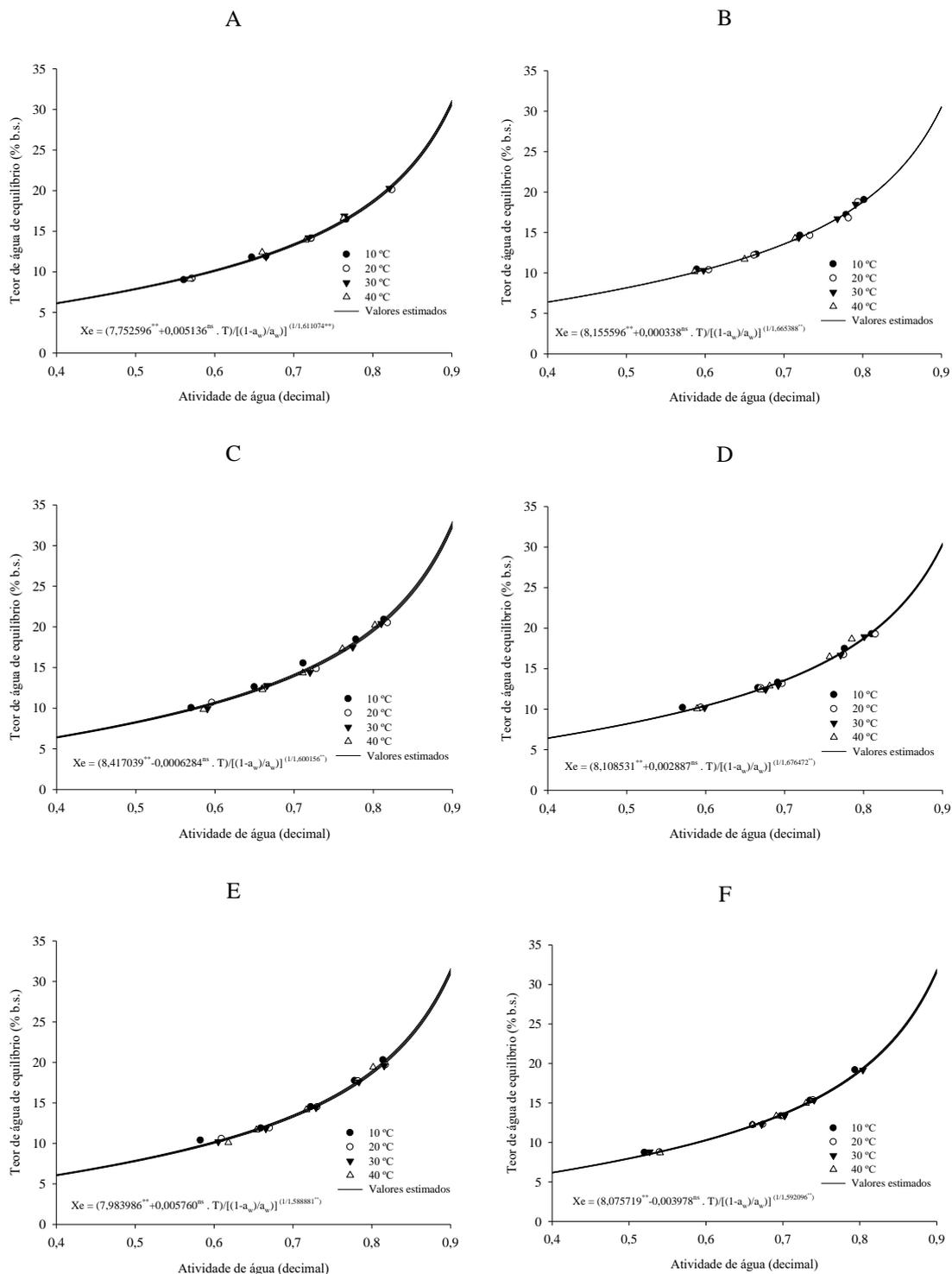
Considerando os resultados dos parâmetros estatísticos obtidos a partir do ajuste das curvas das isotermas de dessorção das diferentes cultivares de soja selecionaram os modelos que se destacaram, em pelo menos uma avaliação para qualquer cultivar, sendo esses o modelo de Chen Clayton (2) e Oswin Modificado (4). O modelo de Sigma Copace (6) foi descartado dessa seleção por não ser recomendado para algumas cultivares. Aos modelos selecionados foram empregados o teste de AIC e BIC, cuja grandezas estão apresentadas na Tabela 8.

Tabela 8. Valores dos critérios de informação de Akaike (AIC) e critérios de informação bayesiano de Schwarz (BIC) para os modelos ajustados as isotermas de dessorção de cultivares de grãos de soja.

Modelo	Cultivar					
	BÔNUS		M-7739		CD-2728	
	AIC	BIC	AIC	BIC	AIC	BIC
Chen Clayton	16,86	20,72	24,33	28,49	27,91	32,63
Oswin Modificado	9,94	13,03	12,84	16,17	25,5	29,28

Modelo	Cultivar					
	NS-7300		BRS-7960		CD-2737	
	AIC	BIC	AIC	BIC	AIC	BIC
Chen Clayton	28,28	33,26	29,74	34,47	32,91	37,36
Oswin Modificado	21,2	25,19	18,33	22,11	5,00	8,56

Observa-se que os valores de AIC e BIC foram menores para o modelo de Oswin Modificado para todas as cultivares (Tabela 8), esses parâmetros contribuíram para definição do melhor modelo para ajustar as isotermas de dessorção de diferentes produtos (FERREIRA JUNIOR, *et al.*, 2018; FONSECA *et al.*; 2020). Baseado nos resultados anteriormente discutidos o modelo de Oswin Modificado foi selecionado para estimar as curvas das isotermas de dessorção das diferentes cultivares de soja (Figura 1).



**Significativo a 1% pelo teste de t; ^{ns}Não significativo pelo teste de t.

Figura 2. Isotermas de dessecção das cultivares Bônus (A), M-7739 (B), CD-2728 (C), NS-7300 (D), BRS-7960 (E) e CD-2737 (F) descritas pelo modelo de Oswin Modificado.

O modelo de Oswin Modificado apresentou bom ajuste as curvas sendo também recomendado para utilização da representação das curvas das isotermas de outros

produtos como por exemplo, para sementes de pimenta malagueta (SILVA & RODOVALHO, 2015), grãos de feijão (CAMPOS *et al.*, 2016), sementes de alface (ZEYMER *et al.*, 2017), sementes de jatobá (FERREIRA JUNIOR *et al.*, 2018), sementes de pimenta do reino (REGO *et al.*, 2020) e grãos de cacau (BIDIAS *et al.*, 2022).

O modelo de Halsey Modificado foi o modelo que melhor ajustou as curvas do equilíbrio higroscópico de grãos de soja na faixa de atividade de água de 0,07 a 0,98 para as temperaturas de 40, 50, 60 e 70°C (AVIARA *et al.*, 2004). A divergência entre modelos ajustados para a mesma espécie vegetal pode ser justificada pela diferença das condições experimentais, o modelo de Halsey Modificado foi testado previamente aos dados experimentais do presente estudo, no entanto não apresentou bom ajuste. A Tabela 9 apresenta os coeficientes do modelo de Oswin Modificado para as diferentes cultivares de soja.

Tabela 9. Valores dos coeficientes do modelo de Oswin Modificado ajustado às diferentes cultivares de soja.

Coef.	Cultivar						Média
	Bônus	M-7739	CD-2728	NS-7300	BRS-7960	CD-2737	
a	7,7526**	8,1556**	8,4170**	8,1085**	7,9840**	8,0757**	8,0822**
b	0,0051 ^{ns}	0,0003 ^{ns}	-0,0063 ^{ns}	0,0029 ^{ns}	-0,0058 ^{ns}	-0,0040 ^{ns}	-0,0012 ^{ns}
c	1,6110**	1,6654**	1,6002**	1,6765**	1,5889**	1,5921**	1,6223**

**Significativo a 1% pelo teste de t; ^{ns}Não significativo pelo teste de t.

Percebe-se que houve diferenças para os valores dos coeficientes ‘a’, ‘b’ e ‘c’ entre as cultivares, de acordo com Botelho (2012) os coeficientes do modelo ajustado para a descrição das isotermas de dessorção são específicos para o produto ou material em estudo. Os coeficientes dos modelos ajustados são dependentes das características do produto, incluindo a composição química, que reflete no comportamento da atividade de água para os diferentes teores de água e temperatura. Sabe-se que a composição físico-química da soja pode variar de acordo com cultivar, época de plantio e colheita, condições edafoclimáticas no campo e as etapas de pós-colheita (MASCARENHAS *et al.*, 1996; MINUZZI *et al.*, 2009; CALÇADO *et al.*; 2019; DURKS *et al.*, 2019; HACKENHAAR *et al.*, 2019; FARIA NETO *et al.*; 2022).

Na Tabela 10 são apresentados os resultados dos parâmetros estatísticos do ajuste do modelo de Oswin Modificado, com os valores dos coeficientes ‘a’, ‘b’ e ‘c’ substituídos por o valor médio desses (Tabela 9).

Tabela 10. Parâmetros estatísticos do ajuste do modelo de Oswin Modificado com o valor dos coeficientes médio: erro médio relativo (P, %), erro médio estimado (SE, decimal) e *Qui*-quadrado (χ^2 , decimal) para as curvas de isotermas de dessorção das diferentes cultivares de soja.

Parâmetros	Cultivar					
	Bônus	M-7739	CD-2728	NS-7300	BRS-7960	CD-2737
SE	0,418	0,325	0,723	0,405	0,414	0,264
P	2,61	1,38	3,37	1,86	2,38	1,52
χ^2	0,1747	0,1054	0,5227	0,1644	0,1713	0,0698

Observa-se na Tabela 10 que os valores do erro médio estimado para o modelo ajustado com os valores médios dos coeficientes apresentaram-se baixos (DRAPER & SMITH, 1998), assim como para o erro médio relativo, apresentando-se inferiores a 10% (MOHAPATRA & RAO, 2005), os valores do teste de *Qui*-quadrado estiveram dentro do intervalo de confiança de 99% (χ^2 tabulado = 8,2604) e apresentaram-se baixos (GUNHAN *et al.*, 2005). Portanto, analisando os resultados, percebe-se que os resultados do ajuste do modelo de Oswin Modificado utilizando os valores médio dos coeficientes (Tabela 9) demonstraram comportamento satisfatório (Figura 3).

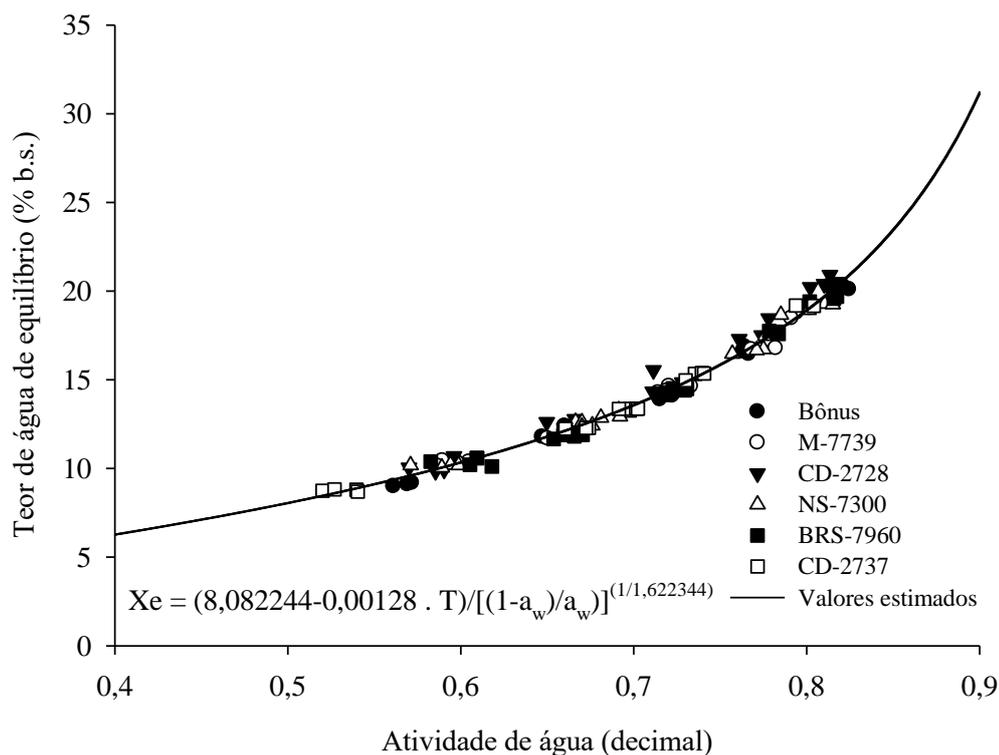


Figura 3. Isotermas de dessorção de grãos estimado pelo modelo de Oswin Modificado com os valores médios dos coeficientes das diferentes cultivares.

De acordo com o a estimativa das isotermas para os valores médios das cultivares, o teor de água de segurança para armazenamento dos grãos de soja é de até 13,60; 13,58; 13,56; 13,54% b.s. para as temperaturas de 10, 20, 30 e 40°C (Figura 3), respectivamente, em base úmida representa teor de água de aproximadamente de 12% b.u.. O teor de água de segurança foi definido para a atividade de água de 0,7, pois valores superiores a esse de atividade de água proporcionam risco de desenvolvimento de microrganismos, afetando a seguridade do armazenamento (OLIVEIRA *et al.*, 2005).

O comportamento das isotermas obtidas no presente estudo (Figuras 1 e 2) mantiveram o padrão reconhecido na literatura. para mesmo valor de atividade de água observa-se que com o aumento da temperatura têm-se a redução do teor de água de equilíbrio das sementes de soja, resultados esses corroboram com o observados por outros autores para diferentes produtos agrícolas, como por exemplo grãos de niger (SIQUEIRA *et al.*, 2018), sementes de trigo (GRANELLA *et al.*; 2019), sementes de girassol (CAMPOS *et al.*, 2019) e grãos de milho (SANTOS *et al.*, 2020).

2.3.4. Comparação do teor de água estimado entre os modelos

Na Tabela 11 são apresentados os modelos ajustados para as diferentes cultivares de soja, assim, como o modelo que foi obtido a partir do valor médio dos coeficientes dos modelos. Conforme já apresentado o ajuste foi realizado ao modelo de Oswin Modificado, nota-se que as equações do modelo apresentam a mesma configuração, diferindo apenas os valores dos coeficientes.

Tabela 11. Modelos obtidos a partir do ajuste das isotermas de diferentes cultivares de soja.

Modelo	Cultivar	Sigla
$X_e = (7,752596 + 0,005136.T) / [(1 - a_w) / a_w]^{1,611074}$	Bônus	mod1
$X_e = (8,155596 + 0,000338.T) / [(1 - a_w) / a_w]^{1,665388}$	M-7739	mod2
$X_e = (8,417039 - 0,006284.T) / [(1 - a_w) / a_w]^{1,600156}$	CD-2728	mod3
$X_e = (8,108531 + 0,002887.T) / [(1 - a_w) / a_w]^{1,676472}$	NS-7300	mod4
$X_e = (7,983986 - 0,005760.T) / [(1 - a_w) / a_w]^{1,588881}$	BRS-7960	mod5
$X_e = (8,075719 - 0,003978.T) / [(1 - a_w) / a_w]^{1,592096}$	CD-2737	mod6
$X_e = (8,082244 - 0,00128.T) / [(1 - a_w) / a_w]^{1,622344}$	Média	modMed

Os modelos foram utilizados para prever o teor de água nas condições do armazenamento dos grãos de soja em diferentes terços do silo, e seus resultados foram comparados aos métodos de estimativa do teor de água pelo sistema e experimentais por meio da determinação do teor de água.

Considerando os métodos de avaliação de teor de água por estimativa pelo sistema, estimativa pelos diferentes modelos matemáticos ajustados as diferentes cultivares de soja, e determinação experimental pelo método de estufa nota-se que não houve diferença pelo teste de f, sendo a única diferença observada para o fator disposição dos grãos no silo (terço) (Tabela 12).

Tabela 12. Resumo da análise de variância com os valores do quadrado médio para o teor de água (TA) de grãos de soja avaliados a partir das estimativas e determinação.

FV	QM
Método de avaliação do TA	0,52 ^{ns}
Terço	43,05 ^{**}
Método de avaliação do TA x Terço	1,04 ^{ns}
CV (%)	6,37
Média Geral	14,10

FV: Fonte de variação; CV: Coeficiente de variação. Quadrado médio. ^{**}Significativo a 1% pelo teste de F; ^{*}Significativo a 5% pelo teste de F; ^{ns}Não significativo pelo teste de F.

Na Tabela 13 é possível observar que os modelos ajustados para as diferentes cultivares de soja estimaram o teor de água próximo ao que foi determinado experimentalmente pelo método de estufa, assim como para o teor de água estimado pelo sistema. Destaca-se o teor de água de equilíbrio estimado pelo modelo médio (TAEE modMed), cujo modelo foi constituído de valores médios dos coeficientes obtidos para os demais modelos (mod1, mod2, mod3, mod4, mod5 e mod6), que apresentou bons valores de estimativa, não diferindo dos demais.

Tabela 13. Teor de água de equilíbrio obtido a partir de diferentes métodos: estimativa pelo sistema (TAEE), estimativa pelos modelos matemáticos ajustados à diferentes cultivares de soja (TAEE mod1, mod2, mod3, mod4, mod5 e mod6), estimativa pelo modelo matemático médio (TAEE modMed) e determinado pelo método de estufa (TAED).

Método TA	Teor de água (% b.s.)
TAEE	13,77
TAEE mod1	13,92
TAEE mod2	14,14
TAEE mod3	14,63
TAEE mod4	14,12
TAEE mod5	13,94
TAEE mod6	14,17
TAEE modMed	14,15
TAED	14,10
Terço	Teor de água (% b.s.)
Superior	12,92 c
Médio	13,96 b
Inferior	15,43 a

Considerando os métodos de avaliação do teor de água é possível inferir que a estimativa do teor de água utilizando os dados dos sensores de temperatura da massa de grãos e da umidade relativa intergranular demonstram-se eficientes, visto que tanto para o que foi estimado direto pelo sistema pela Equação 1 (ASABE, 2007), quanto o que foi estimado por meio dos diferentes modelos (Tabela 11) não diferiram entre si e com o método experimental de determinação do teor de água.

Apesar do teor de água dos grãos armazenados terem diferenciado de acordo com a localização no silo, os teores estimados e experimentais estiveram dentro do padrão para

comercialização da soja que é de 12 a 13% em base úmida (DURKS *et al.*, 2019), que em base seca fica entre 13 e 15%. De acordo com Smaniotto *et al.* (2014) teores de água de 12% b.u. mantêm as sementes de soja com maior qualidade, sendo esse teor indicado para o armazenamento seguro dos produtos em condições de clima tropical.

2.4. CONCLUSÃO

Os sensores de umidade relativa intergranular contribuem para monitorar o comportamento do teor de água de equilíbrio dos grãos armazenados.

O teor de água de equilíbrio estimado pelos dados fornecidos pelos sensores, não diferiu do teor de água determinado.

O modelo de Oswin Modificado foi selecionado para representar as isotermas de dessecção dos grãos das diferentes cultivares de soja.

A equação com os valores médios dos coeficientes das diferentes cultivares demonstrou bom ajuste e aplicabilidade, não diferindo das demais equações para estimativa de teor de água de equilíbrio.

Os sensores digitais de temperatura e umidade relativa demonstraram eficientes, visto que contribuem para estimativa do teor de água de equilíbrio com precisão satisfatória.

2.5. AGRADECIMENTOS

Ao Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia Goiano, PROCER, CARAMURU, EMBRAPPII, CAPES, FAPEG, FINEP e CNPq, pelo apoio indispensável para execução deste trabalho.

2.6. REFERÊNCIAS

AKAIKE, H. A new look at the statistical model identification. **IEEE Transaction on Automatic Control**, v. 19, n. 6, p.716-723, 1974.

ASABE. American Society of Agricultural and Biological Engineers. **ASAE D245.6: Moisture relationships of plant-based agricultural products**. Saint Joseph: ASABE, 2007.

- AVIARA, N. A.; AJIBOLA, O. O.; ONI, S. A. Sorption equilibrium and thermodynamic characteristics of soya bean. **Biosystems Engineering**, v. 87, n. 2, p. 179-190, 2004.
- BESSA J. F. V.; RESENDE, O.; OLIVEIRA, D. E. C.; LIMA, R. R.; QUEQUETO, W. D.; SIQUEIRA, V. C. Adsorption isotherms and thermodynamic properties of *Carthamus tinctorius* L. seeds. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 25, n. 10, p. 696-702, 2021.
- BICA, M. R. R.; PAI, A. D.; RANIERO, M. R.; CALCA, M. V. C.; FRANCO, J. R. Sistema de monitoramento de temperatura em silo de armazenamento de grãos com comunicação sem fio. **Brazilian Journal of Development**, v.7, n. 5, p. 51409-51427, 2021.
- BIDIAS, J. B.; MOUTHE ANOMBOGO, G. A.; NDEJUMI C. C.; DJOMDI, D.; TCHAYA, G. B.; NSOUANDELE, J. L. D. Study of water desorption isotherms from cocoa beans (*Theobroma cacao* L.) of cameroon. **European Scientific Journal**, v. 18, n. 11, p. 1-20, 2022.
- BOTELHO, F. M. **Cinética de secagem, propriedades físicas e higroscópicas dos frutos e caracterização do processo de torrefação dos grãos de *Coffea canephora***. (Tese de doutorado) Universidade Federal de Viçosa, Departamento de Engenharia Agrícola. 2012. 129p.
- BRASIL, Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento (MAPA). **Instrução normativa nº 11, de 15 de maio de 2007**. Diário Oficial da República Federativa do Brasil, Brasília, 2007.
- BRASIL, Ministério da Agricultura e Reforma Agrária. Secretaria Nacional de defesa Agropecuária. **Regras para análise de sementes**. Brasília, 2009. 395p.
- BRASIL, Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento (MAPA). **Instrução normativa n. 29, de 08 de junho de 2011**. Diário Oficial da União, Brasília, 2011.
- BURNHAM, K.P.; ANDERSON, D.R. Multimodel Inference: Understanding AIC and BIC in Model Selection. **Sociological Methods & Research**, v. 33, n. 2, p. 261-304, 2004.
- CALÇADO, J. P.; PELUZIO, J. M.; SIQUEIRA, F. L. T.; SIQUEIRA, G. B.; AFERRI, F. S.; TAVARES, A. T. Épocas de semeadura e períodos de colheita de soja visando produção de óleo e proteínas. **Nativa**, v. 7, n. 4, p. 376-382, 2019.
- CAMPOS, R. C.; CORRÊA, P. C.; FERNANDES, L. S.; BAPTESTINI, F. M.; COSTA, C. F.; BUSTOS-VANEGAS, J. D. Bean grain hysteresis with induced mechanical

damage. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 20, n. 10, p. 930-935, 2016.

CAMPOS, R. C.; CORRÊA, P. C.; ZAIDAN, I. R.; ZAIDAN, U. R.; LEITE, R. A. Moisture sorption isotherms of sunflower seeds: Thermodynamic analysis. **Ciência e Agrotecnologia**, v. 43, s/n, e011619, 2019.

CORRÊA, P. C.; GONELI, A. L. D.; RESENDE, O.; MARTINAZZO, A. P.; Botelho, F. M. Comparação entre os métodos estático e dinâmico na determinação do equilíbrio higroscópico das espigas de milho. **Revista Brasileira de Produtos Agroindustriais**, v. 7, n. 2, p.153-161, 2005.

CORRÊA, P.C.; BOTELHO, F.M.; BOTELHO, S. C. C.; GONELI, A. L. D. Isotermas de sorção de água de frutos de *Coffea canephora*. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 18, n. 10, p. 1047-1052, 2014.

DEVILLA, I. A.; COUTO, S. M.; ZOLNIER, S.; SILVA, J. S. Variação da temperatura e umidade de grãos armazenados em silos com aeração. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 8, n. 2/3, p. 284-291, 2004.

DRAPER, N.R.; SMITH, H. Applied regression analysis. **John Wiley & Sons**, 3th ed., New York, 1998, 712p.

DURKS, J. M.; BOTELHO, F. M.; BOTELHO, S. C. C.; RUFFALO, S.; HOSCHER, R. H. Perdas quantitativas e qualitativas em soja armazenada com aeração convencional e resfriamento artificial. **Revista de Ciências Agroambientais**, v. 17, n. 1, p. 32-39, 2019.

FARIA NETO, A. L.; RAMOS JUNIOR, E. U.; LORINI, I.; MANDARINO, J. M. G. Efeito do retardo na colheita na qualidade de grãos de cultivares de soja. **Nativa**, v. 10, n. 1, p. 47-53, 2022.

FERREIRA JUNIOR, W. N.; RESENDE, O.; OLIVEIRA, D. E. C.; COSTA, L. M. Isotherms and isosteric heat desorption of *Hymenaea stigonocarpa* Mart. seeds. **Journal of agricultural Science**, v. 10, n. 10, p. 505-512, 2018.

FONSECA, N. N.; RESENDE, O.; FERREIRA JUNIOR, W. N.; SILVA, L. C. M.; ANDRADE, E. G.; OLIVEIRA, L. P. Isotherms de dessorção de grãos de sorgo granífero. **Research, Society and Development**, v. 9, n. 7, e466973661, 2020.

GONELI, A. L. D.; VIEIRA, M. C.; VILHASANTI, H. C. B.; GONÇALVES, A. A. Modelagem matemática e difusividade efetiva de folhas de aroeira durante a secagem. **Pesquisa Agropecuária Tropical**, v. 44, n. 1, p. 56-64, 2014.

- GONELI, A. L. D.; CORRÊA, P. C.; FIGUEIREDO NETO, A.; KIRSCH, M. R. H.; BOTELHO, F. M. Static pressure drop in layers of castor bean grains. **Engenharia Agrícola**, v. 40, n. 2, p. 184-191, 2020.
- GRANELLA, S. J.; BECHLIN, T. R.; CHRIST, D.; WERNCKE, I. Isotermas e calor isostérico de dessecção da água em sementes de trigo. **Revista Engenharia na Agricultura**, v. 27, n. 4, p. 304-312, 2019.
- GÜNHAN, T.; DEMIR, V.; HANCIOGLU, E.; HEPBASLI, A. Mathematical modelling of drying of bay leaves. **Energy Conversion and Management**, v. 46, n. 11, p. 1667-1679, 2005.
- HACKENHAAR, N. M.; PELUZIO, J. M.; LIMA, M. D.; HACKENHAAR, C.; CARVALHO, E. V.; AFFÉRRRI, F. S.; MANDARINO, J. M. C. Potássio e época de semeadura em cultivares de soja para teor de óleo e proteína. **Acta Iguazu**, v. 8, n. 2, p. 1-11, 2019.
- MADAMBA, P. S.; DRISCOLL, R. H.; BRUCKLE, K. A. Thin layer drying characteristics of garlic slices. **Journal of Food Engineering**, v. 29, n. 1, p. 75-97, 1996.
- MASCARENHAS, H. A. A.; TANAKA, R. T.; GALLO, P. B.; PEREIRA, J. C. V. N. A.; AMBROSANO, G. M. B.; CARMELLO, Q. A. C. Efeito da calagem sobre a produtividade de grãos, óleo e proteína em cultivares precoces de soja. **Scientia Agrícola**, v. 53, n. 1, s/p, 1996
- MOHAPATRA, D.; RAO, P. S. A thin layer drying model of parboiled wheat. *Journal of Food Engineering, Essex*, v. 66, n. 4, p. 513-518, 2005.
- MINUZZI, A.; RANGEL, M. A. S.; BRACCINI, A. L.; SCAPIM, C. A.; MORA, F.; ROBAINA, A. D. Rendimento, teores de óleo e proteínas de quatro cultivares de soja, produzidas em dois locais no estado do Mato Grosso do Sul. **Ciência e Agrotecnologia**, v. 33, n. 4, p. 1047-1054, 2009.
- MORITZ, A.; ORTIZ, T. A.; SOUZA, A.; TAKAHASHI, L. S. A.; ZUCARELI, C. Comparação de métodos para a determinação do teor de umidade em grãos de milho e de soja. **Revista Brasileira de Tecnologia Aplicada nas Ciências Agrárias**, v. 5, n. 2, p. 145-154, 2012.
- NASCIMENTO, V. R. G.; QUEIROZ, M. R. Estratégias de aeração de milho armazenado: temperatura e teor de água. **Engenharia Agrícola**, v. 31, n. 4, p. 745-759, 2011.

- OLIVEIRA, M. M.; CAMPOS, A. R. N.; GOMES, J. P.; SILVA, F. L. H. Isotermas de sorção do resíduo agroindustrial de casca do abacaxi (*Ananas comosus* L. Mer). **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 9, n. 4, p. 565-569, 2005.
- OLIVEIRA, F. A.; KHATCHATOURIAN, O. A.; BIHAIN, A. Estado térmico de produtos armazenados em silos com sistema de aeração: Estudo teórico e experimental. **Engenharia Agrícola**, v. 27, n.1, p. 247-258, 2007.
- REGO, J. A. R.; BRASIL, D. S. B.; QUEIROZ, R. N.; FURTADO, S. V.; SANTANA, E. B.; COSTA, R. A.; PEREIRA, G. V. S.; COSTA, M. L. Análise isotérmica da atividade de água (aw) de sementes de pimenta-do-reino (*Piper nigrum* L.) em câmara de secagem. **Revista Brasileira de Tecnologia Agroindustrial**, v. 14, n. 1, p. 2983-2994, 2020.
- SANTOS, S. G. F.; SILVA, H. W.; QUEIROZ, J. S.; RODOVALHO, R. S.; MORGADO, V. N. M. Isotermas de adsorção e calor latente de vaporização de grãos de milho. **Científica**, v. 48, n. 1, p. 17-24, 2020.
- SAUER, D.B. **Storage of cereal grains and their products**. American Association of Cereal Chemists, Inc. St. Paul, Minnesota, USA. 1992. 615p.
- SCHWARZ, G. Estimating the dimension of a model. **Annals of Statistics**, v. 6, p. 461-464, 1978.
- SILVA, H. W.; COSTA, L. M.; RESENDE, O.; OLIVEIRA, D. E. C.; SOARES, R. S.; VALE, L. S. R. Higroscopicidade das sementes de pimenta. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 19, n. 8, p.780-784, 2015.
- SILVA, H. W.; RODOVALHO, R. S. Adsorption isotherms and vaporization latent heat of malagueta pepper seeds. **Científica**, v. 44, n. 1, p. 5-13, 2016.
- SIQUEIRA, V. C.; SILVA, F. P.; QUEQUETO, W. D.; JORDAN, R. A.; LEITE, R. A.; MABASSO, G. A. Desorption isotherms and isosteric heat of niger grains (*Guizotia abyssinica* (L. f.) Cass.). **Revista Agro@mbiente On-line**, v. 12, n. 2, p. 124-133, 2018.
- SMANIOTTO, T. A. S.; RESENDE, O.; MARÇAL, K. A. F.; OLIVEIRA, D. E. C.; SIMON, G. A. Qualidade fisiológica das sementes de soja armazenadas em diferentes condições. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 18, n. 4, p. 446-453, 2014.
- STEIDLE NETO, A. J.; LOPES, D. C. Thermistor based system for grain aeration monitoring and control. **Computers and Electronics in Agriculture**, v. 116, s/n, p. 45-54, 2015.
- WEBER, E. A. **Excelência em Beneficiamento e Armazenagem de Grãos**. Canoas: Editora Salles, 2005.

ZEYMER, J. S.; CORRÊA, P. C.; OLIVEIRA, G. H. H.; BAPTESTINI, F. M.; FREITAS, R. C. P. Desorption isotherms of *Lactuca sativa* seeds. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 21, n. 8, p. 568-572, 2017.

CAPÍTULO III. ESTIMATIVA DA EFICIÊNCIA ENERGÉTICA DO PROCESSO AERAÇÃO DE GRÃOS ARMAZENADOS ATRAVÉS DE MACHINE LEARNING

(Normas de acordo com a Revista Engenharia Agrícola)

RESUMO: A aeração é importante processo durante a fase de armazenamento de grãos, no entanto, quando realizada em momentos inadequados podem afetar a qualidade do grão, além de resultar em gastos energéticos desnecessários para a unidade armazenadora. Assim, o objetivo no presente estudo foi estimar a eficiência energética da aeração de grãos de girassol armazenados, assim como propor e testar um modelo de estimativa da eficiência energética da aeração, utilizando diferentes algoritmos no aprendizado de máquinas supervisionado e não supervisionado. Além disso, desenvolver uma aplicação *Web* a partir da mineração e modelagem dos dados com o aprendizado de máquinas. O banco de dados foi composto pelas informações da temperatura média do nível dos sensores, temperatura média do silo, temperatura ambiente externa, ocorrência de aeração, se houve: resfriamento, aquecimento, aquecimento direto durante aeração, e a eficiência energética do processo de aeração. A predição dos modelos pelos algoritmos e a obtenção dos *clusters* no aprendizado de máquinas supervisionado e não supervisionado, respectivamente, foi processada pela ferramenta Weka 3.8.5. O modelo de estimativa da eficiência energética do processo de aeração demonstrou-se eficiente, identificando que durante a aeração de grãos de girassol armazenados a eficiência energética foi de 97,78%. O modelo proposto de avaliação de eficiência da aeração apresenta aplicabilidade de utilização em análises preditivas do processo. Dentre os

algoritmos classificadores testados no o SVM-Poly apresentou as melhores métricas e indicadores sendo esse recomendado para implementação em redes de desenvolvimento de sistemas capaz de prever o status da aeração de grãos armazenados. O aprendizado de máquinas não supervisionado com o algoritmo *K-means* não foi recomendado para a utilização no gerenciamento de processos de avaliação da eficiência da aeração com o banco de dados testado. A partir da mineração e modelagem dos dados com aprendizado de máquinas foi possível desenvolver a ferramenta *Web*.

Palavras-chave: Weka; SVM; K-means.

CHAPTER III. ESTIMATION OF THE ENERGY EFFICIENCY OF THE AERATION PROCESS OF STORED GRAINS THROUGH MACHINE LEARNING

ABSTRACT: Aeration is an important process during the grain storage phase, however, when performed at inappropriate times, it can affect grain quality, in addition to resulting in energy expenditure for the storage unit. The objective of the present study was to propose a model to estimate the energy efficiency of aeration of stored sunflower seeds, as well as to test the model for evaluating the aeration efficiency in different algorithms in supervised and non-supervised machine learning supervised. Developing a Web application from data mining and modeling with machine learning. The database was composed of the data of the average temperature of the sensors level, average temperature of the silo, external ambient temperature, occurrence of aeration, if any: cooling, heating, direct heating during aeration, and the energy efficiency of the aeration process. The prediction of the models by the algorithms and the obtaining of the clusters, in unsupervised machine learning, respectively, were processed by Weka 3.8.5. The model for estimating the energy efficiency of the aeration process proved to be efficient, identifying that during the aeration of stored sunflower grains the energy efficiency was 97.78%. The proposed model for evaluating aeration efficiency has applicability for use in predictive analysis of the process. Among the classifier algorithms tested in the SVM-

Poly presented the best metrics and indicators, which is recommended for implementation in networks for developing systems capable of predicting the status of aeration of stored grains. Unsupervised machine learning with the K-means algorithm was not recommended for use in the management of aeration efficiency evaluation processes with the tested database. From data mining and modeling with machine learning, it was possible to develop the Web system.

Keywords: Weka; SVM; K-means.

3.1. INTRODUÇÃO

A aeração tem por objetivo manter a temperatura da massa de grãos armazenados a níveis seguros, assim como a umidade relativa intergranular, além disso, esse processo contribui para uniformização da temperatura da massa de grãos. O manejo da aeração é realizado insuflando o ar externo para o interior do silo, portanto, antes e durante o processo deve-se atentar a temperatura da massa de grãos, por meio dos dados da termometria, e da temperatura do ar externo (DURKS *et al.*, 2019; LOPES & STEIDLE NETO, 2019).

Para a realização da aeração deve-se aproveitar as melhores condições do ar externo para o processo ser econômico e preservar a qualidade do produto (PANIGRAHI *et al.*, 2020). Mesmo aproveitando as melhores condições do ar externo o processo pode ser ineficiente promovendo o aquecimento da massa de grãos, visto que com a passagem do ar pelas pás dos ventiladores e pelo sistema de distribuição de ar estão sujeitos há aquecimento de até 5°C (PEREIRA, 1998).

A ineficiência do processo de aeração compromete a qualidade dos grãos, pois o aumento da temperatura pode contribuir para o aumento da taxa respiratória do produto afetando diretamente a quantidade e qualidade do mesmo (MOHAPATRA *et al.*, 2017), além disso, o processo ineficiente resulta no gasto energético desnecessário, aumentando os custos da Unidade Armazenadora.

Portanto, é necessário o monitoramento da eficiência energética desses processos para melhoria na gestão do planejamento, visto que não existe nenhum modelo preditivo da eficiência energética da aeração. Sendo importante portanto propor um modelo capaz de estimar a eficiência do processo. As técnicas de aprendizado de máquinas (*Machine Learning*) podem ser empregadas neste processo de gerenciamento, pois essas empregam

o princípio de interferência denominada indução, ao qual é possível obter conclusões genéricas através de um conjunto de dados brutos, esse aprendizado pode ser supervisionado ou não supervisionado (SETIAWAN *et al.*; 2009; LORENA & CARVALHO, 2013).

Com isso, no presente estudo, o objetivo foi estimar a eficiência energética da aeração de grãos de girassol armazenados, como propor e testar um modelo de estimativa da eficiência energética da aeração, utilizando diferentes algoritmos no aprendizado de máquinas supervisionado e não supervisionado. Além disso, desenvolver uma aplicação *Web* a partir da mineração e modelagem dos dados com o aprendizado de máquinas.

3.2. METODOLOGIA

3.2.1. Dados

As informações foram classificadas em dois bancos de dados, primário e secundário, o primeiro foi composto pelos dados brutos, enquanto o segundo foi obtido a partir do primeiro por meio do tratamento dos dados.

3.2.2. Banco de dados primário

Os dados experimentais utilizados foram decorrentes do armazenamento dos grãos de girassol, especificamente, do início do armazenamento, durante a etapa de enchimento do silo com grãos de girassol. Neste período os grãos já estocados foram manejados com a estratégia de aeração visando o resfriamento dos grãos, para isso, padrões referentes a condições climáticas internas e externas foram considerados. Os ventiladores da aeração foram ligados quando a temperatura externa se apresentou 4°C menor do que a média da temperatura interna, ou seja, da massa de grãos de girassol, bem como em condições sem índice pluviométrico, e fora do horário de pico energético, entre 17h30 e 20h.

Os grãos foram armazenados em silo metálico vertical, o silo possuía 22 metros de largura, contabilizando 22 anéis de 0,917 m, fornecendo um corpo de 20,19 m de altura e 26,44 m de altura total. O volume do corpo do silo é de 7.674,87 m³, e o volume total é de 8.466,81 m³. Considerando a massa específica dos grãos de girassol de 0,39 ton m⁻³, tem-se a capacidade estática do corpo do silo de 2.993,20 toneladas de girassol. O sistema de aeração dos silos foi composto por ventiladores centrífugo de pás curvadas para frente impulsionado por motor trifásico com potência de 50 cv (36,77 kW) e que fornece um

fluxo de ar (vazão específica) de $0,05 \text{ m}^3 \text{ min}^{-1}$ toneladas⁻¹ de grão, para o sistema de aeração.

O monitoramento da temperatura interna do silo ocorreu por sistema de termometria digital, cujos sensores foram distribuídos no interior do silo, de forma distribuída a cada 66 m^3 de grãos. Os dados climatológicos externos foram monitorados por meio de uma estação meteorológica na Unidade Armazenadora. Os conjuntos de dados foram salvos em períodos intercalados de aproximadamente 2 horas, ou a cada mudança significativa nas leituras dos sensores.

O banco de dados foi composto por dados referentes a 37 dias de armazenamento, durante esse período utilizaram os dados de termometria apenas da metade do silo. Por se tratar do período de enchimento do silo, não foi possível utilizar os dados de todos os sensores presentes no silo durante o período de análise de dados, assim, utilizaram os dados até o sétimo nível de sensores (S07), os sensores foram espaçados verticalmente a 1,5 m (Figura 1). Durante o período o cabo de termometria P03 estava desativado para manutenção, portanto os dados dos sensores desse cabo foram desprezados.

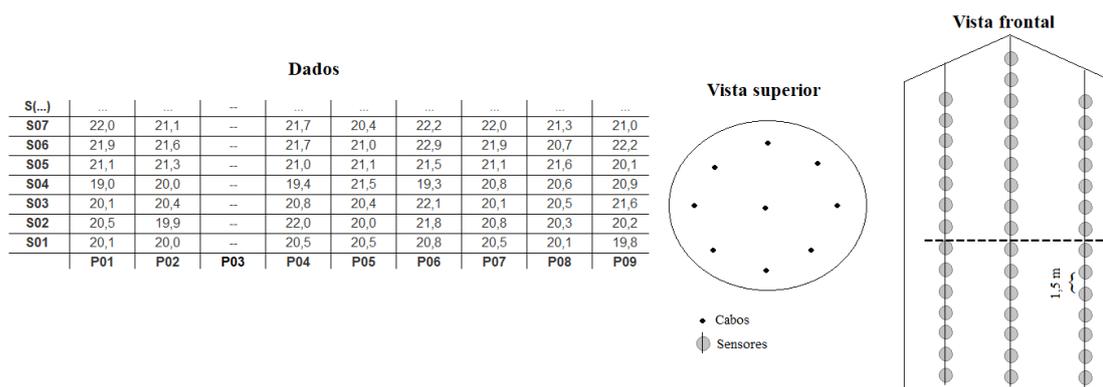


Figura 1. Esquema organizacional dos dados de temperaturas coletados de um silo com sistema de termometria digital.

Na Figura 1, destaca-se na vista frontal do silo até a sétimo nível de sensores (S07) que foram utilizados para compor o banco de dados, além disso, ilustra-se o esquema de distribuição dos cabos de termometria e sensores por todo o silo, sendo 9 cabos. O banco de dados primário foi organizado de acordo com o nível de sensores por período, ou seja, dispôs-se os dados do mesmo nível de sensores em sequência do início ao fim do período de dados, e em seguida dos demais níveis na mesma formatação, por exemplo, todo nível S01, posteriormente a S02, S03, S04, S05, S06 e S07 (Figura 2).

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M
1	Faixa	P01	P02	P04	P05	P06	P07	P08	P09	Média	°C Silo	°C Amb	AERACAO
2	1	20,3	20,6	21,0	20,7	20,3	20,8	21,7	20,6	20,75	19,94	17,80	0
3	1	20,3	20,6	21,0	20,6	20,3	20,8	21,7	20,6	20,74	19,93	17,70	1
4	1	20,3	20,6	21,0	20,5	20,3	20,8	21,7	20,6	20,73	19,94	17,70	1
5	1	21,8	22,1	22,8	19,5	22,2	22,0	22,5	22,0	21,86	21,20	17,40	1
6	1	21,6	22,0	22,6	20,7	22,0	22,3	22,2	21,8	21,90	20,59	16,10	1
7	1	21,3	21,5	22,1	21,3	21,6	22,0	21,6	21,3	21,59	20,55	15,80	1
8	1	21,0	21,2	21,8	21,2	21,4	21,6	21,3	21,0	21,31	20,34	15,70	1
9	1	20,7	21,0	21,5	20,9	21,2	21,3	20,9	20,7	21,03	20,69	18,00	1
10	1	20,7	21,0	21,5	21,0	21,1	21,3	20,9	20,7	21,03	20,75	18,80	0
11	1	20,7	21,0	21,5	21,0	21,1	21,3	20,9	20,7	21,03	24,35	23,90	0

Figura 2. Organização do banco de dados primário.

Nota-se na Figura 2, que o nível de sensores é composto por um sensor de cada cabo de termometria (P01, P02, P03, P04, P05, P06, P07, P08 e P09), e calculou-se a média da temperatura para cada nível de sensor para os diferentes instantes. O banco de dados primário foi composto pela temperatura de cada sensor por cabo no mesmo nível, média da temperatura do nível do sensor no instante, média geral da temperatura do silo no instante, considerando a média apenas dos 7 níveis de sensores, utilizou-se também a média da temperatura ambiente externa no instante, e a condição se houve ou não aeração naquele período. Quando houve aeração o dado recebeu a codificação 1, e 0 indicou a ausência da aeração no período avaliado.

3.2.3. Banco de dados secundário

A partir do banco de dados primário obteve-se o banco secundário, em que variáveis importantes para indicar a eficiência da aeração foram inseridas. Essas variáveis são importantes para a avaliação da eficiência energética do processo de aeração, no entanto, não existem padrões na literatura para a estimativa da eficiência, logo, foram testados alguns padrões no presente estudo com intuito de propor um modelo de predição da eficiência.

A primeira variável obtida foi a de resfriamento durante a aeração. Foi considerado que houve resfriamento quando: houve aeração e a média da temperatura do nível de sensores no instante foi menor ou igual a média da temperatura no nível dos sensores do período anterior ao analisado. A variável aquecimento durante a aeração foi obtida por meio da consideração de quando houve aeração no período, mas não houve resfriamento, bem como quando a média da temperatura do nível dos sensores no instante foi superior a $0,2^{\circ}\text{C}$ a média da temperatura no nível dos sensores do período anterior.

Os dados de aquecimento durante a aeração foram filtrados, para isso, considerou o aquecimento direto durante a aeração, que pode ocorrer quando o ar externo é insuflado no interior do silo com temperatura inadequada. Para avaliar se o aquecimento dos grãos

está diretamente relacionado com a aeração, considerou se houve aquecimento durante a aeração, e quando a média da temperatura no nível de sensores do instante foi maior ou igual a temperatura ambiente externa + 2°C.

Para estimar o modelo de avaliação da eficiência energética da aeração considerou-se os períodos em que houve aeração, o índice de eficiência foi obtido por meio da análise global do banco de dados, em que para ser considerada eficiente a média da temperatura do nível de sensores do instante tem que ser menor que 2°C e acima da temperatura média anterior do mesmo nível de sensores. Além disso, a temperatura média do silo no determinado instante deve ser inferior que 1, °C e acima da temperatura média anterior, os dados também não devem indicar que houve aquecimento direto durante a aeração.

Para as variáveis resfriamento, aquecimento durante a aeração e aquecimento direto durante a aeração as respostas foram codificadas, em que, respostas positivas foram codificadas com 1 e negativas com 0, para os dados de eficiência os dados foram classificados em eficientes e não eficientes. O resumo do conjunto de análise de dados é apresentado na Tabela 1.

Tabela 1. Resumo do tratamento dos dados para obtenção das respostas durante o processo de aeração.

Processo	Ocorrência quando:
Resfriamento	Houver aeração; e, $T_{medSensores_{atual}} - T_{medSensores_{anterior}} \leq 0^{\circ}C$
Aquecimento durante a aeração	Houver aeração; Não houver resfriamento; $T_{medSensores_{atual}} - T_{medSensores_{anterior}} > 0,2^{\circ}C$
Aquecimento direto	Houver aquecimento durante a aeração; $T_{medSensores_{atual}} \leq T_{ambiente_{atual}} + 2^{\circ}C$
Eficiência da aeração (energética)	Houver aeração; $T_{medSensores_{atual}} \leq T_{medSensores_{anterior}} + 2^{\circ}C$; $T_{medSilo_{atual}} \leq T_{medSilo_{anterior}} + 1,5^{\circ}C$; Houver aquecimento direto durante a aeração.

Em que, $T_{medSensores}$: Temperatura média do nível dos sensores, °C; $T_{ambiente}$: Temperatura ambiente externa, °C; e $T_{medSilo}$: Temperatura média do silo, °C.

Portanto, obteve-se o banco de dados completos em que os testes foram empregados. O banco foi composto pelos dados da temperatura média dos sensores de nível, temperatura média do silo, temperatura ambiente externa, ocorrência de aeração, e durante a aeração se houve resfriamento, aquecimento, aquecimento direto à aeração e a eficiência energética do processo de aeração (Figura 3).

B	C	D	E	F	G	H	I
TempSensores	TempSILO	TempAMB	AERACAO	RESFRIAMENTO AERACAO	AQUECIMENTO AERACAO	AQUECIMENTO DIRETO AERACAO	EFICIENCIA AERACAO
20,75	19,94	17,80	0	0	0	0	naoeficiente
20,74	19,93	17,70	1	1	0	0	eficiente
20,73	19,94	17,70	1	1	0	0	eficiente
21,86	21,20	17,40	1	0	1	1	naoeficiente
21,90	20,59	16,10	1	0	0	0	eficiente
21,59	20,55	15,80	1	1	0	0	eficiente
21,31	20,34	15,70	1	1	0	0	eficiente
21,03	20,69	18,00	1	1	0	0	eficiente
21,03	20,75	18,80	0	0	0	0	naoeficiente
21,03	24,35	23,90	0	0	0	0	naoeficiente
20,98	27,98	27,30	0	0	0	0	naoeficiente
20,95	30,52	27,80	0	0	0	0	naoeficiente
20,94	30,05	29,40	0	0	0	0	naoeficiente
20,96	25,91	21,70	0	0	0	0	naoeficiente
20,96	22,02	19,90	0	0	0	0	naoeficiente
20,96	21,15	19,30	0	0	0	0	naoeficiente
20,93	20,87	18,40	0	0	0	0	naoeficiente
20,94	19,99	17,10	0	0	0	0	naoeficiente

Figura 3. Banco de dados finalizado.

O banco de dados (Figura 3) foi composto por 8 colunas e 3.808 linhas, totalizando 30.464 dados, ressalta-se que os dados nas linhas foram separados entre os 7 níveis de sensores, aumentando a variabilidade de dados ao longo do silo.

3.2.4. Obtenção dos modelos preditivos – Aprendizado de máquinas supervisionado

Para modelagem preditiva das respostas de eficiência do processo de aeração, ajustou-se diferentes algoritmos de aprendizagem de máquina supervisionado aos dados obtidos experimentalmente, posteriormente tratados (Figura 3) e organizados em arquivo na extensão arff. Os algoritmos classificadores utilizados foram o *Multilayer Perceptron* (MLP), *Support Vector Machine with Polynomial Kernel* (SVM-Poly), *Support Vector Machine with Radial Kernel* (SVM-Radial), e os algoritmos da árvore de decisão J48 e *Random Forest*.

Os modelos preditivos foram processados pela ferramenta Weka 3.8.5, utilizando a validação cruzada (*cross-validation*) com 10 folds. A eficiência dos classificadores foi avaliada a partir da análise dos indicadores e métricas de desempenho. Os indicadores analisados foram a classificação correta das instâncias (CCI) (Eq. 1), classificação incorreta das instâncias (ICI) (Eq. 2), e os erros na matriz de confusão para eficiência (EF) e não eficiência (NEF) do processo de aeração.

$$CCI = \frac{\text{Total de acertos}}{\text{Total de dados do conjunto}} \times 100 \quad \text{Eq. 1}$$

$$ICI = \frac{\text{Total de erros}}{\text{Total de dados do conjunto}} \times 100 \quad \text{Eq. 2}$$

As métricas analisadas dos resultados dos classificadores foram o coeficiente Kappa, erro relativo absoluto (RAE) (Eq. 3), raiz do erro quadrático médio (RMSE) (Eq. 4), e raiz do erro quadrático relativo (RRSE) (Eq. 5).

$$RAE = \frac{\sum_{i=1}^n |p_i - a_i|}{\sum_{i=1}^n |\bar{a} - a_i|} \quad \text{Eq. 3}$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (p_i - a_i)^2}{n}} \quad \text{Eq. 4}$$

$$RRSE = \frac{\sum_{i=1}^n (p_i - a_i)^2}{\sum_{i=1}^n (\bar{a} - a_i)^2} \quad \text{Eq. 5}$$

em que,

- p_i : Valor da i-ésima observação;
- a_i : Valor predito para i-ésima observação;
- \bar{a} : Média dos valores preditos;
- n : Número de observações.

3.2.5. Obtenção dos *clusters* – Aprendizado de máquinas não supervisionado

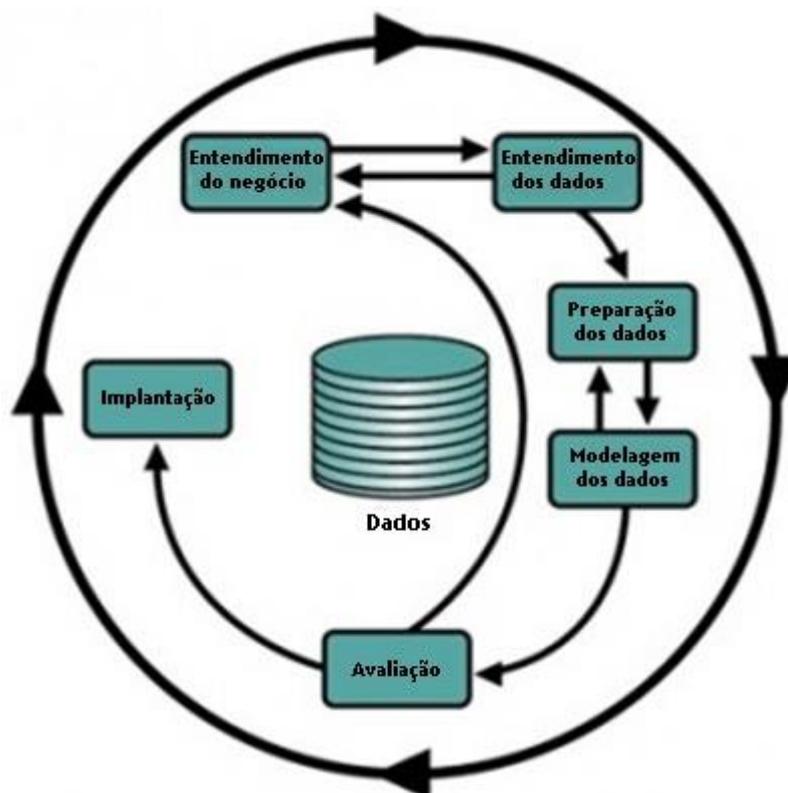
Foi utilizado o algoritmo de clusterização por particionamento para aprendizagem não supervisionada, foi utilizado o mesmo banco de dados na extensão arff, a clusterização foi realizada no Weka 3.8.5. utilizando o algoritmo *K-means*, esse algoritmo tem como objetivo particionar n registros em k agrupamentos, em que $k < n$. Os dados são separados em agrupamentos, e centroides representa o cento do grupamento, os dados são, portanto, agrupados em *clusters* de acordo com a menor distância do centroide dos diferentes agrupamentos, seguindo a métrica de distância (CORCOVIA & ALVES, 2019), que para o algoritmo *K-means* essa métrica é a distância euclidiana (OLIVEIRA *et al.*, 2018).

De acordo com Corcovia & Alvez (2019), a aplicação do algoritmo *K-means* necessita da determinação de qual número de *clusters* serão gerados pelo algoritmo, para isso foram padronizados dois *clusters* na estimativa de separação dos dados do status da eficiência energética da aeração em eficiente e não eficiente. A avaliação dos resultados foi em função dos valores da classificação incorreta das instâncias, assim como pela

avaliação dos erros dos *clusters*, em função dos dados observados de aeração, resfriamento, aquecimento e aquecimento direto.

3.2.6. Desenvolvimento da aplicação Web

A elaboração deste trabalho envolveu a utilização da metodologia *Cross Industry Standard Process for Data Mining* (CRISP-DM) para gerenciamento do projeto e o desenvolvimento da aplicação *Web*, conforme ilustrado na Figura 1, sendo capaz de prever se a aeração do silo foi eficiente ou não eficiente.



Fonte: Elaborado pelos autores (2022).

Figura 4. Representação simplificada do projeto.

O conjunto de dados ou *dataset*, foi constituído de dois bancos de dados primário e secundário, o primeiro foi composto pelos dados brutos, enquanto o segundo foi obtido a partir do primeiro através do tratamento dos dados banco de dados primário, conforme anteriormente relatado.

O *dataset* obtido estava em com formato *.xls*, sendo composto de 3.808 linhas e 8 variáveis (colunas), totalizando 34.272 dados. O *dataset* foi convertido para *comma-separated-values*(*CSV*), e então realizada a análise exploratória de dados, também

conhecida como Estatística Descritiva que corresponde em resumir, organizar e interpretar os dados coletados. A seguir são apresentadas as colunas do *dataset* inicial e suas descrições:

- Temperatura Sensores: temperatura dos sensores no interior do silo;
- Temperatura Silo: temperatura no interior do silo;
- Temperatura Ambiente: temperatura ambiente no momento do experimento;
- Aeração: determina se houve ou não aeração;
- Resfriamento Aeração: determina se houve ou não resfriamento;
- Aquecimento Aeração: determina se houve ou não aquecimento;
- Aquecimento Direto Aeração: determina se houve ou não aquecimento direto no momento da aeração;
- Eficiência Aeração: determina se eficiente ou não eficiente a aeração.

Na análise prévia dos dados foi identificado as distribuições dos atributos que apresentam *outliers* e dados faltantes.

3.2.6.1. Mineração dos dados

Nesta etapa foram retirados os *outliers* e dados faltantes, que comprometam o rendimento do aprendizado de máquina. Para a mineração dos dados foram removidos os ruídos que atrapalham o reconhecimento de padrões. Em seguida, a vírgula foi trocada por ponto deixando uma casa decimal após o ponto. Foi criada também uma coluna nomeada de eficiência do tipo *object* que é a variável alvo do modelo de aprendizado de máquina, que determinou se a aeração foi eficiente ou não eficiente.

A Figura 5 ilustra o *dataset*, composto de 3.808 linhas e 8 colunas, totalizando 34.272 dados.

temp_sensor	temp_silo	temp_amb	aeracao	resfrig	aquec	aquec_direto	eficiencia
20.7500	19.938793	17.8	0	0	0	0	naoeficiente
20.7375	19.928448	17.7	1	1	0	0	eficiente
20.7250	19.937069	17.7	1	1	0	0	eficiente
21.8625	21.196552	17.4	1	0	1	1	naoeficiente
21.9000	20.593103	16.1	1	0	0	0	eficiente
21.5875	20.554310	15.8	1	1	0	0	eficiente
21.3125	20.341379	15.7	1	1	0	0	eficiente
21.0250	20.692241	18.0	1	1	0	0	eficiente
21.0250	20.750000	18.8	0	0	0	0	naoeficiente
21.0250	24.354310	23.9	0	0	0	0	naoeficiente

Fonte: Elaborado pelos autores (2022).

Figura 5. *Dataset* após o pré-processamento.

Após a mineração dos dados para o sistema de aeração para grão de girassol, foi possível concluir que o *dataset* foi composto 84,56% correspondendo a 3220 dados não eficientes e 15,44% correspondendo a 588 dados eficientes para predição da eficiência do sistema de aeração para grão girassol (Figura 3).

Na Figura 6 está ilustrada a análise estatística do *dataset* na qual foi possível constatar as seguintes informações: média (mean), desvio padrão (std), mínimo (min), os quartis (1°, 2°, 3°) e o máximo para cada coluna.

	temp_sensor	temp_silo	temp_amb	aeracao	resfrig	aquec	aquec_direto
count	3808.000000	3808.000000	3808.000000	3808.000000	3808.000000	3808.000000	3808.000000
mean	17.454461	18.227280	19.977022	0.154412	0.093487	0.009979	0.002889
std	2.832282	2.620707	5.191823	0.361390	0.291152	0.099408	0.053676
min	11.125000	14.470000	5.300000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000
25%	14.887500	16.896173	16.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000
50%	17.525000	17.449784	19.400000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000
75%	18.803125	18.637760	23.700000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000
max	32.950000	31.765385	32.400000	1.000000	1.000000	1.000000	1.000000

Figura 6. Análise estatística do *dataset*.

Em seguida, foi realizada a análise estatística do *dataset* por meio da matriz de correlação de *Pearson* (r) que mede o grau de relação linear entre cada par de variáveis e o coeficiente de correlação variando de -1 a 1.

3.2.6.2. Modelagem dos dados

Para a modelagem dos dados foram utilizadas as seguintes tecnologias: ferramenta GitHub para controle de versão do projeto, linguagem de programação *Python* para o desenvolvimento do modelo de aprendizado máquina e a API de sistema de aeração. Também foram utilizadas as seguintes bibliotecas para linguagem de programação *Python*: *Pandas*, *Pandas Profiling*, *Seaborn*, *Matplotlib*, *NumPy*, *Scikit-learn*, *Pycaret* e *Streamlit*.

Como banco de dados foi escolhido o *SQLite3*, e como gerenciador de pacotes o Anaconda. Como ambiente de desenvolvimento, treinamento, realização de testes, avaliação dos resultados do modelo de aprendizado de máquina, foi empregada a ferramenta *Jupyter Notebook*. Foi utilizado o ambiente de desenvolvimento ou *Integrated Development Environment (IDE) Visual Studio Code*.

Para o treinamento do *dataset* foram definidas as *features*: temperatura dos sensores, temperatura do silo, temperatura ambiente, aeração, resfriamento aeração, aquecimento aeração, aquecimento direto aeração e a variável alvo target. O conjunto de treino foi definido como os dados apresentados ao algoritmo de *machine learning* para criação do modelo com 70% dos dados. O conjunto de teste foi apresentado ao modelo após sua criação, simulando previsões reais que o modelo realizou, permitindo que o desempenho real fosse verificado, ou seja, 30% dos dados.

Foi utilizado o módulo de classificação da PyCaret, um módulo de aprendizado de máquina supervisionado que classifica elementos em grupos, capaz de prever os rótulos de classe categóricos (discretos e não ordenados), com gráficos para verificação de desempenho dos modelos treinados (ALI, 2020).

Por meio da função *setup* o ambiente em *pycaret* foi inicializado e criado o pipeline de transformação, preparando os dados para modelagem e implantação. A *Pycaret* através da função *compare_models* treinou os modelos disponíveis na biblioteca de modelos e pontuou a validação cruzada estratificada para avaliação métrica. Foram comparados 15 algoritmos com validação cruzada de 10 vezes (Figura 7).

	Model	Accuracy	AUC	Recall	Prec.	F1	Kappa	MCC	TT (Sec)
nb	Naive Bayes	0.9995	0.9998	0.9994	1.0000	0.9997	0.9982	0.9982	0.0233
ridge	Ridge Classifier	0.9995	0.0000	0.9994	1.0000	0.9997	0.9982	0.9982	0.0267
ada	Ada Boost Classifier	0.9995	0.9997	0.9994	1.0000	0.9997	0.9982	0.9982	0.1567
catboost	CatBoost Classifier	0.9995	1.0000	0.9994	1.0000	0.9997	0.9982	0.9982	1.7767
et	Extra Trees Classifier	0.9991	1.0000	0.9989	1.0000	0.9994	0.9964	0.9964	0.6033
rf	Random Forest Classifier	0.9986	1.0000	0.9983	1.0000	0.9992	0.9946	0.9946	0.6400
lda	Linear Discriminant Analysis	0.9986	0.9994	0.9994	0.9989	0.9992	0.9945	0.9945	0.0233
lr	Logistic Regression	0.9981	1.0000	0.9983	0.9994	0.9989	0.9927	0.9928	1.3833
dt	Decision Tree Classifier	0.9977	0.9936	0.9994	0.9978	0.9986	0.9909	0.9909	0.0233
gbc	Gradient Boosting Classifier	0.9977	0.9997	0.9994	0.9978	0.9986	0.9909	0.9909	0.1533
svm	SVM - Linear Kernel	0.9967	0.0000	0.9967	0.9994	0.9981	0.9874	0.9874	0.0200
xgboost	Extreme Gradient Boosting	0.9962	0.9999	0.9978	0.9978	0.9978	0.9854	0.9855	0.6800
lightgbm	Light Gradient Boosting Machine	0.9962	0.9993	0.9972	0.9983	0.9978	0.9855	0.9855	0.2033
knn	K Neighbors Classifier	0.9808	0.9891	0.9972	0.9804	0.9888	0.9225	0.9243	0.1800
dummy	Dummy Classifier	0.8476	0.5000	1.0000	0.8476	0.9175	0.0000	0.0000	0.0200
qda	Quadratic Discriminant Analysis	0.1524	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0333

Fonte: Elaborado pelos autores (2022).

Figura 7. Comparação das medidas de desempenho de algoritmos de classificação aplicados.

As métricas utilizadas foram: Accuracy indicou a performance do modelo; Area Under the Curve (AUC) forneceu a medida de desempenho dos limites de classificação; recall mediu a quantidade de comentários reprovados que o sistema aprovou; precisão indicou as classificações de classe positivo, ou seja, quantas estão corretas; Pontuação F1 indicou a média harmônica calculada com base na precisão e no recall, Kappa mediu a confiabilidade entre avaliadores e Matthews Correlation Coefficient (MCC), mediu a qualidade dos classificadores binários. O classificador Naive Bayes para o aprendizado de máquina supervisionado obteve maiores valores para as métricas: acurácia, AUC, recall, precisão, Pontuações F1, Kappa e MCC.

3.3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.3.1. Eficiência da aeração

Observa-se na Tabela 2 que 15,44% (588) das informações que compuseram o banco de dados passaram pelo processo de aeração, dentre esses 60,54% (356) dos dados indicaram resfriamento. Estimou-se que 6,46% (38) do processo de aeração promoveu

aquecimento dos grãos, sendo que desses aproximadamente 29% (11) dos dados de aquecimento indicam o aquecimento direto pelo processo de aeração.

Tabela 2. Resultado do tratamento do banco de dados.

PROCESSO	SIM	NÃO
Aeração	588	3220
Resfriamento	356	3452
Aquecimento	38	3770
Aquecimento Direto	11	3797
Eficiência da aeração	575	3233

Considerando os dados de aeração eficiente sobre o total de processos de aeração, o modelo testado neste estudo indicou a taxa de eficiência energética de 97,79% (575) para as aerações realizadas durante o período deste, sendo boa taxa de eficiência, visto que, a ineficiência da aeração pode representar custos desnecessários para a unidade armazenadora, além de comprometer a qualidade dos grãos.

Ressalta-se que a avaliação da eficiência energética de aeração foi realizada por nível de altura do silo, ou seja, por nível de sensor, logo a ineficiência da aeração não pode ser generalizada para todo o silo. Diante dos níveis de sensores analisadas, apenas o nível S05 não apresentou nenhuma ineficiência energética da aeração durante o período em estudo (Figura 8A).

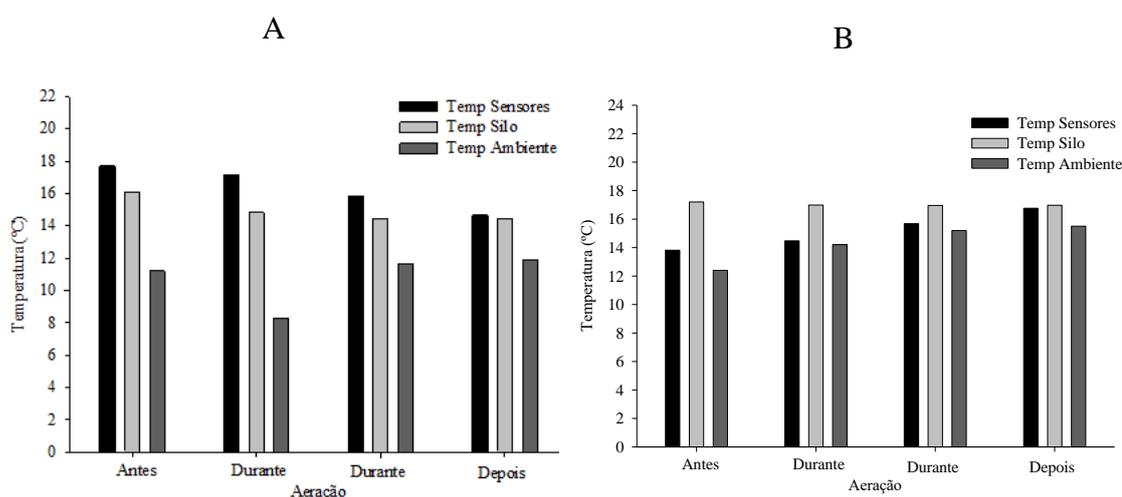


Figura 8. Comportamento da temperatura da massa de grãos e ambiente para o nível S05 (A) e S04 (B) durante processo de aeração de grãos de girassol armazenados.

Para o nível S05 é possível notar que durante o momento de aeração demonstrado houve decréscimo da temperatura dos grãos no nível do sensor, assim como na massa de

grãos total do silo. A temperatura dos grãos no nível desse sensor passou de 17,68 para 14,64°C e a temperatura média da massa de grãos de todo o silo passou de 16,08 para 14,47°C, nesta condição o ar da aeração, em temperatura ambiente, estava com temperatura média de 9,75°C.

Na Figura 8B é possível observar o momento em que a aeração demonstrou ineficiência energeticamente, de acordo com o modelo de eficiência testado, nota-se que houve acentuada redução da temperatura média dos grãos de todo o silo, de 17,20 para 16,97°C. No entanto, para a temperatura dos grãos alocados no nível desse sensor percebeu aumento da temperatura dos grãos, de 13,81 para 16,76°C, representando aumento de 21,36% da temperatura.

Analisando um processo de simulação de aeração de grãos sem o sistema de controle Sá *et al.* (2022) verificaram que, quando o grão é exposto em condições contínuas em temperaturas superiores a temperatura do grão, o processo de aquecimento ocorre, pelo balanço energético ser positivo. Ou seja, no caso da Figura 8B a aeração foi eficiente para reduzir a temperatura da massa de grãos no silo, no entanto, isso não ocorreu em todos os pontos monitorados.

A ineficiência nesse caso ocorreu pela elevação dessa temperatura, visto que esse aumento da temperatura representou gasto energético para a unidade armazenadora, em que em primeira instância gastou energia para o resfriamento do grão, e que de forma involuntária promoveu o aquecimento da massa de grãos. No entanto, duas ressalvas importantes devem ser lembradas, a aeração é feita com intuito de resfriar a massa de grãos do silo, ou seja, essa pode ser realizada para reduzir concentração de calor em pontos específicos, como bolsas de calor, logo situações de aquecimento são normais do ponto de vista prático.

Outra situação é quanto a eficiência prática da aeração, pensando além do ponto de vista energético, na situação de aquecimento do nível S04 (Figura 8B) a temperatura embora tenha sido elevada, estava numa faixa segura para armazenamento de grãos, visto que essa temperatura pode estar segura até 25°C, pois acima desse valor o tempo de armazenamento é reduzido e o grão está sujeito a alterações no teor de água, massa de mil grãos, condutividade elétrica, perfil de ácidos graxos etc. (PARAGINKI *et al.*, 2015).

Portanto, nos casos levantados durante a experimentação desse modelo de predição da eficiência da aeração considera apenas a avaliação da eficiência do processo do ponto de vista energético, sugerindo que futuros trabalhos possam ser desenvolvidos

para testagem de modelos de eficiência de aeração com intuito de atender questões como a temperatura de segurança do armazenamento dos grãos.

3.3.2. Aprendizado de máquinas supervisionado

A Tabela 3 apresenta os indicadores do desempenho dos algoritmos testados no aprendizado de máquinas supervisionado para classificação do status da aeração de grãos de girassol armazenados. Em relação ao classificador MLP observa-se que esse apresentou 99,9212% de acertos na classificação do status do processo de aeração testado, sendo que houve incorreta classificação, o classificador errou 1 vez classificando o processo como eficiente e 2 vezes como não eficiente. Do total de 588 momentos em que o processo da aeração foi eficiente o SVM-Poly obteve 100% de acurácia, no entanto esse classificador errou duas vezes ao avaliar o status de não eficiência da aeração como eficiente.

Tabela 3. Indicadores do desempenho dos algoritmos classificadores, sendo a classificação correta das instâncias (CCI), classificação incorreta das instâncias (ICI), e os erros na matriz de confusão para eficiência (EF) e não eficiência (NEF) do processo de aeração.

Algoritmo	CCI (%)	ICI (%)	Erro na Matriz de confusão	
			EF	NEF
<i>Multilayer Perceptron</i> (MLP)	99,9212	0,0788	2	1
SVM-Poly	99,9475	0,0525	2	0
SVM-Radial	99,6849	0,3151	12	0
J48	99,9475	0,0525	2	0
<i>Random Forest</i> (RF)	99,9212	0,0788	2	1

Dentre os classificadores testados o SVM-Radial apresentou os menores resultados para CCI e maiores para ICI, indicando que esse algoritmo foi o que mais errou durante o processo de classificação do status da aeração, sendo que o erro desse classificador ocorreu para avaliação da não eficiência da aeração em 12 momentos do período analisado o classificador previu como eficiente o processo.

Comparando os algoritmos das árvores de decisão, J48 e *Random Forest*, o algoritmo J48 sobressaiu apresentando maior valor para CCI e menores valores para ICI e erros na matriz de confusão. A Figura 9 demonstra os dois erros a partir da árvore de decisão do algoritmo, sendo possível notar que houve 588 avaliações do processo de aeração como eficiente, ou seja, duas além da realidade.

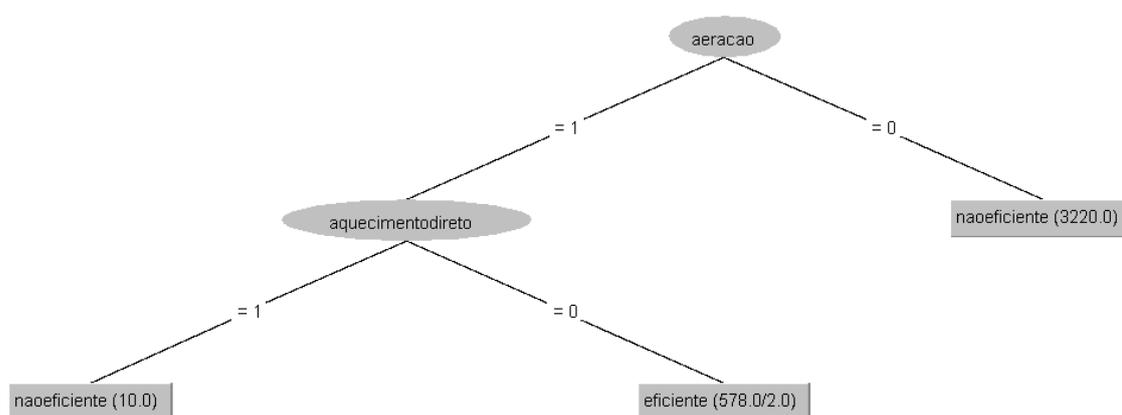


Figura 9. Árvore de decisão do algoritmo J48 para o processo de aeração de grãos de girassol armazenados.

0 indica não, e, 1 indica sim.

Nota-se que o classificador J48 foi eficiente para identificar as situações de não eficiência para aeração quando houve aquecimento direto dos grãos pela aeração, em 10 situações. Na árvore de decisão do classificador nota-se que as duas classificações realizadas erradamente ocorreram em momentos que não houve aeração.

Com relação aos indicadores (Tabela 3) nota-se, portanto, que os algoritmos SVM-Poly, J48 e *Random Forest* apresentaram os mesmos valores para CCI, ICI e erros na matriz de confusão. Com relação aos erros preditos pelo algoritmo SVM-Poly a Figura 10 demonstra-os em função do status do processo de aeração e da incidência de aquecimento direto durante o processo de aeração.

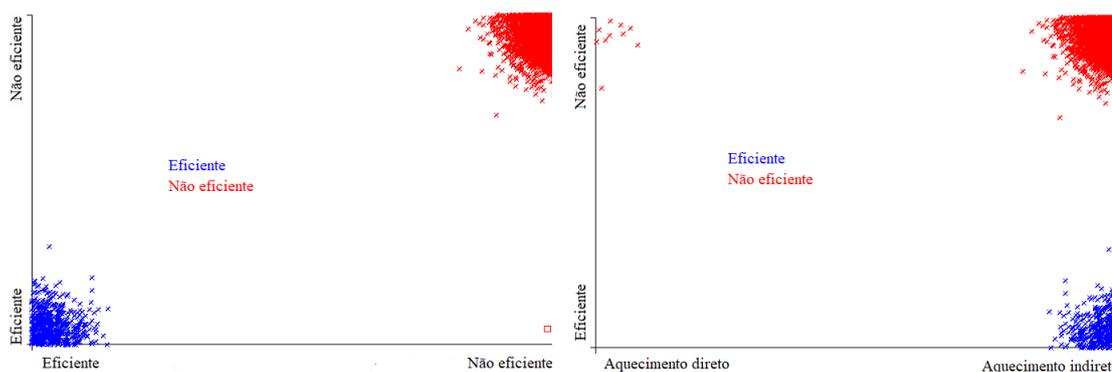


Figura 10. Classificações incorretas das instâncias pelo algoritmo SVM-Poly em função da eficiência da aeração (A) e em função do aquecimento direto da massa de grãos durante a aeração (B).

Analisando a Figura 10A observa-se que a classificação errônea ocorreu para o status de não eficiência, em que o classificador a separou como eficiente, na Figura 10B é possível notar que a classificação de acordo com o aquecimento direto foi realizada corretamente, sendo os 10 momentos da aeração ineficiente pelo aquecimento direto durante a aeração, resultado similar ao observado na classificação do algoritmo J48 (Figura 9). Com esses resultados semelhantes pelos diferentes classificadores, nota-se que o modelo proposto de avaliação de eficiência da aeração apresenta aplicabilidade de utilização em análises preditivas do processo, visto que, pelo menos dois algoritmos conseguiram estimar o processo de maneira correta.

A Tabela 4 apresenta métricas para avaliação dos desempenhos dos algoritmos testados para classificação do status do processo de aeração da massa de grãos de girassol armazenados.

Tabela 4. Métricas para avaliação dos desempenhos dos algoritmos classificadores, sendo o coeficiente Kappa, erro relativo absoluto (RAE), raiz do erro quadrático médio (RMSE) e raiz do erro quadrático relativo (RRSE)

Algoritmo	Coefficiente Kappa	RAE (%)	RMSE	RRSE (%)
<i>Multilayer Perceptron</i> (MLP)	0,9969	0,6906	0,0276	7,6947
SVM-Poly	0,9980	0,2044	0,0229	6,3961
SVM-Radial	0,9878	1,2266	0,0561	15,6672
J48	0,9980	0,4076	0,0229	6,3953
<i>Random Forest</i> (RF)	0,9969	0,7155	0,0266	7,4294

O coeficiente Kappa foi superior para os algoritmos SVM-Poly e J48, ambos apresentaram a mesma magnitude (0,9980), com exceção do classificador SVM-Radial que apresentou menor valor para o coeficiente (0,9878). Os demais algoritmos apresentaram coeficiente Kappa superior a 0,9969. De acordo com Kotz & Johnson (1983) esse coeficiente é utilizado para descrever e testar a confiabilidade e precisão da classificação, para Ladis & Koch valores do coeficiente Kappa superiores a 0,75 são caracterizados como de excelência concordância, sendo assim, todos os algoritmos testados no presente estudo apresentaram classificação em concordância.

O maior valor do erro relativo absoluto foi apresentado pelo algoritmo SVM-Radial, que também apresentou maiores valores para RMSE e RRSE. Com relação ao RAE valores próximos a zero indicam cenário de classificação ideal (CHARLES, 2015), com isso nota-se que o classificador SVM-Poly se destaca, seguido pelo J48. Para os parâmetros RMSE e RRSE, o classificador SVM-Poly apresentou os menores valores indicando menor distância entre os dados classificados e os dados observados experimentalmente (JAMES *et al.*, 2013; KUHN & JHONSON, 2013).

De acordo com as métricas analisadas o algoritmo SVM-Poly destaca-se na classificação do status da aeração em aprendizado de máquinas supervisionado em relação aos demais classificadores testados no presente estudo, sendo esse modelo, portanto, recomendado para implementação em redes neurais para predição do status da aeração de grãos armazenados.

3.3.3. Aprendizado de máquinas não supervisionado

Nos resultados da clusterização foram constatadas as similaridades dos dados por meio da distância euclidiana, e assim definidas pelo aprendizado de máquina não supervisionado, ou seja, os agrupamentos foram definidos conforme a variável da eficiência do processo de aeração: eficientes e não eficientes a partir de dois *clusters*. A Figura 11 representa os *clusters* agrupados pelo algoritmo *K-means*, é possível verificar os agrupamentos realizados em função dos dados observados do status da eficiência da aeração estimado no presente estudo.

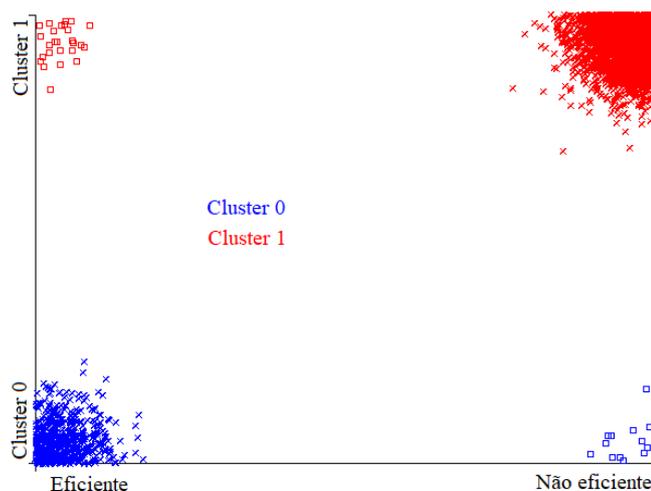


Figura 11. Resultado da clusterização no aprendizado de máquinas não supervisionado em função do status da aeração.

No *cluster* 0 foram agrupados os status de aeração eficiente, no entanto, 12 situações em que a aeração foi não eficiente foi agrupada erroneamente neste *cluster*, assim como para o *cluster* 1 em que 26 momentos que a aeração foi eficiente ficou categorizada no *cluster* de aeração não eficiente (Figura 11). No geral, houve 38 instâncias clusterizadas de maneira incorreta, aproximadamente 1% dos dados, o *cluster* 0 foi composto por 562 dados (15%) e o *cluster* 1 por 3.246 dados (85%).

A Figura 12 detalha o agrupamento dos *clusters*, sendo possível observar os erros de estimativa de clusterização para as situações de aeração, resfriamento, aquecimento e aquecimento indireto.

A

B

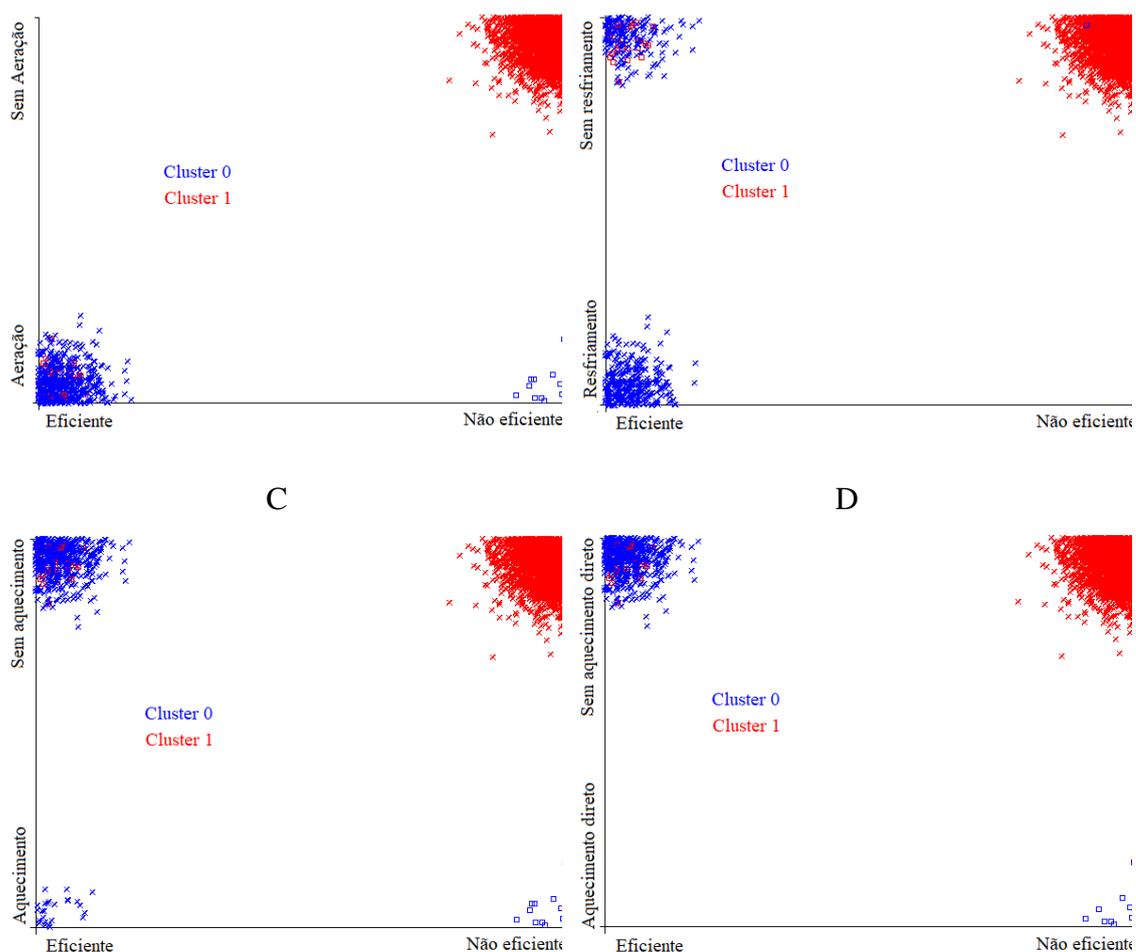


Figura 12. Representação dos *clusters* do aprendizado de máquinas não supervisionado em função da eficiência da aeração com o: Processo de aeração (A); Resfriamento da massa de grãos (B); Aquecimento da massa de grãos (C); Aquecimento direto à aeração (D).

O *cluster 0* representando a eficiência da aeração recebeu a coloração azul, nota-se que para esse cluster ocorreram situações que quando houve aeração, essa foi observada como ineficiente, mas o aprendizado a categorizou no *cluster 0* (Figura 12A). Assim, como para não eficiência, nota-se que a maior parte dos dados de ineficiência da aeração por não ter ocorrido aeração nos momentos avaliados, demonstrando que o aprendizado de máquina não supervisionado conseguiu identificar tal situação.

No entanto, percebe-se que em 26 momentos, cuja aeração foi eficiente, essas foram clusterizadas no *cluster 1*, que recebeu a coloração vermelha, sendo este o *cluster* da não eficiência da aeração. Isso pode ter ocorrido pela grande variedade de dados de temperatura utilizados no banco de dados testado, em que o algoritmo pode ter identificado algum padrão entre esses valores e os demais do mesmo *cluster*, visto que o

K-means utiliza a distância euclidiana como métrica para encontrar as similaridades dos *clusters* (OLIVEIRA *et al.*, 2018).

Para as situações em que a aeração promoveu resfriamento (Figura 12B) o aprendizado clusterizou de maneira correta os dados, com exceção dos 26 dados já listados anteriormente no *cluster* 1 em que esses se mostraram eficiente na prática, mas no aprendizado foram julgados como não eficientes, neste caso a justificativa mais plausível seja que o *K-means* não tenha aprendido com os testes, que independentemente se houve ou não resfriamento a aeração pode se mostrar eficiente (Tabela 1).

Observando o comportamento da clusterização para as situações de aquecimento (Figura 12C) nota-se similaridade com o que foi observado para o resfriamento, visto que em condições que não foi observado o aquecimento a aeração pode ser eficiente caso tenha ocorrido e não eficiente para caso contrário. Portanto, percebe-se que as 26 falhas do aprendizado não supervisionado se devem a essas duas regras (resfriamento e aquecimento), em que o sistema não conseguiu aprender. Observa-se ainda, que ocorreram 12 situações em que houve aquecimento e apesar da aeração ter sido ineficiente os dados foram agrupados no *cluster* 0, ou seja, o sistema não conseguiu ligar as duas situações de aquecimento e não eficiência.

Na Figura 12D nota-se e mesmo comportamento na representação da situação de aquecimento direto em que o sistema não conseguiu com os dados testados aprender, visto que os 10 momentos em que houve aquecimento direto pela aeração e, portanto, a aeração não foi eficiente, os dados foram agrupados no *cluster* 0.

Com esses resultados é possível notar que apesar de apresentar elevado nível de acurácia, 99% de acerto, o aprendizado de máquinas não supervisionado apresentou algumas limitações na estimativa de regras decisivas do processo de avaliação do status de aeração, cujo aprendizado de máquinas supervisionado conseguiu estimar essas regras através dos algoritmos J48 e SVM-Poly. Os erros de estimativa pelo aprendizado não supervisionado podem ter ocorrido pela alta variedade de dados presentes no banco de dados, mais precisamente pela baixa concentração de dados de aquecimento indireto, sendo estes os únicos dados nesta situação que o sistema não conseguiu aprender.

Portanto, de acordo com o observado e testado no presente estudo, não se recomenda o uso do *K-means*, no aprendizado de máquinas não supervisionado, para gerenciamento de processos de avaliação da eficiência da aeração. Novos testes com um banco de dados mais balanceado podem ser executados para testar a estimativa de

aprendizado não supervisionado com o *K-means*. Esse algoritmo é considerado tradicional do aprendizado de máquina não supervisionado (OLIVEIRA *et al.*, 2018).

3.3.4. Aplicação Web

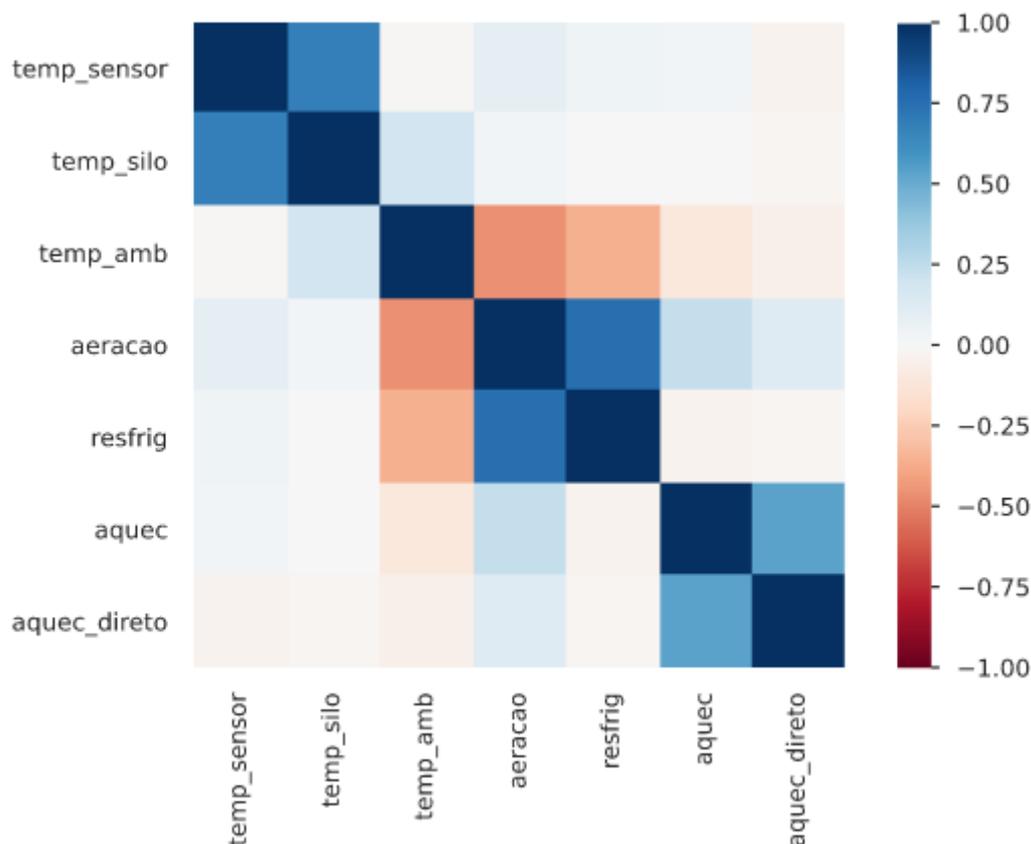
A Figura 13 indica as métricas utilizadas para avaliação do aprendizado de máquina supervisionado em que o classificador Naive Bayes alcançou a média das consecutivas métricas: acurácia de 99,95%, AUC de 99,98%, recall de 99,94%, precisão de 100%, Pontuação F1 de 99,97%, Kappa de 99,82% e MCC de 99,82%.

	Accuracy	AUC	Recall	Prec.	F1	Kappa	MCC
0	1.0000	1.0000	1.0000	1.0	1.0000	1.0000	1.0000
1	1.0000	1.0000	1.0000	1.0	1.0000	1.0000	1.0000
2	1.0000	1.0000	1.0000	1.0	1.0000	1.0000	1.0000
3	1.0000	1.0000	1.0000	1.0	1.0000	1.0000	1.0000
4	1.0000	1.0000	1.0000	1.0	1.0000	1.0000	1.0000
5	1.0000	1.0000	1.0000	1.0	1.0000	1.0000	1.0000
6	0.9953	0.9981	0.9945	1.0	0.9972	0.9818	0.9820
7	1.0000	1.0000	1.0000	1.0	1.0000	1.0000	1.0000
8	1.0000	1.0000	1.0000	1.0	1.0000	1.0000	1.0000
9	1.0000	1.0000	1.0000	1.0	1.0000	1.0000	1.0000
Mean	0.9995	0.9998	0.9994	1.0	0.9997	0.9982	0.9982
SD	0.0014	0.0006	0.0017	0.0	0.0008	0.0054	0.0054

Fonte: Elaborado pelos autores (2022).

Figura 13. Média das métricas de avaliação do modelo.

O resultado da mineração dos dados foi obtido por meio da matriz de Pearson a análise estatística dos dados. Por sua vez, a matriz de correlação de Pearson (r) sinalizada por meio da intensidade das cores a correlação das variáveis, ou seja, quando a intensidade da cor for escura ou próxima de 1 as variáveis possuem maior correlação e ao contrário menor correlação (Figura 14).



Fonte: Elaborado pelos autores (2022).

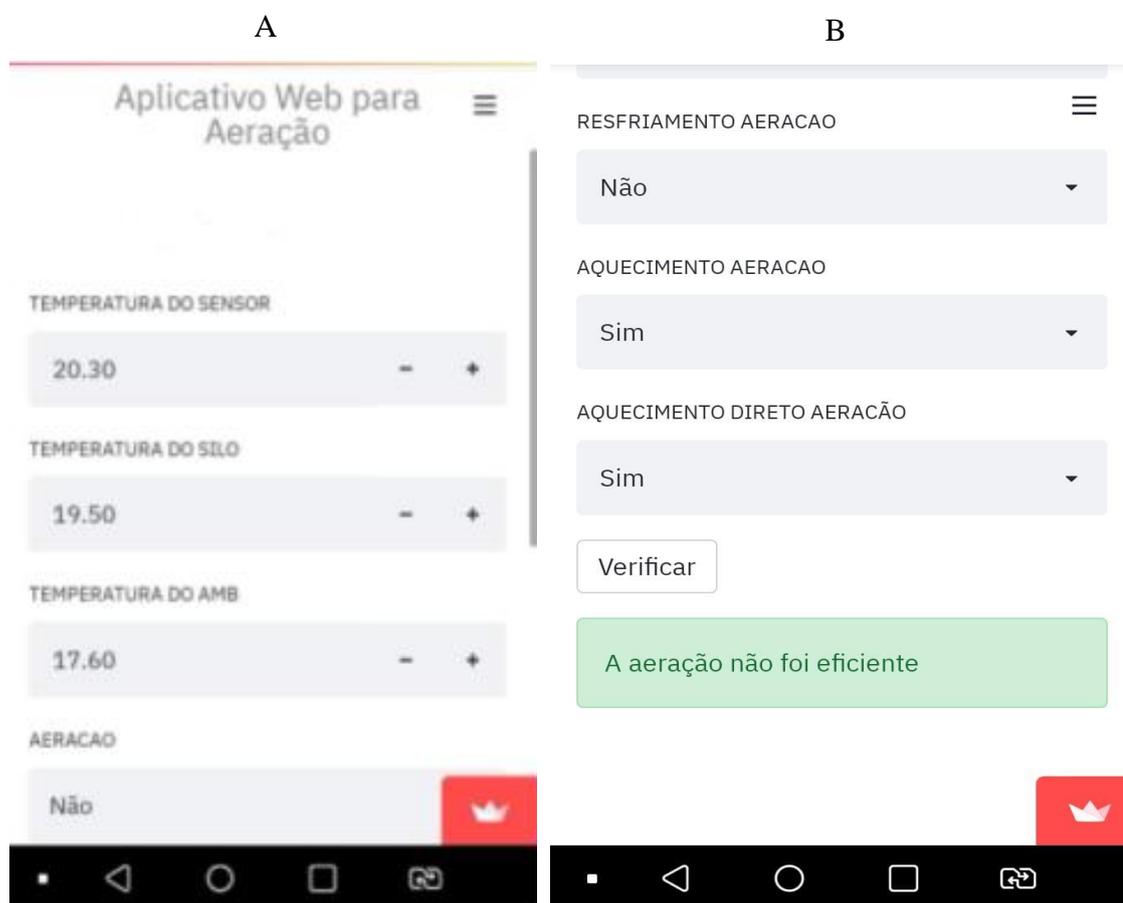
Figura 14. Matriz de correlação de Pearson.

Neste sentido, por meio da matriz de correlação de Pearson foi possível concluir que as variáveis Temperatura Sensores e Temperatura Silos, Aeração e Resfriamento Aeração e por fim Aquecimento Aeração e Aquecimento Direto Aeração são altamente correlacionadas, ou seja, existem relações entre as variáveis. Já as variáveis Temperatura Ambiente e Temperatura Silos bem como Temperatura Sensores possuem baixa correlação. Assim como Resfriamento Aeração e Temperatura Ambiente e Temperatura Silos com baixa correlação, ou seja, as variáveis não possuem relações.

Nesse sentido, foi possível concluir que as variáveis que possuem altas correlações são associadas entre si, enquanto, as variáveis que possuem baixas correlações, não possuem associação entre si.

Após a finalização da análise estatística, foi realizada a implementação do aprendizado de máquina supervisionado e do site *web* utilizando a API Rest com a biblioteca *streamlit* para disponibilizar o modelo de aprendizado de máquina supervisionado em execução em tempo real (Figura 15).

O site *web* foi disponibilizado em tempo real para o produtor e/ou a unidade armazenadora, em que foram delegados a finalidade de inserir os dados da temperatura dos sensores, temperatura dos silos, temperatura ambiente, aeração, resfriamento aeração, aquecimento aeração e aquecimento direto aeração.



Fonte: Elaborado pelos autores (2022).

Figura 15. Tela de sistema aeração; B) site *web* disponibilizado em tempo real.

O site *web* processa a predição do sistema de aeração do grão de girassol, de modo que foi possível verificar se a aeração foi eficiente ou não eficiente, conforme baseado em literatura especializada. Vale ressaltar, que as etapas de mineração e modelagem dos dados influenciaram diretamente no aprendizado de máquina supervisionado e que ele obteve uma taxa de acurácia muito relevante de 99.98%, tornando o resultado robusto e preciso.

A aplicação *Web* foi registrada como programa de computador sob número de registro BR512022000174-8, com título “SisAeração – Webapp para sistema de aeração utilizando Aprendizado de Máquinas”.

3.4. CONCLUSÃO

O modelo de estimativa da eficiência energética do processo de aeração demonstrou-se eficiente, identificando que durante a aeração de grãos de girassol armazenados a eficiência energética foi de 97,78%.

O modelo proposto de avaliação de eficiência da aeração apresenta aplicabilidade de utilização em análises preditivas do processo, sendo os modelos dos algoritmos J48 e SVM-Poly recomendados.

Dentre os algoritmos classificadores testados no aprendizado de máquina supervisionado, o SVM-Poly apresentou as melhores métricas e indicadores sendo esse recomendado para implementação em redes neurais capazes de prever o status da aeração de grãos armazenados.

O aprendizado de máquinas não supervisionado com o algoritmo *K-means* não foi recomendado para a utilização no gerenciamento de processos de avaliação da eficiência da aeração com o banco de dados testado.

A partir da mineração e modelagem dos dados com aprendizado de máquinas foi possível desenvolver a ferramenta *Web*, registrada sob número BR512022000174-8, sendo um sistema capaz de prever a eficiência da aeração.

3.5. AGRADECIMENTOS

Ao Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia Goiano, PROCER, CARAMURU, EMBRAPPII, CAPES, FAPEG, FINEP e CNPq pelo apoio indispensável para execução deste trabalho.

3.6. REFERÊNCIAS

- CHARLES, A. C. **Mineração de dados para previsão de eventos extremos de precipitação**. [Dissertação de Mestrado em Modelagem Computacional] Universidade do Estado do Rio de Janeiro: Nova Friburgo, 2015. 134p.
- CORCOVIA, L. O.; ALVES R. S. **Aprendizagem de máquinas e mineração de dados**. **Revista Interface Tecnológica**, v. 16, n. 1, p. 90-101, 2019.
- DURKS, J. M.; BOTELHO, F. M.; BOTELHO, S. C. C.; RAFFATO, S.; HOSCHER, R. H. Perdas quantitativas e qualitativas em soja armazenada com aeração convencional e resfriamento artificial. **Revista de Ciências Agroambientais**, v. 17, n. 1, p. 31-39, 2019.
- JAMES, G.; WITTEN, D.; HASTIE, T.; TIBSHIRANI, R. **An introduction to statistical learning**. New York: Springer, 2013. 438p.
- KOTZ, S.; JOHNSON, N. L. **Encyclopedia of statistical sciences**. New York: John Wiley & Sons. 1983. 352p.
- KUHN, M.; JOHNSON, K. **Applied Predictive Modeling**. New York: Springer, 2013. 593p.
- LANDIS, J. R.; KOCH, G. G. The measurement of observer agreement for categorical data. **Biometrics**, v. 33, n. 1, p. 159-174, 1977.
- LOPES, D. de C.; STEIDLE NETO, A. J. Effects of climate change on the aeration of stored bean in Minas Gerais State, Brazil. **Biosystems Engineering**, v. 188, n. 1, p. 155-164, 2019.
- LORENA, A. C.; CARVALHO, A. C. P. L. F. Uma introdução às Support Vector Machines. **Revista de Informática Teórica e Aplicada**, v. 14, n. 2, p. 1-25, 2013.
- MOHAPATRA, D.; KUMAR, S.; KOTWALIWALE, N.; SINGH, K. K. Critical factors responsible for fungi growth in stored food grains and non-Chemical approaches for their control. **Industrial Crops & Products**, v. 108, n. 101, p. 162-182, 2017.
- PARAGINSKI, R. T.; ROCKENBACH, B. A.; SANTOS, R. F.; ELIAS, M. C.; OLIVEIRA, M. Qualidade de grãos de milho armazenados em diferentes temperaturas. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 19, n. 4, p. 358-363, 2015.
- OLIVEIRA, D. C., LOPES JUNIOR, V., FERNANDES, M. **Localização de danos com utilização de aprendizado de máquina**. Novas Edições Acadêmicas: Mauritius, p. 39-43, 2018.
- PANIGRAHI, S. S.; SINGH, C. B.; FIELKE, J. CFD modelling of physical velocity and anisotropic resistance components in a peaked stored grain with aeration ducting systems. **Computers and Electronics in Agriculture**, v. 179, e105820, 2020.
- PEREIRA, J. A. M. **Aeração de Grãos – Fundamentos e Manejo**. IN: Curso de Secagem e Aeração de Grãos. CENTREINAR, Viçosa, 1998.

SÁ, T. D. V.; AMANTÉA, R. P.; ROCHA, K. S. O.; MARTINS, J. H. Um modelo em dinâmica de sistemas para controle de sistemas de aeração de grãos em silos. **Scientia Generalis**, v. 3, n. 1, p. 360-384, 2022.

SETIAWAN, N. A.; VENKATACHALAM, P. A.; HANI, A. F. M. Diagnosis of coronary artery disease using artificial intelligence based decision support system. **Proceedings of the International Conference on Man-Machine Systems (ICoMMS)**, v. 6, n. 4, p. 153-160, 2009.

CONCLUSÃO GERAL

A utilização de sistema de termometria dotado de sensores digitais contribui no manejo da aeração automatizado. A automatização da aeração contribui no aproveitamento de melhores condições climáticas para realização do processo, comparativamente ao sistema manual utilizado.

As estratégias de aeração adotadas: resfriamento e conservação apresentaram-se eficientes para amenizar a temperatura da massa de grãos no processo automatizado.

O silo com aeração automatizada melhor conservou a qualidade dos grãos de girassol armazenados. O silo com aeração controlada manualmente apresentou a redução de 11,55% no teor de água. Grãos armazenados no terço médio do silo tendem apresentar melhor qualidade.

Os sensores de umidade relativa intergranular contribuem para monitorar o comportamento do teor de água de equilíbrio dos grãos armazenados. O teor de água de equilíbrio estimado pelos dados fornecidos pelos sensores, não diferiu do teor de água determinado.

O modelo de Oswin Modificado foi selecionado para representar as isotermas de dessorção dos grãos das diferentes cultivares de soja. A equação com os valores médios dos coeficientes das diferentes cultivares demonstrou bom ajuste e aplicabilidade, não diferindo das demais equações para estimativa de teor de água de equilíbrio.

Os sensores digitais de temperatura e umidade relativa demonstraram-se eficientes, visto que contribuem para estimativa do teor de água de equilíbrio com precisão satisfatória.

O modelo de estimativa da eficiência energética do processo de aeração demonstrou-se eficiente, identificando que durante a aeração de grãos de girassol armazenados a eficiência energética foi de 97,78%.

O modelo proposto de avaliação de eficiência da aeração apresenta aplicabilidade de utilização em análises preditivas do processo, sendo os modelos dos algoritmos J48 e SVM-Poly recomendados.

Dentre os algoritmos classificadores testados no aprendizado de máquina supervisionado, o SVM-Poly apresentou as melhores métricas e indicadores sendo esse recomendado para implementação em redes de desenvolvimento de sistemas capaz de prever o status da aeração de grãos armazenados.

O aprendizado de máquinas não supervisionado com o algoritmo *K-means* não foi recomendado para a utilização no gerenciamento de processos de avaliação da eficiência da aeração com o banco de dados testado.

A partir da mineração e modelagem dos dados com aprendizado de máquinas foi possível desenvolver a ferramenta *Web*, registrada sob número BR512022000174-8, sendo um sistema capaz de prever a eficiência da aeração.