

INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA
GOIANO – IF GOIANO - CÂMPUS RIO VERDE
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO *STRICTO SENSU* EM CIÊNCIAS
AGRÁRIAS

ESTUDO DA SECAGEM ARTIFICIAL E DO
REUMEDECIMENTO COM AR NATURAL EM SEMENTES
DE MILHO

Autor: Daniel Emanuel Cabral de Oliveira
Orientador: Prof. Dr. Osvaldo Resende

RIO VERDE – GO

Agosto – 2012

ESTUDO DA SECAGEM ARTIFICIAL E DO
REUMEDECIMENTO COM AR NATURAL EM SEMENTES
DE MILHO

Autor: Daniel Emanuel Cabral de Oliveira
Orientador: Prof. Dr. Osvaldo Resende

Dissertação apresentada, como parte das exigências para obtenção do título de MESTRE EM CIÊNCIAS AGRÁRIAS, ao Programa de Pós-Graduação *stricto sensu* em Ciências Agrárias do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia Goiano – Câmpus Rio Verde - Área de Concentração Ciências Agrárias

Rio Verde – GO
Agosto – 2012

O48e

OLIVEIRA, Daniel Emanuel Cabral de.

Estudo da secagem artificial e do reumedecimento com ar natural em sementes de milho. / Daniel Emanuel Cabral de Oliveira – Rio Verde – 2012.

65 f.: il.;

Dissertação (Mestrado em Ciências Agrárias) apresentada ao Instituto Federal de Educação, Ciências e Tecnologia Goiano, Campus Rio Verde - 2012.

1. Milho-secagem. 2. Milho-sementes 3. Milho-reumedecimento.

Gilmar José Terra. CRB1 2524

CDU 633.15

**INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA
GOIANO – CÂMPUS RIO VERDE
DIRETORIA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIAS AGRÁRIAS**

**ESTUDO DA SECAGEM ARTIFICIAL E DO
REUMEDECIMENTO COM AR NATURAL EM
SEMENTES DE MILHO**

Autor: Daniel Emanuel Cabral de Oliveira
Orientador: Osvaldo Resende

TITULAÇÃO: Mestre em Ciências Agrárias – Área de concentração
Ciências Agrárias – Ciências Agrárias

APROVADA em 29 de agosto de 2012.

Prof. Dr. Paulo Cesar Corrêa
Avaliador externo
UFV

Dra. Juliana Rodrigues Donadon
Avaliadora interna
IFGoiano/RV(Bolsista CAPES/PNPD)

Prof. Dr. Osvaldo Resende
Presidente da banca
IF Goiano/RV

AGRADECIMENTOS

Ao meu orientador, Doutor Osvaldo Resende, pelos ensinamentos, paciência, confiança, amizade, pela dedicação à minha formação, acima de tudo pela compreensão, prontidão em atender às minhas solicitações e, especialmente, pelo grande auxílio na orientação e conclusão deste trabalho, enfim, obrigado simplesmente por ter acreditado e apostado em mim.

Ao Doutor Paulo Cesar Corrêa e à Doutora Juliana Rodrigues Donadon, pelas correções e sugestões da dissertação e participação na comissão julgadora.

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

Um agradecimento a todos os colegas do mestrado e do Laboratório de Pós-Colheita de Produtos Vegetais, com carinho - Thaís Adriana de Souza Smaniotto, Rafael Cândido Campos, Tarcísio Honório Chaves, Douglas Nascimento Gonçalves, Valdiney Cambuy Siqueira, Kelly Aparecida, Lílian Moreira Costa, Jaqueline Bessa, Adrieli Kester, Renan Ullmann, Dieimisson Paulo Almeida e Udenys Cabral - por termos compartilhado experiências e aprendizados durante essa trajetória. Quantas coisas vivemos juntos!

Ao laboratório de Sementes do IF Goiano – Câmpus Rio Verde, que proporcionou condições para elaboração deste estudo, e a meus coorientadores Juliana de Fátima

Sales e Ivano Alessandro Devilla, pela atenção e disponibilidade quando solicitada para as discussões científicas.

Ao CNPq e à Capes, pelo apoio financeiro.

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

À empresa Caramuru, pelo auxílio na pesquisa.

Muito Obrigado!!!

BIOGRAFIA DO AUTOR

DANIEL EMANUEL CABRAL DE OLIVEIRA, filho de André Luiz de Oliveira e Terezinha Cabral Firmino de Oliveira, nascido em Santa Helena de Goiás, Goiás, no dia 21 de julho de 1988. Em 2006, ingressou no curso de graduação pelo IF Goiano – Câmpus Rio Verde e Universidade Estadual de Goiás – Unidade Santa Helena de Goiás, em Tecnologia em Agronegócios e Engenharia Agrícola, concluídos em 2009 e 2010, respectivamente. Em fevereiro de 2011, iniciou-se no Programa de Pós-Graduação *stricto sensu* em Ciências Agrárias, fazendo a pesquisa para a dissertação de mestrado na área de pós-colheita em armazenamento e secagem de produtos vegetais. Concluiu em 29 de agosto de 2012 com a defesa da dissertação “Estudo da secagem artificial e do reumedecimento com ar natural em sementes de milho”.

À minha mãe Terezinha Cabral Firmino de Oliveira e a meu pai André Luiz de Oliveira, exemplos de caráter, dedicação, sabedoria e amor. Às minhas irmãs Daniela Cabral de Oliveira e Adriela Firmino de Oliveira, por todo amor, solidariedade e por acreditarem e se orgulharem de mim. A Caroline Alves Martins, o grande amor da minha vida.

Dedico

ÍNDICE

	Página
ÍNDICE DE TABELAS.....	vii
ÍNDICE DE FIGURAS.....	viii
LISTA DE SÍMBOLOS, SIGLAS, ABREVIATURAS E UNIDADES.....	x
RESUMO.....	xii
ABSTRACT.....	xiv
INTRODUÇÃO GERAL.....	1
1 Milho.....	1
2 Secagem.....	2
3 Qualidade fisiológica de sementes.....	3
4 Aeração e reumedecimento.....	5
5 Referências.....	7
OBJETIVO GERAL.....	12
CAPÍTULO 1. CINÉTICA DE SECAGEM DAS SEMENTES DE MILHO	
CULTIVAR AG 7088.....	13
Resumo.....	13
Abstract.....	14
Introdução.....	14
Material e métodos.....	16
Resultados e discussão.....	20
Conclusões.....	26
Referências.....	27

CAPÍTULO 2. QUALIDADE DAS SEMENTES DE MILHO SUBMETIDAS	
A DIFERENTES TEMPERATURAS DE SECAGEM	
ARTIFICIAL.....	
	30
Resumo.....	30
Abstract.....	31
Introdução.....	31
Material e métodos.....	33
Resultados e discussão.....	35
Conclusões.....	41
Referências.....	41
CAPÍTULO 3. REUMEDECIMENTO COM AR NATURAL EM	
SEMENTES DE MILHO SUBMETIDAS AO PROCESSO DE	
AERAÇÃO.....	
	44
Resumo.....	44
Abstract.....	45
Introdução.....	45
Material e métodos.....	46
Resultados e discussão.....	50
Conclusões.....	60
Referências.....	60
CONCLUSÃO GERAL.....	
	64

ÍNDICE DE TABELAS

CAPÍTULO 1

TABELA 1. Modelos matemáticos utilizados para prever a secagem de produtos agrícolas	17
TABELA 2. Razão de teor de água (RX, decimal) das sementes de milho cultivar AG 7088 ao longo do tempo de secagem (h) em cinco condições de temperatura (°C)	20
TABELA 3. Coeficientes de determinação (R ² , %), erros médio relativo (P, %) e estimado (SE, decimal x 10 ⁻³) para os modelos analisados, durante a secagem das sementes de milho cultivar AG 7088 nas diversas condições de temperatura (°C).	21
TABELA 4. Valores para o teste de qui-quadrado calculados para os dez modelos utilizados na representação da cinética de secagem das sementes de milho cultivar AG 7088	22
TABELA 5. Coeficiente do modelo de Newton ajustado para as diferentes condições de secagem das sementes de milho cultivar AG 7088, com a respectiva equação em função da temperatura.....	22

CAPÍTULO 2

TABELA 1. Análise de variância para germinação, índice de velocidade de germinação (IVG) e condutividade elétrica do exsudato das sementes de milho cultivar AG 7088 submetidas à secagem em diferentes temperaturas.....	37
---	----

CAPÍTULO 3

TABELA 1. Propriedades físicas das sementes de milho	51
TABELA 2. Equações ajustadas aos valores do teor de água, massa específica aparente, germinação, índice de velocidade de germinação (IVG), teste a frio sem solo e condutividade elétrica em função do tempo de armazenamento (meses).....	59

ÍNDICE DE FIGURAS

CAPÍTULO 1

FIGURA 1. Valores do teor de água experimentais e estimados pelo modelo de Newton para a secagem das sementes de milho nas diversas condições de temperatura.....	23
FIGURA 2. Coeficiente de difusão efetivo obtido para a secagem das sementes de milho, cultivar AG 7088, nas temperaturas de 40, 55, 70, 85 e 100 °C	24
FIGURA 3. Representação de Arrhenius para o coeficiente de difusão efetivo em função da temperatura do ar de secagem, obtido durante a secagem das sementes de milho, cultivar AG 7088.	25
FIGURA 4. Representação de Arrhenius para a constante de secagem k do modelo de Newton durante a secagem das sementes de milho, cultivar AG 7088	26

CAPÍTULO 2

FIGURA 1. Curvas de secagem para as sementes de milho, cultivar AG 7088, nas temperaturas de 40, 55, 70, 85 e 100 °C	35
FIGURA 2. Taxa de redução de água para das sementes de milho, cultivar AG 7088, nas temperaturas de 40, 55, 70, 85 e 100 °C em função do tempo.....	36
FIGURA 3. Germinação (%) das sementes de milho da cultivar AG 7088 submetidas às temperaturas de secagem de 40, 55, 70, 85 e 100 °C	38
FIGURA 4. Índice de velocidade de germinação (IVG) das sementes de milho da cultivar AG 7088 submetidas às temperaturas de secagem de 40, 55, 70, 85 e 100 °C.	39
FIGURA 5. Condutividade elétrica do exsudato das sementes de milho da cultivar AG 7088 submetidas às temperaturas de secagem de 40, 55, 70, 85 e 100 °C.	40

CAPÍTULO 3

FIGURA 1. Protótipos dos silos metálicos utilizados	47
FIGURA 2. Temperatura e umidade relativa do ar ambiente e temperaturas da massa de sementes submetidas a diferentes manejos de aeração	51

FIGURA 3. Teores de água (b.s.) das sementes de milho ao longo do armazenamento submetidas a diferentes manejos de aeração (A.M. – Aeração de manutenção; A.R. – Aeração de resfriamento e S.A. – Sem aeração).....	52
FIGURA 4. Massa específica aparente das sementes de milho ao longo do armazenamento submetidas a diferentes manejos de aeração (A.M. – Aeração de manutenção; A.R. – Aeração de resfriamento e S.A. – Sem aeração).....	54
FIGURA 5. Germinação das sementes de milho submetidas ao armazenamento com diferentes manejos de aeração (A.M. – Aeração de manutenção; A.R. – Aeração de resfriamento e S.A. – Sem aeração).....	55
FIGURA 6. Índice de velocidade de germinação (IVG) das sementes de milho submetidas ao armazenamento com diferentes manejos de aeração (A.M. – Aeração de manutenção; A.R. – Aeração de resfriamento e S.A. – Sem aeração).....	56
FIGURA 7. Teste a frio sem solo das sementes de milho submetidas ao armazenamento com diferentes manejos de aeração (A.M. – Aeração de manutenção; A.R. – Aeração de resfriamento e S.A. – Sem aeração).....	57
FIGURA 8. Condutividade elétrica do exsudato das sementes de milho ao longo do armazenamento submetidas a diferentes manejos de aeração em protótipos de silos metálicos (A.M. – Aeração de manutenção; A.R. – Aeração de resfriamento e S.A. – Sem aeração).....	58

LISTA DE SÍMBOLOS, SIGLAS, ABREVIATURAS E UNIDADES

X^*	Teor de água do produto
X_e^*	Teor de água de equilíbrio do produto
X_i^*	Teor de água inicial do produto
%.....	Porcentagem
&.....	Ampersand (e comercial)
a, b, c, n.....	Coefficientes dos modelos
b.s.....	Base seca
Capes.....	Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior
CE.....	Condutividade Elétrica
cm.....	Centímetro
CNPq.....	Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico
CV.....	Coefficiente de Variação
D	Coefficiente de difusão efetivo
D_o	Fator pré-exponencial
E_a	Energia de ativação
Eq.....	Equação
et al.....	E outros, e colaboradores
g.....	Gramas
h.....	Horas
IVG.....	Índice de Velocidade de Germinação
k, k_o, k_1 :	Constantes de secagem
kg.....	Quilograma

kJ mol^{-1}	quilojoule por Mol
m.....	Metros
mL.....	Mililitro
mm.....	Milímetro
N	Número de observações experimentais
n_t	Número de termos
$^{\circ}\text{C}$	Graus Celsius
p.....	Página
P.....	Erro médio relativo
R^2	Magnitude do coeficiente de determinação
RX	Razão de teor de água do produto
s.....	Segundos
S.....	Área da superfície do produto
SE.....	Erro médio estimado
t	Tempo
U^*	Teor de água do produto
UR.....	Umidade Relativa
V.....	Volume
V_g	Volume das sementes
Y	Valor observado experimentalmente
\hat{Y}	Valor estimado pelo modelo
μS	Micro siemens

RESUMO

OLIVERA, Daniel Emanuel Cabral de M.Sc., Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia Goiano, Agosto de 2012. **Estudo da secagem artificial e do reumedecimento com ar natural em sementes de milho.** Orientador: Dr. Osvaldo Resende.

Tendo em vista a crescente produção de milho no município de Rio Verde, Goiás, bem como a carência de informações a respeito das alterações que podem ocorrer durante a secagem e o armazenamento das sementes de milho, torna-se de fundamental importância o conhecimento dos fenômenos que ocorrem na etapa de pós-colheita, que proporcionam a manutenção da qualidade do produto. Desta forma, justifica-se a execução de trabalhos referentes ao assunto, que possam gerar informações teóricas e práticas para a melhor conservação do produto. No presente trabalho, objetivou-se ajustar diferentes modelos matemáticos aos dados experimentais da secagem das sementes, determinar e avaliar o coeficiente de difusão efetivo e a energia de ativação, avaliar a qualidade fisiológica das sementes depois do processo de secagem em diversas condições de ar, bem como avaliar a qualidade das sementes de milho sem o controle de aeração e com duas estratégias de controle de aeração por temperatura da massa de sementes, do ar ambiente e umidade relativa, operada por meio de um gerenciador automático de aeração. As sementes de milho da cultivar AG 7088, com teor de água inicial de 0,235 (kg de água kg⁻¹ de matéria seca), foram submetidas à secagem em estufa com ventilação de ar forçada em cinco condições de temperatura - 40, 55, 70, 85 e 100 °C - até atingirem o teor de água de 0,149 ± 0,009 (kg de água kg⁻¹ de matéria seca). Foram avaliados a taxa de redução de água, germinação, índice de velocidade de

germinação e a condutividade elétrica para cada temperatura de secagem. Entre os modelos analisados, o modelo de Newton apresentou o melhor ajuste para descrever o fenômeno de secagem. O coeficiente de difusão efetivo das sementes de milho aumentou com a elevação da temperatura do ar e a relação entre o coeficiente de difusão efetivo e a temperatura de secagem pode ser descrita pela equação de Arrhenius, que apresenta uma energia de ativação para a difusão líquida na secagem do milho de $19,09 \text{ kJ mol}^{-1}$. As temperaturas de secagem de 85 e 100 °C diminuíram a germinação e o IVG e também aumentam a condutividade elétrica do exsudato das sementes. Para que a qualidade fisiológica das sementes de milho, cultivar AG 7088, não seja comprometida, a secagem deve ser feita com a temperatura máxima de 70 °C. Ao longo do armazenamento, a temperatura da massa se reduziu de 4,0; 5,4 e 2,9 °C para os tratamentos com aeração de manutenção, resfriamento e sem aeração, respectivamente. As avaliações de germinação, índice de velocidade de germinação (IVG), teste a frio sem solo e condutividade elétrica mostraram redução da qualidade das sementes durante o armazenamento, sendo este decréscimo mais acentuado no tratamento sem aeração. O teor de água aumenta ao longo do armazenamento, sendo que os tratamentos com sistema de aeração proporcionaram um aumento maior no teor de água das sementes ao longo do armazenamento.

Palavras-chave: cinética de secagem, qualidade, aeração.

ABSTRACT

OLIVERA, Daniel Emanuel Cabral de M.Sc., Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia Goiano (Goiano Federal Institute of Education, Science and Technology), August, 2012. **Study of artificial drying and re-wetting of corn seeds under natural air.** Advisor: Dr. Osvaldo Resende.

To understanding the phenomena that occur in the post-harvest stage to provide maintenance of the product quality becomes of fundamental importance, due to increasing corn production in the municipality of Rio Verde, Goiás State, Brazil, and the information lack about the changes that can occur during corn seeds drying and storage. For this reason, to perform study about the theme is justified, in order to generate theoretical and practical information for the better product preservation. This work aimed to fit different mathematical models to experimental data of seeds drying, determine and evaluate the effective diffusion coefficient and the activation energy, evaluate the seeds physiological quality after drying process under varying air conditions, and assess the corn seeds quality without aeration control and with two control strategies for aeration by temperature of seed mass, ambient air, and relative humidity operated by automatic aeration manager. Corn seeds of AG 7088 cultivar with initial moisture content of 0.235 (kg of water kg⁻¹ of dry matter) were dried in oven with forced air ventilation in five temperature conditions of 40, 55, 70, 85, and 100°C until the water content reached 0.149 ± 0.009 (kg of water kg⁻¹ of dry matter). Water reduction rate, germination, germination speed index, and electrical conductivity for each drying temperature were evaluated. Among the tested models, Newton model showed the best fit to describe the drying phenomenon. The effective diffusion

coefficient of corn seeds increased with increasing air temperature; and the relation between the diffusion coefficient and the effective drying temperature may be described by Arrhenius equation, which provides activation energy for liquid diffusion in corn drying of $19.09 \text{ kJ mol}^{-1}$. Drying temperatures of 85 to 100°C decreased germination and GSI (Germination Speed Index) and also increased the electrical conductivity of the seed exudate. For the physiological quality of corn seeds of AG 7088 cultivar not being compromised, the drying should be performed with the maximum temperature of 70°C . During storage, mass temperature was decreased from 4.0, 5.4, and 2.9°C with aeration treatment of maintenance and cooling and without aeration, respectively. Germination evaluations, germination speed index (GSI), cold germination test, and electrical conductivity showed a reduction in seeds quality during storage; this decrease was more pronounced in treatment without aeration. During storage, seeds water content increases and the treatments with aeration system provided a higher increase in the seeds water content.

Key words: drying kinetics, quality, aeration.

INTRODUÇÃO GERAL

1. O milho

O milho é um dos cereais mais importantes e mais produzidos no Brasil e no mundo (Corrêa et al., 2011). É utilizado para o consumo humano, animal e na indústria pelo seu valor nutritivo e produtividade elevada. Nos últimos anos, tornou-se mais importante por ser utilizado na produção de etanol, especialmente nos Estados Unidos (Oliveira et al., 2010).

Sua composição é rica em carboidratos (60%), principalmente na forma de amido, assim como em proteínas (10%), lipídios (4%), além de minerais e vitaminas (Fancelli & Lima, 1982).

A estimativa para colheita de grãos da safra 2011/12 no Brasil é de cerca de 162,6 milhões de toneladas, 206,7 mil toneladas inferior à safra de 2010/11. A produção estimada de milho é de cerca de 69,48 milhões de toneladas na safra de 2011/12, o que representa um acréscimo na produção de 21% em relação à safra anterior. Já a produção estimada do estado de Goiás na safra de 2011/12 é de 8,26 milhões de toneladas, um acréscimo de 37,5% em relação à safra anterior (CONAB, 2012).

No ano de 2011, o município de Rio Verde, Goiás produziu 667.250 toneladas de milho, 11,67% de toda a produção do estado e aproximadamente 1,18% da produção do Brasil, de 56.337.400 t (SEPIN, 2012).

A cultivar AG 7088 é um híbrido das sementes Agrocere que nas regiões acima de 700 metros de altitude tem como diferencial a excelente sanidade foliar e de grãos, que são semiduros e alaranjados. O AG 7088 tem seu melhor desempenho produtivo quando o plantio ocorre em época normal ou cedo e possui ciclo precoce (AGROCERES, 2012).

2. Secagem

Uma produção de sementes de boa qualidade requer que o produto seja colhido antecipadamente, ou seja, quando ainda apresenta elevado teor de água, visando a minimizar as perdas ocasionadas no campo pelo ataque de insetos e microrganismos (Corrêa et al., 2006). Desta forma, a secagem se destaca como a mais importante etapa da pós-colheita, garantindo a manutenção da qualidade das sementes.

A secagem é um fenômeno que envolve simultaneamente a transferência de calor e massa, que podem alterar de forma substancial a qualidade das sementes, dependendo do método e das condições em que é feita. A secagem dos produtos vegetais é o processo mais utilizado para assegurar sua qualidade, sendo que a redução do teor de água do produto reduz a atividade biológica e as mudanças químicas e físicas que ocorrem durante o armazenamento, mantendo assim sua qualidade (Hall, 1980).

A remoção do teor de água dos grãos deve ser realizada de tal modo que o produto fique em equilíbrio com o ambiente onde será armazenado e também deve manter a aparência, as qualidades nutritivas e sua viabilidade como semente (Silva, 2008). Para que a secagem seja realizada de forma rápida, segura e econômica, é fundamental conhecer e monitorar os fenômenos físicos existentes durante o processo (Martinazzo et al., 2007).

Para o aperfeiçoamento e desenvolvimento de equipamentos utilizados para a secagem de sementes, são de fundamental importância a simulação e a obtenção de informações teóricas a respeito do comportamento de cada produto, durante a retirada de água. Para a simulação, cujo princípio se fundamenta na secagem de sucessivas camadas delgadas do produto, utiliza-se um modelo matemático que representa, satisfatoriamente, sua perda de água durante o período de secagem (Berbert et al., 1995). Para o desenvolvimento de novos tipos de secadores, é imprescindível a utilização de modelos matemáticos que possam descrever a taxa de transferência de massa que ocorre entre o ar de secagem e o produto (Erenturk et al., 2004).

A utilização de modelos matemáticos auxilia no projeto e no dimensionamento de equipamentos, contribuindo para a melhor compreensão dos mecanismos envolvidos (Resende, 2006). A possibilidade de simular o processo de secagem permite a redução no tempo necessário para o desenvolvimento de novos secadores bem como avaliar o efeito de qualquer combinação das variáveis envolvidas no grau de uniformidade, no

teor de água final, na eficiência do processo em termos energéticos e na relação custo/benefício dos diversos métodos de secagem (Carlesso et al., 2007).

Entre os modelos aplicados ao processo de secagem, o modelo da difusão é o mais intensamente investigado. Este modelo é aplicado em processos de secagem de um sólido a taxa decrescente, considerando, como mecanismo principal, a difusão baseada na segunda Lei de Fick, que descreve que o fluxo de massa por unidade de área é proporcional ao gradiente de concentração de água (Park et al., 2002). Muitos pesquisadores utilizam a segunda lei de Fick para calcular o coeficiente de difusão efetivo (Goneli et al., 2007; Campos et al., 2009; Goneli et al., 2009).

3. Qualidade fisiológica de sementes

Durante a fase de pós-colheita, um manejo inadequado pode conduzir a uma rápida deterioração da qualidade fisiológica das sementes. A atividade microbiana pode causar efeitos indesejáveis como descoloração do tegumento, contribuir para o aquecimento da massa armazenada e perdas de matéria seca por meio da utilização de carboidratos, proteínas e lipídios como fonte de energia durante a respiração (Magan & Aldred, 2007).

A qualidade das sementes não pode ser melhorada durante o armazenamento, então a armazenagem tem por objetivo preservar as qualidades físicas, sanitárias e nutricionais das sementes, depois de colhidas, quando as condições de conservação são favoráveis. Afonso Júnior et al. (2000), estudando armazenamento de soja, verificaram que os grãos podem ser armazenados com elevado teor de água por longos períodos de tempo, quando submetidos a baixas temperaturas, enquanto grãos com baixo teor de água expostos a temperaturas de armazenagem elevadas apresentam substancial perda de viabilidade.

Para Silva (2008), o teor de água do produto e a temperatura são considerados fatores cruciais para a interação de fatores bióticos e abióticos que promovem sua deterioração. A temperatura inicial dos produtos armazenados deve ser reduzida rapidamente para não permitir a deterioração. Temperaturas baixas podem compensar os efeitos de maiores teores de água no desenvolvimento de microrganismos que atacam as sementes armazenadas. Logo, em climas frios, as sementes podem ser armazenadas com segurança com teor de água superior em até 1,5 ponto percentual acima do indicado para locais de climas mais quentes.

Silva (2008) afirma que há um aumento da intensidade respiratória proporcionalmente ao aumento da temperatura, que fica na dependência do teor de água. Para valores de teor de água superiores a 0,1628 (b.s.), a respiração aumenta rapidamente na maioria dos cereais, causando sua deterioração.

A qualidade fisiológica das sementes influencia diretamente o armazenamento. Desta forma, o teste de condutividade elétrica, baseado na integridade dos sistemas de membranas, é de grande interesse por permitir que o processo de deterioração seja detectado (Dias & Marcos Filho, 1995). A perda do potencial fisiológico está diretamente ligada à quantidade de solutos lixiviados, sendo a integridade da membrana celular comprometida com aumento de íons lixiviados (Vieira & Krzyzanowski, 1999).

Conforme Delouche & Baskin (1973), a alteração ou perda da integridade das membranas celulares é um indicativo da deterioração nas sementes, principalmente em função do período de armazenamento prolongado. Diversos fatores estão associados à permeabilidade das membranas, entre eles, podem ser citados a idade das sementes, suas condições fisiológica e física, condições de armazenamento e a incidência de danos mecânicos (Powell, 1986).

A lixiviação eletrolítica dos solutos celulares é inversamente relacionada ao vigor, uma vez que reflete a perda da integridade das membranas e de compartimentalização dos constituintes celulares e ainda constitui excelente substrato para o desenvolvimento de microrganismos que aceleram a deterioração da semente (Woodstock, 1988).

Queiroga et al. (2009b), estudando duas cultivares de sementes de algodão (BRS Verde e CNPA 7H) submetidas ao deslincamento químico e armazenadas por 12 meses, verificaram que o poder germinativo das sementes de algodão tende a decrescer ao longo do tempo. O mesmo foi observado por diversos autores ao estudar o armazenamento de diferentes espécies: guandu (Nakagawa et al., 2009), algodão (Queiroga et al., 2009a) e soja (Afonso Júnior et al., 2000).

Sendo assim, o teste de condutividade elétrica e a germinação vêm sendo utilizados por diversos pesquisadores como índice de avaliação da qualidade fisiológica (Nascimento et al., 2011; Queiroga et al., 2009b).

4. Aeração e reumedecimento

A aeração é uma técnica que consiste na passagem de ar forçado, com fluxo adequado, através da massa de grãos. Este processo é utilizado com o objetivo de manter a qualidade do produto por meio do resfriamento e uniformização da temperatura na massa de grãos (Silva, 2008). Para Weber (2001), a passagem do ar entre os grãos impede a migração da umidade e a formação de bolsas de calor durante o período de armazenamento.

A temperatura do ambiente de armazenamento e o teor de água dos grãos são os responsáveis pelo desenvolvimento de insetos e microrganismos que influenciam significativamente na qualidade do produto (Oliveira et al., 2007).

A aeração é uma técnica amplamente utilizada para o resfriamento e uniformização da temperatura na massa de grãos, pois elimina o aquecimento dos grãos úmidos, reduz o uso de produtos químicos e pode eliminar odores de resíduos e do próprio fumigante (Khatchatourian & Oliveira, 2006). Devilla et al. (2004) ressaltam que o uso adequado da aeração é de fundamental importância para manter a qualidade dos grãos, além de diminuir os custos durante o armazenamento.

Rigueira et al. (2009) verificaram que o resfriamento da massa de grãos a 15 °C mantém as características qualitativas dos grãos de café. Quando comparado com a temperatura ambiente a 25 °C, notaram que a qualidade da bebida e o teor de água inicial foram mantidos por 180 dias de armazenamento, além de diminuir a incidência e o desenvolvimento de microrganismos.

A temperatura e a umidade relativa favorecem a reprodução e a sobrevivência dos agentes biológicos (Jayas & White, 2003). A temperatura na faixa de 25 a 30 °C proporciona a condição ideal para o desenvolvimento de várias espécies de insetos (Volk & Afonso, 2009). Para Santos (2002), é desnecessário o uso de produtos químicos para o controle de insetos quando a temperatura da massa de grãos atinge 17 °C.

Arthur (1994) verificou que silos com sistema de aeração contínua reduziram as populações de *Sitophilus zeamais* e *Tribolium castaneum*. Arthur & Throne (1994), estudando a eficácia de inseticida metílico em grãos de milho armazenados em silos com sistema de aeração e sem aeração, verificaram que a população de insetos nos silos sem aeração foi maior em relação aos silos com aeração.

O processo de aeração em grãos é empregado com maior frequência em regiões de clima temperado por apresentarem boas condições de temperatura e umidade relativa (Ferreira & Muir, 1981). Entretanto, Bhatnagar & Baksi (1975), Navarro et al. (1969) e Sutherland (1968) observaram resultados satisfatórios em climas tropicais.

Ferreira & Muir (1981), estudando aeração em milho armazenado a granel, verificaram que o tempo de armazenamento de milho com teor de água de 0,1905 (b.s.) pode ser aumentado com o uso da aeração. Observaram ainda que o tempo de armazenamento em grãos com teor de água de 0,1494 (b.s.) pode ser superior a um ano com o uso da aeração.

A portaria de n.º 29/2011, publicada em 08 de junho de 2011, estabelece que todas as unidades armazenadoras para produtos a granel de nível fazenda, coletora e intermediário devem possuir um sistema de aeração e termometria. Tendo, no mínimo, um ponto de termometria a cada 150 m³ de capacidade estática, o sistema de aeração deve ter uma vazão mínima de 0,05 m³ min⁻¹ ton⁻¹ e 0,1 m³ min⁻¹ ton⁻¹, respectivamente, para silo vertical e horizontal. Todas as unidades armazenadoras que estiverem em construção ou ampliação, após a data de publicação da portaria, devem adequar sua estrutura. As unidades já existentes terão um prazo de até cinco anos a contar da data de publicação da Instrução Normativa MAPA n.º 41 no DOU em 15 de dezembro de 2010.

O reumedecimento de sementes secas acontece quando a umidade relativa do ar está elevada, pois a pressão de vapor dentro do grão é inferior à pressão parcial de vapor do ar do ambiente circulante, assim, o teor de água do produto aumenta (Basunia e Abe, 2004). Ferrari Filho (2011) ressalta que a capacidade dos grãos de secagem é até sete vezes maior do que a de reumedecimento.

Alencar et al. (2009), estudando o armazenamento de grãos de soja em diferentes condições de temperatura e umidade relativa, verificaram que aumento da temperatura e da umidade relativa do ar ambiente proporciona reumedecimento no teor de água dos grãos. Nascimento et al. (2012) verificaram que aeração em milho seco (0,1236 b.s.) não interferiu no desenvolvimento dos fungos, já em grãos úmidos (0,2048 b.s.), houve desenvolvimento de *Aspergillus* spp. em todas as estratégias.

Nascimento & Queiroz (2011), avaliando três manejos de aeração (contínua, noturna e condição de equilíbrio higroscópico) em milho verificaram reumedecimento para todos os tratamentos provocado pela alta umidade relativa e pela baixa temperatura do ar ambiente.

5. Referências

- AFONSO JÚNIOR, P.C.; CORRÊA, P.C.; FARONI, L.R.D. Efeito das condições e período de armazenagem sobre a viabilidade de sementes de soja. **Revista Brasileira de oleaginosas e fibrosas**, Campina Grande, v.4, n.1, p.1-7, 2000.
- AFONSO JÚNIOR, P.C.; CORRÊA, P.C.; ANDRADE, E.T. Efeito do impacto mecânico induzido sobre a integridade dos grãos e a qualidade do café. **Revista Brasileira de Armazenamento**, Viçosa, Especial Café, n.06, p.10-18, 2003.
- AGROCERES (2012), Sementes Agrocerec – AG 7088. Disponível em: <http://www.sementesagrocerec.com.br/?page_id=502>. Acessado em: 25 de setembro de 2012.
- ALENCAR, E.R.; FARONI, L.R.D.; LACERDA FILHO, A.F.; PETERNELLI, L.A.; COSTA, A.R. Qualidade dos grãos de soja armazenados em diferentes condições. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v.13, n.5, p.606-613, 2009.
- ARTHUR, F.H. Feasibility of using aeration to control insect pests of corn stored in Southeast Georgia: Simulated field test. **Journal of Economical Entomology**, Oxford, v.87, n.5, p.1359-1365, 1994.
- ARTHUR, F.H.; THRONE, J.E. Pirimiphos-methyl degradation and insect population growth in aerated and unaerated corn stored in southeast Georgia: Small bin test. **Journal of Economical Entomology**, Oxford, v.87, n.3, p.810-816, 1994.
- BASUNIA, M.A.; ABE, T. Thin-layer re-wetting of rough rice at low and high temperatures. **Journal of Stored Products Research**, Oxford, v. 41, n. 2, p. 163-173, 2005.
- BERBERT, P.A.; QUEIROZ, D.M.; SILVA, J.S.; PINHEIRO FILHO, J.B. Simulation of coffee drying in a fixed bed with periodic airflow reversal. **Journal of Agricultural Engineering Research**, London, v.60, n.3, p.167-173, 1995.
- BHATNAGAR, A.P.; BAKSHI, A.S. Aeration studies on the storage of wheat grains in a 50-tonne outdoor metal bin. **Journal of Research - Punjab Agricultural University**, Punjab, v.12, n.2, p.189-199, 1975.
- CAMPOS, S.C.; CORRÊA, P.C.; BOTELHO, F.M.; NOGUEIRA, B.L.; OLIVEIRA, G.H.H.; PAIXÃO, A.A. Avaliação da secagem dos grãos de café de diferentes etapas do processamento via úmida. **Revista Brasileira de Armazenamento**, Viçosa, Especial Café, n. 11, p.88-98, 2009.

CARLESSO, V.O.; BERBERT, P.A.; SILVA, R.F.; DETMANN, E. Avaliação de modelos de secagem em camada fina de sementes de maracujá amarelo. **Revista Brasileira de Sementes**, Brasília, v. 29, n. 2, p. 28-37, 2007.

COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO (CONAB). **Acompanhamento da safra brasileira: grãos safra 2011/2012**. Acesso em: < http://www.conab.gov.br/OlalaCMS/uploads/arquivos/12_07_05_08_41_20_boletim_graos_-_10julho_2012.pdf > Acesso em: 30 jul. 2012.

CORRÊA, P.C.; RIBEIRO, D.M.; RESENDE, O.; BOTELHO, F. M. Determinação e modelagem das propriedades físicas e da contração volumétrica do trigo durante a secagem. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v.10, n.3, p.665-670, 2006.

CORRÊA, P.C.; BOTELHO, F.M.; OLIVEIRA, G.H.H.; GONELI, A.L.D.; RESENDE, O.; CAMPOS, S.C. Mathematical modeling of the drying process of corn ears. **Acta Scientiarum. Agronomy**, Maringá, v.33, n.4, p.575-581, 2011.

DELOUCHE, J.C.; BASKIN, C.C. Accelerated aging techniques for predicting the relative storability of seed lots. **Seed Science and Technology**, Zurich, v.1, n. 2, p. 427-452, 1973.

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

DIAS, D.C.F.S.; MARCOS FILHO, J. Teste de vigor baseados na permeabilidade das membranas celulares: I. Condutividade elétrica. **Informativo ABRATES**, Curitiba, v.5, n.1, p.23-36, 1995.

ERENTURK, S.; GULABOGLU, M.S.; GULTEKIN, S. The thinlayer drying characteristics of roseship. **Biosystems Engineering**, London, v.89, n.2, p.159-166, 2004.

FANCELLI, A.L.; LIMA, U.A. Milho: produção, pré-processamento e transformação agroindustrial. São Paulo: SICCI; PROMOCET; FEALQ, 1982. 112p. (Série Extensão Agroindustrial, 5)

FERRARI FILHO, E. Métodos e temperaturas de secagem sobre a qualidade físico-química e microbiológica de grãos de milho no armazenamento. Porto Alegre: Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2011. 95p. Dissertação de Mestrado.

FERREIRA, W.A.; MUIR, W.E. Aeração de milho a granel no Brasil. **Revista Brasileira de Armazenamento**, Viçosa, v.6, n.2, p.41-46, 1981.

- GONELI, A.L.D.; CORREA, P.C.; RESENDE, O.; REIS NETO, S.A. Estudo da difusão de umidade em grãos de trigo durante a secagem. **Ciência e Tecnologia de Alimentos**, Campinas, v.27, n.1, p.135-140, 2007.
- GONELI, A.L.D.; CORRÊA, P.C.; AFONSO JÚNIOR, P.C.; OLIVEIRA, G.H.H. Cinética de secagem dos grãos de café descascados em camada delgada. **Revista Brasileira de Armazenamento**, Viçosa, Especial Café, n. 11, p.64-73, 2009.
- HALL, C.W. *Drying and storage of agricultural crops*. Westport: AVI, 1980. 381p.
- JAYAS, D.S.; WHITE, N.D.G. Storage and drying of grain in Canada: low cost approaches. **Food Control**, Guildford, n.14, v.4 ,p. 255 - 261 2003.
- KHATCHATOURIAN, O.A.; OLIVEIRA, F.A. Mathematical modelling of airflow and thermal state in large aerated grain storage. **Biosystems Engineering**, London, v.95, n.2, p.159-69, 2006.
- MARTINAZZO, A.P.; CORRÊA, P.C.; RESENDE, O.; MELO, E.C. Análise e descrição matemática da cinética de secagem de folhas de capim-limão. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v.11, n.3, p.301–306, 2007.
- MAGAN, N.; ALDRED, D. Post-harvest control strategies: Minimizing in the food chain. **International Journal of Food Microbiology**, Amsterdam, v.119, n.1-2, p.131-139, 2007.
- NASCIMENTO, V.R.G.; QUEIROZ, M.R. Estratégias de aeração de milho armazenado: temperatura e teor de água. *Engenharia Agrícola*, Jaboticabal, v. 31, n. 4, p. 745-759, 2011.
- NASCIMENTO, V.R.G.; QUEIROZ, M.R.; MARCHI, V.C.; AGUIAR, R.H. Desempenho de estratégias de aeração de milho armazenado: fungos e condutividade elétrica. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v.16, n.1, p.113-121, 2012.
- NAKAGAWA, J.; CAVARIANI, C.; TOLEDO, M.Z. Germinação de sementes armazenadas de guandu. **Revista Brasileira de Sementes**, Brasília, v. 31, n. 4, p.43-48, 2009.
- NAVARRO, S.; DONAHAYE, E.; CALDERON, M. Observations on prolonged grain storage with forced aeration in Israel. **Journal of Stored Products Research**, Oxford, v.5, n.1, p.73-81, 1969.

- 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**, Jaboticabal, v.27, n.1, p.247-258, 2007.
- OLIVEIRA, G.H.H; CORRÊA, P.C.; ARAÚJO, E.F.; VALENTE, D.S.M.; BOTELHO, F.M. Desorption isotherms and thermodynamic properties of sweet corn cultivars (*Zea mays* L.). **International Journal of Food Science and Technology**, Oxford, v.45, v.3, p.546-554, 2010.
- PARK, K. J.; VOHNIKOZA, Z.; BROD, F. P. R. Evaluation of drying parameters and desorption isotherms of garden mint leaves (*Mentha crispa* L.). **Journal of Food Engineering**, Essex, v.51, n.3, p.193-199, 2002.
- POWELL, A.A. Cell membranes and seed leachate conductivity in relation to the quality of seed for sowing. **Journal of Seed Technology**, Lincoln, v.10, p.81-100, 1986.
- QUEIROGA, V.P.; CASTRO, L.B.Q.; GOMES, J.P.; JERÔNIMO, J.F.; PEDROZA, J.P. Qualidade de sementes de algodão armazenadas em função de diferentes cultivares e teores de água. **Revista Caatinga**, Mossoró, v. 22, n. 4, p.135-144, 2009a.
- QUEIROGA, V.P.; CASTRO, L.B.Q.; GOMES, J.P.; SILVA, A.L.; ALVES, N.M.C.; ARAUJO, D.R. Qualidade fisiológica de sementes de algodão armazenadas em função de diferentes tratamentos e cultivares. **Revista Brasileira de Produtos Agroindustriais**, Campina Grande, v. 11, n. 1, p. 43-54, 2009b.
- RESENDE, O. Variação das propriedades físicas e mecânicas e da qualidade do feijão (*Phaseolus vulgaris* L.) durante a secagem e o armazenamento. 2006. 186f. Tese (Doutorado) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa-MG.
- RIGUEIRA, R.J.A.; LACERDA FILHO, A.F.; VOLK, M.B.S.; CECON, P.R. Armazenamento de grãos de café cereja descascado em ambiente refrigerado. **Engenharia na Agricultura**, Viçosa, v.17, n.4, 2009.
- SANTOS, J.P. **Armazenagem de grãos**. Métodos Preventivos de Controle de Pragas. Instituto Bio Geneziz, IBG, Campinas, SP. 2002, p. 417-418.
- SEPIN (2012) Superintendência de Estatística, Pesquisa e Informação. Estatísticas municipais. Disponível em: <
http://www.seplan.gov.br/sepin/perfilweb/Estatistica_bde.asp>. Acessado em: 30 de junho de 2012.
- SILVA, J.S. Secagem e Armazenagem de Produtos Agrícolas, Viçosa: Aprenda Fácil, 2008. 559p.

SUTHERLAND, J.W. Controle of insects in wheat store with an experimental aeration system. **Journal Agricultural Engineering Research**, London, v.13, n.3, p.210-219, 1968.

VIEIRA, R.D.; KRZYZANOWSKI, **Vigor de sementes: conceitos e testes**. Londrina, PR: ABRATES, 1999. Cap. 4, p.1-26.

VOLK, M.B.S.; AFONSO, A.D.L. Viabilidade técnica e econômica da utilização do Equipamento de ar refrigerado em trigo armazenado. **Revista Caatinga**, Mossoró, v.22, n. 3, p 09-17, 2009.

WEBER, E. A. **Armazenagem Agrícola**. Guaíba: Livraria e Editora Agropecuária, 2001, 395p.

WOODSTOCK, L.W. Seed imbibition: a critical period for successful germination. **Journal of Seed Technology**, Lincoln, v.12, n.1 p.1-15, 1988.

OBJETIVOS GERAIS

Diante do potencial produtivo do município de Rio Verde, GO, bem como da escassez de informações a respeito dos fenômenos que ocorrem durante a secagem e o armazenamento das sementes de milho na região do Sudoeste Goiano, além do avanço do conhecimento na área de tecnologia da pós-colheita, objetivou-se no presente trabalho estudar a secagem e a reumedecimento das sementes de milho durante o armazenamento, bem como avaliar a qualidade fisiológica do produto durante estas etapas da pós-colheita.

CAPÍTULO 1

CINÉTICA DE SECAGEM DAS SEMENTES DE MILHO CULTIVAR AG 7088¹

RESUMO - No presente trabalho, objetivou-se ajustar diferentes modelos matemáticos aos dados experimentais da secagem das sementes de milho, determinar e avaliar o coeficiente de difusão efetivo, bem como obter a energia de ativação para o processo durante a secagem em diversas condições de ar. O experimento foi desenvolvido no Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia Goiano – Câmpus Rio Verde. As sementes de milho da cultivar AG 7088, com teor de água inicial de 0,235 (kg de água kg⁻¹ de matéria seca), foram submetidas à secagem em estufa com ventilação de ar forçada em cinco condições de temperatura - 40, 55, 70, 85 e 100 °C - até atingirem o teor de água de 0,149 ± 0,009 (kg de água kg⁻¹ de matéria seca). Entre os modelos analisados, o modelo de Newton apresentou o melhor ajuste para descrever o fenômeno de secagem. O coeficiente de difusão efetivo das sementes de milho aumentou com a elevação da temperatura do ar, e a relação entre o coeficiente de difusão efetivo e a temperatura de secagem pode ser descrita pela equação de Arrhenius, que apresenta uma energia de ativação para a difusão líquida na secagem do milho de 19,09 kJ mol⁻¹.

Palavras-chave: *Zea mays*, modelagem matemática, difusividade líquida, Newton.

¹ Artigo submetido em 2012. Revista Brasileira de Milho e Sorgo. Sete Lagoas.

DRYING KINETICS OF CORN CULTIVAR AG 7088

ABSTRACT - This study aimed to fit different mathematical models to experimental data of drying corn seeds, determine and evaluate the effective diffusion coefficient, and obtain the activation energy for the process during drying at different air conditions. This experiment was carried out at the Goiano Federal Institute of Education, Science and Technology, Campus of Rio Verde City, Goiás State, Brazil. Corn seeds of AG 7088 cultivar, with an initial water content of 0.235 (kg of water kg⁻¹ of dry matter) were dried in oven with forced air ventilation in five temperature conditions of 40, 55, 70, 85, and 100°C until the water content reached 0.149 ± 0.009 (kg of water kg⁻¹ of dry matter). Among the tested models, Newton model showed the best fit to describe the drying phenomenon. The effective diffusion coefficient of corn seeds increased with increasing air temperature, and the relation between the effective diffusion coefficient and the drying temperature may be described by Arrhenius equation, which provides activation energy for liquid diffusion in corn drying of 19.09 kJ mol⁻¹.

key words: *Zea mays*, mathematical modeling, liquid diffusivity, Newton.

Introdução

O milho (*Zea mays* L.) é uma cultura originária da América Central, cultivado em grande parte do mundo, sendo sua importância econômica evidenciada pelas diversas formas de sua utilização, desde a alimentação animal até a indústria de alta tecnologia.

A secagem dos produtos agrícolas é o processo mais utilizado para assegurar sua qualidade e estabilidade, considerando que a diminuição da quantidade de água do material reduz a atividade biológica e as alterações químicas e físicas que ocorrem durante o armazenamento (Resende et al., 2008).

No desenvolvimento e aperfeiçoamento de equipamentos utilizados para a secagem de sementes, são relevantes a simulação e a obtenção de informações teóricas a respeito do comportamento de cada produto durante a remoção de água (Berbert et al., 1995). A utilização de modelos matemáticos nas simulações das operações de secagem tem auxiliado o projeto, o desenvolvimento, a avaliação e a otimização de secadores

(Palacin et al., 2005). Para a simulação, cujo princípio se fundamenta na secagem de sucessivas camadas delgadas do produto, necessita-se da utilização de um modelo matemático que represente, satisfatoriamente, a perda de água durante o período de secagem (Giner & Mascheroni, 2002).

O estudo de simulação da secagem de sementes sob condições externas constantes, para determinado tempo de processamento, pode ser dividido em dois grupos principais: modelos teóricos e modelos empíricos (Beker et al., 1997). Os modelos teóricos consideram a resistência interna, a transferência de calor e massa entre o produto e o ar quente. Já os empíricos, geralmente, baseiam-se em variáveis externas ao produto, como a temperatura e a umidade relativa do ar de secagem. Entretanto, não fornecem indicações sobre os fenômenos de transporte de energia e de massa no interior das sementes e consideram que todo o processo de secagem ocorre somente no período de taxa decrescente (Resende et al., 2009).

A água pode movimentar-se no interior do material por mecanismos diferentes. Em produtos capilares porosos, como a maioria dos produtos agrícolas, os possíveis mecanismos de transporte de água são: difusão líquida, difusão capilar, difusão na superfície, fluxo hidrodinâmico, difusão de vapor e difusão térmica (Martinazzo et al., 2007).

A teoria da difusão líquida assume que não há influência da capilaridade, despreza os efeitos da transferência de energia e massa de um corpo para outro e também considera que os corpos entram em equilíbrio térmico com o ar instantaneamente, o que pode induzir a discrepâncias entre os resultados encontrados (Goneli et al., 2007).

Pode-se dizer que a difusividade é a facilidade com que a água é removida do material. Como a difusividade varia conforme mudam as condições de secagem, ela não é intrínseca ao material, convencionou-se chamá-la, então, de difusividade efetiva (Oliveira et al., 2006). O coeficiente de difusão efetivo pode ser usado quando as sementes são consideradas materiais homogêneos (Iguaz et al., 2003).

Inúmeros trabalhos têm sido realizados com o objetivo de identificar as características de diversos produtos agrícolas durante a secagem. Entre eles, estão trabalhos com nabo forrageiro (Sousa et al., 2011), crambe (Costa et al., 2011), espiga de milho (Corrêa et al., 2011), clones de café (Resende et al., 2009) e feijão (Corrêa et al., 2007).

Considerando a importância do estudo teórico do processo de secagem dos produtos agrícolas, no presente trabalho, objetivou-se ajustar diferentes modelos matemáticos aos dados experimentais da secagem das sementes de milho e determinar o coeficiente de difusão efetivo, bem como obter a energia de ativação para o processo durante a secagem em diversas condições de ar.

Material e Métodos

O experimento foi desenvolvido no Laboratório de Pós-Colheita de Produtos Vegetais do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia Goiano - Câmpus Rio Verde (IF Goiano - *Campus* Rio Verde), com sementes de milho da cultivar AG 7088, procedentes do Município de Rio Verde - GO, com teor de água inicial 0,235 (kg de água.kg⁻¹ de matéria seca). As sementes foram submetidas à secagem em estufa com ventilação de ar forçada em cinco condições de temperatura - 40, 55, 70, 85 e 100 °C - que promoveram as umidades relativas de 22,4; 9,2; 4,2; 2,9 e 1,0%, respectivamente. A secagem prosseguiu até que as sementes atingissem o teor de água de 0,149 ± 0,009 (kg de água . kg⁻¹ de matéria seca), determinado em estufa a 103 ± 1 °C, durante 72 h, em três repetições (ASAE, 2000).

A redução do teor de água ao longo da secagem foi acompanhada pelo método gravimétrico (perda de massa), conhecendo-se o teor de água inicial do produto até atingir o teor de água desejado. O acompanhamento da redução da massa durante a secagem foi realizado com auxílio de uma balança com resolução de 0,01 g.

A temperatura e a umidade relativa do ar ambiente foram monitoradas com um psicrômetro. A temperatura do ar de secagem foi monitorada com um termômetro instalado na parte interna da estufa, e a umidade relativa no interior da estufa foi obtida por meio dos princípios básicos de psicrometria, utilizando o programa computacional GRAPSI (MELO et al., 2004).

Para a determinação das razões de teor de água das sementes de milho durante a secagem, utilizou-se a seguinte expressão:

$$RX = \frac{X - X_e}{X_i - X_e} \quad (1)$$

em que:

RX: razão de teor de água do produto, adimensional;

X: teor de água do produto (kg de água kg⁻¹ de matéria seca);

X_i : teor de água inicial do produto (kg de água kg^{-1} de matéria seca); e

X_e : teor de água de equilíbrio do produto (kg de água kg^{-1} de matéria seca).

Para obter o teor de água de equilíbrio das sementes de milho em cada temperatura, foram utilizadas três bandejas contendo 50g cada, em uma estufa de ventilação forçada. As bandejas contendo as sementes permaneceram na estufa até que a sua massa permanecesse invariável durante três pesagens consecutivas em intervalos de 24 horas.

Aos dados experimentais da secagem das sementes de milho foram ajustados os modelos matemáticos frequentemente utilizados para representação da secagem de produtos agrícolas (Tabela 1).

TABELA 1. Modelos matemáticos utilizados para prever a secagem de produtos agrícolas.

Designação do modelo	Modelo	
$RX = 1 + a t + b t^2$	Wang e Sing	(2)
$RX = a \cdot \exp(-k \cdot t) + (1 - a) \exp(-k_1 \cdot t)$	Verma	(3)
$RX = \exp \left(\left(-a - \left(a^2 + 4 \cdot b \cdot t \right)^{0,5} \right) / 2 \cdot b \right)$	Thompson	(4)
$RX = \exp(-k \cdot t^n)$	Page	(5)
$RX = \exp(-k \cdot t)$	Newton	(6)
$RX = a \cdot \exp(-k \cdot t) + c$	Logarítmico	(7)
$RX = a \cdot \exp(-k \cdot t)$	Henderson e Pabis	(8)
$RX = a \cdot \exp(-k \cdot t) + (1 - a) \exp(-k \cdot a \cdot t)$	Exponencial de Dois Termos	(9)
$RX = a \cdot \exp(-k_0 \cdot t) + b \cdot \exp(-k_1 \cdot t)$	Dois Termos	(10)
$RX = a \cdot \exp(-k \cdot t) + (1 - a) \cdot \exp(-k \cdot b \cdot t)$	Aproximação da Difusão	(11)
$RX = a + bt$	Linear	(12)

em que:

t : tempo de secagem, h;

k, k_0, k_1 : constantes de secagem h^{-1} ; e

a, b, c, n : coeficientes dos modelos.

Os modelos matemáticos foram ajustados por meio de análise de regressão não linear pelo método Gauss-Newton, utilizando um programa estatístico. Os modelos foram selecionados considerando a magnitude do coeficiente de determinação (R^2), do teste de qui-quadrado (χ^2), do erro médio relativo (P) e do desvio padrão da estimativa (SE). Considerou-se o valor do erro médio relativo inferior a 10% como um dos critérios para seleção dos modelos, de acordo com Mohapatra e Rao (2005).

$$P = \frac{100}{N} \sum \frac{|Y - \hat{Y}|}{Y} \quad (13)$$

$$SE = \sqrt{\frac{\sum (Y - \hat{Y})^2}{GLR}} \quad (14)$$

$$\chi^2 = \frac{\sum (Y - \hat{Y})^2}{GLR} \quad (15)$$

em que:

Y : valor observado experimentalmente;

\hat{Y} : valor estimado pelo modelo;

N : número de observações experimentais; e

GLR : graus de liberdade do modelo (número de observações experimentais menos o número de coeficientes do modelo).

O modelo da difusão líquida para a forma geométrica de placa plana, com aproximação de oito termos (Equação 16), foi ajustado aos dados experimentais de secagem das sementes de milho, considerando a área superficial e o volume, de acordo com a seguinte expressão:

$$RX = \frac{X - X_e}{X_i - X_e} = \frac{8}{\pi^2} \sum_{n_i=0}^{\infty} \frac{1}{(2 \cdot n_i + 1)^2} \cdot \exp \left[-\frac{(2 \cdot n_i + 1)^2 \cdot \pi^2 \cdot D \cdot t}{4} \cdot \left(\frac{S}{V} \right)^2 \right] \quad (16)$$

em que:

n_i : número de termos;

S : área da superfície do produto, m^2 ; e

V : volume do produto, m^3 .

A área superficial (S) das sementes de milho foi obtida utilizando os eixos ortogonais de acordo com a expressão:

$$S = \pi \cdot D_g \quad (17)$$

$$D_g = (A \cdot B \cdot C)^{1/3} \quad (18)$$

D_g : diâmetro geométrico médio.

O volume das sementes de milho foi obtido de acordo com a expressão proposta por Mohsenin (1986):

$$V_g = \frac{\pi \cdot A \cdot B \cdot C}{6} \quad (19)$$

em que:

V_g : volume das sementes, mm^3 ;

A: maior eixo, mm;

B: eixo médio, mm; e

C: menor eixo, mm.

A relação entre o coeficiente de difusão efetivo e a elevação da temperatura do ar de secagem foi descrita pela equação de Arrhenius.

$$D = D_0 \cdot \exp\left(\frac{-E_a}{R \cdot T_{ab}}\right) \quad (20)$$

em que:

D_0 : fator pré-exponencial;

E_a : energia de ativação, $\text{kJ} \cdot \text{mol}^{-1}$;

R: constante universal dos gases, $8,134 \text{ kJ} \cdot \text{kmol}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$; e

T_{ab} : temperatura absoluta, K.

Os coeficientes da expressão de Arrhenius foram linearizados com a aplicação do logaritmo na seguinte fórmula:

$$\ln D = \ln D_0 - \frac{E_a}{R} \cdot \frac{1}{T_{ab}} \quad (21)$$

Resultados e Discussão

A Tabela 2 mostra os valores médios da razão de teor de água das sementes de milho submetidos à secagem em diferentes condições de ar. Verifica-se que o tempo necessário para que as sementes atingissem o teor de água de $0,149 \pm 0,009$ (kg de água kg^{-1} de matéria seca) foi de 5,13; 3,38; 2,37; 1,67 e 1,65 h para as temperaturas de secagem de 40, 55, 70, 85 e 100 °C, respectivamente, evidenciando que aumento da temperatura do ar promove redução no tempo de secagem das sementes. Nota-se, também, que com o aumento da temperatura do ar de secagem ocorre maior taxa de remoção de água do produto, conforme observado por diversos pesquisadores para diferentes produtos agrícolas (Sousa et al., 2011; Resende et al., 2009; Resende et al., 2008;). Ainda na Tabela 2, verifica-se que o valor de razão de teor de água diminui rapidamente, com conseqüente aumento da temperatura.

TABELA 2. Razão de teor de água (RX, decimal) das sementes de milho, cultivar AG 7088, ao longo do tempo de secagem (h) em cinco condições de temperatura (°C).

40 °C		55 °C		70 °C		85 °C		100 °C	
RX	Tempo								
1,0000	0,00	1,0000	0,00	1,0000	0,00	1,0000	0,00	1,0000	0,00
0,9009	1,02	0,9196	0,57	0,9214	0,42	0,9280	0,27	0,9197	0,20
0,8205	1,82	0,8537	0,93	0,8583	0,73	0,8549	0,50	0,8460	0,52
0,7587	2,75	0,7859	1,43	0,7870	1,12	0,7881	0,78	0,7644	0,83
0,6666	3,80	0,7185	1,98	0,7246	1,48	0,7249	1,02	0,6922	1,15
0,5910	5,13	0,6467	2,65	0,6740	1,85	0,6687	1,30	0,6340	1,40
-	-	0,5919	3,38	0,5921	2,37	0,6043	1,67	0,5869	1,65

Na Tabela 3 encontram-se os parâmetros estatísticos utilizados para a comparação entre os dez modelos analisados para a descrição da cinética de secagem das sementes de milho submetidas à secagem em diferentes condições de temperatura. Nota-se que todos os modelos matemáticos apresentaram coeficientes de determinação (R^2) superiores a 98,40%, indicando, segundo Madamba et al. (1996), uma representação satisfatória do processo de secagem.

Verifica-se também que os dez modelos apresentaram valores do erro médio relativo inferiores a 10%, para as cinco condições testadas, indicando, de acordo com Mohapatra e Rao (2005), serem adequados para representação do fenômeno. Observa-se que o modelo Linear apresentou os maiores valores do erro médio relativo.

Com relação ao SE, todos os modelos apresentaram valores baixos, próximos a zero, representando bom ajuste dos modelos aos dados experimentais. De acordo com Draper e Smith (1981), a capacidade de um modelo representar adequadamente um determinado processo físico é inversamente proporcional ao valor do erro médio estimado.

TABELA 3. Coeficientes de determinação (R^2 , %), erros médio relativo (P, %) e estimado (SE, decimal x 10^{-3}) para os modelos analisados, durante a secagem das sementes de milho, cultivar AG 7088, nas diversas condições de temperatura ($^{\circ}\text{C}$).

Modelo	40 $^{\circ}\text{C}$			55 $^{\circ}\text{C}$			70 $^{\circ}\text{C}$			85 $^{\circ}\text{C}$			100 $^{\circ}\text{C}$		
	SE	P	R^2	SE	P	R^2									
2	6,4	0,55	99,86	5,4	0,40	99,89	3,3	0,30	99,96	4,4	0,38	99,92	8,2	0,52	99,76
3	6,7	0,64	99,84	4,5	0,25	99,92	3,0	0,24	99,96	5,1	0,48	99,89	5,2	0,50	99,91
4	6,5	0,59	99,85	6,8	0,58	99,82	5,5	0,50	99,88	5,0	0,45	99,89	7,7	0,55	99,79
5	6,6	0,62	99,84	7,8	0,73	99,77	3,0	0,28	99,96	5,1	0,48	99,89	7,0	0,59	99,83
6	6,0	0,64	99,84	8,1	0,91	99,70	5,0	0,50	99,88	4,7	0,48	99,89	7,3	0,42	99,77
7	7,4	0,59	99,85	6,6	0,52	99,86	3,6	0,31	99,96	5,0	0,38	99,91	7,6	0,51	99,84
8	6,7	0,66	99,84	8,7	0,92	99,71	4,6	0,44	99,92	5,1	0,50	99,89	6,8	0,53	99,84
9	6,5	0,59	98,85	6,7	0,57	99,82	3,2	0,29	99,96	5,0	0,45	99,90	7,7	0,54	99,91
10	9,5	0,66	99,84	11,2	0,92	99,71	3,8	0,24	99,96	6,4	0,45	99,93	6,6	0,50	99,79
11	6,7	0,64	99,84	8,8	0,91	99,70	5,5	0,50	99,88	5,1	0,48	99,89	8,0	0,42	99,77
12	16,6	1,58	99,02	20,3	2,15	98,40	9,5	0,97	99,63	12,0	1,05	99,08	11,8	0,89	99,37

Na Tabela 4 estão apresentados os valores do teste de qui-quadrado obtidos para os diferentes modelos ajustados às curvas de secagem das sementes de milho. Os dez modelos analisados apresentaram valores relevantes de qui-quadrado, sendo menores que o qui-quadrado tabelado, que variou de 5,991 a 12,592. Segundo Günhan et al. (2005), quanto menor o valor do qui-quadrado, melhor o ajuste do modelo. Assim, de uma maneira geral, os modelos de Newton (6), Verma (3), Page (5) e Wang e Sing (2) apresentaram os menores valores de qui-quadrado e o modelo Linear (12) obteve os maiores valores.

TABELA 4. Valores para o teste de qui-quadrado calculados para os dez modelos utilizados na representação da cinética de secagem das sementes de milho, cultivar AG 7088.

Modelos	Temperatura				
	40 °C	55 °C	75 °C	85 °C	100 °C
2	0,000041	0,000029	0,000011	0,0000197	0,00007
3	0,000045	0,000021	0,000009	0,0000263	0,00003
4	0,000042	0,000047	0,000031	0,0000248	0,00006
5	0,000043	0,000061	0,000009	0,0000263	0,00005
6	0,000036	0,000065	0,000025	0,0000220	0,00005
7	0,000056	0,000044	0,000013	0,0000246	0,00006
8	0,000045	0,000076	0,000021	0,0000259	0,00005
9	0,000042	0,000046	0,000010	0,0000248	0,00006
10	0,000090	0,000127	0,000015	0,0000413	0,00004
11	0,000045	0,000078	0,000031	0,0000263	0,00006
12	0,000276	0,000416	0,000091	0,000144	0,000141

De acordo com a análise dos parâmetros estatísticos, verifica-se que todos os modelos apresentaram bons ajustes aos dados experimentais. Entretanto, o modelo de Newton foi selecionado para representar o fenômeno de secagem do milho pela sua simplicidade de aplicação.

Vitorino (2009), estudando a secagem de grãos de milho da variedade DKB 979 em camada delgada nas temperaturas de 40, 50, 60 e 70 °C, com teor de água de 0,35 a 0,11 (kg de água kg⁻¹ de matéria seca), verificou que o modelo de Newton representa satisfatoriamente a cinética de secagem desta variedade.

Na Tabela 5 estão apresentados os valores do coeficiente “k” do modelo de Newton ajustado aos dados experimentais da cinética de secagem das sementes de milho em diferentes temperaturas.

TABELA 5. Coeficiente do modelo de Newton ajustado para as diferentes condições de secagem das sementes de milho, cultivar AG 7088, com a respectiva equação em função da temperatura.

Coeficiente	Temperatura (°C)					Equação
	40	55	70	85	100	
K	0,1039**	0,1618**	0,2161**	0,3072**	0,3240**	k=0,0039T -0,0507

**Significativo a 1% pelo teste t

Analisando os resultados, nota-se que a magnitude da constante de secagem k para o modelo de Newton, que representa o efeito das condições externas de secagem, aumentou com a elevação da temperatura do ar de secagem.

Segundo Madamba et al. (1996), a constante de secagem k pode ser utilizada como uma aproximação para caracterizar o efeito da temperatura e está relacionada com a difusividade efetiva no processo de secagem no período decrescente.

Na Figura 1, estão apresentadas as curvas de secagem das sementes de milho estimadas pelo modelo de Newton. Verifica-se ajuste satisfatório do modelo aos valores experimentais obtidos ao longo da secagem das sementes de milho.

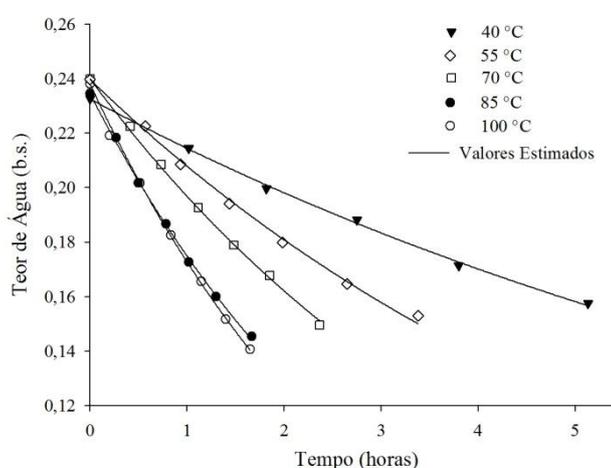


FIGURA 1. Valores do teor de água experimentais e estimados pelo modelo de Newton para a secagem das sementes de milho nas diversas condições de temperatura.

Na Figura 2, estão apresentados os valores do coeficiente de difusão efetivo para as sementes de milho, considerando a área superficial e o volume, após a secagem em diferentes condições de ar. Verifica-se que o coeficiente de difusão efetivo das sementes de milho aumenta com o incremento da temperatura do ar de secagem, concordando com resultados obtidos por outros pesquisadores (Goneli et al., 2007; Gely & Santalla, 2007; Resende et al., 2008).

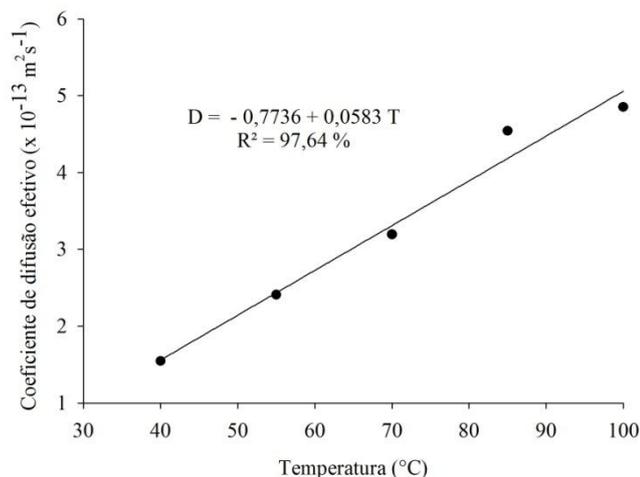


FIGURA 2. Coeficiente de difusão efetivo obtido para a secagem das sementes de milho, cultivar AG 7088, nas temperaturas de 40, 55, 70, 85 e 100 °C.

Nota-se que o modelo linear representou satisfatoriamente os dados experimentais, com alto coeficiente de determinação (97,64%). A difusividade depende da temperatura do ar de secagem, ou seja, quanto maior a temperatura do ar de secagem, menor a resistência da semente à remoção de água, aumentando a difusividade.

Os coeficientes de difusão efetivos das sementes de milho apresentaram magnitudes entre $1,54 \times 10^{-13}$ a $4,85 \times 10^{-13} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$, valores próximos aos encontrados por Gely & Santalla (2007), para sementes de quinoa, $1,18 \times 10^{-12}$ e $6,76 \times 10^{-12} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$, para temperaturas de 30 e 90 °C. Já Sacilik (2007) e Goneli et al. (2007) encontraram magnitudes de $8,53 \times 10^{-11}$ a $17,52 \times 10^{-11} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ e $8,3306 \times 10^{-11}$ e $41,0977 \times 10^{-11} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ para o coeficiente de difusão das sementes de abóbora e grãos de trigo, respectivamente.

Os valores dos coeficientes de difusão efetivo para as sementes de milho da cultivar AG 7088 foram inferiores aos relatados por Madamba et al. (1996), da ordem de 10^{-11} a $10^{-9} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$. Esses valores menores encontrados no milho podem ser atribuídos à sua composição química, rico em carboidrato, lembrando que para secar o produto a água presente nas sementes deve passar pelas camadas dos diferentes tecidos celulares que as formam, e, dependendo da composição química dessas camadas, o produto apresenta diferentes características. Ressalta-se que Gely & Santalla (2007) encontraram valores semelhantes para a quinoa, que também tem alto valor de carboidratos totais.

A dependência do coeficiente de difusão efetivo das sementes de milho com relação à temperatura do ar de secagem foi representada pela expressão de Arrhenius (Figura 3).

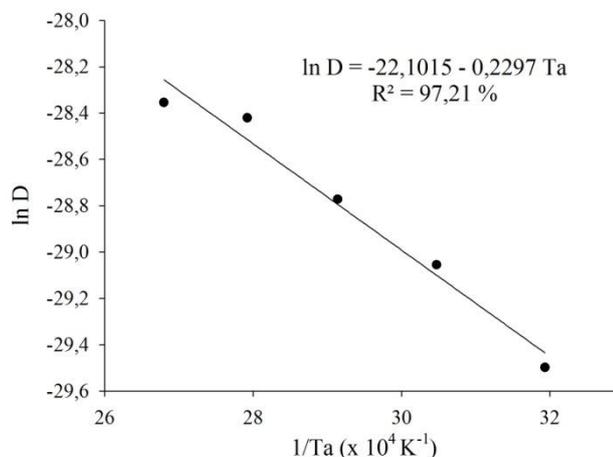


FIGURA 3. Representação de Arrhenius para o coeficiente de difusão efetivo em função da temperatura do ar de secagem, obtido durante a secagem das sementes de milho, cultivar AG 7088.

A energia de ativação para o fenômeno de secagem do milho foi de 19,09 kJ mol⁻¹ para a faixa de temperatura estudada. Segundo Zogzas et al. (1996), a energia de ativação para produtos agrícolas varia entre 12,7 a 110 kJ mol⁻¹, deste modo, o valor obtido no presente trabalho se encontra dentro desta faixa.

Como a energia de ativação indica a facilidade com que as moléculas de água superam a barreira de energia durante a migração no interior do produto, quanto menor a energia de ativação, maior será a difusividade de água no produto (Corrêa et al., 2007).

Na literatura, encontram-se valores da energia de ativação para diversos produtos agrícolas: mamona, 15,25 kJ mol⁻¹ na faixa de temperatura de 25 a 55 °C (Goneli, 2008); quinoa, 37,97 kJ mol⁻¹ para temperaturas de 30 e 90 °C (Gely & Santalla, 2007); e crambe, 37,07 kJ mol⁻¹ para temperaturas de 30, 40, 50, 60 e 70 °C (Costa et al., 2011).

Vitorino (2009), estudando secagem de grãos de milho da variedade DKB 979, verificou que a energia de ativação foi de 31,54 kJ mol⁻¹. Já Corrêa et al. (2011), estudando secagem de milho em espiga da variedade UFV-100 nas temperaturas de 45,

55 e 65 °C e teor de água de 0,45 a 0,12 (kg de água kg⁻¹ de matéria seca), verificaram que a energia de ativação foi de 17,64 kJ mol⁻¹.

A Figura 4 mostra a influência da temperatura na constante de secagem (k), do modelo de Newton, descrita por meio da representação de Arrhenius.

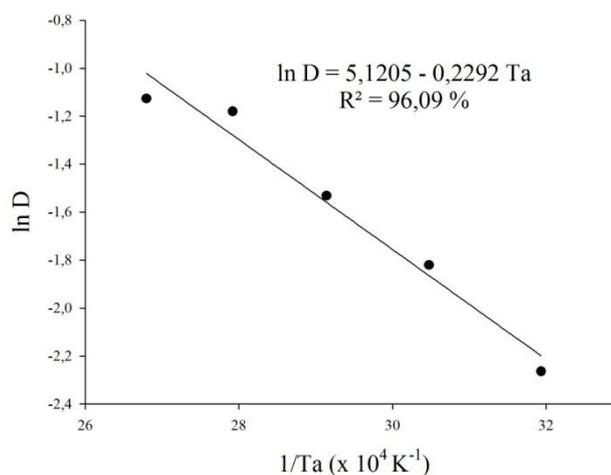


FIGURA 4. Representação de Arrhenius para a constante de secagem k, do modelo de Newton, durante a secagem das sementes de milho cultivar AG 7088.

A energia de ativação para o fenômeno de secagem do milho com base nos dados estimados pelo modelo de Newton foi de 19,05 kJ mol⁻¹, valor próximo ao obtido para a energia de ativação do coeficiente de difusão efetivo, 19,09 kJ mol⁻¹, demonstrando que a constante k está diretamente relacionada à difusividade de água nas sementes.

Conclusões

Todos os modelos avaliados apresentaram bons ajustes, entretanto o modelo de Newton, pela sua maior simplicidade quando comparado aos demais modelos analisados, foi o modelo selecionado para representar o fenômeno da secagem das sementes de milho da cultivar AG 7088.

O coeficiente de difusão efetivo para as sementes de milho aumenta com a elevação da temperatura do ar durante a secagem, sendo descrito pela equação de Arrhenius, apresentando uma energia de ativação de 19,09 kJ.mol⁻¹.

Referências

- American Society of Agricultural Engineers (ASAE). Moisture measurement - Unground grain and seeds. ASAE, St. Joseph, 2000. p.563.
- BERBERT, P.A.; QUEIROZ, D.M.; SILVA, J.S. Simulation of coffee drying in a fixed bed with periodic airflow reversal. **Journal of Agricultural Engineering Research**, London, v.6, n.3, p.167-173, 1995.
- BEKER, J.; MUJUMDAR, A.S.; GIROUX, M. Some fundamental attributes of corn and potato drying in microwave fields. **Drying Technology**, New York, v.15, n.2, p.539-554, 1997.
- CORRÊA, P.C.; RESENDE, O.; MARTINAZZO A.P.; GONELI, A.L.G.; BOTELHO, F. M. Modelagem matemática para a descrição do processo de secagem do feijão (*Phaseolus vulgaris* L.) em camadas delgadas. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, MG, v.27, n.2, p.501-510, 2007.
- CORRÊA, P.C.; BOTELHO, F. M.; OLIVEIRA, G.H.H.; GONELI, A.L.G.; RESENDE, O.; CAMPOS, S.C. Mathematical modeling of the drying process of corn ears. **Acta Scientiarum. Agronomy**, Maringá, PR, v.33, n.4, p.575-581, 2011.
- COSTA, L.M.; RESENDE, O.; SOUSA, K.A.; GONÇALVES, D.N. Coeficiente de difusão efetivo e modelagem matemática da secagem de sementes de crame. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, PB, v.15, n.10, p.1089-1096, 2011.
- GELY, M.C.; SANTALLA, E.M. Moisture diffusivity in quinoa (*Chenopodium quinoa* Willd.) seeds: Effect of air temperature and initial moisture content of seeds. **Journal of Food Engineering**, Essex, v.78, n.3, p. 1029-1033, 2007.
- GINER, S.A.; MASCHERONI, R.H. Diffusive drying kinetics in wheat, part 2: applying the simplified analytical solution to experimental data. **Biosystems Engineering**, London, v.81, v.1, p. 85–97, 2002.
- GONELI, A.L.D.; CORRÊA, P.C.; RESENDE, O.; REIS NETO, S.A. Estudo da difusão de umidade em grãos de trigo durante a secagem. **Ciência Tecnologia de Alimentos**, Campinas, SP, v.27, n.1, p.135-140, 2007.
- GONELI, A.L.D. Variação das propriedades físico-mecânicas e da qualidade de mamona (*Ricinus communis* L.) durante a secagem e o armazenamento. Viçosa: Universidade Federal de Viçosa, 2008. 186p. Tese Doutorado.

- GÜNHAN, T.; DEMIR, V.; HANCIOGLU, E.; HEPBASLI, A. Mathematical modelling of drying of bay leaves. **Energy Conversion and Management**, Oxford, v.46, n.11-12, p.1667-1679, 2005.
- IGUAZ, A.; SAN MARTIN, M.B.; MATÉ, J.I.; FERNANDEZ, T.; VÍRSEDA, P. Modelling effective moisture diffusivity of rough rice (*Lido cultivar*) at low drying temperatures. **Journal of Food Engineering**, Essex, v.59, n.2-3, p.253–258, 2003..
- MADAMBA, P.S.; DRISCOLL, R.H.; BUCKLE, K.A. The thin layer drying characteristic of garlic slices. **Journal of Food Engineering**, Essex, v.29, n.1, p.75-97, 1996.
- MARTINAZZO, A.P.; CORRÊA, P.C.; RESENDE, O.; MELO, E.C. Análise e descrição matemática da cinética de secagem de folhas de capim-limão. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, PB, v.11, n.3, p.301-306, 2007.
- MELO, E.C.; LOPES, D.C.; CORRÊA, P.C. Grapsi – programa computacional para o cálculo das propriedades psicrométricas do ar. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v.12, n.2, p.154-162, 2004.
- 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.
- MOHSENIN, N.N. Physical properties of plant and animal materials. New York: Gordon and Breach Publishers, 1986. 841p.
- OLIVEIRA, R.A.; OLIVEIRA, W.P.; PARK, K.J. Determinação da difusividade efetiva de raiz de chicória. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, SP, v.26, n.1, p.181-189, 2006.
- PALACIN, J.J.F.; FILHO, A.F.L.; CECON, P.R.; MONTES, E.J.M. Determinação das curvas de secagem de milho nas espigas (*Zea mays* L.). **Engenharia na Agricultura**, Viçosa, v.13, n.4, p.300-313, 2005.
- RESENDE, O.; CORRÊA, P.C.; GONELI, A.L.D.; BOTELHO, F.M.; RODRIGUES, S. Modelagem matemática do processo de secagem de duas variedades de feijão (*Phaseolus vulgaris* L.). **Revista Brasileira de Produtos Agroindustriais**, Campina Grande, v.10, n.1, p.17-26, 2008.
- RESENDE, O.; ARCANJO, R.V.; SIQUEIRA, V.C.; RODRIGUES, S. Modelagem matemática para a secagem de clones de café (*Coffea canephora* Pierre) em terreiro de concreto. **Acta Scientiarum. Agronomy**, Maringá, v.31, n.2, p.189-196, 2009.

SACILIK, K. Effect of drying methods on thinlayer drying characteristics of hull-less seed pumpkin (*Cucurbita pepo* L.). **Journal of Food Engineering**, Essex, v.79, n.1, p.23-30, 2007.

SOUSA, K.A.; RESENDE, O.; CHAVES, T.H.; COSTA, L.M. Cinética de secagem do nabo forrageiro (*Raphanus sativus* L.). **Revista Ciência Agronômica**, Fortaleza, v.42, n.4, p.883-892, 2011.

VITORINO, R.B. Modelagem e simulação matemática do processo de secagem de milho. Dourados: Universidade Federal da Grande Dourados, 2009. 52p. Dissertação de Mestrado.

ZOGZAS, N.P.; MAROULIS, Z.B.; MARINOS-KOURIS, D. Moisture diffusivity data compilation in food stuffs. **Drying Technology**, New York, v.14, n.10, p.2225-2253, 1996.

CAPÍTULO 2

QUALIDADE DAS SEMENTES DE MILHO SUBMETIDAS A DIFERENTES TEMPERATURAS DE SECAGEM ARTIFICIAL ²

RESUMO - Objetivou-se com o presente trabalho avaliar o efeito da secagem em diferentes condições de ar sobre a qualidade das sementes de milho, cultivar AG 7088. O experimento foi desenvolvido no Laboratório de Pós-Colheita de Produtos Vegetais no Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia Goiano - Câmpus Rio Verde. Foram utilizadas sementes de milho, cultivar AG 7088, com teor de água inicial de $0,2370 \pm 0,0032$ (base seca, b.s.), sendo submetidas à secagem em estufa com ventilação de ar forçada em cinco condições de temperatura: 40, 55, 70, 85 e 100 °C. A secagem prosseguiu até que as sementes atingissem o teor de água de $0,1492 \pm 0,0065$ (b.s.). Foram avaliados a taxa de redução de água, germinação, índice de velocidade de germinação (IVG) e a condutividade elétrica para cada temperatura de secagem. Com base nos resultados obtidos, concluiu-se que as temperaturas de secagem superiores a 70 °C diminuem a germinação e o IVG e também aumentam a condutividade elétrica do exsudato das sementes. Para que a qualidade das sementes de milho, cultivar AG 7088, não seja comprometida, a secagem deve ser realizada com a temperatura do ar máxima de 70 °C.

Palavras-chave: *Zea mays* L, condutividade elétrica, germinação, cultivar AG 7088.

² Artigo submetido à Revista Caatinga.

QUALITY OF GRAIN OF CORN SUBMITTED TO DIFFERENT TEMPERATURES FOR ARTIFICIAL DRYING

ABSTRACT - This study aimed to evaluate the drying effect under different air conditions on seeds quality of AG 7088 cultivar. This experiment was carried out in the Laboratory of Post-Harvest of Vegetable products at the Goiano Federal Institute of Education, Science and Technology, in Campus of Rio Verde City, Goiás State, Brazil. Corn seeds of AG 7088 cultivar were used with initial water content of 0.2370 ± 0.0032 (dry basis, db), being subjected to drying in oven with forced air ventilation in five temperature conditions of 40, 55, 70, 85, and 100°C. Drying continued until the seeds reached a moisture content of 0.1492 ± 0.0065 (db). Water reduction rate, germination, germination speed index (GSI), and electrical conductivity for each drying temperature were evaluated. Results showed that the drying temperatures above 70°C decrease the germination and GSI, and also increase the electrical conductivity of the seeds exudate. For the corn seeds quality of AG 7088 cultivar not being compromised, drying must be done with maximum air temperature of 70°C.

Key words: *Zea mays* L, electrical conductivity, germination, AG 7088 cultivar.

Introdução

A secagem é um processo que visa a diminuir o teor de água das sementes para um armazenamento eficiente e seguro. Este fenômeno de redução do teor de água envolve simultaneamente a transferência de calor e massa, que podem alterar de forma substancial a sua qualidade, dependendo do método e das condições de secagem (Hall, 1980).

O teor de água do produto e a temperatura de armazenamento são características cruciais para a interação de fatores bióticos e abióticos que promovem a deterioração de sementes (Silva & Vieira, 2008). A secagem reduz o teor de água atuando diretamente na diminuição do metabolismo, podendo contribuir para atenuar a taxa de deterioração e aumentando o período em que as sementes podem ser armazenadas, sem perda da qualidade do produto (Carlesso et al., 2008).

Para garantir a qualidade e a conservação das sementes, são indispensáveis o transporte e o armazenamento em locais secos e ventilados e, principalmente, com baixos teores de água (Corrêa et al., 2006). O teor de água tem uma relação direta com a atividade de insetos e microrganismos, bem como influencia tanto na percentagem quanto na velocidade e uniformidade do processo germinativo (Marcos Filho, 2005).

Os microrganismos contribuem para o aquecimento das sementes armazenadas e para perdas de matéria seca ocasionadas pela utilização de carboidratos, proteínas e lipídios como fonte de energia durante a respiração e ainda podem causar efeitos indesejáveis na qualidade do produto, como descoloração do tegumento (Magan & Aldred, 2007).

Faroni et al. (2006) ressaltam que a secagem, se conduzida inadequadamente, tem papel significativo nas perdas da qualidade das sementes. Assim, a temperatura do ar de secagem deve ser controlada para evitar possíveis danos à qualidade das sementes.

Durante o processo de secagem, pode ocorrer decréscimo na qualidade fisiológica das sementes, como redução da porcentagem e velocidade de germinação, produção de plântulas anormais, trincamentos internos, rompimento do tegumento e alterações na coloração (Nellist & Hugues, 1973). A proporção dos danos depende da interação entre a temperatura, o tempo de exposição e o teor de água das sementes.

A velocidade e a primeira contagem de germinação estão entre os testes de viabilidade mais conhecidos. O teste de velocidade de germinação considera que lotes cujas sementes germinam mais rapidamente são mais vigorosos, havendo, portanto, relação direta entre velocidade de germinação e o vigor (Silva & Vieira, 2006).

Outro método utilizado para identificar os lotes mais vigorosos é a condutividade elétrica, sendo rápido, prático e de fácil condução, sem necessidade de equipamentos sofisticados e pessoal extremamente qualificado (Vieira & Krzyzanowski, 1999).

Diante do exposto, este trabalho foi desenvolvido com o objetivo de estudar o efeito da secagem em diferentes condições de ar sobre a qualidade das sementes de milho da cultivar AG 7088.

Material e Métodos

O experimento foi desenvolvido no Laboratório de Pós-colheita de Produtos Vegetais do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia Goiano – *Câmpus* Rio Verde (IF Goiano – *Câmpus* Rio Verde).

Foram utilizadas sementes de milho (*Zea mays* L.), cultivar AG 7088, procedentes do Município de Rio Verde – GO, com teor de água inicial de $0,2370 \pm 0,0032$ (base seca, b.s.), sendo submetidas à secagem em estufa com ventilação de ar forçada em cinco condições de temperatura - 40, 55, 70, 85 e 100 °C - e umidades relativas de 22,4; 9,2; 4,2; 2,9 e 1,0%, respectivamente. A secagem prosseguiu até que o produto atingisse o teor de água de $0,1492 \pm 0,0065$ (b.s), determinado em estufa com ventilação forçada a 103 ± 1 °C, durante 72 horas, em três repetições (ASAE, 2000).

Foram utilizadas três repetições com 0,5 kg de sementes de milho para cada condição de secagem. As amostras foram colocadas em bandejas metálicas circulares perfuradas, com diâmetro de 28 cm, perfazendo uma camada de 0,032 m de espessura.

A redução do teor de água ao longo da secagem foi acompanhada pelo método gravimétrico (perda de massa), conhecendo-se o teor de água inicial do produto, até atingir o teor de água desejado. O acompanhamento da redução da massa durante a secagem foi realizado com auxílio de uma balança analítica com resolução de 0,01 g.

A temperatura do ar de secagem foi monitorada por um termômetro instalado no interior do secador. A umidade relativa no interior da estufa foi obtida por meio dos princípios básicos de psicrometria, monitorando-se as condições do ambiente externo e utilizando o programa computacional GRAPSI (Melo et al., 2004).

Para a avaliação da secagem, procedeu-se à determinação da taxa de redução de água do produto de acordo com a seguinte expressão:

$$TRA = \frac{Ma_0 - Ma_i}{Ms \cdot (t_i - t_0)} \quad (1)$$

em que:

TRA: taxa de redução de água ($\text{kg kg}_{\text{ms}}^{-1} \text{h}^{-1}$);

Ma_0 : massa de água total anterior (kg);

Ma_i : massa de água total atual (kg);

Ms : massa seca (kg);

t_0 : tempo total de secagem anterior (h); e

t_i : tempo total de secagem atual (h).

Os testes de germinação e índice de velocidade de germinação (IVG) foram conduzidos em quatro repetições de 50 sementes, em rolos de papel “Germitest”, em germinador tipo “Mangelsdorf” regulado a temperatura de 25 ± 2 °C. O substrato foi umedecido com água destilada na proporção de 2,5 vezes a massa do papel substrato. As avaliações foram realizadas aos quatro dias (primeira contagem) e sete dias (segunda contagem), computando-se a porcentagem média de germinação (Brasil, 2009).

O índice de velocidade de germinação (IVG) foi calculado após a completa estabilização das germinações, tendo as avaliações ocorrido a partir do 1º dia após a semeadura e a germinação, analisada diariamente até que o número de sementes germinadas fosse constante. O IVG foi calculado conforme a expressão proposta por Maguire (1962):

$$\text{IVG} = \frac{G_1}{D_1} + \frac{G_2}{D_2} + \dots + \frac{G_n}{D_n} \quad (2)$$

em que:

IVG = índice de velocidade de germinação;

G_1 = número de plântulas germinadas na primeira contagem;

D_1 = número de dias para a primeira contagem;

G_n = número de plântulas germinadas na última contagem; e

D_n = número de dias para a última contagem.

A condutividade elétrica (CE) foi realizada medindo-se a condutividade de massa, tendo como finalidade avaliar a danificação nas membranas celulares. O teste foi conduzido em quatro repetições de 50 sementes, pesadas em balança com resolução de 0,01 gramas e colocados em copos de plástico de 200 mL, aos quais foram adicionados 75 mL de água deionizada. Em seguida, os recipientes foram inseridos em câmara climática do tipo B.O.D., em temperatura de 25 °C, durante 24 horas. Após este período, as amostras foram retiradas da câmara para medições da condutividade elétrica da solução. O valor da condutividade elétrica ($\mu\text{S cm}^{-1}$) fornecido pelo aparelho foi dividido pela massa de matéria seca das sementes (g), obtendo-se o valor expresso em $\mu\text{S cm}^{-1} \text{g}^{-1}$ de matéria seca (Vieira & Krzyzanowski, 1999).

O experimento foi montado em delineamento inteiramente casualizado (DIC), com 5 tratamentos (temperaturas de secagem de 40, 55, 70, 85 e 100 °C), em três repetições. Os dados foram analisados por meio de regressão para caracterização do

comportamento das variáveis. Os modelos foram selecionados com base no coeficiente de determinação (R^2) e no conhecimento da evolução do fenômeno biológico.

Resultados e Discussão

A Figura 1 apresenta as curvas de secagem para as sementes de milho, cultivar AG 7088, nas temperaturas de 40, 55, 70, 85 e 100 °C. Nota-se que os tempos de secagem para cada temperatura foram de 5,13; 3,38; 2,27; 1,67 e 1,65 horas, respectivamente.

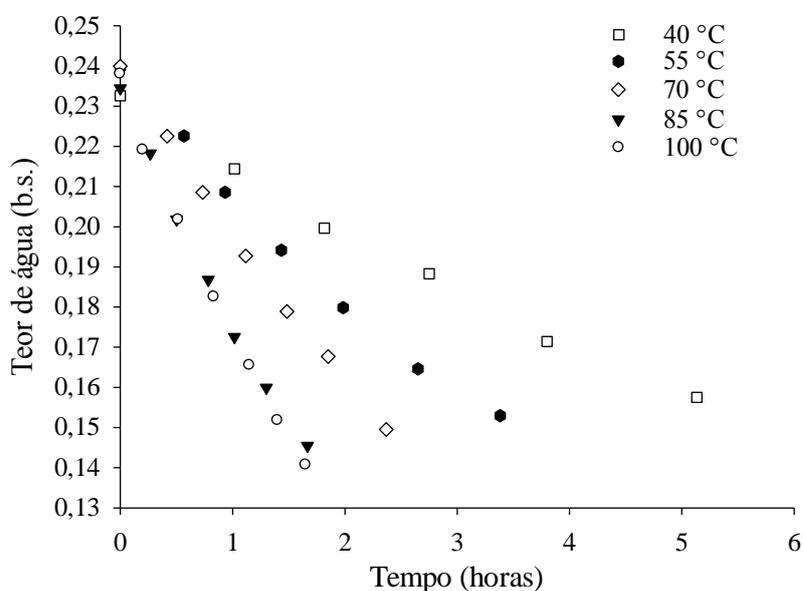


FIGURA 1. Curvas de secagem para as sementes de milho, cultivar AG 7088, nas temperaturas de 40, 55, 70, 85 e 100 °C.

Verifica-se que com o aumento da temperatura há uma redução do tempo de secagem, evidenciando a maior velocidade de retirada de água e proporcionando uma maior taxa de remoção de água em razão do maior gradiente de umidade entre a semente e o ar. Assim, o tempo necessário para reduzir o teor de água até o valor desejado diminui, mostrando uma clara dependência da velocidade da secagem à temperatura do ar. As sementes de milho apresentam o mesmo comportamento da maioria dos produtos agrícolas, como observado por Resende et al., (2008), Almeida et al. (2009), Ullmann et al. (2010) e Sousa et al. (2011), trabalhando com feijão vermelho, feijão adzuki, pinhão manso e nabo forrageiro, respectivamente. Com o

decréscimo do teor de água, a taxa de evaporação diminui gradativamente até alcançar o seu teor de água de equilíbrio.

O tempo de secagem pode ser muito importante na tomada de decisão para otimizar o sistema de secagem. Entretanto, a utilização de temperaturas elevadas pode provocar trincamento, principalmente em grãos de milho e arroz (Peske & Villela, 2003).

A Figura 2 apresenta a taxa de redução de água das sementes de milho, cultivar AG 7088, durante o processo de secagem nas temperaturas de 40, 55, 70, 85 e 100 °C. Verificou-se que as maiores taxas de redução no teor de água ocorreram nas temperaturas mais elevadas.

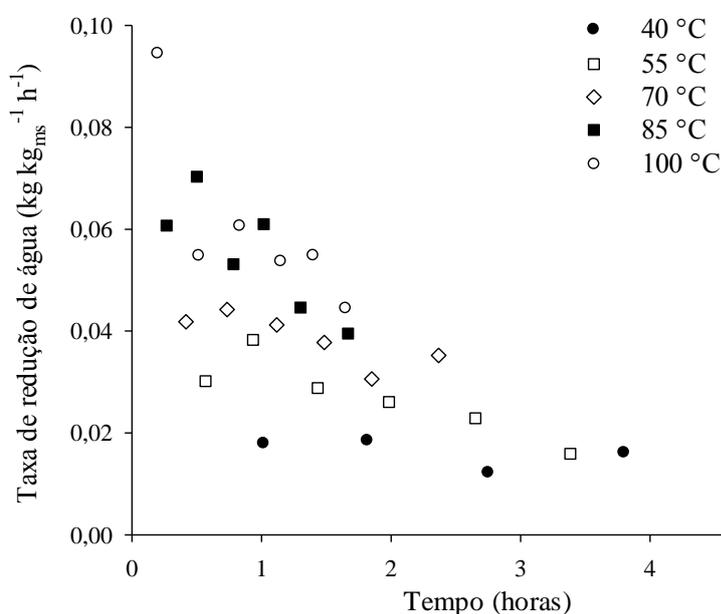


FIGURA 2. Taxa de redução de água para das sementes de milho, cultivar AG 7088, nas temperaturas de 40, 55, 70, 85 e 100 °C em função do tempo.

Percebe-se que a temperatura de 100 °C apresentou a maior taxa de redução de água com o valor de $0,0945 \text{ kg kg}_{\text{ms}}^{-1} \text{ h}^{-1}$, já a temperatura de 40 °C apresentou a menor taxa de redução de água em $0,0104 \text{ kg kg}_{\text{ms}}^{-1} \text{ h}^{-1}$, evidenciando que com temperaturas elevadas há maior remoção de água das sementes de milho e, conseqüentemente, diminuição do tempo de secagem.

Nota-se que as maiores taxas de redução de água ocorrem no início da secagem. Este comportamento também foi observado por Ribeiro et al. (2003) e Resende et al. (2010) estudando secagem de café cereja descascado e clones de café,

respectivamente. No final da secagem, a água se encontra fortemente ligada, necessitando de maior energia para a sua evaporação, assim a secagem ocorre mais lentamente, resultando em menores valores da taxa de redução de água (Resende et al., 2010).

A Tabela 1 apresenta a análise de variância para os testes de germinação, IVG e condutividade elétrica do exsudato das sementes de milho. Os resultados comprovam que as variáveis avaliadas foram significativas a 1% pelo teste de F, com baixo coeficiente de variação.

TABELA 1. Análise de variância para germinação, índice de velocidade de germinação (IVG) e condutividade elétrica do exsudato das sementes de milho, cultivar AG 7088, submetidas à secagem em diferentes temperaturas.

Variáveis analisadas	Quadrados médios	Coeficiente de Variação (%)
Germinação	942,53**	9,17
IVG	133,92**	10,15
Condutividade elétrica	14,75**	9,80

**Significativo a 1% pelo teste F.

A Figura 3 apresenta os valores de germinação do milho da cultivar AG 7088 submetidas a diferentes condições de secagem. Nota-se que a germinação diminuiu com o aumento da temperatura. Para a faixa de temperatura entre 40 e 70 °C, houve pequenas alterações nos valores da germinação das sementes. Entre as temperaturas de 70 e 100 °C, ocorreu mudança no comportamento com acentuada redução da germinação. Desta forma, pode-se dizer que temperaturas de secagem superiores a 70 °C removem a água do interior das sementes de milho com maior velocidade, reduzindo a qualidade das sementes.

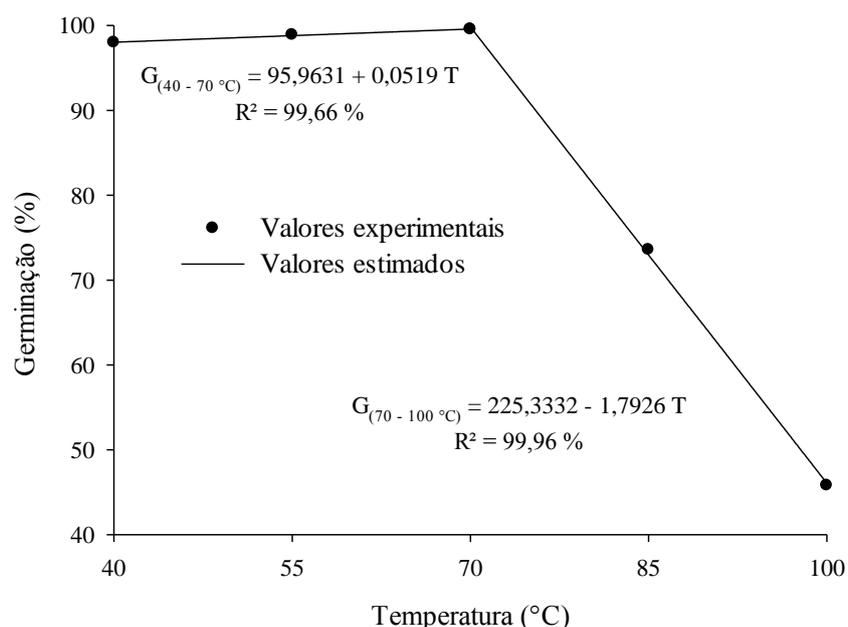


FIGURA 3. Germinação (%) das sementes de milho da cultivar AG 7088 submetidas às temperaturas de secagem de 40, 55, 70, 85 e 100 °C.

Comparando a germinação entre as temperaturas, observa-se que para a temperatura de 40 °C (98%) a germinação foi 2,14 vezes maior que para a de 100 °C (45,78%). Ainda na Figura 3, nota-se que a equação linear pode ser utilizada para descrever o comportamento da germinação em função das temperaturas de secagem: no intervalo de 40 a 70 °C há um pequeno aumento na germinação e entre 70 e 100 °C a germinação diminui de maneira drástica.

Considerando o efeito da secagem na qualidade das sementes de milho da cultivar AG 7088, elas, para serem comercializados como sementes, devem ter germinação mínima de 85% (Brasil, 2005). A qualidade fisiológica das sementes de milho é afetada por temperatura acima de 70 °C, sendo esta a temperatura máxima para a secagem sem prejudicar a germinação.

Ullmann et al. (2010), estudando qualidade fisiológica de sementes de pinhão manso, submetidas a diferentes condições de secagem, verificaram que a porcentagem de germinação diminuiu com aumento da temperatura de secagem.

Gupta et al. (2005) observaram que, para sementes de milho doce colhidas com teor água de 0,25 a 0,4286 b.s., a temperatura de secagem pode ser elevada para 50 °C

utilizando-se baixa velocidade do ar de secagem (1,25 m/s), sem que a qualidade fisiológica seja comprometida.

Na Figura 4, estão os resultados do IVG para diferentes temperaturas de secagem. Nota-se que o IVG obteve o mesmo comportamento constatado para a germinação. Verifica-se um suave aumento no IVG no intervalo de 40 a 70 °C e, a partir desta temperatura, há um decréscimo no índice de velocidade de germinação.

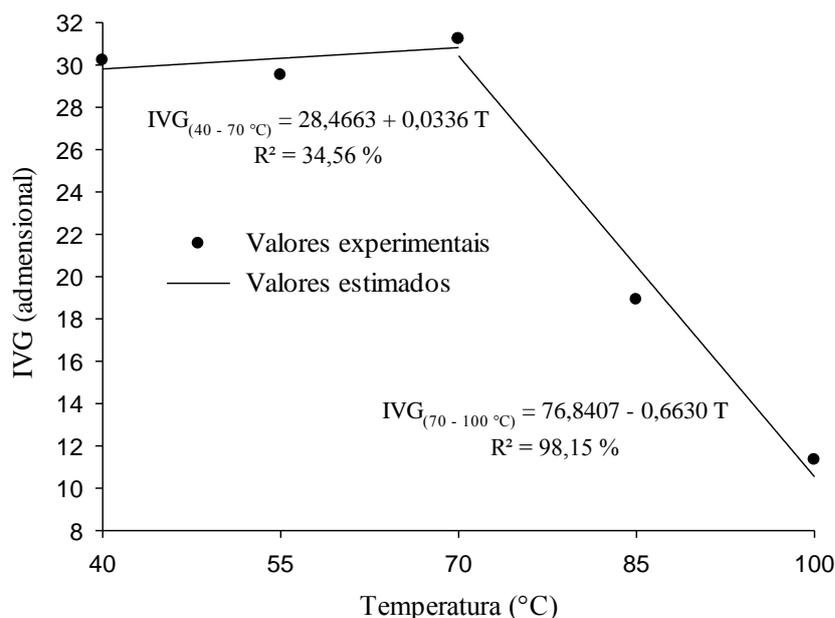


FIGURA 4. Índice de velocidade de germinação (IVG) das sementes de milho da cultivar AG 7088 submetidas às temperaturas de secagem de 40, 55, 70, 85 e 100 °C.

Verifica-se que as sementes de milho secas na temperatura de 40 °C (30,21) obtiveram um IVG 2,67 vezes maior que aquelas expostas à temperatura de 100 °C, ratificando o decréscimo na qualidade do produto quando submetido à secagem com temperaturas elevadas.

Oliveira et al. (2010), avaliando os efeitos imediato e latente da secagem nas temperaturas de 30, 34 e 38 °C em sementes de carambola, não verificaram diferença significativa no IVG com aumento da temperatura de secagem.

Ullmann et al. (2010), estudando a qualidade fisiológica das sementes de pinhão-mansão submetidas à secagem nas temperaturas de 30, 40, 50, 60 e 70 °C, também não verificaram diferença significativa no IVG com aumento da temperatura de secagem.

Na Figura 5, estão os resultados da condutividade elétrica dos exsudato das sementes de milho para diferentes temperaturas de secagem. Verifica-se aumento nos valores com a elevação da temperatura de secagem.

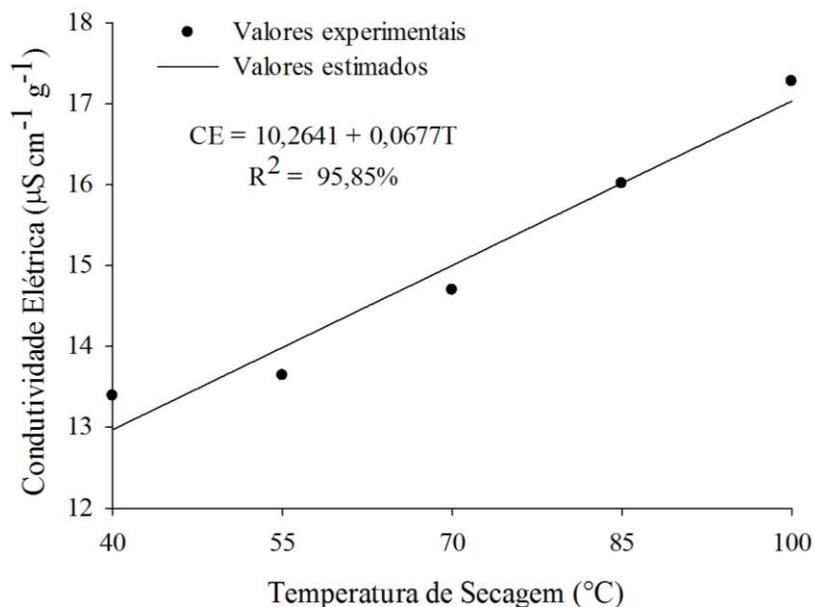


FIGURA 5. Condutividade elétrica do exsudato das sementes de milho da cultivar AG 7088 submetidas às temperaturas de secagem de 40, 55, 70, 85 e 100.

Borém et al. (2008), estudando secagem de café natural e despulpado em três ambientes diferentes (terreiro e com ar aquecido a 40 e 60 °C), verificaram aumento da condutividade elétrica com o incremento da temperatura de secagem, independentemente do tipo de processamento, e os lixiviados foram mais acentuados na temperatura de 60 °C.

Ainda na Figura 5, nota-se que a equação linear representou a evolução da condutividade elétrica em função do aumento da temperatura. Pode-se inferir que o aumento da danificação das membranas das sementes de milho está diretamente ligado ao incremento da temperatura de secagem.

Desta forma, fica evidenciado que temperaturas de secagem elevadas, essencialmente as temperaturas de 85 e 100 °C, removem a água do interior das sementes com maior agressividade, ocasionando um decréscimo na qualidade do milho da cultivar AG 7088.

Zuchi et al. (2009), avaliando secagem de sementes de mamona colhidas com teor de água de 0,3333 e 0,4286 (b.s.), em temperaturas variando de 40 a 100 °C,

verificaram que temperaturas de secagem superiores a 60 °C prejudicam significativamente a qualidade fisiológica destas sementes. Jose et al. (2006), estudando sementes de híbridos de milho, identificaram que uma maior tolerância a altas temperaturas de secagem está associada com maior relação entre a sacarose, rafinose e estaquiase/glicose e frutose.

Conclusões

Temperaturas de secagem superiores a 70 °C diminuem a germinação e o IVG, e também aumentam a condutividade elétrica do exsudato das sementes de milho, piorando a qualidade do produto.

A secagem das sementes de milho da cultivar AG 7088 deve ser realizada com a temperatura do ar máxima de 70 °C para que sua qualidade não seja comprometida.

Referências

- ALMEIDA, D. P.; RESENDE, O.; COSTA, L.M.; MENDES, U.C.; SALES, J.F. Cinética de secagem do feijão adzuki (*Vigna angularis*). **Global Science and Technology**, Rio Verde, GO , v. 2, n. 1, p.72 -83, 2009.
- AMERICAN SOCIETY OF AGRICULTURAL ENGINEERS. Moisture measurement - Unground grain and seeds. St. Joseph, 2000. 563p.
- BRASIL, Instrução Normativa nº25, de 16 de dezembro de 2005. Diário Oficial da República Federativa do Brasil, Poder Executivo, Brasília, DF, 2005. Seção 1, p.18.
- BRASIL. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. **Regras para análise de sementes**. Secretaria de Defesa Agropecuária. Brasília: MAPA/ACS, 2009. 395p.
- BORÉM, F.M.; CORADI, P.C.; SAATH, R.; OLIVEIRA, J.A. Qualidade do café natural e despoldado após secagem em terreiro e com altas temperaturas. **Ciência e Agrotecnologia**, Lavras, v. 32, n. 05, p.1609-1615, 2008.
- CARLESSO, V.O.; BERBERT, P.A.; SILVA, R.F.; THIÉBAUT, J.T.L. Secagem, armazenamento e qualidade fisiológica de sementes de maracujá-amarelo. **Revista Brasileira de Armazenamento**, Viçosa, v. 33, n. 1, p.9-18, 2008.
- CORRÊA, P.C.; AFONSO JÚNIOR, P.C.; RIBEIRO, D.M.; SILVA, F.S. Equilíbrio higroscópico de milheto, alpiste e painço: Obtenção e modelagem. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 10, n. 1, p.162-167, 2006.

- FARONI, L.A.; CORDEIRO, I.C.; ALENCAR, E.R.; ROZADO, A.F.; ALVES, W.M. Influência do conteúdo de umidade de colheita e temperatura de secagem na qualidade do feijão. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 10, n.1, p.148–154, 2006.
- GUPTA, M.L.; GEORGE, D.L.; PARWATA, I.G.M.A. Effect of harvest time and drying on supersweet sweet corn seed quality. **Seed Science and Technology**, Zurich, v. 33, n. 1, p.167-176, 2005.
- HALL, C.W. Drying and storage of agricultural crops. Westport: AVI, 1980. 381p.
- JOSÉ, S.C.B.R.; PINHO, E.V.R.V.; DIAS, M.A.G.S. Açúcares e tolerância à alta temperatura de secagem em sementes de milho. **Revista Brasileira de Sementes**, Brasília, v. 28, n. 2, p.60-68, 2006.
- MAGAN, N.; ALDRED, D. Post-harvest control strategies: Minimizing mycotoxins in the food chain. **International Journal of Food Microbiology**, Amsterdam, v.119, n.1-2, p.131-139, 2007.
- MAGUIRE, J. D. Speed of germination aid in selection and evaluation for seedling emergence and vigor. **Crop Science**, Madison, v. 2, n. 2, p.176-177, 1962.
- MARCOS FILHO, J. Fisiologia das sementes de plantas cultivadas. Piracicaba: FEALQ, 2005. 495p.
- MELO, E.C.; LOPES, D.C.; CORRÊA, P.C. Grapsi – programa computacional para o cálculo das propriedades psicrométricas do ar. **Engenharia na Agricultura**, Viçosa, v. 12, n. 2, p.154-162, 2004.
- NELLIST, M.E.; HUGUES, M. Physical and biological processes in the drying of seed. **Seed Science & Technology**, Zurich, v. 1, n. 3, p.613-643, 1973.
- OLIVEIRA, M.T.R.; BERBERT, P.A.; VIEIRA, H.D.; THIÉBAUT, J.T.L.; CARLESSO, V.O.; PERREIRA, R.C. Avaliação do vigor de sementes de carambola em função da secagem e do armazenamento. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 13, n. 4, p.477-482, 2009.
- PESKE, S.T.; VILLELA, F. Secagem de sementes. In: PESKE, S. T.; ROSENTHAL, M.; ROTA, G.R.M. (Ed.). **Sementes: Fundamentos Científicos e Tecnológicos**. Pelotas: UFPel, 2003, p. 283-322.
- RESENDE, O.; CORRÊA, P.C.; GONELI, A.L.D.; BOTELHO, F.M.; RODRIGUES, S. Modelagem matemática do processo de secagem de duas variedades de feijão (*Phaseolus vulgaris* L.). **Revista Brasileira de Produtos Agroindustriais**, Campina Grande, v. 10, n. 1, p.17-26, 2008.

- RESENDE, O.; RODRIGUES, S.; SIQUEIRA, V.C.; ARCANJO, R.V. Cinética da secagem de clones de café (*Coffea canephora*, Pierre) em terreiro de chão batido. **Acta Amazônica**, Manaus, v. 40, n. 2, p.247-256, 2010.
- RIBEIRO, D.M.; BORÉM, F.M.; ANDRADE, E.T.; ROSA, S.D.V.F. Taxa de redução de água do café cereja descascado em função da temperatura da massa, fluxo de ar e período de pré-secagem. **Revista Brasileira de Armazenamento**, Viçosa, Especial Café, n. 7, p. 94-107, 2003.
- SILVA, J. B.; VIEIRA, R. D. Avaliação do potencial fisiológico de sementes de beterraba. **Revista Brasileira de Sementes**, Brasília, v.28, n.2, p.128-134, 2006.
- SOUSA, K.A.; RESENDE, O.; CHAVES, T.H.; COSTA, L.M. Cinética de secagem do nabo forrageiro (*Raphanus sativus* L.). **Revista Ciência Agronômica**, Fortaleza, v. 42, n. 4, p.883-892, 2011.
- ULLMANN, R.; RESENDE, O.; SALES, J.F.; CHAVES, T.H. Qualidade das sementes de pinhão manso submetidas à secagem artificial. **Revista Ciência Agronômica**, Fortaleza, v.41, n.3, p.442-447, 2010.
- VIEIRA, R.D.; KRZYZANOWSKI, F.C. Teste de condutividade elétrica. In: KRZYZANOWSKI, F.C.; VIEIRA, R.D.; França Neto, J.B. (Ed.). **Vigor de sementes: conceitos e testes**. Londrina: ABRATES, 1999. p.4.1-4.26.
- ZUCHI, J.et al. Retardamento de colheita, método de secagem e qualidade de sementes de mamona. **Revista Brasileira de Sementes**, Brasília, v. 31, n. 3, p.9-15, 2009.

CAPÍTULO 3

REUMEDECIMENTO COM AR NATURAL DE SEMENTES DE MILHO SUBMETIDAS AO PROCESSO DE AERAÇÃO

RESUMO - Objetivou-se neste trabalho avaliar duas estratégias de controle de aeração para o reumedecimento de sementes de milho armazenadas em protótipos de silos metálicos, bem como avaliar a qualidade do produto com e sem as estratégias de controle de aeração. Foram utilizadas sementes de milho (*Zea mays* L.) com teor de água inicial de aproximadamente 0,12 (base seca, b.s.), armazenadas durante quatro meses em silos secadores metálicos experimentais, com capacidade de 442 kg, assistidos por sistema de aeração e termometria. O produto foi avaliado ao longo do armazenamento pelo teor de água, massa específica aparente, condutividade elétrica, germinação, índice de velocidade de germinação, teste a frio sem solo e grau de infestação de insetos. Conclui-se que os tratamentos de aeração aumentaram o teor de água da massa em maior proporção, e as avaliações de qualidade fisiológica indicam que houve redução da qualidade das sementes durante o armazenamento, tendo sido este decréscimo mais acentuado no tratamento sem aeração.

Palavras-chave: milho, armazenamento, temperatura, qualidade.

ABSTRACT - This study aimed to evaluate two aeration control strategies for re-wetting of corn seeds stored in prototypes of metal silos, as well as evaluate the product quality with and without aeration control strategies. Corn seeds (*Zea mays* L.) with initial water content of approximately 0.12 (dry basis, db) stored for four months in metal and experimental drying silos with capacity of 442 kg assisted by aeration system and thermometry were used. The product was evaluated during storage for water content, density, electrical conductivity, germination, germination speed index, cold germination test without soil, and degree of insect infestation. It was concluded that the aeration treatments increased the mass water content in a higher proportion, and physiological quality evaluations indicate reduction in seeds quality during storage, and this decrease was more pronounced in treatment without aeration.

Key words: corn, storage, temperature, quality.

Introdução

O município de Rio Verde – GO tem como clima o tipo Aw (Köppen-Geiger) – Tropical, chuvas concentradas no verão (outubro a abril) e período seco bem definido durante o período de inverno (maio a setembro), precipitação anual média de 1550 mm ano⁻¹ e temperatura média de 23,3 °C (Siqueira Neto et al., 2011). No ano de 2011, o município de Rio Verde, Goiás, produziu 667.250 toneladas de milho, o que representa 11,67% de toda a produção do estado de Goiás e, aproximadamente, 1,18% da produção do Brasil (SEPIN, 2012).

Parte das sementes produzidas é armazenada durante um longo período e pode sofrer alterações na sua qualidade. Desta forma, a manutenção da qualidade das sementes armazenadas por longos períodos depende do controle de fungos, bactérias e insetos, que se desenvolvem e se reproduzem no meio (Sun & Woods, 1997).

O reumedecimento de sementes secas acontece quando a umidade relativa do ar está elevada, pois a pressão de vapor dentro do grão é inferior à pressão do ar do ambiente circulante, assim, o teor de água do produto aumenta (Basunia e Abe, 2004). Ferrari Filho (2011) ressalta que a capacidade de secagem dos grãos e sementes é até sete vezes maior que a de reumedecimento.

A aeração é uma técnica amplamente utilizada para o resfriamento e uniformização da temperatura na massa de grãos e sementes, eliminando o aquecimento, reduzindo o uso de produtos químicos e podendo eliminar odores de

resíduos e do próprio fumigante (Khatchatourian & Oliveira, 2006). Este processo, além de inibir o desenvolvimento de insetos e da microflora, preserva a qualidade do produto, podendo até remover odores (Silva, 2008).

Casada et al. (2002), estudando aeração controlada por termostato, verificaram melhores temperaturas para o controle de insetos nos grãos aerados em relação aos armazenados sem aeração. E no período noturno, embora a temperatura fosse baixa, a umidade relativa do ar era alta, o que provocou um ligeiro reumedecimento e aumento da temperatura dos grãos causados pelo efeito do calor latente.

A aeração pode ser classificada em provisória, corretiva, secante e de resfriamento ou manutenção. A aeração de resfriamento ou de manutenção é aplicada para corrigir um início de aquecimento ou para promover seu arrefecimento, em etapas progressivas ou em ciclo único, cada vez que a temperatura do ar exterior permitir (Elias, 2002). A aeração de resfriamento reduz ao máximo a temperatura da massa de grãos e a de manutenção reduz a temperatura da massa de grãos a níveis que reduzem o desenvolvimento de insetos.

Ileleji et al. (2007) ressaltam que a aeração com alto fluxo de ar ($1 \text{ a } 3 \text{ m}^3 \text{ min}^{-1} \text{ ton}^{-1}$) pode ser utilizada de forma estratégica e econômica para inibir o desenvolvimento de insetos durante o armazenamento, tirando proveito dos breves períodos de tempo fresco.

Assim, objetivou-se neste trabalho avaliar duas estratégias de controle de aeração para o reumedecimento de sementes de milho armazenadas em protótipos de silos metálicos, bem como avaliar a qualidade do produto com e sem as estratégias de controle de aeração.

Material e Métodos

Este trabalho foi desenvolvido no Laboratório de Pós-Colheita de Produtos Vegetais e no Laboratório de Sementes do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia Goiano - Câmpus Rio Verde, situados no município de Rio Verde, GO, durante os meses de novembro e dezembro de 2011 e janeiro, fevereiro e março de 2012.

Foram utilizadas sementes de milho (*Zea mays* L.) com teor de água inicial de aproximadamente 0,12 (b.s.). Antes de iniciar o experimento, foi feito o expurgo das sementes com fosfina na dosagem recomendada pelo fabricante.

No experimento, foram utilizados silos secadores metálicos experimentais com capacidade de aproximadamente 442 kg de sementes de milho, de fundo plano totalmente perfurado, assistido por sistema de aeração composto por ventilador centrífugo de pás curvadas para frente, impulsionado por motor trifásico de 1,10 kW (1,5 cv) e diafragma para controle da entrada do ar próximo ao ventilador. O fluxo de ar medido na entrada de ar no plênum foi de $2,86 \text{ m}^3 \text{ min}^{-1} \text{ t}^{-1}$, obtido por meio da medição da vazão de ar na saída do ventilador, utilizando-se um termoanemômetro de pás rotativas com precisão de 0,01. Ieleji et al. (2007), estudando o efeito de três estratégias de controle de aeração (sem aeração, aeração com refrigeração e aeração com ar ambiente) em Indiana, Estados Unidos, em silos metálicos preenchidos com grãos de milho, utilizaram fluxo de ar de $2,9 \text{ m}^3 \text{ min}^{-1} \text{ ton}^{-1}$.

Os silos, com capacidade de 442 kg, foram carregados e ficaram armazenados por um período de quatro meses (Figura 1).

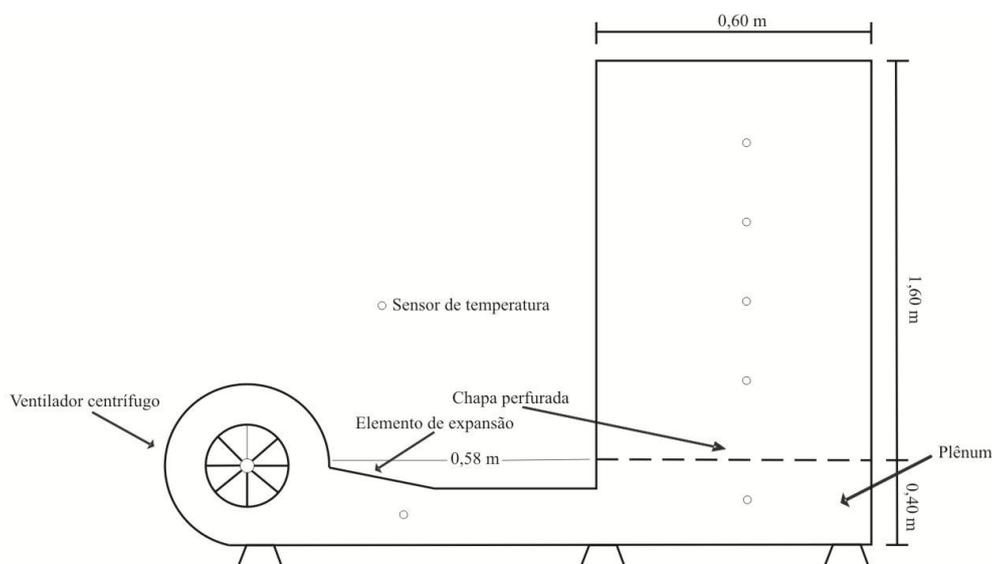


FIGURA 1. Protótipos dos silos metálicos utilizados.

Os testes foram executados de acordo com as seguintes estratégias de controle do sistema de aeração:

- Aeração de manutenção (Temperatura da massa de sementes igual ou superior a $25 \text{ }^\circ\text{C}$) (A.M.);
- Aeração de resfriamento (Temperatura do ar ambiente inferior à temperatura da massa de sementes) (A.R.);
- Sem aeração (Controle) (S.A.).

Os sistemas de aeração foram controlados por um sistema eletrônico, em que as estratégias descritas foram implementadas. A cada 10 minutos, o sistema registrava a temperatura interna (na massa de sementes dentro dos silos) e a temperatura e umidade relativa do ambiente ($50 < UR < 90\%$). As temperaturas foram medidas nos silos por meio de sensores pendulares, sendo quatro sensores em cada silo, posicionados aleatoriamente no centro da massa de sementes numa distância de 0,32 m verticalmente, perfazendo um total de 110,60 kg de grãos monitorados para cada sensor, além de 2 sensores em cada silo externamente à massa de grãos, monitorando a temperatura do ar de aeração após a entrada nos silos (Figura 1).

Os parâmetros ambientais (temperatura e umidade relativa) foram registrados por meio de um sensor termo-higrômetro digital integrado, com precisão de 3%. A aquisição de dados foi realizada a cada 10 minutos.

Para a caracterização da qualidade do produto durante os quatro meses de armazenamento, foram retiradas três amostras aleatórias em todo o silo, a cada 30 dias, com calador manual composto de três estágios nas partes inferiores e superiores de cada célula. O produto foi classificado quanto ao teor de água, massa específica aparente, condutividade elétrica, germinação, índice de velocidade de germinação (IVG), germinação a frio sem solo e grau de infestação de insetos.

As sementes foram aquecidas, antes da aplicação da aeração, visando a simular aquecimento espontâneo que pode ocorrer durante a armazenagem. Este procedimento foi realizado dentro do próprio silo com auxílio de resistências elétricas e acompanhamento da temperatura até as sementes atingirem em torno de 30 °C.

Os teores de água do produto foram determinados por gravimetria, utilizando-se a estufa a 103 ± 1 °C, durante 72 horas, em três repetições (ASAE, 2000). O teor de água de equilíbrio das sementes de milho foi determinado utilizando a equação de Oswin, conforme Smaniotto et al. (2012).

A massa específica aparente expressa em kg m^{-3} foi determinada, utilizando-se uma balança de peso hectolitro, com capacidade de um litro. A massa específica unitária das sementes expressa em kg m^{-3} foi determinada pela relação entre a massa de um grão e o volume ocupado por ele. O volume de um grão foi determinado conforme Mohsenin (1986). A determinação do comprimento, largura e espessura das sementes foi realizada com o auxílio de um paquímetro digital com resolução de 0,01 mm. A porosidade da massa de sementes foi calculada indiretamente conforme Mohsenin (1986).

$$V_g = \frac{\pi(abc)}{6} \quad (1)$$

$$\varepsilon = 1 - \frac{\rho_{aparente}}{\rho_{real}} \cdot 100 \quad (2)$$

em que:

a: maior eixo do grão, mm;

b: eixo médio do grão, mm;

c: menor eixo do grão, mm.

ε : porosidade, %;

$\rho_{aparente}$: massa específica aparente, kg m^{-3} ; e

ρ_{real} : massa específica unitária, kg m^{-3} .

O teste de condutividade elétrica foi realizado nas sementes de milho, segundo metodologia descrita por Vieira & Krzyzanowski (1999). Foram contadas e pesadas quatro subamostras de 50 sementes de cada tratamento. As amostras foram colocadas em copos de plástico com 75 mL de água deionizada e mantidas em uma câmara com temperatura controlada a 25 °C, durante 24 horas. Depois desse período, após agitação das amostras, foi efetuada a leitura da condutividade elétrica por meio de condutímetro.

O teste de germinação foi conduzido com quatro subamostras de 50 sementes de cada repetição, em rolos de papel toalha tipo “Germitest”, em germinador tipo “Mangelsdorf”, regulado para manter a temperatura constante de 25 ± 2 °C. A quantidade de água adicionada foi equivalente a 2,5 vezes a massa do substrato seco, visando ao umedecimento adequado e, conseqüentemente, à uniformização do teste. As avaliações foram efetuadas no 4º dia e 7º dia depois da semeadura, computando-se a porcentagem média de germinação (Brasil, 2009).

O teste a frio sem solo foi realizado conforme a metodologia descrita por Sinício et al. (2009), conduzida de maneira semelhante ao teste de germinação com as modificações que seguem. Após a confecção, os rolos de papel foram colocados em sacos de polietileno e em B.O.D. a 10°C, durante sete dias. Em seguida, os rolos foram transferidos para o germinador tipo “Mangelsdorf” a 25°C, e a avaliação foi realizada no quarto dia. Os resultados foram expressos em porcentagem de plântulas normais.

O IVG foi calculado após a completa estabilização das germinações, tendo as avaliações ocorrido a partir do 1º dia depois da semeadura e diariamente até que o número de sementes germinadas fosse constante. O IVG foi calculado conforme a fórmula proposta por Maguire (1962):

$$IVG = \frac{G_1}{D_1} + \frac{G_2}{D_2} + \dots + \frac{G_n}{D_n} \quad (3)$$

em que:

IVG = índice de velocidade de germinação;

G_1 = número de plântulas germinadas na primeira contagem;

D_1 = número de dias para a primeira contagem;

G_n = número de plântulas germinadas na última contagem; e

D_n = número de dias para a última contagem.

O grau de infestação por insetos do produto foi determinado segundo a metodologia descrita nas Regras para Análise de Sementes (Brasil, 2009). Foram utilizadas quatro subrepetições contendo, cada uma, 50 sementes. Para facilitar o corte, as sementes de milho foram imersas em água durante um período de 12 horas. O milho foi considerado infestado quando apresentou no seu interior qualquer uma das fases do inseto-praga - ovo, larva, pupa e inseto adulto - e também pela presença do orifício de saída do inseto. O resultado foi expresso em porcentagem de sementes infestadas.

O experimento foi montado em delineamento inteiramente casualizado, segundo o esquema em parcela subdividida (3 x 5), tendo nas parcelas as condições estratégias de aeração (aeração de manutenção, resfriamento e sem aeração) e nas subparcelas, o tempo de armazenamento (0, 1, 2, 3 e 4 meses). Os dados foram analisados por meio de regressão, adotando-se o nível de 5% de significância. Também foi feita análise de correlação de Pearson entre as variáveis.

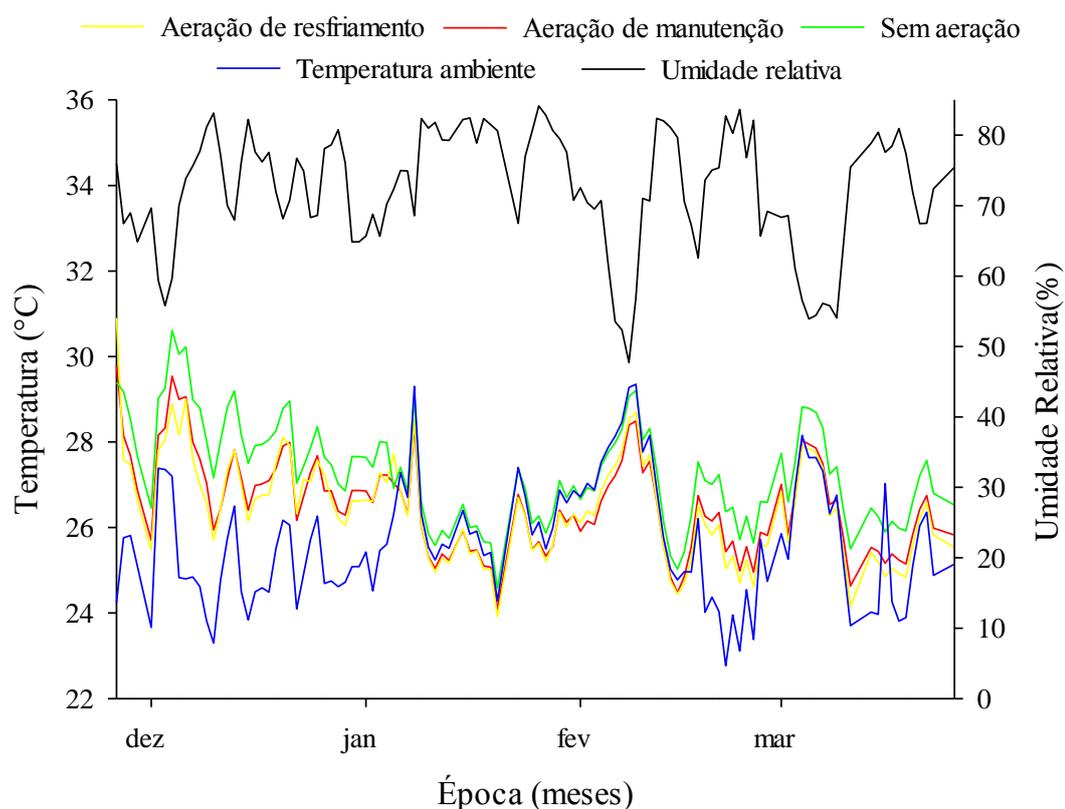
Resultados e Discussão

Na Tabela 1, estão apresentados os valores das propriedades físicas consideradas relevantes para a caracterização do produto utilizado no experimento.

TABELA 1. Propriedades físicas das sementes de milho.

Propriedades	Aeração de manutenção	Aeração de resfriamento	Sem aeração
Teor de água (b.s.)	0,1211±0,0022	0,1208±0,0009	0,1208±0,0008
Dimensões principais			
Comprimento (mm)	11,01±1,02	11,10±1,13	11,27±0,70
Largura (mm)	8,35 ±0,46	8,43±0,70	8,48±0,61
Espessura (mm)	4,11±0,36	4,16±0,22	4,04±0,99
Massa específica aparente (kg m ⁻³)	769,56±2,03	763,71± 1,41	768,07±0,91
Massa específica unitária (kg m ⁻³)	1.475,13±81,2	1.405,74±184,7	1.390,41±120,9
Porosidade unitária estimada (%)	47,67±2,93	44,40±6,63	44,26±4,57

Na Figura 2, estão apresentadas as médias diárias das temperaturas da massa de sementes de cada tratamento (aeração de manutenção, resfriamento e sem aeração) e as condições do ar ambiente (temperatura e umidade relativa). Cada ponto da curva representa a média diária das temperaturas registradas nos quatro sensores instalados no interior dos silos.

**FIGURA 2.** Temperatura e umidade relativa do ar ambiente e temperaturas da massa de sementes submetidas a diferentes manejos de aeração.

Nota-se que a temperatura da massa de sementes de milho foi influenciada pela temperatura ambiente em todos os tratamentos. Nascimento & Queiroz (2011), avaliando aeração em grãos de milho, verificaram o mesmo comportamento ao longo do armazenamento. A umidade relativa média foi de 72,3% e a temperatura média do ar ambiente, de 25,7 °C, apresentando variações de 47,7 a 84,1% e de 22,7 a 29,3 °C, respectivamente. O tempo de acionamento do sistema de aeração foi de 478 e 680 horas para os tratamentos com aeração de manutenção e resfriamento, respectivamente.

A temperatura inicial da massa de sementes foi de 29,8; 30,9 e 29,4 °C, sendo a temperatura final de 25,8; 25,5 e 26,5 °C, tendo assim uma redução de 4,0; 5,4 e 2,9 °C, para os tratamentos com aeração de manutenção, resfriamento e sem aeração, respectivamente. Nota-se que o tratamento com aeração de resfriamento obteve maior redução e menor temperatura final. Devilla et al. (2004) ressaltam que o uso adequado da aeração é de fundamental importância para manter a qualidade dos grãos, além de diminuir os custos durante o armazenamento. Ileleji et al. (2007) verificaram que o ar ambiente pode ser utilizado para o resfriamento da massa de grãos durante os meses de inverno e primavera.

Na Figura 3, estão apresentados os valores obtidos para o teor de água das sementes de milho armazenadas para diferentes estratégias de manejo da aeração, bem como o teor de água de equilíbrio estimado.

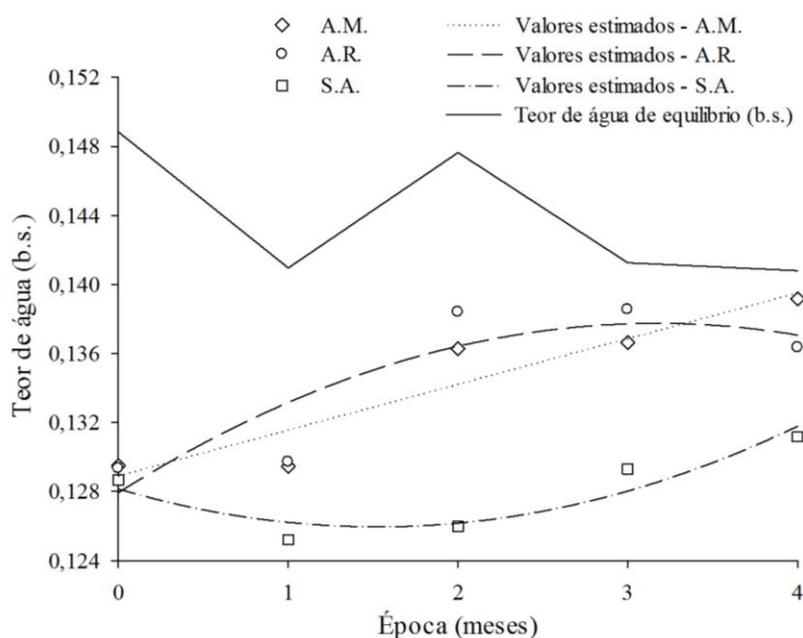


FIGURA 3. Teores de água (b.s.) das sementes de milho ao longo do armazenamento submetidas a diferentes manejos de aeração (A.M. – Aeração de manutenção; A.R. – Aeração de resfriamento e S.A. – Sem aeração).

Verifica-se que o teor de água aumentou ao longo do armazenamento para todos os tratamentos. Analisando a Figura 3, verifica-se que o teor de água variou de 0,1295 para 0,1392, de 0,1293 para 0,1363 e de 0,1287 para 0,1312 (b.s.) para os tratamentos com aeração de manutenção, aeração de resfriamento e sem aeração, respectivamente. Nota-se que a aeração proporcionou maior acréscimo no teor de água das sementes de milho, resultando em reumedecimento do produto.

Este aumento está relacionado com alta umidade relativa do ar ambiente, durante o período estudado. Nota-se que no início do armazenamento o produto não está em equilíbrio com as condições do ambiente, pois os tratamentos com aeração de manutenção, resfriamento e sem aeração apresentavam uma diferença de 0,019; 0,019 e 0,02 b.s. em relação ao teor de água de equilíbrio estimado. Já na última avaliação, a diferença entre o teor de água do produto e o teor de água de equilíbrio diminuiu para 0,002, 0,004 e 0,009 b.s., respectivamente, mostrando que a aeração com alta umidade relativa e com o fluxo de ar de $2,86 \text{ m}^3 \text{ min}^{-1} \text{ t}^{-1}$ proporciona aumento no teor de água, podendo atuar como uma ferramenta de reumedecimento das sementes.

Alencar et al. (2009), estudando o armazenamento de grãos de soja em diferentes condições de temperatura e umidade relativa, verificaram que o aumento da temperatura e da umidade relativa do ar ambiente proporciona incremento no teor de água dos grãos. Nascimento et al. (2012), avaliando e comparando três diferentes estratégias de aeração (noturna, contínua e condições de umidade de equilíbrio entre os grãos e o ar ambiente) com grãos secos (0,1236 b.s.) e úmidos (0,2048 b.s.), verificaram que aeração em milho seco não interferiu no desenvolvimento dos fungos, já em grãos úmidos, observaram desenvolvimento de *Aspergillus* spp. em todas as estratégias.

O teor de água mais elevado pode ter proporcionado um acréscimo na temperatura da massa de sementes dos silos com aeração. Casada et al. (2002) verificaram que a aeração com umidade relativa alta provoca um ligeiro reumedecimento e aumento da temperatura dos grãos de trigo.

Na Figura 4, estão apresentados os valores médios de massa específica aparente das sementes de milho armazenadas com diferentes manejos de aeração.

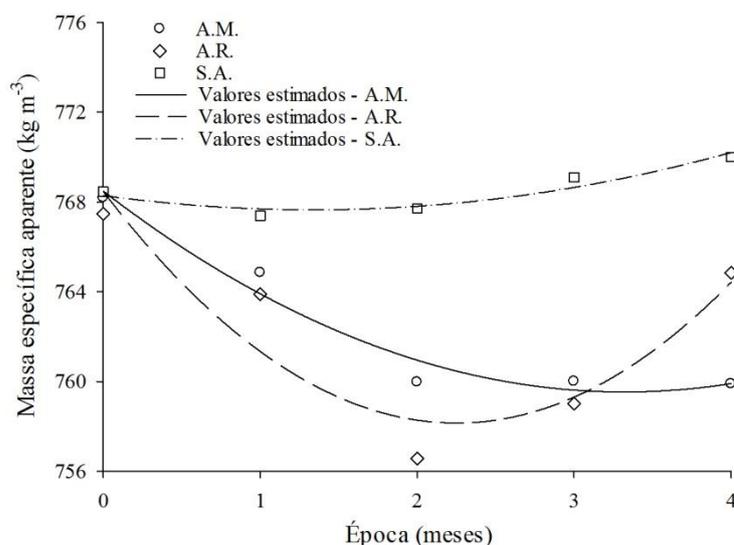


FIGURA 4. Massa específica aparente das sementes de milho ao longo do armazenamento submetidas a diferentes manejos de aeração (A.M. – Aeração de manutenção; A.R. – Aeração de resfriamento e S.A. – Sem aeração).

Nota-se que ocorreu decréscimo da massa específica aparente para os tratamentos de aeração de manutenção e resfriamento até o segundo mês de armazenamento, e após este período houve um acréscimo nos valores desta variável. Já no tratamento sem aeração, nota-se aumento na massa específica aparente ao longo do armazenamento. Isso pode ter ocorrido tanto pelo fato de as sementes de milho ainda não terem atingido o equilíbrio higroscópico, quanto pela intensidade de chuva durante o período de desenvolvimento do presente trabalho, proporcionando uma umidade relativa elevada e assim alterando o teor de água do produto.

Analisando a correlação de Pearson, verificou-se uma relação negativa e significativa entre o teor de água e a massa específica aparente, sendo de 0,975; 0,927 e 0,958 para aeração de manutenção, aeração de resfriamento e sem aeração, respectivamente, mostrando que o reumedecimento interferiu na massa específica aparente durante o armazenamento, sendo este efeito inversamente proporcional.

De acordo com Muir & White (2001), o processo de respiração dos grãos e sementes e da microflora durante o armazenamento é fator determinante para a deterioração do produto armazenado, pois parte da matéria seca é consumida durante este processo. Adhikarinayake et al. (2006), estudando a perda de matéria seca em arroz em casca com temperatura variando de 27 a 32 °C, verificaram aumento da temperatura,

o que proporcionou uma perda de 2,1% da matéria seca em sistemas de armazenamento aberto.

Com relação ao grau de infestação, verificou-se presença de insetos apenas no terceiro e quarto mês de avaliação, sendo que apenas dois insetos no estágio inicial de desenvolvimento foram encontrados no tratamento sem aeração. Ijeleji et al. (2007) verificaram que a aeração com resfriamento de ar é eficaz no controle de *S. zeamais* em todas as épocas do ano, e a aeração com ar natural pode ser utilizada nas épocas mais frias do ano.

A Tabela 4 apresenta os valores da germinação das sementes durante os quatro meses de armazenamento.

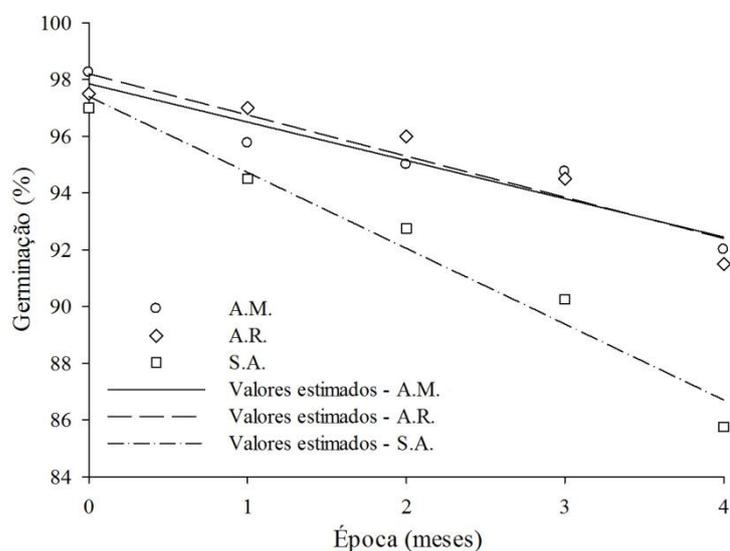


FIGURA 5. Germinação das sementes de milho submetidas ao armazenamento com diferentes manejos de aeração (A.M. – Aeração de manutenção; A.R. – Aeração de resfriamento e S.A. – Sem aeração).

Nota-se que com o decorrer do armazenamento e, independentemente do manejo de aeração, ocorreu decréscimo do potencial germinativo das sementes de milho, fato esse que pode ser devido à perda de qualidade das sementes armazenadas. Nakagawa et al. (2009), estudando comportamento da germinação de duas cultivares de guandu ao longo do armazenamento em ambiente sem controle de temperatura e umidade, verificaram que a germinação decresceu com o aumento do tempo de armazenamento.

Verifica-se que o tratamento sem aeração diminui a germinação com maior intensidade (98 para 85,75 %) já a partir do segundo mês de armazenamento. Os

tratamentos com manejo de aeração de manutenção e resfriamento obtiveram valores de germinação semelhantes ao longo do armazenamento, que se reduziram de 98,00 para 91,50 e de 98,50 para 92,00 %, respectivamente. Queiroga et al. (2009), avaliando o armazenamento de duas cultivares de algodão (BRS Verde e CNPA 7H) submetidas ao tratamento químico, verificaram decréscimo no poder germinativo para todos os tratamentos ao longo do armazenamento, ressaltando que este decréscimo pode estar relacionado com o aumento do teor de água.

A Figura 6 apresenta os valores do índice de velocidade de germinação (IVG) para as sementes de milho armazenadas com diferentes manejos de aeração.

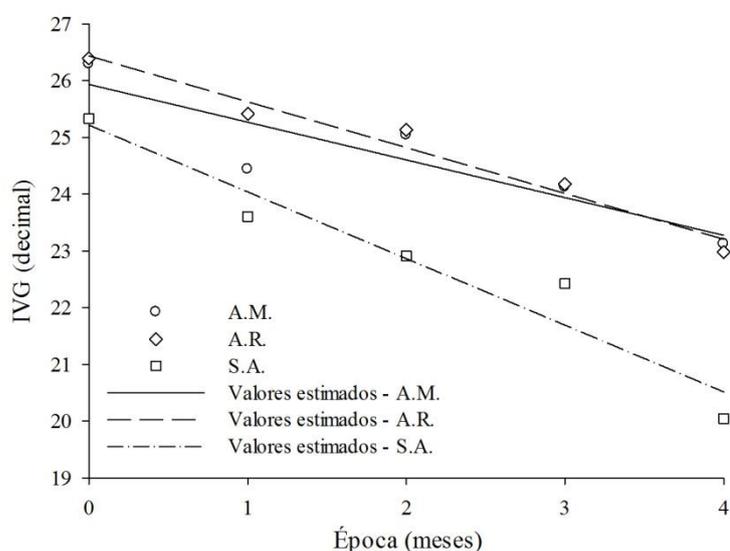


FIGURA 6. Índice de velocidade de germinação (IVG) das sementes de milho submetidas ao armazenamento com diferentes manejos de aeração (A.M. – Aeração de manutenção; A.R. – Aeração de resfriamento e S.A. – Sem aeração).

O IVG se reduz com aumento do tempo de armazenamento, independentemente do manejo da aeração. Entretanto, nota-se que o decréscimo do tratamento sem aeração foi mais acentuado, sendo o mesmo comportamento observado para germinação. Ferreira & Borghetti (2004) ressaltam que o IVG pode indicar com precisão o vigor de um lote, pois indica a quantidade de sementes germinadas por unidade de tempo, sendo que quanto maior o IVG, melhor a qualidade das sementes.

Por meio da correlação de Pearson, nota-se uma correlação positiva e significativa entre as variáveis germinação e índice de velocidade de germinação, 0,945; 0,974 e 0,987 para aeração de manutenção, de resfriamento e sem aeração, respectivamente. Desta forma, confirma-se que o IVG é diretamente proporcional à germinação.

A Figura 7 apresenta os valores do teste a frio sem solo para as sementes de milho armazenadas com diferentes manejos de aeração.

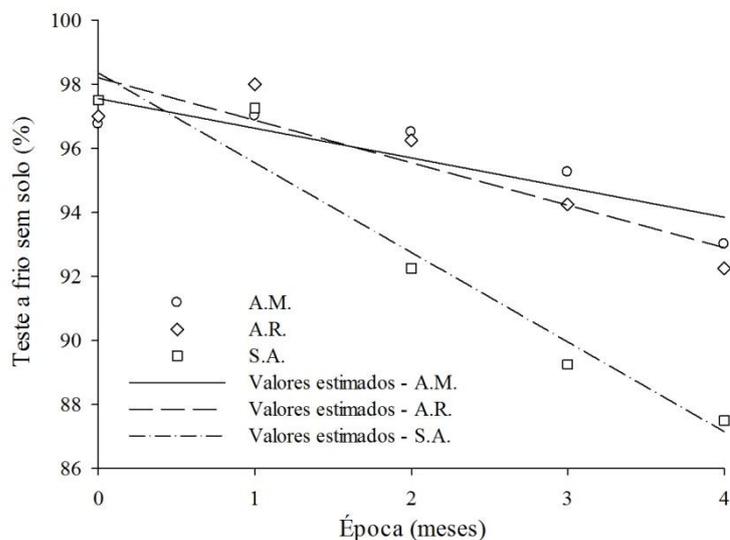


FIGURA 7. Teste a frio sem solo das sementes de milho submetidas ao armazenamento com diferentes manejos de aeração (A.M. – Aeração de manutenção; A.R. – Aeração de resfriamento e S.A. – Sem aeração).

Nota-se que o teste a frio sem solo variou de 96,75 para 93,00, de 97,00 para 92,25 e de 97,50 para 87,5 (%), considerando aeração de manutenção, de resfriamento e sem aeração, respectivamente. O teste a frio sem solo ratifica que houve decréscimo no vigor das sementes armazenadas, independentemente do manejo de aeração. Entretanto, este efeito foi maior nas sementes armazenadas sem aeração.

A Figura 8 apresenta os valores da condutividade elétrica do exsudato ($\mu\text{S cm}^{-1} \text{g}^{-1}$) para as sementes de milho armazenadas com diferentes manejos de aeração.

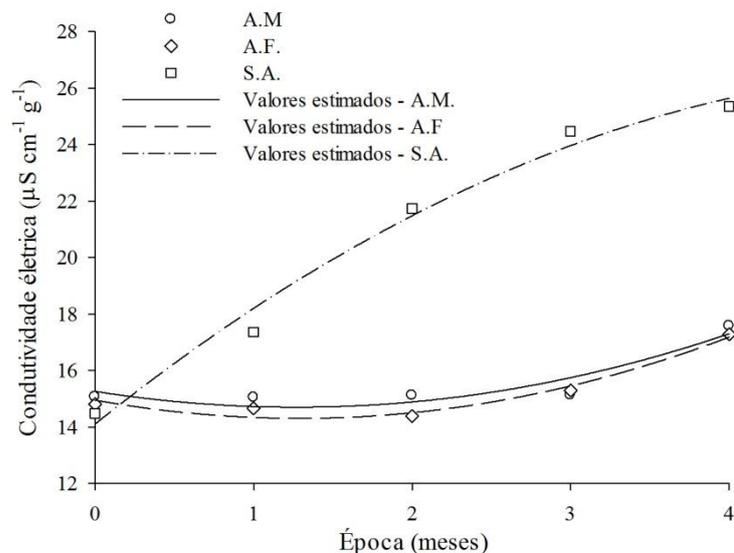


FIGURA 8. Condutividade elétrica do exsudato das sementes de milho ao longo do armazenamento submetidas a diferentes manejos de aeração em protótipos de silos metálicos (A.M. – Aeração de manutenção; A.R. – Aeração de resfriamento e S.A. – Sem aeração).

Verifica-se que o tratamento sem aeração obteve os maiores valores para a condutividade elétrica ($25,35 \mu\text{S cm}^{-1} \text{g}^{-1}$) ao final do armazenamento, indicando maior danificação nas sementes. Os tratamentos aeração de resfriamento e de manutenção obtiveram condutividades elétricas finais próximas, $17,28$ e $17,57 \mu\text{S cm}^{-1} \text{g}^{-1}$, respectivamente. Nota-se que, quanto maior a temperatura e período de armazenamento, maior a condutividade elétrica do exsudato da massa de sementes, indicando maior deterioração das membranas celulares, permitindo a lixiviação de exsudatos do interior das células para o meio, gerando maior condutividade elétrica (Torres et al., 2009).

Faroni et al. (2005), estudando armazenamento de milho em diferentes condições de temperatura e tratamento de inseticida, verificaram o mesmo comportamento, sendo que a condutividade diferiu após 60 dias de armazenamento. Já Nascimento et al. (2012) verificaram que aeração favoreceu a redução da condutividade elétrica, mas a aeração de milho úmido em condições de equilíbrio causou aumento nos valores da condutividade elétrica.

Nota-se uma correlação negativa e significativa entre a variável condutividade elétrica e teste a frio sem solo, ou seja, $0,923$, $0,883$ e $0,975$ para aeração de manutenção, de resfriamento e sem aeração, respectivamente. Assim, a condutividade elétrica é inversamente proporcional ao teste a frio sem solo.

Todas as avaliações de qualidade mostraram decréscimo na qualidade do produto, independentemente do manejo de aeração. Entretanto, esta redução foi mais acentuada nas sementes sem aeração, apesar da ligeira diferença na temperatura da massa de sementes ao longo do armazenamento. Já os tratamentos com manejos de aeração de resfriamento (A.R.) e manutenção (A.M.) não apresentaram diferenças durante o armazenamento, mesmo o manejo com aeração de resfriamento tendo funcionado cerca de 202 horas a mais.

A Tabela 2 apresenta os modelos ajustados aos dados experimentais do teor de água, massa específica aparente, germinação, índice de velocidade de germinação (IVG), teste a frio sem solo e condutividade elétrica em função das épocas (meses) em três diferentes manejos de aeração.

TABELA 2. Equações ajustadas aos valores do teor de água, massa específica aparente, germinação, índice de velocidade de germinação (IVG), teste a frio sem solo e condutividade elétrica em função do tempo de armazenamento (meses).

Variável	Manejos	Equações	R ² (%)
Teor de água	A.M.	$Ta = 0,1289+0,0027t$	88,38**
	A.R.	$Ta = 0,1279+0,00062t-0,001t^2$	77,51**
	S.A.	$Ta = 0,1281-0,0029t+0,0009t^2$	86,26**
Massa específica aparente	A.M.	$Mea = 768,481-5,388t+0,811t^2$	96,35**
	A.R.	$Mea = 768,468-9,182t+2,042t^3$	86,44**
	S.A.	$Mea = 768,288-0,953t+0,358t^2$	91,59**
Germinação	A.M.	$G = 97,850-1,350t$	90,78**
	A.R.	$G = 98,200-1,450t$	90,24**
	S.A.	$G = 97,400-2,675t$	96,80**
IVG	A.M.	$Ivg = 25,933-0,665t$	80,53**
	A.R.	$Ivg = 26,435-0,807t$	96,68**
	S.A.	$Ivg = 25,217-1,176t$	93,42**
Teste a frio sem solo	A.M.	$Tf = 97,550-0,925t$	78,32**
	A.R.	$Tf = 98,200-1,325t$	82,91**
	S.A.	$Tf = 98,350-2,800t$	94,60**
Condutividade elétrica	A.M.	$Ce = 15,262-0,883t+0,348t^2$	86,80*
	A.R.	$Ce = 14,948-1,000t+0,390t^2$	96,75**
	S.A.	$Ce = 14,106+4,493t-0,402t^2$	98,57**

**Significativo a 1% pelo teste de F;

t = tempo de armazenamento, meses.

Verifica-se que os modelos quadráticos (teor de água A.R. e S.A.; massa específica aparente e condutividade elétrica) e lineares (teor de água A.M., germinação, IVG e teste a frio sem solo) apresentaram alto grau de significância de acordo com o teste F e coeficientes de determinação (R²) superiores a 77,56%. Assim, descrevem de

forma satisfatória o comportamento das variáveis analisadas em função dos meses de armazenamento.

Conclusões

A temperatura da massa de sementes variou conforme a temperatura ambiente para as três condições analisadas.

A alta umidade relativa do ar ambiente proporcionou um reumedecimento das sementes ao longo do armazenamento, independentemente do manejo de aeração, sendo que os tratamentos com aeração de resfriamento e manutenção proporcionaram um maior reumedecimento, mostrando que a aeração com alta umidade relativa altera o teor de água e assim pode atuar como uma ferramenta de reumedecimento das sementes.

As avaliações de germinação, IVG, teste a frio sem solo e condutividade elétrica indicaram redução na qualidade das sementes durante o armazenamento, sendo este decréscimo mais acentuado no tratamento sem aeração.

Referências

ADHIKARINAYAKE, B.T.; PALIPANE, K.B.; MULLER, J. Quality change and mass loss of paddy during airtight storage in a ferro-cement bin in Sri Lanka. **Journal of Stored Product Research**, Oxford, v.42, p. 377-390, 2006.

ALENCAR, E.R.; FARONI, L.R.D.; LACERDA FILHO, A.F.; PETERNELLI, L.A.; COSTA, A.R. Qualidade dos grãos de soja armazenados em diferentes condições. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v.13, n.5, p.606-613, 2009.

American Society of Agricultural Engineers (ASAE). Agricultural Engineers Handbook. ASAE, 1988. 35th, St. Joseph.

American Society of Agricultural Engineers (ASAE). Moisture measurement - Unground grain and seeds. ASAE, 2000. p. 563.

ARTHUR, F.H.; THRONE, J.E.; MAIER, D.E.; MONTROSS, M.D. Impact of aeration on maize weevil (Coleoptera: Curculionidae) populations in corn stored in the northern United States: simulation studies. **American Entomologist**, Lanham, v.47, n.2, 104-110, 2001.

- BASUNIA, M.A.; ABE, T. Thin-layer re-wetting of rough rice at low and high temperatures. **Journal of Stored Products Research**, Oxford, v. 41, n. 2, p. 163-173, 2005.
- BRASIL. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. Secretaria de Defesa Agropecuária. **Regras para análise de sementes**. Brasília: MAPA/ACS, 2009. 399p.
- CASADA, M.E.; ARTHUR, F.H.; AKDOGAN, H. Temperature monitoring and aeration strategies for stored wheat in the central plains. In: ASAE ANNUAL INTERNATIONAL MEETING/CIGR WORLD CONGRESS, 15., 2002, Chicago. Proceedings... p.1-9 (ASAE, 02-6116).
- DEVILLA, I.A.; COUTO, S.M.; ZOLNIER, S.; SILVA, J.S. Variação de temperatura e umidade de grãos armazenados em silos com aeração. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 8, n.2-3, 284-291, 2004.
- FARONI, L.R.A.; BARBOSA, G.N.O.; SARTORI, M.A.; CARDOSO, F.S.; ALENCAR, E.R. Avaliação qualitativa e quantitativa do milho em diferentes condições de armazenamento. **Engenharia na Agricultura**, Viçosa, v. 13, n. 03, p. 193-201, 2005.
- FERRARI FILHO, E. Métodos e temperaturas de secagem sobre a qualidade físico-química e microbiológica de grãos de milho no armazenamento. Porto Alegre: Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2011. 95p. Dissertação de Mestrado.
- FERREIRA, A. G.; BORGHETTI, F. Germinação: do básico ao aplicado. Porto Alegre: Artmed, 2004. 323 p.
- ILELEJI, K.E.; MAIER, D.E.; WOLOSHUK, C.P. Evaluation of different temperature management strategies for suppression of *Sitophilus zeamais* (Motschulsky) in stored maize. **Journal of Stored Products Research**, Oxford, v.43, n.4, 480-488, 2007.
- KHATCHATOURIAN, O.A.; OLIVEIRA, F.A. Mathematical modelling of airflow and thermal state in large aerated grain storage. **Biosystems Engineering**, London, v.95, n.2, p.159-69, 2006.
- LOPES, D.C.; MARTINS, J.H.; STEIDLE NETO, A.J.; LACERDA FILHO, A.F.; MELO, E.C.; MONTEIRO, P.M.B. Management of stored maize by AERO controller in five Brazilian locations: a simulation study. **Biosystems Engineering**, London, v. 101, n. 3, p.325-330, 2008.
- MAGUIRE, J.D. Speed of germination-aid in selection and evaluation for seedling emergence and vigor. **Crop Science**, Madison. v.2, n.2, p.176-177. 1962.

MOHSENIN, N.N. Physical properties of plant and animal materials. New York: Gordon and Breach Publishers, 1986. 841p.

MUIR, W.E.; WHITE, N.D.G. Microorganisms in stored grain. In: Muir, W.E. (Ed). Grain Preservation Biosystems. p. 28-42., Manitoba, 2001.

NAKAGAWA, J.; CAVARIANI, C.; TOLEDO, M.Z. Germinação de sementes armazenadas de guandu. **Revista Brasileira de Sementes**, Brasília, v. 31, n. 4, p.43-48, 2009.

NASCIMENTO, V.R.G.; QUEIROZ, M.R. Estratégias de aeração de milho armazenado: temperatura e teor de água. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v.31, n.4, p.745-759, 2011.

NASCIMENTO, V.R.G.; QUEIROZ, M.R.; MARCHI, V.C.; AGUIAR, R.H. Desempenho de estratégias de aeração de milho armazenado: fungos e condutividade elétrica. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v.16, n.1, p.113-121, 2012.

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**, Jaboticabal, v.27, n.1, p.247-258, 2007.

QUEIROGA, V.P.; CASTRO, L.B.Q.; GOMES, J.P.; SILVA, A.L.; ALVES, N.M.C.; ARAUJO, D.R. Qualidade fisiológica de sementes de algodão armazenadas em função de diferentes tratamentos e cultivares. **Revista Brasileira de Produtos Agroindustriais**, Campina Grande, v. 11, n. 1, p. 43-54, 2009.

SEPIN (2012) Superintendência de Estatística, Pesquisa e Informação. Estatísticas municipais. Disponível em: <
http://www.seplan.gov.br/sepin/perfilweb/Estatistica_bde.asp>. Acessado em: 30 de junho de 2012.

SINÍCIO, R.; BHERING, M.C.; VIDIGAL, D.S.; DIAS, D.C.F.S. Equacionamento da qualidade inicial de sementes de milho e soja para aplicação no modelo probit. **Revista Brasileira de Sementes**, Brasília, v. 31, n. 1, p. 122-130, 2009.

SILVA, J.S. Secagem e Armazenagem de Produtos Agrícolas, Viçosa: Aprenda Fácil, 2008. 559p.

SMANIOTTO, T.A.S.; RESENDE, O; OLIVEIRA, D.E.C.; SOUSA, K.A.; CAMPOS, R.C. Isotermas e calor latente dos grãos de milho da cultivar AG 7088. **Revista Brasileira de Milho e Sorgo**, Sete Lagoas, v. 11, n. 3, 2012. (no prelo)

SUN, D.W.; WOODS, J.L. Deep bed simulation of the cooling of stored grain with ambient air: A test bed for ventilation control strategies. **Journal of Stored Products Research**, Oxford, v.33, n.4, p.299-312, 1997.

TORRES, S.B.; MEDEIROS, M.A.; TOSTA, M.S.; COSTA, G.M.M. Teste de condutividade elétrica em sementes de gergelim. **Revista Brasileira de Sementes**, Brasília, v. 31, n. 3, p.70-77, 2009.

VIEIRA, R.D.; KRZYZANOWSKI, **Vigor de sementes: conceitos e testes**. Londrina, PR: ABRATES, 1999. Cap. 4, p.1-26.

CONCLUSÃO GERAL

De acordo com os resultados obtidos, pode-se concluir que:

- O tempo de secagem das sementes de milho da cultivar AG 7088 foi reduzido com o aumento da temperatura, mas a qualidade fisiológica das sementes de milho foi influenciada pelo aumento da temperatura.
- O modelo de Newton, pela sua maior simplicidade quando comparado aos demais modelos analisados, foi o selecionado para representar o fenômeno secagem das sementes de milho da cultivar AG7088.
- O coeficiente de difusão efetivo para as sementes de milho aumenta com a elevação da temperatura do ar durante a secagem, sendo descrito pela equação de Arrhenius, apresentando uma energia de ativação de $19,09 \text{ kJ.mol}^{-1}$.
- As temperaturas de secagem de 85 e 100 °C diminuem a germinação e o IVG e também aumentam a condutividade elétrica do exsudato das sementes de milho, piorando a qualidade do produto.
- A secagem das sementes de milho da cultivar AG 7088 deve ser realizada com a temperatura do ar inferior a 62,54 °C para que sua qualidade não seja comprometida.
- A temperatura da massa de sementes, independentemente do manejo de aeração, variou conforme a temperatura ambiente. Ao longo do armazenamento, houve redução de 4,0; 5,4 e 2,9 °C para os tratamentos com aeração de manutenção, resfriamento e sem aeração, respectivamente.
- A alta umidade relativa do ar ambiente proporcionou reumedecimento das sementes ao longo do armazenamento, independentemente do manejo de

aeração, sendo este reumedecimento maior para os tratamentos com aeração de resfriamento e manutenção.

- As avaliações de germinação, IVG, teste a frio sem solo e condutividade elétrica mostraram redução na qualidade das sementes durante o armazenamento, sendo este decréscimo mais acentuado no tratamento sem aeração.