



**JOSE RENATO ROBLES PADILLA**

**PROCESSAMENTO DE GRÃOS DE *Moringa oleifera* Lam.:  
EFEITOS DA SECAGEM NA EFICIÊNCIA DE EXTRAÇÃO  
MECÂNICA DO ÓLEO E MODELAGEM MATEMÁTICA DA  
HIGROSCOPICIDADE DA TORTA**

**LAVRAS – MG  
2023**

**JOSE RENATO ROBLES PADILLA**

**PROCESSAMENTO DE GRÃOS DE *Moringa oleifera* Lam.: EFEITOS DA SECAGEM  
NA EFICIÊNCIA DE EXTRAÇÃO MECÂNICA DO ÓLEO E MODELAGEM  
MATEMÁTICA DA HIGROSCOPICIDADE DA TORTA**

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Lavras, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação Strictu-Sensu em Engenharia Agrícola, na área de concentração em Processamento de Produtos Agrícolas, para a obtenção do título de Mestre.

Prof. Dr. Ednilton Tavares de Andrade  
Orientador

**LAVRAS – MG  
2023**

Ficha catalográfica elaborada pelo Sistema de Geração de Ficha Catalográfica da Biblioteca  
Universitária da UFLA, com dados informados pelo(a) próprio(a) autor(a).

Robles Padilla, Jose Renato.

Processamento de grãos de *Moringa oleifera* Lam.: Efeitos da secagem na eficiência de extração mecânica do óleo e modelagem matemática da higroscopicidade da torta / Jose Renato Robles Padilla. - 2023.

73 p. : il.

Orientador(a): Ednilton Tavares de Andrade.

Dissertação (mestrado acadêmico) - Universidade Federal de Lavras, 2023.

Bibliografia.

1. Secagem. 2. Modelagem. 3. Propriedades termodinâmicas. I. Andrade, Ednilton Tavares de. II. Título.

**JOSE RENATO ROBLES PADILLA**

**PROCESSAMENTO DE GRÃOS DE *Moringa oleifera* Lam.: EFEITOS DA SECAGEM  
NA EFICIÊNCIA DE EXTRAÇÃO MECÂNICA DO ÓLEO E MODELAGEM  
MATEMÁTICA DA HIGROSCOPICIDADE DA TORTA**

**PROCESSING OF *Moringa oleifera* Lam. GRAINS: EFFECTS OF DRYING ON THE  
EFFICIENCY OF MECHANICAL OIL EXTRACTION AND MATHEMATICAL  
MODELING OF CAKE HYGROSCOPICITY**

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Lavras, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação Strictu-Sensu em Engenharia Agrícola, na área de concentração em Processamento de Produtos Agrícolas, para a obtenção do título de Mestre.

APROVADA em 23 de Junho de 2023.

Dr. Ednilton Tavares de Andrade


Dr. Rafael Peron Castro

Dr. Ana Paula de Carvalho Alves

UFLA

UFLA

UFLA

Documento assinado digitalmente  
 EDNILTON TAVARES DE ANDRADE  
Data: 27/07/2023 17:04:17-0300  
Verifique em <https://validar.it.gov.br>

Prof. Dr. Ednilton Tavares de Andrade  
Orientador

**LAVRAS – MG  
2023**

## **AGRADECIMENTOS**

Deus por estar sempre comigo, me ajudando em todo momento. Minha família por confiar em mim e me dar apoio em tudo o que eles puderam até o dia de hoje.

Meu orientador o professor Ednilton Tavares de Andrade por me escolher como seu orientado, confiar e me ensinar.

Meus amigos e colegas da Universidade Federal de Lavras, em especial a Bárbara, Paula, Guilherme e Filipe.

A Universidade Federal de Lavras e seus professores e técnicos que me apoiaram no decorrer do projeto; os professores Rafael, Jefferson e Ana Paula.

Aos professores Jose Luis Llanos e Carlos Rivadeneira da Universidad Autónoma Gabriel Rene Moreno.

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) – Código de Financiamento 001.

## RESUMO

*Moringa oleifera* L. é uma planta de diversas utilidades, introduzida no Brasil na década dos 50, contem grãos com alto teor de lipídios e proteínas. O óleo de moringa é considerado resistente à oxidação, quando comparados a outros óleos de origem vegetal e pode ser utilizado como lubrificante de máquinas e matéria prima na produção de biodiesel. Além disso, a torta obtida da extração de óleo é usada na alimentação animal, fertilizantes e no tratamento de águas residuais. Considerando a importância da manutenção da qualidade dos produtos pós-colheita, este trabalho teve como objetivo avaliar a influência de diferentes temperaturas de secagem nas propriedades físicas e estruturais dos grãos e na extração mecânica do óleo. Como também ajustar modelos matemáticos a cinética de secagem dos grãos e higroscopicidade da torta. Os grãos de moringa foram provenientes do estado de Pará. Os tratamentos foram: grãos úmidos sem secagem e grãos submetidos à secagem artificial com ar na temperatura de 40, 50 e 60 °C. Para cada amostra foram determinadas a massa específica aparente e analisadas as estruturas mediante microscopia eletrônica de varredura (MEV) para observar a contração celular. O rendimento e eficiência de extração do óleo foram feitas a partir da diferença entre o óleo residual da torta e o total extraído quimicamente do grão. Para a modelagem matemática foram empregados diferentes modelos para o ajuste por regressão não linear dos dados experimentais de cinética de secagem dos grãos e higroscopicidade da torta, além de calcular as propriedades termodinâmicas sobre diferentes temperaturas e umidades relativas do ar para a torta. Para a cinética de secagem o modelo de Midilli representou melhor os dados experimentais para as amostras secas a 40 °C, para os grãos secos nas temperaturas de 50 e 60 °C o modelo de Exponencial Dois Termos e Valcam foram os que mais se adaptaram, respectivamente. Foi detectada diferença significativa na massa específica aparente entre os grãos úmidos sem secagem e os grãos secados as diferentes temperaturas. Para a análise ultra estrutural realizando a MEV observou-se contração e desorganização celular para os grãos secados a diferentes temperaturas. O tratamento de secagem com temperatura do ar de secagem de 60 °C foi o que apresentou melhor rendimento de extração e eficiência da prensa. Os modelos que melhor representam a higroscopicidade da torta de *Moringa oleifera* L. são o de Sigma Copace e Halsey modificado. Com a diminuição do teor de água de equilíbrio os valores do calor isostérico integral e entropia diferencial aumentaram e a energia livre de Gibbs diminuiu. O processo de sorção da torta de *Moringa oleifera* L. é um processo espontâneo. Valores iguais ou abaixo de 0,082 (b.s.) no teor de água de equilíbrio na torta apresenta-se na faixa segura para o armazenamento nas temperaturas de 20, 30, 55 e 70 °C.

**Palavras-chave:** Secagem. Modelagem. Grãos. Torta. Propriedades Termodinâmicas.

## ABSTRACT

*Moringa oleifera* L. is a plant with several uses, introduced in Brazil in the 50's, contains grains with a high content of lipids and proteins. Moringa oil is considered resistant to oxidation when compared to other oils of vegetable origin and can be used as a lubricant for machines and raw material in the production of biodiesel. In addition, the cake obtained from oil extraction is used in animal feed, fertilizers and wastewater treatment. Considering the importance of maintaining the quality of post-harvest products, this work aimed to evaluate the influence of different drying temperatures on the physical and structural properties of the grains and on the mechanical extraction of the oil. As well as adjusting mathematical models for grain drying kinetics and cake hygroscopicity. The moringa grains came from the state of Pará. The treatments were: wet grains without drying and grains submitted to artificial drying with air at 40, 50 and 60 °C. For each sample, the apparent specific mass was determined and the structures were analyzed using scanning electron microscopy (SEM) to observe cell contraction. The yield and efficiency of oil extraction were calculated from the difference between the residual oil in the cake and the total chemically extracted from the grain. For the mathematical modeling, different models were used to adjust the experimental data of grain drying kinetics and cake hygroscopicity by non-linear regression, in addition to calculating the thermodynamic properties under different temperatures and relative air humidity for the cake. For the drying kinetics, the Midilli model best represented the experimental data for the samples dried at 40 °C, for the grains dried at temperatures of 50 and 60 °C, the Exponential Two Terms and Valcam models were the ones that best adapted, respectively. A significant difference was detected in the apparent specific mass between the wet grains without drying and the grains dried at different temperatures. For the ultrastructural analysis, performing SEM, contraction and cellular disorganization were observed for grains dried at different temperatures. The drying treatment with drying air temperature of 60 °C was the one that presented the best extraction yield and press efficiency. The models that best represent the hygroscopicity of *Moringa oleifera* L. cake are Sigma Copace and modified Halsey. As the equilibrium water content decreases, the integral isosteric heat and differential entropy values increase and the Gibbs free energy decreases. The sorption process of *Moringa oleifera* L. cake is a spontaneous process. Values equal to or below 0.082 (d.b.) in the equilibrium water content in the cake are in the safe range for storage at temperatures of 20, 30, 55 and 70 °C.

**Keywords:** Drying. Modeling. Grains. Cake. Thermodynamic Properties.

## LISTA DE FIGURAS

### SEGUNDA PARTE

#### ARTIGO 1

- Figura. 1 - Cinética de secagem; Razão de Umidade em função do tempo para as temperaturas de ar de secagem de 40, 50 e 60 °C. ....40
- Figura. 2 – Razão de umidade (RU) experimental e estimado pelo modelo de Midilli. Taxa de redução de água em função do tempo para a temperatura de ar de secagem de 40 °C..... 42
- Figura. 3 – Razão de umidade (RU) experimental e estimado pelo modelo de Exponencial dois termos. Taxa de redução de água em função do tempo para a temperatura de ar de secagem de 50 °C.....42
- Figura. 4 – Razão de umidade (RU) experimental e estimado pelo modelo de Valcam. Taxa de redução de água em função do tempo para a temperatura de ar de secagem de 60 °C.....43
- Figura. 5 – Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) do endosperma dos grãos de *Moringa oleifera* L. sem secagem. Setas de cor verde: corpos de proteínas, cor azul: células sem dano, estrutura em padrões normais. ....45
- Figura. 6 - Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) do endosperma dos grãos de *Moringa oleifera* L. secados a 40 °C ate aproximadamente 5 % de teor de água (b.u.). Setas de cor verde: corpos de proteínas, cor azul: células sem dano, estrutura em padrões normais, cor vermelho: Lúmen, cor roxo: espaço entre células, cor amarelo: gotículas de óleo. ....46
- Figura. 7 - Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) do endosperma dos grãos de *Moringa oleifera* L. secados a 50 °C ate aproximadamente 5 % de teor de água (b.u.). Setas de cor verde: corpos de proteínas, cor azul: células sem dano, estrutura em padrões normais, cor vermelho: Lúmen, cor roxo: espaço entre células, cor amarelo: gotículas de óleo. ....47
- Figura. 8 - Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) do endosperma dos grãos de *Moringa oleifera* L. secados a 60 °C ate aproximadamente 5 % de teor de água (b.u.). Setas de cor verde: corpos de proteínas, cor vermelho: Lúmen, cor roxo: espaço entre células, cor amarelo: gotículas de óleo. Cor rosa: espaços vazios ocupados pelos corpos de proteínas. ....48

#### ARTIGO 2

- Figura: 1 – Valores dos coeficientes dos ângulos de inclinação para cada teor de água de equilíbrio (b.s.) para a torta de *Moringa oleifera* L..... 66
- Figura: 2 – Calor isostérico integral calculado e estimado em função do teor de água de equilíbrio (b.s.) para a torta de *Moringa oleifera* L..... 67



## LISTA DE TABELAS

### PRIMEIRA PARTE

Tabela 1 - Composição física-química dos grãos de Moringa de dois estados diferentes. .... 13

### SEGUNDA PARTE

#### ARTIGO 1

Tabela.1 - Modelos Matemáticos aplicados aos dados experimentais para determinação da cinética de secagem. ....36

Tabela.2 – Parâmetros estimados dos modelos de Midilli, Exponencial dois Termos e Valcam; coeficiente de determinação ( $R^2$ ), erro médio relativo (P) e erro médio estimado (SE) para cada temperatura de secagem. .... 40

Tabela.3 – Massa específica aparente ( $\text{kg m}^{-3}$ ) dos grãos de *Moringa oleifera* L. para as diferentes temperaturas de ar de secagem. ....43

Tabela.4 - Rendimento da extração e Eficiência da prensa mecânica para grãos de *Moringa oleifera* L. submetidos a diferentes temperaturas de secagem. ....49

#### ARTIGO 2

Tabela:1 – Soluções salinas com suas respectivas umidade relativas quando expostas a diferentes temperaturas.....58

Tabela:2 – Modelos matemáticos para a obtenção das isotermas ..... 59

Tabela:3 – Modelos matemáticos ajustados aos dados experimentais de sorção da torta de *Moringa oleifera* L. com seus parâmetros, e avaliadores de ajuste; coeficiente de determinação ( $R^2$ ), erro médio relativo (P), e erro médio estimado (SE). .... 62

Tabela:4 – Teor de água de equilíbrio estimado com o modelo Halsey modificado para a torta de *Moringa oleifera* L..... 63

Tabela:5 – Atividade de água ( $a_w$ ) estimadas pelo modelo de Halsey modificado para a torta de *Moringa oleifera* L. conforme ao teor de água de equilíbrio (b.s.) e temperatura ( $^{\circ}\text{C}$ ). .... 64

Tabela:6 – Coeficiente da inclinação da reta, calor isostérico líquido, calor isostérico integral calculado e estimado pelo modelo para a torta de *Moringa oleifera* L. .... 66

Tabela:7 - Energia Livre de Gibbs e Entropia diferencial para cada teor de água de equilíbrio (b.s.) para a torta de *Moringa oleifera* L. .... 67

## SUMARIO

<b>PRIMEIRA PARTE</b> .....	10
<b>1. INTRODUÇÃO</b> .....	11
<b>2. REFERENCIAL TEÓRICO</b> .....	12
2.1. <i>Moringa oleifera</i> Lam. ....	12
2.2. Ponto de colheita .....	13
2.3. Secagem de grãos e sua importância .....	13
2.3.1. Causas de danos nos grãos devido à secagem .....	14
2.4. Microscopia Eletrônica de Varredura .....	15
2.5. Modelagem Matemática .....	16
2.6. Modelos semiempíricos adaptados a secagem de produtos agrícolas .....	17
2.7. Óleo nos grãos da Moringa .....	18
2.7.1. Processo de extração de óleos vegetais .....	19
2.7.1.1. Extração por solvente – Soxhlet.....	19
2.7.1.2. Extração por prensagem.....	20
2.8. Higroscopicidade, Isotermas de sorção e propriedades termodinâmicas dos produtos agrícolas.....	20
<b>REFERÊNCIAS</b> .....	22
<b>SEGUNDA PARTE – ARTIGOS</b> .....	31
<b>ARTIGO 1 - EFEITOS DA SECAGEM DE GRÃOS DE <i>Moringa oleifera</i> Lam. NA EFICIÊNCIA DA EXTRAÇÃO MECÂNICA DO ÓLEO.</b> .....	32
1. INTRODUÇÃO .....	32
2. MATERIAL E MÉTODOS.....	34
3. RESULTADOS E DISCUSSÃO .....	39
4. CONCLUSÃO .....	50
<b>REFERÊNCIAS</b> .....	50
<b>ARTIGO 2 - MODELAGEM MATEMÁTICA DA HIGROSCOPICIDADE DA TORTA DE <i>Moringa oleifera</i> Lam E PROPRIEDADES TERMODINÂMICAS.</b> .....	55
1. INTRODUÇÃO .....	55
2. MATERIAL E MÉTODOS.....	57
3. RESULTADOS E DISCUSSÃO .....	62
4. CONCLUSÃO .....	69
<b>REFERÊNCIAS</b> .....	69

## **PRIMEIRA PARTE**

## 1. INTRODUÇÃO

Na década de 50, a *Moringa oleifera* (Lamark) foi introduzida no Brasil, esta espécie se tornou a mais conhecida do gênero *Moringa*. A planta é tolerante a solos pobres em nutrientes, ampla faixa de precipitação e há possibilidade de até três colheitas por ano. No Brasil esta espécie está presente em quinze estados. Várias partes da planta são comestíveis como as folhas, flores, frutas e raízes. As folhas são ricas em cálcio, ferro, fósforo e vitaminas A e C, as sementes tem alto teor de proteína e óleo comestível, este último estudado para a fabricação de biodiesel. Já a torta da semente tem propriedades coagulantes podendo ser utilizada para o tratamento de água residuária.

Com o crescimento populacional global e a busca por colaborar no cumprimento dos objetivos da agenda 2030 para o desenvolvimento sustentável, erradicação da pobreza, fome zero, saúde e bem-estar; tem-se a preocupação de utilização de novos recursos naturais para a alimentação, uso farmacêutico e outras utilidades, mas que tenham garantida a qualidade e a viabilidade de obtenção.

A pesar de diversas partes da *Moringa oleifera* Lam. apresentarem excelentes características para uso em diferentes setores da alimentação, saúde e indústria, poucos são os estudos no que se refere aos efeitos da secagem na extração mecânica do óleo e qualidade dos subprodutos. No processamento de produtos agrícolas, a secagem é uma etapa muito relevante, por colocar o produto em faixa segura de teor de água, evitando o desenvolvimento de microrganismos e a deterioração dos mesmos. A secagem em altas temperaturas pode acelerar o processo, mas pode levar a perda de qualidade física e química do produto e afetar o processamento.

No que se refere à extração do óleo da semente, as técnicas mais utilizadas são extração por solvente e extração por prensa, a primeira pode extrair maior quantidade do óleo da semente do que a segunda. O que sobra após a extração é a torta, que pode sofrer deterioração de qualidade como qualquer outro produto da indústria agrícola quando exposto a determinadas condições ambientais de temperatura e umidade relativa o que prejudica a armazenagem segura.

Em função do exposto o objetivo deste trabalho foi avaliar a secagem em diferentes temperaturas do ar e sua influência na extração mecânica do óleo de grãos de *Moringa oleifera* Lam. assim como determinar as isotermas de sorção da torta e as propriedades termodinâmicas da mesma.

## 2. REFERENCIAL TEÓRICO

### 2.1. *Moringa oleifera* Lam.

*Moringa oleifera* (Lamarck) é a mais conhecida das quatorze espécies do gênero *Moringa*, pertence à família das Moringaceae. Tem um crescimento rápido, sendo que sua árvore pode alcançar até dez metros de altura. O fruto é do tipo vagem de coloração marrom-esverdeado, com 20 a 24 sementes aladas (BEZERRA et al., 2004; AGUSTINI et al., 2015). A planta é tolerante a solos pobres em nutrientes com uma faixa de pH entre 5,0 e 9,0. Também é resistente a seca com uma ampla faixa de precipitação de 250 a 3000 mm por ano (PALADA & CHANGL, 2003; RADISH et al., 2008).

A *Moringa oleifera* foi introduzida no Brasil na década dos 50 (ANWAR & BHANGHER, 2003). Nos trabalhos apresentados no Encontro Nacional de *Moringa*, evento que acontece desde 2009, relata a ocorrência de *moringa* nos seguintes estados, Rio Grande do Norte, Piauí, Ceará, Paraíba, Pernambuco, Alagoas, Sergipe, Bahia, Mato Grosso do Sul, São Paulo, Rio de Janeiro, Minas Gerais e Paraná (ALMEIDA, 2015).

Segundo Brisibe et al. (2009), a variação nos componentes nutricionais da *Moringa oleifera* L. depende de fatores genéticos, ambientais e técnicas de cultivos. Segundo Ravani et al. (2017), variadas partes da árvore de *Moringa oleifera* L. como folha, córtex, goma, raízes, frutos são repositórios de proteínas, vitaminas e minerais.

As folhas são ricas em vitaminas A e C, fósforo, ferro e cálcio e os frutos tem alto teor de proteína (NASCIMENTO et al., 2015). As folhas têm sido usadas como suplementação para prevenção da anemia materna e o aumento da hemoglobina em recém-nascidos (ISKANDAR et al., 2015). Extrato das flores tem efeito hepatoprotetor (UPADHYAY et al., 2015). O extrato das raízes tem atividade antimicrobiana (MOYO et al., 2012) e as raízes contém glucosinolato de bencilo, o qual é transformado em isotiocianatos, nitrilos e tiocarbamatos, os quais tem efeitos espasmolíticos e hipotensores (ANWAR et al., 2007).

As sementes têm óleo comestível (OJIAKO & OKEKE, 2013) os quais tem potencial na indústria do biodiesel por ter um alto conteúdo de ácido oleico, maior que 70 % (RASHID et al., 2006). Já a torta da semente depois da extração pode ser utilizada como fertilizante ou coagulante de águas residuais (PREMI & SHARMA, 2013).

Silva et al. (2020) determinaram a composição físico-química dos grãos de *moringa* provenientes de dois estados do nordeste brasileiro. Os resultados são apresentados na tabela 1, demonstrando que a composição química ou bromatológica pode variar segundo as características do lugar como já mencionado.

**Tabela 1 - Composição física-química dos grãos de *Moringa* de dois estados diferentes.**

Estado / Parâmetro	Bahia	Paraíba
Teor de água (%)	6,16	5,53
Atividade de água ( $a_w$ )	0,65	0,66
pH	6,1	6,0
Acidez total (%)	0,38	0,37
Cinzas (%)	4,50	4,51
Proteínas (%)	32,16	32,52
Lipídios (%)	25,00	33,68
Carboidratos (%)	32,43	23,48

Fonte: (SILVA et al., 2020).

O óleo de *Moringa oleifera* comercialmente é conhecido como óleo de Ben ou Behen, este contém ácido palmítico, esteárico, beênico (OJIAKO & OKEKE, 2013) e ácido oleico (>70 %) (ANWAR & BHANGER, 2003). O óleo é mais estável quando utilizado na fritura do que o óleo de soja, palma e canola (Nguyen et al., 2011) e possui resistência à degradação por oxidação (LALAS & TSAKNIS, 2002; RADISH et al., 2008).

## 2.2. Ponto de colheita

A maturidade fisiológica é uma etapa considerada muito importante por pesquisadores e produtores, ela representa o final do crescimento ativo da planta e da produção de safras, quando a semente não tem mais uma conexão funcional com a planta mãe (EGLI, 2017). Neste ponto ocorrem mudanças na coloração do fruto, relacionada com a maturação, variando de verde ao marrom (AGUSTINI, 2015). A identificação deste ponto permite saber o momento ideal de colheita dos grãos (IOSSI et al., 2007).

## 2.3. Secagem de grãos e sua importância

Durante o processamento diversos produtos estão sujeitos a pelo menos uma etapa de secagem (WANKHADE, SAPKAL & SAPKAL, 2013). O processo de secagem consiste na remoção da água de um determinado produto, visando à redução do seu metabolismo, da atividade enzimática e desenvolvimento de microrganismos, além de ter como objetivo

manter a qualidade do produto, este processo reduz a massa e volume e beneficia o armazenamento e o transporte do mesmo (NASCIMENTO, 2015).

O processo de secagem remove a água através de uma transferência simultânea de calor do ar para a semente e um fluxo de massa de água das sementes para o ar (GONELI et al., 2011; SIQUEIRA et al., 2012; CORADI et al., 2016). A análise do comportamento do fenômeno de transferência de calor e massa é importante para projetos de simulações de secagem e desenho de secadores (CORADI et al., 2016).

A taxa de secagem é influenciada pela temperatura e umidade relativa do ar ambiente, temperatura e fluxo do ar de secagem, teor de água inicial, histórico do produto, fluxo do produto no secador (ANDRADE, 2006). Segundo a natureza do produto os fatores que podem afetar a secagem são a área superficial, orientação dos constituintes, estrutura celular e tipo e concentração dos solutos (HELDMAN & HARTEL, 2000).

A secagem geralmente é realizada por convecção forçada de ar aquecido, podendo ser em camada de grãos delgada ou camada espessa, experimentalmente e majoritariamente utiliza-se em camada delgada por utilizar menor quantidade de produto, o que otimiza o tempo de secagem e facilita a determinação das taxas de secagem (SILVA, 2017). Na convecção de ar aquecido a água evaporada é removida e o ar saturado substituído por ar seco com maior volume específico (SAKAI & MAO, 2006; NINDO & MWITHIGA, 2011).

### 2.3.1. Causas de danos nos grãos devido à secagem

Segundo Borém (2008), os danos por secagem ocorrem na última etapa deste processo, quando a cinética de secagem e o teor de água do produto são menores em relação à perda por evaporação e aumento de temperatura do fruto. A perda de água causa danos na estrutura celulares no produto, e como consequência ocorre um decréscimo na sua forma e em suas dimensões (GONELI et al., 2011).

A temperatura do ar de secagem quando não é bem controlada pode ocasionar perdas na qualidade e influenciar na eficiência de secagem (AFONSO JÚNIOR, 2001). Como também ocasionar alterações físicas e químicas nos grãos além de afetar a efetividade na extração do óleo por prensa mecânica (ALMEIDA et al., 2013, ARAÚJO et al., 2020).

Segundo Hoekstra et al. (2001), a perda de água induz a contração da parede celular, reduzindo o tamanho das células e provocando um aumento da viscosidade do conteúdo da célula e uma aglomeração dos componentes citoplasmáticos. Nas mudanças físicas pode-se

mencionar a contração volumétrica que é consequência da redução do tamanho celular (SILVA, 2017). A contração volumétrica pode ser descrita de duas formas dependendo se o estudo é realizado em grão unitário (contração volumétrica unitária) ou na massa de grãos (contração volumétrica aparente) (BOTELHO et al., 2018). Ratti (1994) observou a contração volumétrica dos produtos vegetais durante a secagem e afirma que não depende só do teor de água, mas também, do processo e da geometria do produto.

Alguns autores afirmam que os danos sofridos pela exposição dos grãos a secagem pode variar de acordo com a espécie, temperatura de secagem, teores de água inicial e final de sementes, dentre outros fatores (ANDRADE, 2006). Botelho et al. (2015) avaliaram o efeito do aumento da temperatura da secagem sobre as propriedades físicas dos grãos de soja. Para isso utilizaram uma estufa com circulação de ar forçado nas temperaturas de 40, 50, 60, 70 e 80 °C. Concluíram que o aumento da temperatura influenciou no aumento da condutividade elétrica da solução dos exsudatos, houve uma diminuição da massa específica aparente e unitária e massa de mil grãos e uma troca da cor característica da soja.

A influência do teor de água em produtos agrícolas durante a secagem tem sido estudada por vários autores e para diferentes grãos como: Milho (SILVA et al., 2022); Soja (ZAGUI, 2018); Sorgo (ULLMANN, 2018); Moringa (ARAÚJO et al., 2020).

#### **2.4. Microscopia Eletrônica de Varredura**

O Microscópio eletrônico de varredura é um dos instrumentos mais úteis disponíveis para análises de características microestruturais de materiais sólidos. É um equipamento de alta resolução, com instrumentos comerciais de 2 a 5 nm e instrumentos de pesquisa com resolução melhor que 1 nm (NAGATANI et al. 1987). O princípio de funcionamento consiste na utilização de um feixe de elétrons de pequeno diâmetro para explorar a superfície da amostra ponto a ponto, por linhas sucessivas com o fim de transmitir o sinal. O sinal de imagem resulta da interação do feixe incidente com a superfície da amostra, sinal que será recolhido pelo detector e utilizado para ajustar o brilho do monitor permitindo a observação (DEDAVID, GOMES & MACHADO, 2007).

Segundo Berjak & Pammenter (2000), a utilização de estudos de ultra-estrutura contribuiu ao entendimento das respostas de sementes recalcitrantes e ortodoxas a secagem. Danos durante a secagem das estruturas como membranas das organelas celulares, o citoesqueleto e o núcleo esquelético podem comprometer o bom funcionamento da célula e causar por consequência perda de viabilidade.



A microscopia de varredura tem sido usada para vários fins como avaliar danos mecânicos em melões, causados pelo congelamento (RESENDE & CAL-VIDAL, 2002). Modificações na estrutura superficial das sementes de tomate (SILVA et al., 2002). Danos na membrana dos eixos embrionários em soja (SILVA et al., 2007). Desestruturação dos componentes celulares em grãos de café (BOREM et al., 2013), entre outros.

No trabalho de SAATH et al. (2010), observaram através da microscopia de varredura um comprometimento nas estruturas celulares nos cafés com teor de água de 20% (b.u.) quando a temperatura de secagem foi de 60 °C em secadores de camada fixa. Já no trabalho de Borém (2013), em análises ultraestruturais de grãos de café, observou que o aumento da temperatura induziu as membranas celulares ao rompimento.

## **2.5. Modelagem Matemática**

Modelos matemáticos podem ser ajustados aos dados de cinética de secagem (FARIA et al., 2012). Estes modelos tentam representar a perda de teor de água do produto durante o período de secagem (AFONSO JÚNIOR & CORRÊA, 1999) e proporcionam informação importante para entender e estudar os sistemas de secagem, fazer dimensionamento e otimização além de viabilizar a aplicação comercial. Dados de cinética de secagem podem ser obtidos a partir de secagem de sucessivas camadas delgadas ou de apenas uma camada de produto (GINER & MASCHERONI, 2002; SILVA, 2017). Modelos matemáticos devem ser ajustados ao formato do produto, tipo de secagem além de considerar a transferência de calor e massa do processo (NASCIMENTO, BIAGI & OLIVEIRA, 2015).

A secagem de um produto pode-se dividir em duas, a velocidade em taxa constante e em taxa decrescente. Na velocidade de taxa constante as temperaturas do produto mantem-se igual à temperatura do ar de secagem saturado, existe uma compensação na transferência de calor e massa, o ar recupera o que perdeu sob a forma de calor em forma de vapor. Na taxa de velocidade decrescente a evaporação na superfície do produto é maior que o transporte da água dentro dele até chegar à superfície, não existindo uma compensação como no caso anterior o que gera um aumento da temperatura do produto com tendência a se igualar a temperatura do ar de secagem (BROOKER et al., 1992).

Para as análises de secagem de produtos agrícolas em camada fina podem ser encontrados vários métodos como: teóricos, semi-empíricos e os empíricos (AFONSO JÚNIOR & CORRÊA, 1999). Os métodos teóricos consideram a transferência de calor e massa no interior do produto e as condições externas que influenciam no processo de secagem

(BROOKER et al., 1992). Os modelos teóricos se baseiam na difusão da segunda lei de Fick, os quais descrevem que o fluxo de massa por unidade de área é proporcional ao gradiente de concentração da água (PARK et al., 2002; ROMERO-PEÑA & KIECKBUSCH, 2003).

Para Keey (1972), os modelos empíricos se baseiam principalmente em dados experimentais e uma análise adimensional, por outra parte seus parâmetros não tem significado físico, e estes modelos apresentam uma relação direta entre a redução média do teor de água e o tempo. Os modelos semiempíricos se baseiam na lei do resfriamento de Newton para a transferência de massa, se considera um processo isotérmico e que a resistência à transferência de água seja somente na superfície dos grãos (BROOKER et al., 1992).

Devido ao número de fatores e condições na secagem, além do produto a ser secado, não existe um só modelo de camada delgada que possa representar de maneira geral a cinética de secagem de vários produtos agrícolas. A escolha do modelo mais apropriado para descrever o comportamento da secagem dos produtos agrícolas não depende do número de variáveis, mas sim de vários indicadores estatísticos (ONWUDE, 2016).

O coeficiente de determinação ajustado ( $R^2_{aj}$ ) é utilizado para avaliar a qualidade de ajuste dos modelos com diferentes números de parâmetros (RIBEIRO et al., 2017). Quanto maior ( $R^2_{aj}$ ) melhor o ajuste do modelo (FERNANDES et al., 2014). Outro avaliador de qualidade é o desvio padrão residual (DPR) ou erro médio da estimativa o qual indica a distância entre os valores observados e a estimativa do modelo (RIBEIRO et al., 2017). Segundo Sousa et al. (2014), quanto menor o valor do (DPR) melhor o ajuste do modelo. O erro médio relativo é um dos indicadores estatístico para a seleção do modelo, ele deve ser menor que 10 % (MOHAPATRA E RAO, 2005; OLIVERIA et al., 2013).

## **2.6. Modelos semiempíricos adaptados a secagem de produtos agrícolas**

Estudos de secagem e modelagem realizados com *Moringa oleifera* L. encontraram que o modelo de Midilli se ajusta bem aos dados experimentais quando os grãos foram submetidos a uma secagem por radiação infravermelha com temperaturas do ar de 30 e 60 °C. (NASCIMENTO, BIAGI & OLIVEIRA, 2015). Aremu & Akintola (2016), secando grãos de *Moringa oleifera* L. encontraram que o modelo de Page foi quem melhor representou os dados para uma secagem a temperaturas de 50, 60 e 70 °C em secador de laboratório.

Quando o produto foi a soja da cultivar Valiosa, Oliveira et al. (2013), determinaram que o melhor modelo foi o de Page para representar a perda de água durante a secagem quando expostos a temperaturas de ar forçado de 40, 55, 70, 85 e 100 °C. No estudo de Botelho et al. (2018) se secaram quatro variedades de soja a temperaturas de ar forçado de 40, 50, 60 e 70 °C, o modelo de Midilli foi quem melhor representou os dados para todas as condições e variedades.

## 2.7. Óleo nos grãos da Moringa

Os lipídios são macromoléculas presentes em animais e plantas, estas cumprem funções importantes, são parte da estrutura celular além de serem fontes de reserva (NELSON & COX, 2014). Os lipídios são constituídos por carbono, hidrogênio e oxigênio, com alguns grupos contendo nitrogênio, fósforo e enxofre. Estas macromoléculas são solúveis em solventes orgânicos. Os lipídios simples são ácidos graxos e álcoois e os lipídeos compostos são os fosfolipídeos (ANDRADE, 2006).

Segundo Solomons & Fryhle (2012), os lipídeos são moléculas que armazenam energia, em geral na forma de gordura e óleo, a diferença entre estas últimas está quando na temperatura ambiente as gorduras são sólidas e os óleos são líquidos. As formas mais abundantes de lipídios são os Triacilgliceróis compostos por três moléculas de ácidos graxos e uma molécula de glicerol (VISENTAINER & FRANCO, 2006). Segundo Kamal & Eldin (2006), os óleos vegetais estão constituídos por 95 % de Triacilgliceróis.

Os ácidos graxos são classificados segundo a presença de duplas ligações entre as cadeias de carbonos. Sendo assim ácidos graxos são saturados quando não tem duplas ligações, ácidos graxos são monoinsaturados pela presença de uma dupla ligação e ácidos graxos são poli-insaturados pela presença de duas ou mais duplas ligações (YOU DIM, MARTIN & JOSEPH, 2000).

Óleos vegetais são em sua maioria insaturados, contendo ácidos graxos de 18 carbonos. Em óleos de soja, milho, oliva, canola os ácidos graxos mais comuns são: ácido linolênico (C18:3), ácido linoleico (C18:2), ácido oleico (C18:1), ácido esteárico (C18:0) e ácido palmítico (C16:0) (MCCLEMENTS & DECKER, 2010).

Dependendo da disponibilidade de água e condições climáticas da região as sementes dos frutos de uma única árvore de moringa pode ter uma produtividade de óleo de 580 kg.ha<sup>-1</sup> (AYERZA, 2011). A semente de moringa é composta por 29,36 % da sua massa por proteína,

40,39 % por óleo. O óleo tem níveis de ácido oleico (até 78,59 %), palmítico (7,00 %), esteárico (7,50 %), behênico (5,99%) e araquídico (4,21%). O óleo, segundo ANWAR & BHANGER (2003), tem uma densidade (24°C) de 0,9057 g.mL<sup>-1</sup>; índice de saponificação 186,67 mg KOH.g<sup>-1</sup> e índice de acidez de 0,79 mg KOH.g<sup>-1</sup>.

### 2.7.1. Processo de extração de óleos vegetais

O objetivo da extração é isolar o óleo da matriz, que no caso da maioria dos óleos vegetais é a semente. Com a extração procura-se o maior rendimento possível, um óleo sem alterações e impurezas e uma torta de qualidade (BRUNETON, 1991). O processo de preparo e o processo de extração numa mesma variedade podem influenciar o teor e a composição química do óleo (RAMOS et al., 2011).

Os métodos convencionais para a extração de óleos vegetais na indústria são: prensagem mecânica (prensa hidráulica), prensagem mecânica em prensa contínua (expeller) e a extração com solventes orgânicos (GAONKAR & ROSENTRATER, 2019). Os não convencionais são o ultrassom, extração com fluido supercrítico e extração com líquido pressurizado (FREITAS, 2007).

Segundo Perry (2008), a extração por prensa mecânica pode degradar compostos bioativos e reduzir a vida de prateleira do óleo pela exposição à luz e o oxigênio. Além da baixa eficiência de extração, deixando de 8 a 14 % na torta como resíduo, em contrapartida quando comparado ao método por solvente, este método é mais rápido, contínuo, e de fácil manipulação para diferentes tipos de oleaginosas (SINGH & BARGALE, 2000).

Na extração por solvente, pelo uso de temperaturas elevadas pode ocorrer degradação de compostos termicamente sensíveis, a extração demanda grande espaço de tempo, há alto custo energético e elevada quantidade de solvente (HERRERO, CIFUENTES & IBANEZ, 2006). Em contrapartida a eficiência na taxa de extração é mais elevada com o uso de solventes (LIU et al., 2009).

#### 2.7.1.1. Extração por solvente – Soxhlet

A técnica Soxhlet é considerada padrão e foi desenvolvida por Franz von Soxhlet em 1879, desenvolvida para extração de lipídios de materiais sólidos (CASTRO & PRIEGO-CAPOTE, 2010). Normalmente é utilizada a metodologia Soxhlet, com emprego de hexano como solvente, tanto no laboratório como na indústria (AQUINO, 2007).

Segundo García-Ayuso et al. (2000), na técnica Soxhlet consideram-se três etapas importantes: contato e penetração do solvente no produto, formação de uma micela intracelular e a difusão do extrato na micela externa. Na técnica Soxhlet o solvente é aquecido e evaporado para logo condensar no produto, sucessiva e intermitentemente permitindo a extração.

#### 2.7.1.2. Extração por prensagem

De acordo com Li (2002), na extração mecânica a aplicação de alta pressão produz a ruptura das paredes celulares e o óleo é forçado a sair. No processo uma quantidade de água se evapora, o óleo diminui a viscosidade recebendo gradativamente pigmentos, sólidos e compostos coloidais.

Segundo Khan & Hanna (1984), na extração mecânica, existem variáveis que podem influenciar no rendimento, como o teor de água do produto, temperatura de aquecimento, tempo de aquecimento e pressão. Quando as variáveis não são controladas estas podem influenciar na qualidade e no rendimento de extração dos óleos e gorduras (BAMGBOYE & ADEJUMO, 2011).

Estudos de extração de óleo em sementes de *Moringa oleifera* L. demonstraram a extração através do solvente hexano (Soxhlet) superior a extração por prensagem. Obtendo rendimentos de 28,58 % e 35,03 % (FAKAYODE & AJAV, 2016), 26,5 % e 35,3 % (TSANKINS et al., 1998), 25 % e 35 % (AZEVEDO, 2013) para extração por prensagem e solvente hexano (Soxhlet), respectivamente.

### **2.8. Higroscopicidade, Isotermas de sorção e propriedades termodinâmicas dos produtos agrícolas.**

Uma propriedade física conhecida como higroscopicidade ocorre quando um produto com teor de água é exposto a uma atmosfera contendo vapor de água, naquele momento ocorrem trocas de energia e massa (vapor de água). O produto pode ganhar ou perder água até atingir um equilíbrio, conhecido como equilíbrio higroscópico (BORÉM, 2008). O equilíbrio é atingido quando a pressão de vapor sobre o sólido é igual à pressão parcial do vapor no gás secante na alimentação (FOUST et al., 1982). A higroscopicidade de um produto depende da afinidade entre a água e os demais constituintes do material (gorduras, proteínas, açúcares, amido, etc.) (BROOKER et al., 1992).

Para uma mesma umidade relativa do ar e temperatura, pode haver dois teores de água de equilíbrio dependendo se o material está mais seco ou úmido em relação com as condições de umidade relativa do ar, então podemos ter adsorção ou dessorção de água, a diferença entre esses dois pontos chama-se histerese (WOLF et al., 1972; CORREA, et al., 2014,).

A relação entre a umidade relativa de equilíbrio e o teor de água do produto para uma mesma temperatura pode ser representada por equações matemáticas que são chamadas de isotermas ou curvas de equilíbrio higroscópico (CORREA et al., 2015). Para a obtenção das isotermas de sorção os modelos teóricos não tem sido capazes, de forma geral, de encontrar o teor de água de equilíbrio para uma ampla faixa de temperatura e umidade relativa do ar, conseqüentemente os modelos empíricos são majoritariamente utilizados (BORÉM, 2008).

As Isotermas de sorção de teor de água podem apresentar 5 formatos. Os alimentos geralmente possuem as isotermas de sorção de teor de água na forma Sigmoide (Tipo II) (AL-MUHTASEB et al., 2002). Segundo a descrição de Brunauer et al., (1940) as isotermas são de tipo I “Langmuir”, tipo II “Sigmoide”, tipo III “formato J”, tipo IV e tipo V (adsorção de multi-camadas BET).

Para obter experimentalmente o teor de água de equilíbrio basicamente se têm dois métodos, o método estático e o método dinâmico. No primeiro o grão é levado ao equilíbrio sem movimentação do grão e do ar, no segundo tem-se a movimentação do ar (MORTOLA et al., 2003).

No método estático gravimétrico o grão é submetido à temperatura e umidade relativa da atmosfera constante até atingir o equilíbrio higroscópico. Para a obtenção da umidade relativa constante da atmosfera neste método e para a determinação das isotermas de sorção se utiliza algumas soluções salinas, sendo frequentemente usados o: Hidróxido de potássio, Acetato de potássio, Cloreto de magnésio, Carbonato de potássio, Nitrato de magnésio, Nitrito de potássio, Cloreto de sódio, Cloreto de potássio, Cloreto de bário, Sulfato de cobre II (GREENSPAN, 1977).).

Estudos de isotermas de sorção tem sido realizado em uma diversidade de produtos agrícolas, estes estudos encontraram diferentes modelos que se ajustaram aos dados experimentais como o modelo de Chung-Pfost em sementes de Tunge (COSTA et al., 2021), o modelo de Chung-Pfost em sementes de Cártamo (BESSA et al, 2021), os modelos de Roa e Chung-Pfost em Milho BR-451(BRAGA, 1991), o modelo de Andrade em pimenta Dedo-de-Moça (ANDRADE et al., 2017).

Mediante as propriedades termodinâmicas se tem uma maior compreensão entre a relação água e produto e a energia requerida para o dimensionamento de secadores

(OLIVEIRA et al., 2013). Entre as propriedades estão a entalpia, entropia e energia livre de Gibbs (CORRÊA et al., 2010). Para Silva et al. (2015), a relação do produto em quanto a perda ou ganho de água para diferentes condições de armazenagem e as propriedades termodinâmicas podem ser calculadas com as isotermas de sorção.

No processo de sorção, se tem a oscilação da entalpia, e isto se deve as trocas de energia por consequência da interação dos constituintes do produto com as moléculas de água. Por outro lado, a entropia se refere ao grau de desordem do sistema na relação água e constituintes do produto (MCMINN et al., 2005). A energia livre de Gibbs é a energia requerida para realizar o processo de evaporação ou sublimação das moléculas de água no produto (OLIVEIRA et al., 2014).

As propriedades termodinâmicas como o calor isostérico integral, entropia e energia livre de Gibbs dos produtos agrícolas foram estudados por diversos autores, entre eles, grãos de abobora (*Cucurbita moschata*) (TEIXEIRA, ANDRADE & DEVILLA, 2018), café (*Coffea arabica* L.) (SANTOS et al., 2020), sementes de maracujá doce (ISQUIERDO et al., 2020) similitudes foram encontradas nestes estudos, demonstrando que o teor de água de equilíbrio é diretamente proporcional à atividade de água (aw) e decresce com o aumento da temperatura e quando o teor de água das sementes reduz existe um aumento do calor isostérico integral de sorção, entropia diferencial e energia livre de Gibbs.

## REFERÊNCIAS

- ABDULKARIM, S. M.; LONG, K.; LAI, O. M.; MUHAMMAD, S. K. S., & GHAZALI, H. M. **Some physico-chemical properties of Moringa oleifera seed oil extracted using solvent and aqueous enzymatic methods.** Food Chemistry, v. 93, n. 2, p. 253-263, 2005.
- AFONSO JÚNIOR, P.C. **Aspectos físicos, fisiológicos e da qualidade do café em função da secagem e do armazenamento.** 2001. 373f. Tese (Doutorado em Engenharia Agrícola) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2001.
- AFONSO JÚNIOR, P.C.; CORRÊA, P.C. **Comparação de modelos matemáticos para descrição da cinética de secagem em camada fina de sementes de feijão.** Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental, v.3, p.349-353,1999.
- AGUSTINI, M.A.B.; WENDT, L.; PAULUS, C.; MALASAVI, M.M. (d); GUSATTO, F.C. **Maturidade fisiológica de sementes de Moringa oleifera (Lam).** Revista Cultivando o Saber, v.8, n.3, p. 267-278. 2015.
- ALMEIDA F.N.; HTOO J.K.; THOMSON J STEIN H.H. **Amino acid digestibility in camelina products fed to growing pigs.** Canadian Journal of Animal Science, 93(3): 335-43. 2013.

ALMEIDA, N. C. D. **Estudo do processo de extração do óleo da semente de *Moringa oleifera* Lam. visando a produção de biodiesel.** Dissertação (Mestrado em Engenharia Química). Universidade Estadual de Maringá, Maringá/PR, 2015.

AL-MUHTASEB, A. H.; McMINN, W. A. M.; MAGEE, T. R. A. **Moisture sorption isotherm characteristics of food products: a review.** Trans IChemE, v. 80, parte C, 2002.

ANDRADE, E. C. B. (d). **Análise de alimentos: uma visão química da nutrição.** Livraria Varela, 2006.

ANDRADE, E. T.; CORREA, P. C.; TEIXEIRA, L. P.; PEREIRA, R. G.; FREITAS CALOMENI, J. **Cinética de secagem e qualidade de sementes de feijão.** Engvista, v. 8, n. 2, p. 83-95 2006.

ANDRADE, E. T.; FIGUEIRA, V. G.; TEIXEIRA, L. P.; TAVEIRA, J. H. D. S.; BORÉM, F. M. **Determination of the hygroscopic equilibrium and isosteric heat of aji chili pepper.** Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental, v. 21, p. 865-871, 2017.

ANWAR, F.; LATIF, S.; ASHRAF, M.; GILANI, A. H. **Moringa oleifera: a food plant with multiple medicinal uses.** Phytotherapy Research: An International Journal Devoted to Pharmacological and Toxicological Evaluation of Natural Product Derivatives, v. 21, n. 1, p. 17-25, 2007.

AQUINO, L. P. **Extração do óleo da polpa de pequi (*Caryocar brasiliense*): influência das variáveis operacionais.** 2007. 95 f. Dissertação (Mestrado em Ciências do Alimento). Universidade Federal de Lavras, Lavras/MG, 2007.

ARAÚJO, B. L. O.; ANDRADE, E. T. (d), NOLASCO, K. C. V.; CASTRO, R. P.; NETO, P. C. **Eficiência da extração mecânica de *Moringa oleifera* de acordo com diferentes condições de secagem de grãos.** Research, Society and Development, v. 9, n. 7, p. e937975133, 2020.

AREMU, A.; AKINTOLA, A. **Drying kinetics of moringa (*Moringa oleifera*) seeds.** Journal of Life Sciences and Technologies. doi, v. 10, p. 7-10, 2016.

AYERZA, R. **Seed yield components, oil content, and fatty acid composition of two cultivars of moringa (*Moringa oleifera* Lam.) growing in the Arid Chaco of Argentina.** Industrial Crops and Products, v. 33, p. 389-394, 2011.

AZEVEDO, S. H. G. D. **Extração enzimática de óleo e produção in situ de biodiesel a partir da *Moringa oleifera* Lam.** Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) - Universidade Federal do Rio Grande do Norte. Natal, 87p. 2013.

BAMGBOYE, A. I.; ADEJUMO, O. I. **Effects of processing parameters of Roselle seed on its oil yield.** International Journal of Agricultural and Biological Engineering, v. 4, n. 1, p. 82-86, 2011.

BENEDETTI, B. C. **Influência do teor de umidade sobre propriedades físicas de vários grãos.** 125p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) – Faculdade de Engenharia Agrícola, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 1987.



BERJAK, P. & PAMMENTER, N. **What ultrastructure has told us about recalcitrant seeds.** Revista Brasileira de Fisiologia Vegetal, v. 12, n. Edicao Especial, p. 22-55, 2000.

BESSA, J. F.; RESENDE, O.; OLIVEIRA, D. E.; LIMA, R. R. D.; QUEQUETO, W. D.; SIQUEIRA, V. C. **Adsorption isotherms and thermodynamic properties of *Carthamus tinctorius* L. seeds.** Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental, 25, 696-702, 2021.

BEZERRA, A. M. E.; FILHO, S. M.; FREITAS, J. B. S.; TEÓFILO, E. M. **Avaliação da qualidade das sementes de *Moringa oleifera* lam. durante o armazenamento.** Revista Ciência e Agrotecnologia, Lavras, v. 28, n.6, p. 1240-1246, 2004.

BORÉM, F.M. **Pós-colheita do café (ed).** Lavras: Ed. UFLA, 2008. 631p.

BORÉM, F. M.; OLIVEIRA, P. D.; ISQUIERDO, E. P.; SILVA GIOMO, G.; SAATH, R.; CARDOSO, R. A. **Microscopia eletrônica de varredura de grãos de café submetidos a diferentes formas de processamento e secagem.** Coffee Science-ISSN 1984-3909, 8(2), 227-237, 2013.

BOTELHO, F. M.; GRANELLA, S. J.; CAMPOS, S. C. (d); GARCIA, T. R. B. **Influência da temperatura de secagem sobre as propriedades físicas dos grãos de soja.** Engenharia na Agricultura, Viçosa, v. 23, n. 3, p. 212-219. 2015.

BOTELHO, F.M.; HAUTH, M.R.; HOSCHER, R.H.; BOTELHO, S.C.C. (d). **Modelagem matemática da contração volumétrica de grãos de soja durante o processo de secagem.** Revista Engenharia na Agricultura, v.26, n.01, p.1-12, 2018.

BOTELHO, F. M.; HOSCHER, R. H.; HAUTH, M. R.; BOTELHO, S. C. C. (d). **Cinética de secagem de grãos de soja: influência varietal.** Engenharia na Agricultura, v. 26, n. 1, p. 13-25, 2018.

BRAGA, M.E.D. **Estudo da Histerese entre as isotermas de sorção e dessorção do Milho BR-451.** Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) – Universidade Federal de Paraíba, Campina Grande, 1991.

BRASIL. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. **Regras para Análise de Sementes.** Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. Secretaria de Defesa Agropecuária. Brasília, DF: Mapa/ACS, 2009. 398p.

BRISIBE, E. A.; UMOREN, U. E.; BRISIBE, F.; MAGALHÃES, P. M.; FERREIRA, J. F.; LUTHRIA, D.; PRIOR, R. L. **Nutritional characterisation and antioxidant capacity of different tissues of *Artemisia annua* L.** Food chemistry, v. 115, n. 4, p. 1240-1246, 2009.

BROOKER, D. B.; BAKER-ARKEMA, F. W.; HALL, C. W. **Drying and storage of grains and oilseeds.** Westport: AVI, p. 450, 1992.

BRUNAUER, S.; DEMING, L. S.; DEMING, W. E.; TELLER, E. **On a theory of the van der Waals adsorption of gases.** Journal of the American Chemical society, 62(7), 1723-1732. 1940.

BRUNETON, J. **Elementos de fitoquímica y de Farmacognosia**; Editora Acribia: Zaragoza Espanha, 1991.

CASTRO, M. D. L. (d); PRIEGO-CAPOTE, F. **Soxhlet extraction: past and present panacea**. Journal of Chromatography A, v. 1217, p. 2383-2389, 2010.

CORADI, P.C.; FERNANDES, C.H.P.; HELMICH, J.C. **Adjustment of mathematical models and quality of soybean grains in the drying with high temperatures**. Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental, v.20, n.4, p.385-392, 2016.

CORRÊA, P. C.; OLIVEIRA, G. H. H.; BOTELHO, F. M.; GONELI, A. L. D.; CARVALHO, F. M. **Modelagem matemática e determinação das propriedades termodinâmicas do café (Coffea arabica L.) durante o processo de secagem**. Revista Ceres, v. 57, p. 595-601, 2010.

CORREA, P.C.; BOTELHO, F.M.; BOTELHO, S.C.C. (d); GONELI, A.L.D. **Isotermas de sorção de água de frutos de Coffea canéfora**. Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental, v.18, n.10, p.1047–1052, 2014.

CORREA, P.C.; RESENDE, O.; RIBEIRO, D.M. **Isotermas de sorção das espigas de milho: obtenção e modelagem**. Revista Brasileira de Milho e Sorgo, v.4, n.1, p.126-134,2005.

COSTA, L. M.; RESENDE, O.; JUNIOR, W. N. F.; OLIVEIRA, D. E. C.; SILVA, I. O. F. **Isotermas e calor isostérico de dessorção das sementes de tungue**. Revista Principia-Divulgação Científica e Tecnológica do IFPB, no 54, p. 163-171, 2021.

DEDAVID, B. A.; GOMES, C. I.; MACHADO, G. **Microscopia eletrônica de varredura: aplicações e preparação de amostras: materiais poliméricos, metálicos e semicondutores [recurso eletrônico]**. Porto Alegre: EDIPUCRS, 60p. 2007.

EGLI, D.B. **Seed Biology and Yield of Grain Crops**. Plant and Soil Sciences Faculty Book Gallery. 2017.

FAKAYODE, O. A.; AJAV, E. A. **Process optimization of mechanical oil expression from Moringa (Moringa oleifera) seeds**. Industrial Crops and Products, v. 90, p. 142-151, 2016.

FARIA, R.Q.; TEIXEIRA, I.R.; DEVILLA, I.A.; ASCHERI, D.P.; RESENDE, O. **Cinética de secagem de sementes de crambe**. Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental, v. 16, n. 5, p. 573-583, 2012.

FERNANDES, T. J.; PEREIRA, A. A.; MUNIZ, J. A.; SAVIAN, T. V. **Seleção de modelos não lineares para a descrição das curvas de crescimento do fruto do cafeeiro**. Coffe Science, Lavras, v.9, n.2, p. 207-215, abr./jun. 2014.

FOUST, A.S.; WENZEL, L.A.; CLUMP, C.W.; MAUS, L.; ANDERSEN, L.B. **Princípios das operações unitárias**. Guanabara Dois, Rio de Janeiro, 1982.

FREITAS, L. S. **Desenvolvimento de procedimentos de extração do óleo de semente de uva e caracterização química dos compostos extraídos.** Tese (Doutorado em Química), Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2007.

GAONKAR, V.; ROSENTRATER, K. A.; **Soybean.** In: PAN, Z.; ZHANG, R.; ZICARI, S. (ed.). *Integrated processing technologies for food and agricultural by-products.* Massachusetts: Academic Press, p. 73-104, 2019.

GARCÍA-AYUSO, L. E.; VELASCO, J.; DOBARGANES, M. C.; CASTRO, M. D. L. (d). **Determination of the oil content of seeds by focused microwave-assisted soxhlet extraction.** *Chromatographia*, v. 52, n. 1, p. 103-108, 2000.

GONELI, A. L. D.; CORRÊA, P. C.; MAGALHÃES, F. E. A.; BAPTESTINI, F. M. **Contração volumétrica e forma dos frutos de mamona durante a secagem.** *Acta Scientiarum. Agronomy*, v.33, p.1-8, 2011.

GREENSPAN, L. **Humidity fixed points of binary saturated aqueous solutions.** *Journal of research of the National Bureau of Standards. Section A, Physics and chemistry*, v. 81, n. 1, p. 89, 1977.

HERRERO, M.; CIFUENTES, A.; IBANEZ, E. **Sub-and supercritical fluid extraction of functional ingredients from different natural sources: plants, foodby-products, algae and microalgae: a review.** *Food Chemistry*, v. 98, p. 136-148, 2006.

HOEKSTRA, F.A.; GOLOVINA, E.A.; BUITINK, J. **Mechanisms of plant desiccation tolerance.** *Trends in Plant Science*, London, v.6, n.9, p.431-438, Sept. 2001.

IOSSI, E.; SADER, R.; MORO, F. V.; BARBOSA, J. C. **Maturação fisiológica de sementes de *Phoenix roebelenii* O'Brien.** *Revista Brasileira de Sementes*, 29, 147-154. 2007.

ISKANDAR, I.; HADJU, V.; AS'AD, S.; NATSIR, R. **Effect of Moringa oleifera leaf extracts supplementation in preventing maternal anemia and low-birth-weight.** *International Journal of Scientific and Research Publications*, v. 5, n. 2, p. 1-3, 2015.

ISQUIERDO, E. P.; SIQUEIRA, V. C.; BORÉM, F. M.; ANDRADE, E. T. (d); LUZ, P. B. (da); QUEQUETO, W. D. **Isotermas de sorção e propriedades termodinâmicas de sementes de maracujá doce.** *Research, Society and Development*, v. 9, n. 5, p. e44952884-e44952884, 2020.

KAMAL-ELDIN, A. **Effect of fatty acids and tocopherols on the oxidative stability of vegetable oils.** *European Journal of Lipid Science and Technology*, v. 58, p. 1051-1061, 2006.

KEEY, R. B. **Drying: Principles and practice.** New York: Pergamon Press. 1972. 358p.  
KHAN, L.M.; HANNA, M.A. **Expression of soybean oil.** *Trans. ASAE* 27 (91), 190-194. 1984.

K. L.; FENNEMA, O. R. **Química de Alimentos de Fennema.** Porto Alegre: Artmed, 2010, 900p.

LALAS, S., TSAKNIS, J., 2002. **Extraction and identification of natural antioxidant from the seeds of the Moringa oleifera tree variety of Malawi.** J. Am. Oil Chem. Soc. 79, p.677–683, 2002.

LI, H. **Ultrasound and Microwave Assisted Extraction of Soybean Oil.** 2002. 77 f. Dissertação (Mestrado em Tecnologia da Engenharia de Biosistemas). Universidade do Tennessee, Tennessee, 2002.

LIU, S.; YANG, F.; ZHANG, C.; JI, H.; HONG, P.; DENG, D. **Optimization of process parameters for supercritical carbon dioxide extraction of Passiflora seed oil by response surface methodology.** The Journal of Supercritical Fluids, v. 48, n. 1, p. 9-14, 2009.

McCLEMENTS, D. J.; DECKER, E. A. **Lipídeos.** In: DAMODARAN, S.; PARKIN, MCMINN, W. A. M.; AL-MUHTASEB, A. H.; MAGEE, T. R. A. **Enthalpy–entropy compensation in sorption phenomena of starch materials.** Food Research International, v. 38, n. 5, p. 505-510, 2005.

MOHAPATRA, D.; RAO, P. S. **A Thin layer drying model of parboiled wheat.** J. Food Eng. 66: 513-518. 2005.

MORTOLA, V. B.; MEILI, L.; PINTO, L. A. A. **Determinação das isotermas de equilíbrio para cebola, gelatina e farinha de peixe: Análise dos modelos de GAB, BET e Henderson.** Revista Vetor, v.13, p.79-91, 2003.

MOYO, B.; MASIKA, P.J.; MUCHENJE, V. **Antimicrobial activity of Moringa oleifera (Lam.) root extract.** Afr. J. Biotechnol. 11, 2797–2802. 2012.

NAGATANI, T.; SAITO S.; SATO, M.; YAMADA, M. **Development of an ultra high resolution scanning electron microscope by means of a field emission source and in-lens system.** Scanning Microscopy. v.11, 901-909, 1987.

NASCIMENTO, V.R.G.; BIAGI, J.D.; OLIVEIRA, R.A. (d). **Modelagem matemática da secagem convectiva com radiação infravermelha de grãos de Moringa oleifera.** Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental, v.19, n.7, p686-692, 2015.

NELSON, D. L.; COX, M. M. **Princípios de bioquímica de Lehninger.** 6 ed. Porto Alegre: Artmed, 1298p. 2014.

NGUYEN, H.N., GASPILLO, P.D., MARIDABLE, J.B., MALALUAN, R.M., HINODE, H., SALIM, C., HUYNH, H.K.P. **Extraction of oil from Moringa oleifera kernels using supercritical carbon dioxide with ethanol for pretreatment: optimization of the extraction process.** Chem. Eng. Process. Process Intensif. 50, 1207–1213. 2011.

NINDO, C.; MWITHIGA, G. **Infrared drying.** In: Pan, Z.; Atungulu, G. G. **Infrared heating for food and agricultural processing.** New York: CRC Press, Cap. 5, p.89–97. 2011.

OJIAKO, E.N.; OKEKE, C.C. **Determination of antioxidant of Moringa oleiferaseed oil and its use in the production of a body cream.** Asian J. Plant Sci. Res. 3,1–4. 2013.

- OLIVEIRA, D. E. C. D.; RESENDE, O.; CHAVES, T. H.; SOUZA, K. A.; SMANIOTTO, T. A. D. S. **Propriedades termodinâmicas das sementes de pinhão-manso**. Biosci. j.(Online), p. 147-157, 2014.
- OLIVEIRA, D. E. C. D.; RESENDE, O.; SMANIOTTO, T. A. D. S.; SOUSA, K. A. D.; CAMPOS, R. C. **Propriedades termodinâmicas de grãos de milho para diferentes teores de água de equilíbrio**. Pesquisa Agropecuária Tropical, v. 43, p. 50-56, 2013.
- OLIVEIRA, D.E.C. (d); RESENDE, O.; BESSA, J.F.V.; KESTER, A.N. **Kinetic and thermodynamic properties of soybean grains during the drying process**. Journal of Agricultural Engineering, v.44.(s2):66. 2013.
- ONWUDE, D.I.; HASHIM, N.; JANIUS, R.B.; NAWI, N.M.; ABDAN, K. **Modeling the Thin-Layer Drying of Fruits and Vegetables: A Review**. Comprehensive Reviews in Food science and Food Safety, v.15, 2016.
- PALADA, M.C., CHANGL, L.C. **Suggested Cultural Practices for Moringa**. International Cooperators' Guide AVRDC. AVRDC pub # 03-545, pp. 1–5. 2003.
- 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, Davis, v.51, n.3, p.193-199, 2002.
- PERRY, R. H., BENSKOW, L. R., BEIMESCH, W. E. et al. **Perry's Chemical Engineers' Handbook**. 8ed. Nova Iorque: McGraw-Hill, 2008.
- PREMI, M.; SHARMA, H. K. **Oil extraction optimization and kinetics from Moringa oleifera (PKM 1) seeds**. International Journal of Agriculture and Food Science Technology, v. 4, n. 4, p. 371-378, 2013.
- RAMOS, L. P.; DA SILVA, F. R.; MANGRICH, A. S.; CORDEIRO, C. S. **Tecnologias de produção de biodiesel**. Revista virtual de química, v. 3, n. 5, p. 385-405, 2011.
- RASHID, U.; ANWAR, F.; MOSER, B. R.; KNOTHE, G. **Moringa oleifera oil: A possible source of biodiesel**. Bioresource technology, v. 99, n. 17, p. 8175-8179, 2008.
- RATTI, C. **Shrinkage during drying of food stuffs**. Journal of food Engineering, London, v.23, n.1, p.91-105,1994.
- RAVANI, A.; PRASAD, R. V.; GAJERA, R. R.; JOSHI, D. C. **Potentiality of Moringa oleifera for food and nutritional security-A review**. Agricultural Reviews, v. 38, n. 3, 2017.
- RESENDE, J.V.; CAL-VIDAL, J. **Frutos de melão submetidos a pré-tratamentos como hidrocolóides: efeitos do processo de congelamento sobre a microestrutura celular**. Ciencia e Tecnologia de Alimentos, Campinas, v.22, n.3, p.295-304, 2002.
- RIBEIRO, T. D.;SAVIAN, T. V.;FERNANDES, T. J.;MUNIZ, J. A. **The use of the nonlinear models in the growth of pears of 'Shinseiki' cultivar**. Ciência Rural, 48, 2017.

ROMERO-PENÑA, L. M.; KIECKBUSCH, T. G. **Influência de condições de secagem na qualidade de fatias de tomate.** Brazilian Journal of Food Technology, Campinas, v.6, n.1, p.69-76, 2003.

SAATH, R.; BORÉM, F.M.; ALVES, E.; TAVEIRA, J.H.S. (d); MEDICE, R.; CORADI, P.C. **Microscopia eletrônica de varredura do endosperma de café (*Coffea arábica* L.) durante o processo de secagem.** Ciênc. agrotec., Lavras, v. 34, n. 1, p. 196-203, 2010.

SAKAI, N.; MAO, W. **Infrared heating.** In: Sun, D. (ed.) **Thermal food processing: New technologies and quality issues.** New York: CRC Press, Cap.16, p.493-522. 2006.

SANTOS, S. G. F. (dos); ALMEIDA, V. G.; CRUZ, D. R. C.; RODOVALHO, R. S. **Propriedades termodinâmicas da adsorção de água de grãos de *Coffea arabica* L.** Científica, v. 48, n. 4, p. 302-310, 2020.

SILVA, Â.; CARMO, M. G.; OLIVARES, F. L.; PEREIRA, A. J. **Termoterapia via calor seco no tratamento de sementes de tomate: eficiência na erradicação de *Xanthomonas campestris* pv. vesicatoria e efeitos sobre a semente.** Fitopatologia Brasileira, 27, 586-593. 2002.

SILVA, F. B. (da), SANTOS, S. G. F. (dos), ALMEIDA, V. G., REZENDE, G., XAVIER, I. R. R., & RODOVALHO, R. S. **Cinética de secagem e qualidade fisiológica de sementes de milho.** Revista de Ciências Agrárias, v. 45, n. 1-2, p. 24-33, 2022.

SILVA, F.P. (d). **Cinética de secagem, higroscopicidade e propriedades físicas dos grãos de niger (*Guizotia abyssinica* (L.f.) Cass.).** Dourados, MS: UFGD, 2017.

SILVA, H. W. D.; COSTA, L. M.; RESENDE, O.; OLIVEIRA, D. E. (d); SOARES, R. S.; VALE, L. S. **Higroscopicidade das sementes de pimenta (*Capsicum chinense* L.).** Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental, v. 19, p. 780-784, 2015.

SILVA, P. D. A.; DINIZ, K. A.; OLIVEIRA, J. A.; PINHO, É. V. D. R. V. **Análise fisiológica e ultra-estrutural durante o desenvolvimento e a secagem de sementes de soja.** Revista Brasileira de Sementes, 29, 15-22. 2007.

SILVA, S. N. (do); GOMES, J. P.; MATOS, J. D. A. P. (d); MORAES, S. M. (d); SOUSA, R. S. O. W. (d); CUNHA SIQUEIRA, E. (da). **Composição físico-química de sementes de *Moringa* oriundas de dois estados do nordeste Brasileiros.** Revista de Agroecologia no Semiárido, [S.l.], v. 4, n. 5, p. 63-71, 2020.

SINGH, J.; BARGALE, P. C. **Development of a small capacity double stage compression screw press for oil expression.** Journal of food engineering, v. 43, n. 2, p. 75-82, Feb. 2000.

SIQUEIRA, V. C.; RESENDE, O.; CHAVES, T. H. **Drying kinetics of *Jatropha* seeds.** Revista Ceres, v.59, p.171-177, 2012.

SOLOMONS, T. & FRYHLE, C. Química Orgânica vol. 1 e vol. 2. 10ª. Edição. Rio de Janeiro: editora LTC, 2012.

SOUSA, I. F.; KUNZLE NETO, J. E.; MUNIZ, J. A.; GUIMARÃES, R. M.; SAVIAN, T. V.; MUNIZ, F. R. **Fitting nonlinear autoregressive models to describe coffee seed germination.** *Ciência Rural*, v. 44, p. 2016-2021, 2014.

TEIXEIRA, L. P.; ANDRADE, E. T. D.; DEVILLA, I. A. **Isosteric heat, entropy, and gibbs free energy of pumpkin seeds (*Cucurbita moschata*).** *Engenharia Agrícola*, v. 38, p. 97-102, 2018.

TSAKNIS, J.; LALAS, S.; GERGIS, V.; SPILLOTIS, V. **A total characterisation of Moringa oleifera Malawi seed oil.** *Rivista Italiana delle Sostanze Grasse*, v. 75, p. 21-28, 1998.

ULLMANN, R.; RESENDE, O.; RODRIGUES, G. B.; CHAVES, T. H.; OLIVEIRA, D. E. C. (d). **Qualidade fisiológica das sementes de sorgo sacarino submetidas à secagem e ao armazenamento.** *Revista Engenharia na Agricultura*, v. 26, n. 4, p. 313-321, 2018.

UPADHYAY, P.; YADAV, M.K.; MISHRA, S.; SHARMA, P.; PUROHIT, S. **Moringa oleifera: a review of the medical evidence for its nutritional and pharmacological properties.** *Int. J. Res. Pharm. Sci.* 5, 12–16. 2015.

VISENTAINER, J. V.; FRANCO, M. R. B. **Ácidos graxos em óleos e gorduras: identificação e quantificação.** 1 ed. São Paulo: Varela, 2006.

WANKHADE, P. K.; SAPKAL, R. S.; SAPKAL, V. S. **Drying characteristics of okra slices on drying in hot air dryer.** *Procedia Engineering*, v. 51, p. 371-374, 2013.

WOLF, M.; WALKER, J. E.; KAPSALIS, J. G. **Water sorption hysteresis in dehydrated food.** *Journal of Agricultural Food Chemistry*, v.20, p.1073-1077, 1972.

YOUDIM, K. A.; MARTIN, A.; JOSEPH, J. A. **Essential fatty acids and the brain: possible health implications.** *International Journal of Developmental Neuroscience*, v. 18, p. 383-399, 2000.

ZAGUI, G.; CARVALHO NERES, D. C. **Danos mecânicos e qualidade fisiológica no beneficiamento de sementes de soja, TMG 1180 RR.** *Connection line-revista eletrônica do Univag*, (18), 2018.

**SEGUNDA PARTE – ARTIGOS**



## ARTIGO 1 - EFEITOS DA SECAGEM DE GRÃOS DE *Moringa oleifera* Lam. NA EFICIÊNCIA DA EXTRAÇÃO MECÂNICA DO ÓLEO.

### RESUMO

*Moringa oleifera* L. é uma planta nativa do norte da Índia, foi introduzida no Brasil no ano 1950. Raízes, folhas, flores, sementes são utilizadas de forma medicinal, alimentar e industrial. O objetivo deste trabalho foi estudar a cinética de secagem a 40, 50 e 60 °C, analisar o aumento da temperatura do ar de secagem com a contração volumétrica e o dano celular e posterior relação com o rendimento da extração do óleo e eficiência da prensa. Foram utilizados grãos maduros provenientes do Estado do Pará. Secados em secador convectivo com ar forçado e com os dados experimentais ajustados a doze modelos matemáticos. Comparou a contração volumétrica através da massa específica e a danificação celular através da Microscopia Eletrônica de Varredura. O óleo foi extraído em prensa a frio e calculado o rendimento de extração e eficiência da prensa para cada tratamento. Como resultado obteve-se que o melhor modelo para a temperatura de 40 °C foi o de Midilli com R<sup>2</sup> de 99,91 e P de 4,18 e para 50 e 60 °C o modelo de Exponencial Dois Termos e Valcam com R<sup>2</sup> de 99,99 e 99,96 e P de 0,44 e 1,37, respectivamente. O aumento da temperatura do ar de secagem causou uma maior contração e desorganização celular, dado observado através do MEV. O aumento da temperatura do ar de secagem resultou em maiores rendimentos e eficiências na extração, diferenciando-se significativamente a temperatura de 60 °C das demais. Para o tratamento sem secagem, 40, 50 e 60 °C os rendimentos foram 8,90, 8,32, 7,84 e 17,53 %, respectivamente, e a eficiência de 37,69, 37,54, 34,16 e 79,50 %, respectivamente. Como conclusão se tem que a cinética de secagem dos grãos de *Moringa* pode ser representada por modelos matemáticos, assim o aumento da temperatura do ar de secagem provoca maior disponibilidade do óleo e conseqüentemente maiores rendimentos de extração e eficiências da prensa.

**Palavras-chaves:** Secagem, danos do processamento, modelos matemáticos, extração.

### 1. INTRODUÇÃO

*Moringa oleifera* (Moringaceae) é uma planta nativa do nordeste da Índia (TSHABALALA et al., 2019), família de gênero único o qual é composto de 14 espécies (ANWAR et al., 2007). Hoje em dia esta planta cresce ao redor do mundo onde se tem climas tropicais e subtropicais (GANDJI et al., 2020). No ano 1950 foi introduzida no Brasil como arvore ornamental, mas pelas diversas utilidades foi disseminada para diferentes estados (BEZERRA et al., 2004).

Esta planta é qualificada como multiuso, já que são aproveitadas diferentes partes dela, com propósito humano ou animal tanto na alimentação como para outras finalidades. Alguns exemplos de uso são: folhas: medicina natural, nutrição animal e humano, potencializador de crescimento de plantas e biopesticidas; flores: medicina natural e culinária, raízes: efeito antimicrobiano, óleo do grão: óleo comestível, biodiesel, cosméticos e lubrificantes para

maquinaria fina. A torta de Moringa após a extração de óleo é utilizada como coagulante natural para o tratamento de águas residuárias (NDABIGENGESERE & NARASIAH, 1998; MOYO et al., 2012; LEONE et al., 2015; KALAPPURAYIL E JOSEPH, 2017).

*Moringa oleifera* contém aproximadamente 40% de óleo no grão, sendo esta rica em ácido palmítico, esteárico, beénico e oleico. Este último, com teor maior a 70%, esta composição do óleo permite fritura em alta temperatura e armazenagem por longos períodos, além de substâncias biologicamente ativas como o tocoferol, esterol, carotenóides e compostos poli-fenólicos (ANWAR et al.,2005; ABDULKARIM et al., 2007; SAINI et al.,2016).

A secagem é um processo de transferência de calor e massa o qual permite retirar parcialmente a água dos grãos. A convecção do ar aquecido permite retirar água do produto substituindo o ar saturado por um ar seco. Entre os fatores que influenciam na secagem os que têm relação com o processo são temperatura do ar, umidade relativa, velocidade do ar de secagem, pressão do sistema e os relacionados ao produto como espessura e área superficial (HELDMAN & HARTEL, 2000; NINDO & MWITHIGA, 2011; SIQUEIRA et al., 2012).

As práticas pós-colheita permitem manter a qualidade dos produtos agrícolas com a retirada da água a níveis onde reduza o metabolismo, as atividades enzimáticas e diminuição do desenvolvimento de microrganismos permitindo assim uma armazenagem segura, além de permitir a redução de massa e volume, que pode trazer benefícios no espaço utilizado para armazenamento e transporte (ULLMANN et al., 2010; NASCIMENTO et al., 2015).

A informação obtida no processo de transferência de calor e massa entre o material biológico e o elemento de secagem é importante para o dimensionamento de secadores, determinação da taxa de secagem e análise da qualidade do processo (CORRÊA et al., 2010). Modelos matemáticos utilizam aquela informação obtida no processo de transferência de calor e massa para estimar a perda de teor de água ao longo do processo (ARAÚJO et al., 2017). Existem distintos métodos que permitem representam esse processo de secagem em alimentos, são classificados em teóricos, empíricos e semiempíricos (BROOKER et al., 1992).

Estudos relacionados à secagem e modelagem de produtos agrícolas são amplamente difundidos, podendo-se citar alguns como: ajuste dos modelos matemáticos para cinética de secagem em fatias de maçã, sendo o modelo de Midilli o mais representativo (TOGRUL, 2005) e os modelos de Pabis Modificado, Page e Handerson para sementes de pinhão-mansão (RESENDE et al., 2011).

As perdas qualitativas do produto podem ser elevadas pelo excesso de aquecimento, umidade inicial e final e velocidade do ar de secagem (SANTOS CARDOSO et al., 2021). No

trabalho de Araújo et al. (2020), foram secadas sementes de *Moringa oleifera* Lam. com temperaturas de secagem controladas de 40, 55 e 70 °C, a contração volumétrica foi relacionado com o aumento da temperatura, que contribuiu com a baixa eficiência da prensa e o rendimento de óleo extraído.

Mendonça et al. (2020), avaliando a temperatura de secagem em duas variedades de sementes de andiroba (*Carapa surinamensis* e *Carapa guianensis*) demonstrou que o maior rendimento de óleo extraído por prensa foi na temperatura de 40 °C e a 10% de teor de água.

Em função do exposto, o objetivo deste trabalho foi avaliar a cinética de redução de água no processo de secagem em diferentes temperaturas, e escolher o melhor modelo matemático para representar essa redução, além de relacionar o processo com as mudanças estruturais nos grãos e eficiência de extração do óleo.

## 2. MATERIAL E MÉTODOS

Os experimentos foram realizados no Laboratório de Processamentos de Produtos Agrícolas e no Laboratório de Plantas Oleaginosas, Óleos, Gorduras e Biodiesel, ambos pertencentes ao Departamento de Engenharia Agrícola e no Laboratório de Microscopia Eletrônica e Análise Ultraestrutural da Universidade Federal de Lavras (UFLA).

Os grãos de *Moringa oleifera* Lam. foram comprados na empresa Controle Consultoria Ambiental localizada no Estado de Pará. A colheita das vagens foi feita manualmente depois de atingir o ponto de maturidade fisiológica, ao alcançarem a cor marrom escuro (AGUSTINI, 2015). Os grãos foram retirados das vagens, colocados dentro de caixa de isopor e enviadas até a UFLA. Ao chegar ao Laboratório de Processamento de Produtos Agrícolas os grãos foram homogeneizados e divididos em 4 tratamentos: grãos úmidos sem secagem e secagem artificial a 40, 50 e 60 °C. A secagem artificial foi realizada até os grãos atingirem um teor de água de 6%. O teor de água antes e após a secagem foi obtido mediante o método de estufa a  $105 \pm 3$  °C por 24 horas (BRASIL, 2009). O experimento foi em triplicadas com  $\pm 0,55$  kg em cada.

A secagem artificial foi em secador mecânico de laboratório com circulação de ar forçada ( $0,33 \text{ m.s}^{-1}$ ) e em camada fixa, a medição da velocidade do ar foi feita por um anemômetro de pás localizado na entrada da câmara de secagem. A medição da temperatura foi feita por termômetro de mercúrio localizado na bandeja do secador.

Para medir a contração volumétrica foi determinada a massa específica aparente em  $\text{kg.m}^{-3}$  antes e após a secagem para cada tratamento segundo as Regras para Análises de

Sementes (BRASIL, 2009). Para determinação do peso hectolítrico foi utilizada uma balança de peso hectolítrico com capacidade de um litro de grãos, conforme equação 1:

$$P_{ap} = \frac{M_s}{V_t} \quad (1)$$

Onde:

$P_{ap}$  = massa específica aparente ( $\text{kg.m}^{-3}$ );

$M_s$  = massa dos grãos (kg);

$V_t$  = volume do recipiente ocupado pelos grãos ( $\text{m}^{-3}$ ).

Foi realizada análise ultraestrutural por meio da técnica de microscopia eletrônica de varredura para os grãos em cada tratamento antes e depois da secagem, este procedimento foi realizado com a finalidade de determinar se existe algum dano ou modificação na estrutura do grão depois do processamento. Foi realizado segundo a metodologia utilizada em SAATH et al. (2010).

Um grão de cada tratamento foi escolhido aleatoriamente. Para cada grão de cada tratamento foi feito o corte transversal do endosperma de aproximadamente 1 mm de espessura, imersos em solução fixadora de Karnovsky modificado (Glutaraldeído 2,5%, Paraformaldeído 2,0%, Tampão Cacodilato 0,05M, pH 7,2). Logo os cortes foram retirados da solução e diferidos para líquido crio-protetor (glicerol 30%) por 30 minutos e cortadas longitudinalmente em nitrogênio. Os cortes obtidos foram diferidos para uma solução de tetróxido de ósmio 1% (3 gotas) e água, cobertos por uma hora, lavados com água destilada (três vezes) e desidratados em série de acetona (25, 50, 75, 90 e 100%, por três vezes) para logo ser levados ao aparelho de ponto crítico. Os cortes foram levados para suportes de alumínio (stubs), cobertos com ouro para logo ser observados em microscópio eletrônico de varredura LEO EVO 40 XVP. As condições de trabalho foram de 20 kv e distância entre 7 e 15 mm, as imagens foram gravadas e processadas no Software Photopaint do pacote Corel Draw 12.

Foram ajustados modelos matemáticos aos dados experimentais de cinética de secagem por meio do método Quase-Newton com a ajuda do programa Statistica 5.0®, os modelos testados são apresentados na tabela 1.

Tabela 1 - Modelos Matemáticos aplicados aos dados experimentais para determinação da cinética de secagem.

Nome do modelo	Modelo	Equação
Aproximação da difusão <sup>1</sup>	$RU = a \exp(-kt) + (1 - a) \exp(-kbt)$	(2)
Dois termos <sup>2</sup>	$RU = a \exp(-k_0 t) + b \exp(-k_1 t)$	(3)
Exponencial dois termos <sup>3</sup>	$RU = a \exp(-k t) + (1 - a) \exp(-k a t)$	(4)
Henderson & Pabis <sup>4</sup>	$RU = a \exp(-k t)$	(5)
Henderson & Pabis modificado <sup>5</sup>	$RU = a \exp(-k t) + b \exp(-k_0 t) + c \exp(-k_1 t)$	(6)
Midilli <sup>6</sup>	$RU = a \exp(-k t^n) + b t$	(7)
Newton <sup>7</sup>	$RU = \exp(-k t)$	(8)
Page <sup>8</sup>	$RU = \exp(-k t^n)$	(9)
Thompson <sup>9</sup>	$RU = \exp\{[-a - (-a^2 + 4 b t)^{0,5}] (2 b)^{-1}\}$	(10)
Valcam <sup>10</sup>	$RU = a + b t + c t^{1,5} + d t^2$	(11)
Verma <sup>11</sup>	$RU = -a \exp(-k t) + (1 - a) \exp(-k_1 t)$	(12)
Wang & Sing <sup>12</sup>	$RU = 1 + a t + b t^2$	(13)

(Yaldiz; Ertekin, 2001)<sup>1</sup>; (Henderson, 1974)<sup>2</sup>; (Sharaf-Eldeen et al., 1980)<sup>3</sup>; (Henderson & Pabis, 1961)<sup>4</sup>; (Karathanos, 1999)<sup>5</sup>; (Midilli et al., 2002)<sup>6</sup>; (Lewis, 1921)<sup>7</sup>; (Page, 1949)<sup>8</sup>; (Thompson et al., 1968)<sup>9</sup>; (Siqueira; Resende & Chaves, 2013)<sup>10</sup>; (Verma et al., 1985)<sup>11</sup>; (Wang & Singh, 1978)<sup>12</sup>.

RU: razão de teor de água; T: tempo de secagem (h); k, k<sub>0</sub> e k<sub>1</sub> constante de secagem (h<sup>-1</sup>); a, b, c, d, n: coeficientes do modelo.

Para determinar a razão de teor de água durante a secagem, foi utilizada a equação 14:

$$RU = \frac{U - U_e}{U_i - U_e} \quad (14)$$

Em que:

RU = razão de teor de água do produto (adimensional);

U = teor de água médio do produto no tempo (kg de água. kg de matéria seca<sup>-1</sup>);

U<sub>i</sub> = teor de água inicial do produto (kg de água. kg de matéria seca<sup>-1</sup>);

U<sub>e</sub> = teor de água de equilíbrio do produto (kg de água. kg de matéria seca<sup>-1</sup>).

O teor de água de equilíbrio do produto para as condições de estudo de temperatura e umidade relativa do ar de secagem foi calculada pela equação de Sigma Copace, equação que melhor se ajustou aos dados experimentais neste trabalho. Segundo a equação 15:

$$Ue = \exp(-3,979 - (0,005 T) + (0,961 \exp(UR))) \quad (15)$$

Em que:

Ue = teor de água de equilíbrio do produto (b.s.);

UR = umidade relativa do ar de secagem (decimal);

T = temperatura do ar de secagem (°C).

Os modelos foram escolhidos segundo a magnitude do coeficiente de determinação ajustado ( $R_a^2$ ), erro médio relativo (P) e erro médio estimado (SE). Conforme as equações 16, 17 e 18.

Para se comparar modelos com diferentes números de parâmetros foram utilizados o coeficiente de determinação ajustado considerando a quantidade de parâmetros do modelo. No modelo estimado o coeficiente de determinação  $R^2$  não faz ponderações quanto aos parâmetros (RATKOWSKI, 1983; DRAPER & SMITH, 1998).

$$R_a^2 = 1 - \left[ \frac{(n - i)(1 - R^2)}{n - p} \right] \quad (16)$$

Em que:

$R_a^2$  = Coeficiente de determinação ajustado.

$R^2$  = Coeficiente de determinação.

n = número de observações.

i = está relacionado com o ajuste do intercepto da curva, sendo igual a 1 se houver intercepto e igual a 0 se não houver intercepto no modelo.

p = quantidade de parâmetros.

A equação ajusta o número de variáveis entre um modelo e outro e nos permite fazer uma comparação homogênea.

$$P = \frac{100}{n} \sum \frac{|RU_{obs} - RU_{est}|}{RU_{obs}} \quad (17)$$

$$SE = \sqrt{\frac{\sum (RU_{obs} - RU_{est})^2}{GLR}} \quad (18)$$

Em que:

$RU_{obs}$  = razão de teor de água observado experimentalmente;

$RU_{est}$  = razão de teor de água estimado pelo modelo;

$n$  = número de observações experimentais;

$GLR$  = graus de liberdade do modelo (número de observações experimentais menos número de coeficientes do modelo).

Segundo Corrêa, Machado & Andrade (2001) a Taxa de Redução de Água é definida como a massa de água perdida em razão da matéria seca e o tempo. Para a determinação do TRA foi utilizada a equação 19:

$$TRA = \frac{(Ma_o - Ma_i)}{(Ms * (t_i - t_o))} \quad (19)$$

Em que:

$TRA$  = Taxa de redução de água, ( $kg \cdot kg^{-1} \cdot h^{-1}$ );

$Ma_o$  = massa de água total anterior, (kg);

$Ma_i$  = massa de água total atual, (kg);

$Ms$  = matéria seca, (kg);

$t_o$  = tempo total de secagem anterior, (h);

$t_i$  = tempo total de secagem atual, (h).

A extração do óleo foi uma extração em frio através de prensa mecânica tipo expeller da marca Scott Tech do modelo ERT 50 a uma mesma pressão. A determinação da eficiência ( $Ef$ , %) da prensa e o rendimento ( $Rm$ , %) da extração mecânica foi calculado por meio da diferença do teor lipídico inicial do grão e residual da torta, pelo método Soxhlet com solvente hexano (ARAUJO et al., 2019), e para isso foram utilizadas as equações 20 e 21:

$$Rm = Tg - Tt \quad (20)$$

Em que,

Rm = Rendimento de extração mecânica do óleo (%)

Tg = Teor de óleo do grão (%)

Tt = Teor de óleo da torta (%)

$$Ef = \frac{(Rm \times 100)}{Tg} \quad (21)$$

Em que,

Ef = Eficiência da prensa mecânica (%)

Rm = Rendimento de extração mecânica de óleo (%)

Tg = Teor de óleo do grão (%)

As análises físicas e extrações foram feitas em três repetições. Foram realizadas análises de variância para todos os tratamentos a um nível de significância de 5%, quando houve diferença significativa entre os tratamentos, foram comparadas as medias das variáveis resposta pelo teste de Tukey por meio do programa SISVAR 5.5, com 5% de significância.

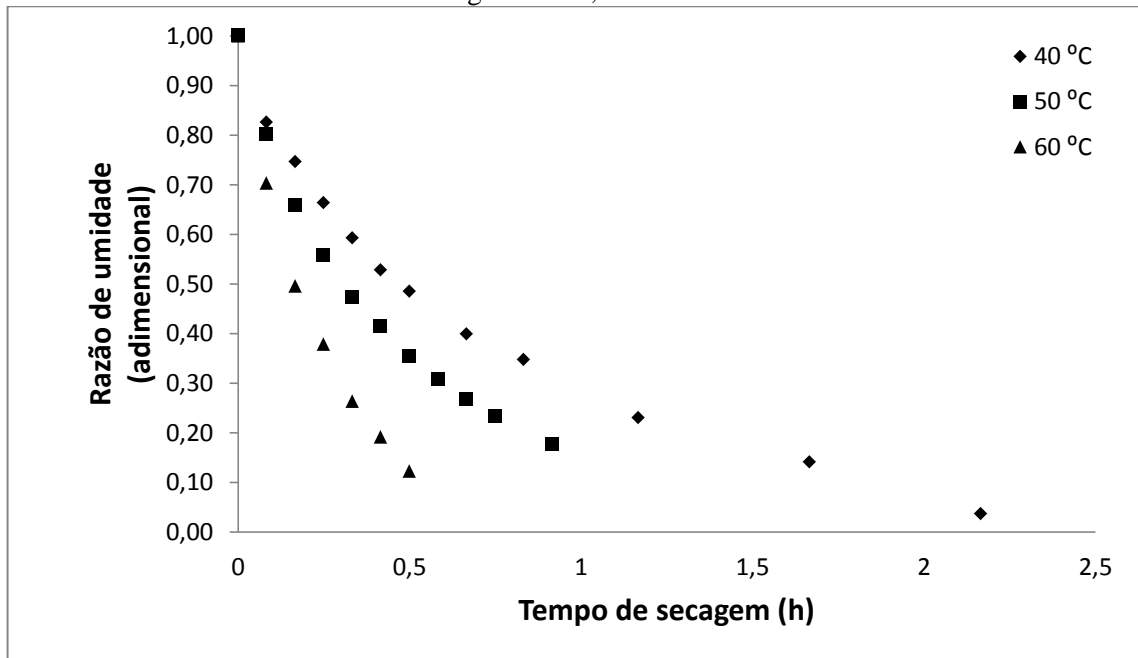
### 3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

#### Cinética de Secagem e Modelagem Matemática

Na figura 1 pode se observar a cinética de secagem para as diferentes temperaturas de ar de secagem ao longo do tempo. Percebe-se que com o aumento da temperatura os grãos de *Moringa oleifera* L. secam de forma mais acelerada. Para um teor de água final de aproximadamente 6 % a temperatura de ar de secagem de 60 °C retirou a água 4,34 e 1,84 vezes mais rápido que as temperaturas de 40 e 50 °C, respectivamente.



Figura 1 - Cinética de secagem; Razão de Umidade em função do tempo para as temperaturas de ar de secagem de 40, 50 e 60 °C.



Fonte: Do autor (2023).

Com os dados experimentais de cinética de secagem representados pela razão de umidade (RU) em função do tempo (t) foram ajustados 11 modelos matemáticos para as três temperaturas de secagem; 40, 50 e 60 °C descritos na tabela 1. Os melhores modelos para cada temperatura de secagem foram escolhidos segundo seu ajuste aos dados experimentais em razão do coeficiente de determinação ( $R^2$ , %), erro médio relativo (P, %) e erro médio estimado (S, decimal), os quais são descritos na tabela 2.

Tabela 2 – Parâmetros estimados dos modelos de Midilli, Exponencial dois Termos e Valcam; coeficiente de determinação ( $R^2$ ), erro médio relativo (P) e erro médio estimado (SE) para cada temperatura de secagem.

Temperatura (°C)	Modelo	a	k	b	k0	c	K1	n	D	$R^2$ (%)	P (%)	SE (decimal)
40	Midilli	1,000	1,124	-0,042	-	-	-	0,737	-	99,907	4,182	0,020
50	Exponencial dois Termos	0,212	7,661	-	-	-	-	-	-	99,992	0,438	0,005
60	Valcam	1,001	-	-5,724	-	8,287	-	-	-3,781	99,959	1,374	0,011

Fonte: Do autor (2023)

Valores do coeficiente de determinação ( $R^2$ ) superiores que 90 %, e inferiores que 10 % para erro médio relativo (P) representam corretamente os dados experimentais (TEIXEIRA et al., 2012). Na tabela 2 observa-se que para a temperatura de 40 °C o melhor modelo foi o de Midilli e para 50 e 60 °C os modelos de Exponencial dois Termos e de Valcam com 99,91, 99,99 e 99,96 % para o coeficiente de determinação ( $R^2$ ), 4,18, 0,44 e 1,37 % para o erro

médio relativo (P) e 0,02, 0,005 e 0,01 para erro médio estimado (SE), respectivamente. Já por meio da equação 16 foi calculado o  $R^2_a$ , sendo 99,872 % para o modelo de Midilli a 40 °C, 99,991 e 99,9187 % para os modelos de Exponencial dois Termos e Valcam a 50 e 60 °C, respectivamente.

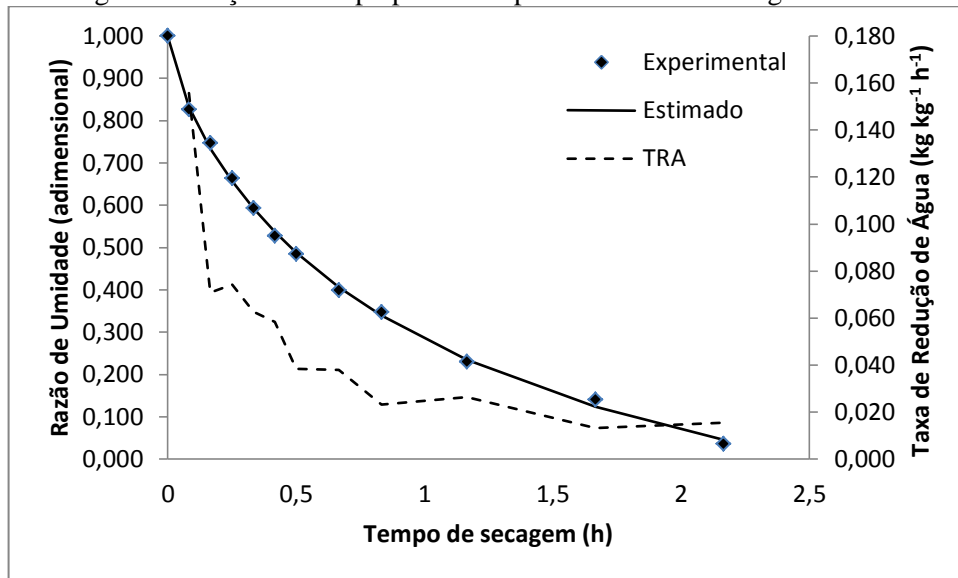
Cardoso et al. (2021) estudaram a cinética e modelagem de grãos de *Moringa oleifera* L. em secador convectivo de bandejas, para temperaturas de 60, 70 e 80 °C. O modelo que melhor se ajustou aos dados experimentais foi de Midilli, em outro estudo com temperaturas de ar de secagem de 40, 55 e 70 °C Araújo et al. (2020) encontrou um melhor ajuste no modelo de Exponencial de Dois Termos.

Entre os parâmetros nos modelos a variável “k” aumenta com o aumento da temperatura de secagem. Esta variável está relacionada à difusividade efetiva a qual aumenta com o aumento da temperatura (OLIVEIRA et al., 2015). Durante a avaliação dos melhores modelos para as diferentes temperaturas do ar de secagem se evidenciou este fenômeno, porém só foram apresentados os melhores modelos neste trabalho.

### **Taxa de redução de água (TRA)**

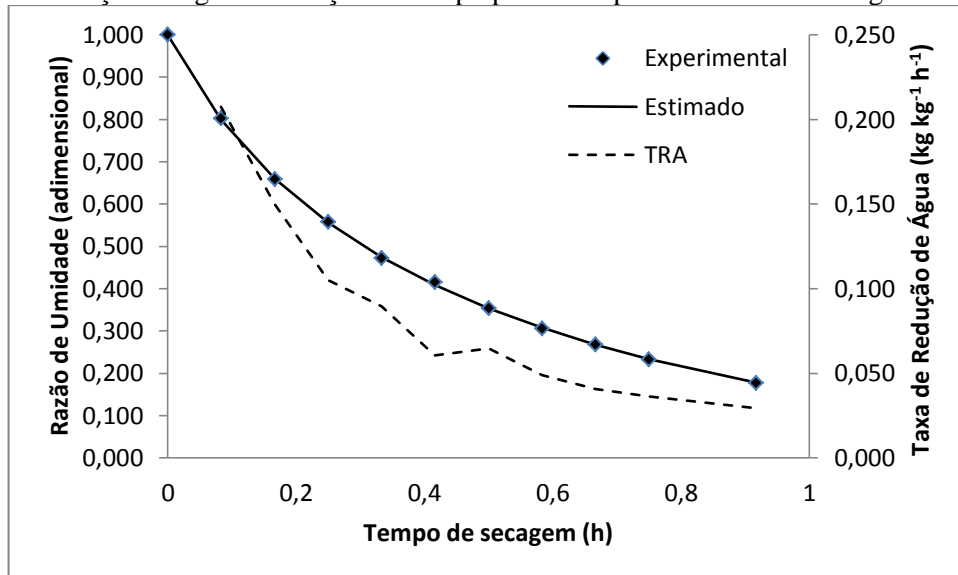
Nas figuras 2 a 4 estão apresentados os dados de cinética de secagem, representados pela razão de umidade (RU) em função do tempo para as diferentes temperaturas, nas mesmas figuras pode-se observar os valores estimados por cada modelo, além de apresentar a taxa de redução de água (TRA).

Figura. 2 – Razão de umidade (RU) experimental e estimado pelo modelo de Midilli. Taxa de redução de água em função do tempo para a temperatura de ar de secagem de 40 °C.



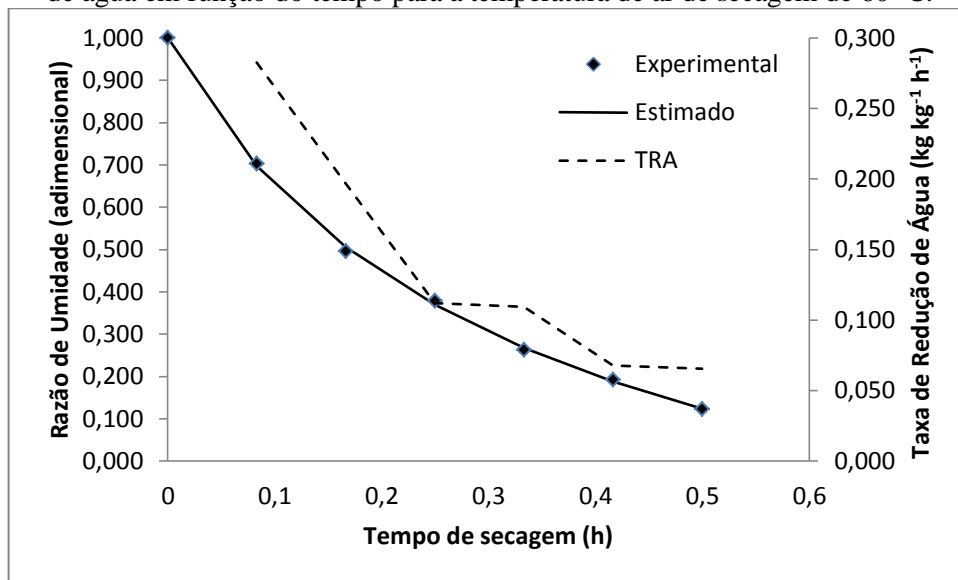
Fonte: Do autor (2023).

Figura 3 – Razão de umidade (RU) experimental e estimado pelo modelo de Exponencial dois termos. Taxa de redução de água em função do tempo para a temperatura de ar de secagem de 50 °C.



Fonte: Do autor (2023).

Figura 4 – Razão de umidade (RU) experimental e estimado pelo modelo de Valcam. Taxa de redução de água em função do tempo para a temperatura de ar de secagem de 60 °C.



Fonte: Do autor (2023).

Pode se observar nas figuras 2, 3 e 4 que a taxa de redução de água (TRA) em função do tempo apresentou uma tendência similar à cinética de secagem representada pela razão de umidade em função do tempo, indicando que a retirada de água foi uniforme. Nascimento et al. (2019) avaliaram o efeito da radiação infravermelha no ar de secagem com temperaturas de 30 a 58 °C em grãos de *Moringa oleifera* para uso de tratamentos de águas. Entre os resultados obtiveram taxas de secagem desde  $0,70 \times 10^{-3}$  a  $2,05 \times 10^{-3}$  kg kg<sup>-1</sup> min<sup>-1</sup>.

### Massa específica aparente

Na tabela 3 pode-se observar a massa específica aparente em (kg m<sup>-3</sup>) para as diferentes temperaturas de ar de secagem. Quando comparado ao tratamento sem secagem, percebe-se que houve efeito da temperatura do ar de secagem na redução da massa específica aparente nos grãos de *Moringa oleifera* L.

Tabela 3 – Massa específica aparente (kg m<sup>-3</sup>) dos grãos de *Moringa oleifera* L. para as diferentes temperaturas de ar de secagem.

Massa Especifica Aparente (kg m <sup>-3</sup> )				
	Sem secagem	40 °C	50 °C	60 °C
Média	183,244 a	154,668 b	159,200 b	158,872 b
CV (%)	2,63			

\*Os valores com as mesmas letras na fila não diferem entre si de acordo a teste de Tukey 5 %. CV: Coeficiente de variação.

Para os tratamentos 40, 50 e 60 °C não houve diferença significativa na massa específica aparente ( $\text{kg m}^{-3}$ ), indicando que nessas condições de temperatura do ar de secagem não ocorreu contração volumétrica nos grãos de *Moringa oleifera* L. Araújo et al. (2020) secaram grãos de *Moringa oleifera* L. com diferentes temperaturas do ar de secagem em 40, 55 e 70 °C. E observaram diferenças significativas na contração volumétrica à medida que a temperatura foi aumentando, com massas específicas para o grão sem secagem de  $137,0 \text{ kg m}^{-3}$ ,  $143,4 \text{ kg m}^{-3}$  para 40 °C,  $154,8 \text{ kg m}^{-3}$  para 55 °C e  $177,3 \text{ kg m}^{-3}$  para 70 °C.

### **Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV)**

A contração das células e desorganização dos compostos celulares podem ser observadas nas figuras de 5 a 8. Evidencia-se, nessas figuras, que com um aumento da temperatura os corpos de proteínas e gotículas de óleo movimentam-se de seus espaços originais para fora da célula, aumentando a maior disponibilidade deste nos processos de extração.

Figura 5 – Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) do endosperma dos grãos de *Moringa oleifera* L. sem secagem. Setas de cor verde: corpos de proteínas, cor azul: células sem dano, estrutura em padrões normais.

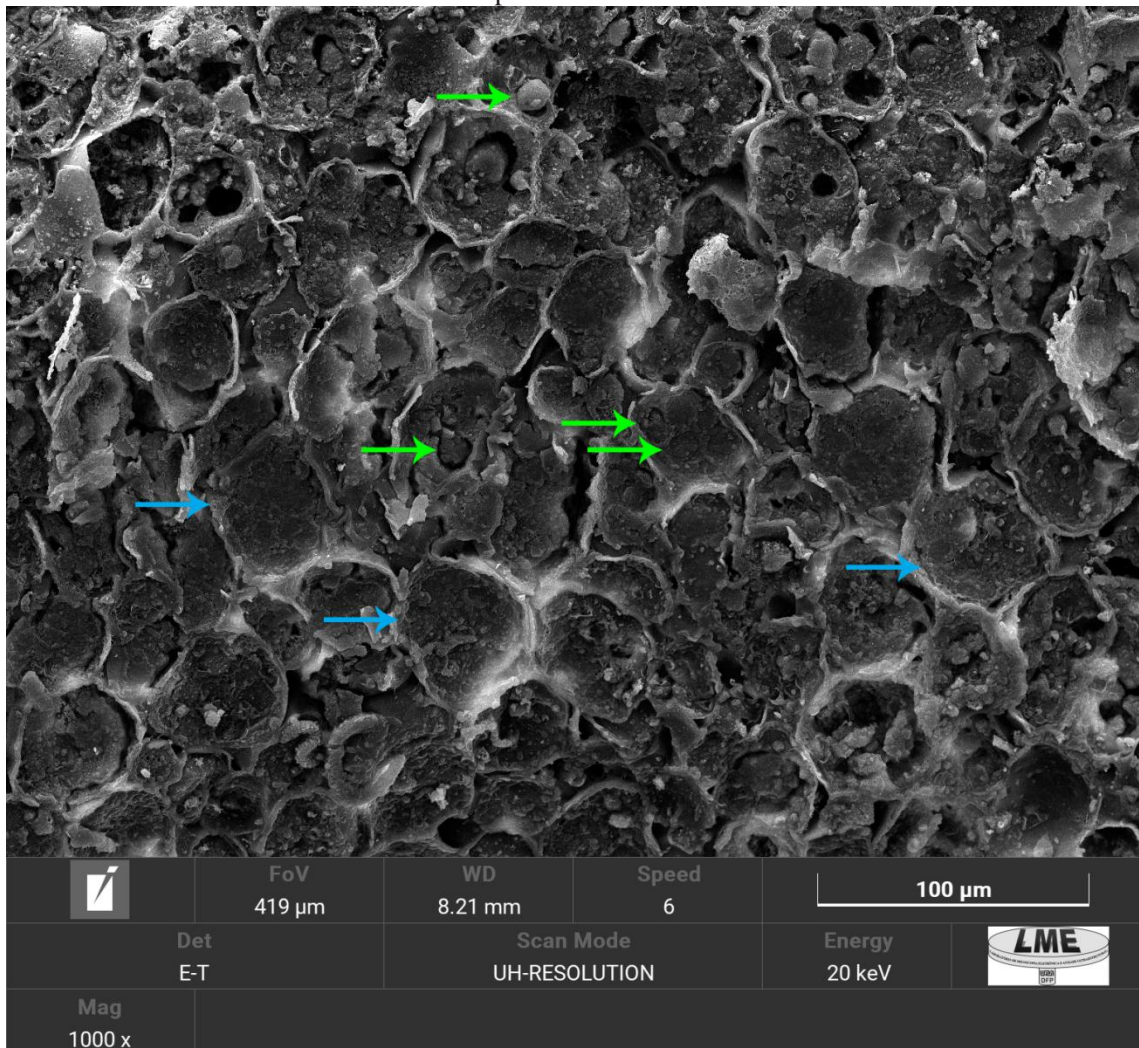




Figura 6 - Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) do endosperma dos grãos de *Moringa oleifera* L. secados a 40 °C ate aproximadamente 5 % de teor de água (b.u.). Setas de cor verde: corpos de proteínas, cor azul: células sem dano, estrutura em padrões normais, cor vermelho: Lúmen, cor roxo: espaço entre células, cor amarelo: gotículas de óleo.

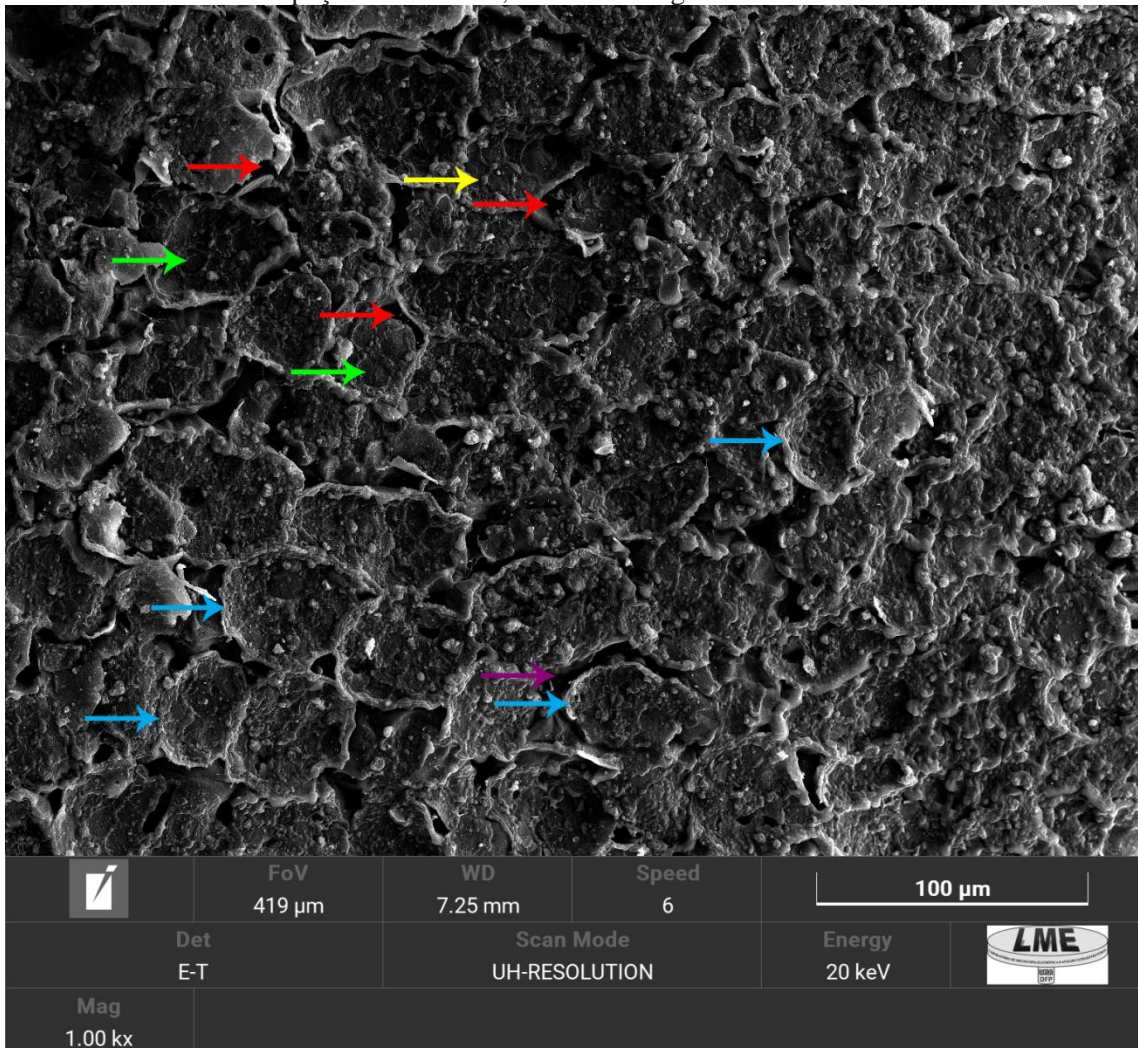


Figura 7 - Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) do endosperma dos grãos de *Moringa oleifera* L. secados a 50 °C ate aproximadamente 5 % de teor de água (b.u.). Setas de cor verde: corpos de proteínas, cor azul: células sem dano, estrutura em padrões normais, cor vermelho: Lúmen, cor roxo: espaço entre células, cor amarelo: gotículas de óleo.

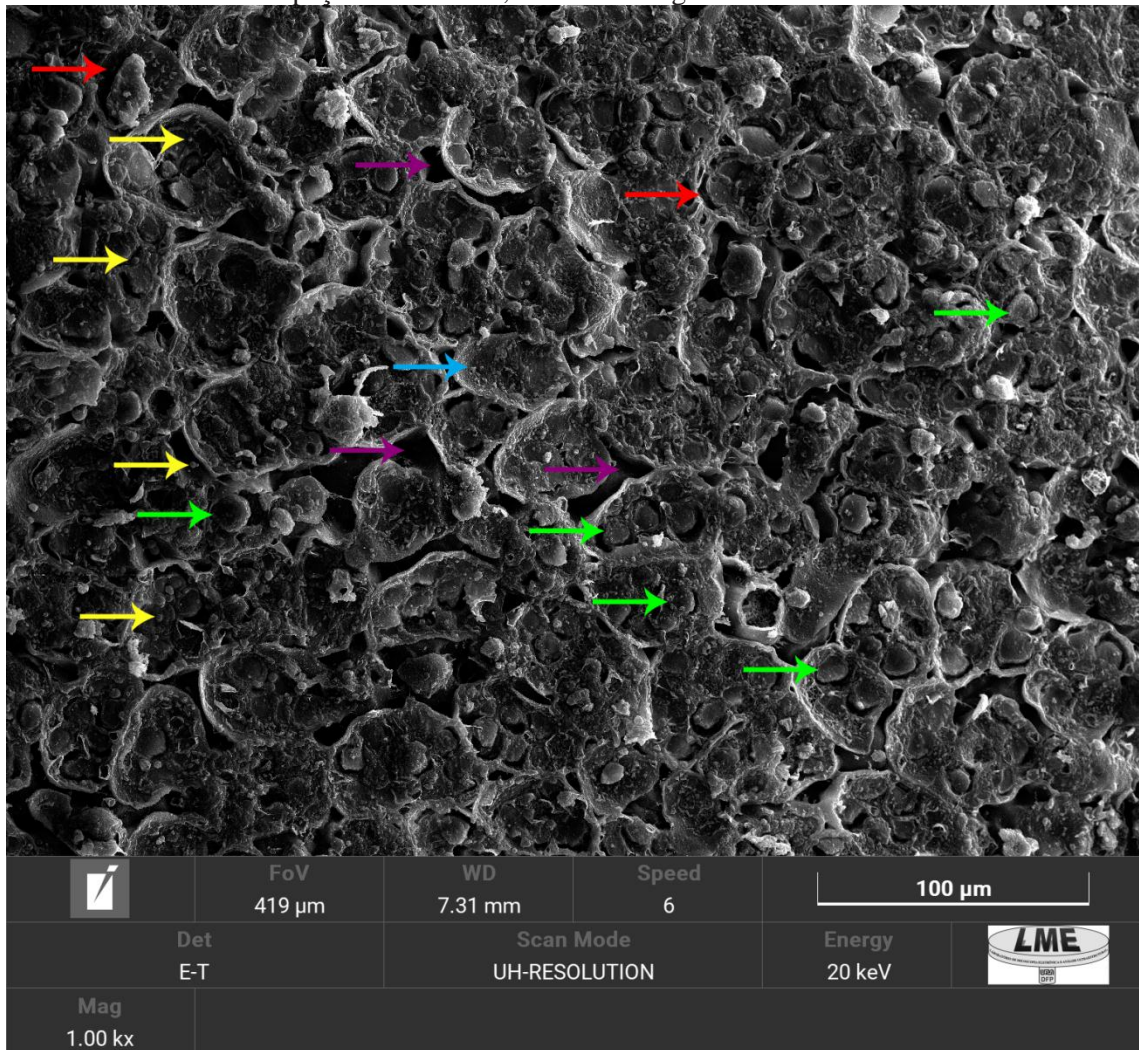
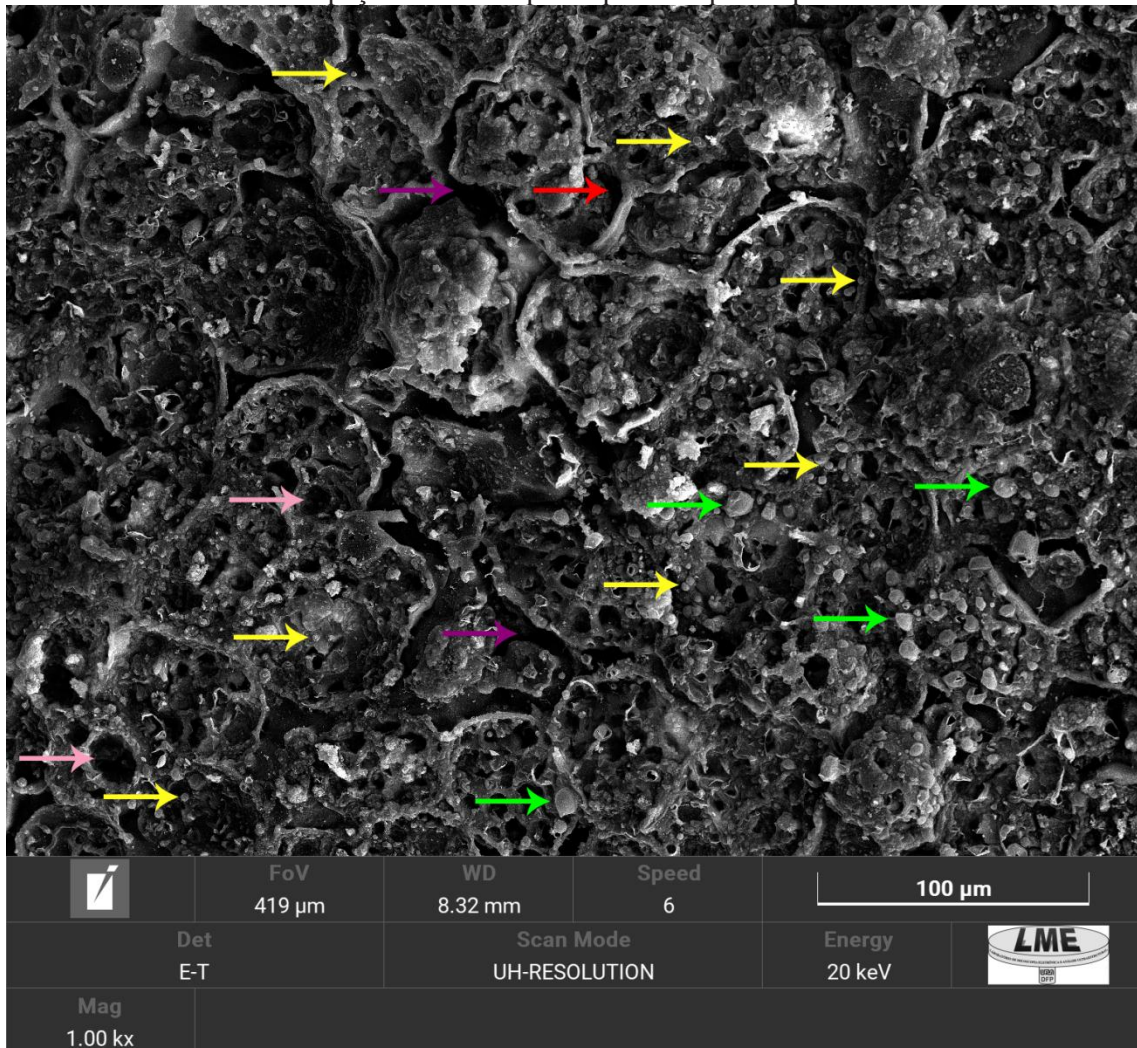




Figura 8 - Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) do endosperma dos grãos de *Moringa oleifera* L. secados a 60 °C ate aproximadamente 5 % de teor de água (b.u.). Setas de cor verde: corpos de proteínas, cor vermelho: Lúmen, cor roxo: espaço entre células, cor amarelo: gotículas de óleo. Cor rosa: espaços vazios ocupados pelos corpos de proteínas.



Estudos ultra-estruturais com o auxílio da Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) demonstraram que quando há aumento da temperatura de ar de secagem houve comprometimento das estruturas nos produtos agrícolas, como nos eixos embrionários em soja (SILVA et al., 2007), descompartimentação celular em uvaia (JUSTO et al., 2007), comprometimento nas estruturas celulares no endosperma de café (SAATH et al., 2010), dano nas estruturas e contração celular em café (BORÉM et al., 2013).

A perda de água nas plantas gera a contração da parede celular, conseqüentemente diminuição do volume da célula, aglomeração dos compostos citoplasmáticos e aumento da viscosidade de seu conteúdo (HOEKSTRA et al., 2001). Em condições inadequadas no processo de secagem de produtos hidratados danos mecânicos podem ocorrer além da redução do volume celular (PAMMENTER & BERJAK, 1999).

Altas temperaturas no processo de secagem podem danificar as estruturas celulares, favorecer a desnaturação das proteínas e comprometer as sementes a qual pode variar dependendo da espécie, método e tempo de exposição da secagem (VILLELA & PESKE, 2003). Estudos ultra-estruturais em grãos de café relacionaram o aumento da temperatura ao rompimento das membranas celulares. (BORÉM, 2013).

### **Eficiência e Rendimento na extração do óleo**

O aumento do rendimento de extração (%) e eficiência da prensa mecânica (%) com o aumento da temperatura de ar de secagem pode ser observado na tabela 4, percebe-se que os tratamentos sem secagem, secagem a 40 e 50 °C não tiveram diferença significativa, já para a temperatura de 60 °C se obteve um melhor resultado para as duas variáveis resposta.

Para os tratamentos sem secagem, 40, 50 e 60 °C os resultados de rendimento de extração (%) foram de 8,90, 8,32, 7,84 e 17,53, respectivamente. No caso da eficiência de extração (%) obteve-se 37,69, 37,54, 34,16 e 79,50, respectivamente. Relacionando os resultados observados na microscopia eletrônica de varredura e os dados de rendimento de extração na temperatura do ar de secagem de 60 °C, pode se observar nas imagens, maior desorganização dos compostos presentes na célula e conseqüentemente maior disponibilidade das gotículas de óleo para a extração.

Tabela 4 - Rendimento da extração e Eficiência da prensa mecânica para grãos de *Moringa oleifera* L. sometidos a diferentes temperaturas de secagem.

	Rendimento de extração (%)	Eficiência de extração (%)
Sem Secagem	8,90 a	37,69 a
40 °C	8,32 a	37,54 a
50 °C	7,84 a	34,16 a
60 °C	17,53 b	79,50 b
CV (%)	9,66	7,77

\*Os valores com as mesmas letras na coluna não diferem entre si de acordo ao teste de Tukey 5 %. CV: Coeficiente de variação.

A extração do óleo dos grãos de *Moringa oleifera* L. foi estudado para diferentes propósitos, encontrando-se diferentes rendimentos de acordo a metodologia empregada: 28,58 % e 35,03 % (FAKAYODE & AJAV, 2016), 11,36 e 36,48 % (PEREIRA et al., 2016) para prensagem e Soxhlet com solvente hexano, respectivamente.

Segundo Tsaknis et al. (1999), o rendimento de extração do óleo vegetal depende da metodologia utilizada e as condições dos grãos; genéticos, sistema de produção, condições edafoclimáticas e tempo de armazenamento.

#### 4. CONCLUSÃO

O Modelo de Midilli representou adequadamente a cinética de secagem para a temperatura de ar de 40 °C, e o modelo de Exponencial dois termos e Valcam para as temperaturas de 50 e 60 °C, respectivamente. A taxa de redução de água (TRA) seguiu uma tendência sem amostrar variações pronunciadas, evidenciando uma secagem uniforme.

As imagens obtidas mediante a microscopia eletrônica de varredura (MEV) evidenciam que quando a temperatura de ar de secagem é incrementada, maior é a contração na estrutura e desorganização celular.

Existe uma maior desorganização celular resultando numa maior disponibilidade das gotículas de óleo para a extração quando aumentada a temperatura do ar de secagem, fato comprovado pelo maior rendimento de extração e eficiência da prensa na temperatura de 60 °C.

#### REFERÊNCIAS

- ABDULKARIM, S. M.; LONG, K.; LAI, O. M.; MUHAMMAD, S. K. S.; GHAZALI, H. M. **Frying quality and stability of high-oleic Moringa oleifera seed oil in comparison with other vegetable oils**. Food chemistry, v. 105, n. 4, p. 1382-1389, 2007.
- AGUSTINI, M. B.; WENDT, L.; PAULUS, C.; MALAVASI, M. M. **Maturidade fisiológica de sementes de Moringa oleifera (Lam)**. Revista Inova Ciência & Tecnologia/Innovative Science & Technology Journal, p. 11-17, 2015.
- ANWAR, F.; ASHRAF, M.; BHANGER, M.I. **Interprovenance variation in the composition of Moringa oleifera oilseeds from pakistan**. J. Am. Oil Chem. Soc., v. 82, p. 45-51. 2005.
- ANWAR, F.; LATIF, S.; ASHRAF, M.; GILANI, A. H. **Moringa oleifera: A food plant with multiple medicinal uses**. Phytotherapy Research, v.21, p.17-25, 2007.
- ARAÚJO, B. L. O., DE ANDRADE, E. T., NOLASCO, K. C. V., CASTRO, R. P., & NETO, P. C. **Efficiency of mechanical extraction of Moringa oleifera according to different grain drying conditions**. Research, Society and Development, v. 9, n. 7, p. e937975133-e937975133, 2020.

- ARAÚJO, B. L. O.; ANDRADE, E. T.; NOLASCO, K. C. V.; CASTRO, R. P.; NETO, P. C. **Eficiência da extração mecânica de Moringa oleifera de acordo com diferentes condições de secagem de grãos.** Research, Society and Development, v. 9, n. 7, p. e937975133, 2020.
- ARAUJO, W. D.; GONELI, A. L. D.; CORRÊA, P. C.; HARTMANN FILHO, C. P.; MARTINS, E. A. S. **Modelagem matemática da secagem dos frutos de amendoim em camada delgada.** Revista Ciência Agronômica, v.48, n.3, p.448-457, 2017.
- BEZERRA, A. M. E.; MOMENTÉ, V. G.; MEDEIROS FILHO, S. **Germinação de sementes e desenvolvimento de plântulas de moringa (*Moringa oleifera* Lam.) em função do peso da semente e do tipo de substrato.** Horticultura Brasileira, 22, 295-299, 2004.
- BORÉM, F. M.; OLIVEIRA, P. D.; ISQUIERDO, E. P.; SILVA GIOMO, G.; SAATH, R.; CARDOSO, R. A. Microscopia eletrônica de varredura de grãos de café submetidos a diferentes formas de processamento e secagem. Coffee Science-ISSN 1984-3909, 8(2), 227-237, 2013.
- BRASIL. Ministério da Agricultura e Reforma Agrária. **Regras para análise de sementes.** Brasília: SNDA/DNDV/CLAV, 1992.
- BROOKER, D. B.; BAKER-ARKEMA, F. W.; HALL, C. W. **Drying and storage of grains and oilseeds.** Westport: AVI, p. 450, 1992.
- CARDOSO, E.S.; SANTANA, F.N.R.P.; SANTOS, T.M.; SANTANA, S.F.; SILVA, G.F.; FARIA, L.J.G. **Análise experimental da secagem de sementes de Moringa.** Engenharia de produtos naturais: planejamento, experimentação, obtenção de produtos e purificação, v. 1, n. 1, p. 50-68, 2021.
- CORRÊA, P. C., MACHADO, P. F., & ANDRADE, E. D. **Cinética de secagem e qualidade de grãos de milho-pipoca.** Ciência e Agrotecnologia, v. 25, n. 1, p. 134-142, 2001.
- CORRÊA, P. C; GONELI, A. L.; JUNIOR, P. C.; DE OLIVEIRA, G. H.; VALENTE, D. S. **Moisture sorption isotherms and isosteric heat of sorption of coffee in different processing levels.** International Journal of Food Science & Technology, v. 45, n. 10, p. 2016-2022, 2010.
- DRAPER, N. R.; SMITH, H. **Applied regression analysis.** 3<sup>rd</sup> ed. New York: J. Wiley, 1998. 706 p.
- FAKAYODE, O. A.; AJAV, E. A. **Process optimization of mechanical oil expression from Moringa (*Moringa oleifera*) seeds.** Industrial Crops and Products, v. 90, p. 142-151, 2016.
- GANDJI, K.; TOVISSODÉ, F. C.; AZIHOU, A. F.; AKPONA, J. D. T.; ASSOGBADJO, A. E.; KAKAI, R. L. G. **Morphological diversity of the agroforestry species *Moringa oleifera* Lam. as related to ecological conditions and farmers' management practices in Benin (West Africa).** South African Journal of Botany, 129, 412-422, 2020.
- HELDMAN, D.R.; HARTEL, R.W. **Principles of food processing.** New York: Chapman & Hall, 2000.

HENDERSON, S.M. **Progress in developing the thin layer drying equation.** Transactions of the ASAE, v.17, n.6, p.1167-1168, 1974.

HENDERSON, S.M.; PABIS, S. **Grain drying theory. Temperature effect on drying coefficient.** Journal of Agricultural Engineering Research, n.6, n.??, p.169- 174, 1961.  
HOEKSTRA, F.A.; GOLOVINA, E.A.; BUITINK, J. **Mechanisms of plant desiccation tolerance.** Trends in Plant Science, London, v.6, n.9, p.431-438, 2001.

JUSTO, C. F.; ALVARENGA, A. A. D.; ALVES, E.; GUIMARÃES, R. M.; STRASSBURG, R. C. **Efeito da secagem, do armazenamento e da germinação sobre a micromorfologia de sementes de Eugenia pyriformis Camb.** Acta botanica brasílica, v. 21, p. 539-551, 2007.

KALAPPURAYIL, T. M.; JOSEPH, B. P. **A review of pharmacognostical studies on Moringa oleifera lam. flowers.** Pharmacognosy Journal, v. 9, n. 1, 2017.

KARATHANOS, V.T. **Determination of water content of dried fruits by drying kinetics.** Journal of Food Engineering, v.39, n.4, p.337-44, 1999.

LEONE, A., SPADA, A., BATTEZZATI, A., SCHIRALDI, A., ARISTIL, J., & BERTOLI, S. **Cultivation, genetic, ethnopharmacology, phytochemistry and pharmacology of Moringa oleifera leaves: An overview.** International journal of molecular sciences, v. 16, n. 6, p. 12791-12835, 2015.

LEWIS, W.K. **The drying of solid materials.** Journal Industrial Engineering, v.13, n.5, p.427-33, 1921.

MENDONÇA, A. P.; ALMEIDA, F. D. A. C.; DOS SANTOS OLIVEIRA, A.; ROSA, J. C.; ARAÚJO, M. E. R.; SAMPAIO, P. D. T. B. **Extração de óleo de andiroba por prensa: rendimento e qualidade de óleo de sementes submetidas a diferentes teores de água e temperaturas de secagem.** Sci. For., v. 48, n. 125, 2020.

Midilli, A. D. N. A. N.; Kucuk, H. A. Y. D. A. R.; Yapar, Z. İ. Y. A. **A new model for single-layer drying.** Drying technology, v. 20, n. 7, p. 1503-1513, 2002.

MOYO, B.; MASIKA, P.J.; MUCHENJE, V. **Antimicrobial activity of Moringa oleifera (Lam.) root extract.** Afr. J. Biotechnol. v. 11, p. 2797–2802. 2012.

NASCIMENTO, V. R.; BIAGI, J. D.; OLIVEIRA, R. A. D.; ARANTES, C. C.; ROSSI, L. A. **Infrared radiation drying of Moringa oleifera grains for use in water treatment.** Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental, v. 23, p. 768-775, 2019.

NDABIGENGESERE, A.; NARASIAH, K. S. **Quality of water treated by coagulation using Moringa oleifera seeds.** Water research, v. 32, n. 3, p. 781-791, 1998.

NINDO, C.; MWITHIGA, G., **Infrared drying.** In: PAN, Z.; ATUNGULU, G. G. **Infrared heating for food and agricultural processing.** New York: CRC Press, Cap. 5, p.89–97, 2011.

OLIVEIRA, G. H. H.; ARAGÃO, D. M. S.; OLIVEIRA, A. P. L. R.; SILVA, M. G.; GUSMÃO, A. C. A. **Modelagem e propriedade termodinâmicas na secagem de morangos**. Brazilian Journal of Food Technology, 18(4), 314-321. 2015.

PAGE, G.E. **Factors influencing the maximum rates of air drying shelled corn in thin layers**. Dissertação (Mestrado).Purdue University, USA. Indiana: 1949

PAMMENTER, N. W.; BERJAK, P. **A review of recalcitrant seed physiology in relation to desiccation-tolerance mechanisms**. Seed Science Research, Wallingford, v. 9, n. 1, p. 13-37, 1999.

PEREIRA, F. S. G.; BRITO NETO, E. X.; WEI, S.; GALVÃO, C. C.; LIMA, V. F.; SILVA, V. L.; LIMA FILHO, N. M. **Produção de biodiesel metílico com óleo purificado de Moringa oleifera lamarck**. Revista Virtual de Química, v. 8.3, p. 873-888, 2016.

RATKOWSKY, D. A. **Nonlinear regression modeling: a unified practical approach**. New York: M. Dekker, 276p, 1983.

RESENDE, O.; ULLMANN, R.; SIQUEIRA, V. C.; CHAVES, T. H.; FERREIRA, L. U. **Modelagem matemática e difusividade efetiva das sementes de pinhão-manso (Jatropha curcas L.) durante a secagem**. Engenharia Agrícola, v. 31, n. 6, p. 1123-1135, 2011.

SAATH, R.; BORÉM, F. M.; ALVES, E.; TAVEIRA, J. H. D. S.; MEDICE, R.; CORADI, P. C. **Microscopia eletrônica de varredura do endosperma de café (Coffea arabica L.) durante o processo de secagem**. Ciência e Agrotecnologia, v. 34, p. 196-203, 2010.

SAINI, R. K.; SIVANESAN, I.; KEUM, Y. S. **Phytochemicals of Moringa oleifera: a review of their nutritional, therapeutic and industrial significance**. 3 Biotech, v. 6, n. 2, p. 1-14, 2016.

MOREIRA, T. M. D. O.; MOREIRA, E. D. O.; ROSA, N. C.; FARIAS, V. S.; NESI JÚNIOR, V.; FERREIRA, D. K.; FARIA, L. J. G. D. **Análise experimental da secagem de sementes de moringa**. Engenharia de produtos naturais: planejamento, experimentação, obtenção de produtos e purificação, 1(1), 50-68, 2021.

SHARAF-ELDEEN, Y.I.; BLAISDELL, J.L.; HAMDY, M.Y. **A model for ear corn drying**. Transactions of the ASAE, v.23, n.5, p.1261-1265, 1980.

SILVA, P. D. A.; DINIZ, K. A.; OLIVEIRA, J. A.; PINHO, É. V. D. R. V. **Análise fisiológica e ultra-estrutural durante o desenvolvimento e a secagem de sementes de soja**. Revista Brasileira de Sementes, v. 29, p. 15-22, 2007.

SIQUEIRA, V. C., RESENDE, O., & CHAVES, T. H. **Mathematical modelling of the drying of jatropha fruit: an empirical comparison**. Revista Ciência Agronômica, v. 44, p. 278-285, 2013.

SIQUEIRA, V. C.; RESENDE, O.; CHAVES, T. H. **Drying kinetics of Jatropha seeds**. Revista Ceres, v. 59, n. 2, p. 171-177, 2012.

TEIXEIRA, L. P.; ANDRADE, E. T.; SILVA, P. G. L. **Determinação do equilíbrio higroscópico e do calor isostérico da polpa e da casca do abacaxi.** Engevista, v. 14, n. 2, 2012.

THOMPSON, T.L. et al. **Mathematical simulation of corn drying: A new model.** Transactions of ASAE, v.11, n.4, p.582-586, 1968.

TOĞRUL, H. **Simple modeling of infrared drying of fresh apple slices.** Journal of Food Engineering, v. 71, n. 3, p. 311-323, 2005.

TSAKNIS, J.; LALAS, S.; GERGIS, V.; DOURTOGLOU, V.; SPILIOTIS, V. **Characterization of Moringa oleifera variety Mbololo seed oil of Kenya.** Journal of Agricultural and food chemistry, v. 47, n. 11, p. 4495-4499, 1999.

TSHABALALA T, NCUBE B, MADALA NE, NYAKUDYA TT, MOYO HP, SIBANDA M, NDHLALA AR. **Scribbling the Cat: A Case of the “Miracle” Plant, Moringa oleifera.** Plants, v.8 n. 11, p.510, 2019.

ULLMANN, R.; RESENDE, O.; SALES, J. D. F.; CHAVES, T. H. **Qualidade das sementes de pinhão manso submetidas à secagem artificial.** Revista Ciência Agronômica, v. 41, n. 3, p. 442-447, 2010.

VERMA, L.R. et al. **Effects of drying air parameters on rice drying models.** Transactions of the ASAE, v.28, n.1, p.296-301, 1985.

VILLELA, F. A.; PESKE, S. T. Secagem de sementes. In: PESKE, S.; ROSENTHAL, M.; ROTA, G. (Eds.). **Sementes: fundamentos científicos e tecnológicos.** Pelotas: UFPel, p. 283-321. 2003.

WANG, C Y.; SINGH, R. P. **Use of variable equilibrium moisture content in modeling rice drying.** Transaction of ASAE, v.11, n.78, p.668-672, 1978.

YALDIZ, O.; ERTEKIN, C. **Thin layer solar drying of some vegetables.** Drying Technology, 19, 583-597, 2001.

## ARTIGO 2 - MODELAGEM MATEMÁTICA DA HIGROSCOPICIDADE DA TORTA DE *Moringa oleifera* Lam E PROPRIEDADES TERMODINÂMICAS.

### RESUMO

*Moringa oleifera* L. é uma planta originária da Índia que foi introduzida e está adaptada às condições ambientais do Brasil. Diferentes partes da planta são utilizadas, inclusive a torta resíduo da extração do óleo dos grãos, normalmente utilizada para o tratamento de águas residuárias. O objetivo deste trabalho foi estudar a higroscopicidade e utilizando as isotermas de sorção fazer a modelagem matemática e posterior cálculo das propriedades termodinâmicas da torta de *Moringa oleifera* L. Para isso se trabalhou com soluções salinas que propiciaram umidades relativas do ar entre 10,75 a 85,11% quando expostas a temperaturas de 20 a 70 °C, se utilizou o método estático gravimétrico para a obtenção do teor de água de equilíbrio, foram testados nove modelos matemáticos aos dados experimentais. Como resultados, os modelos de Sigma Copace e Halsey modificado se ajustaram de forma ótima. Os teores de água de equilíbrio variaram de 0,035 a 0,174 (b.s.), à medida que o teor de água de equilíbrio decresce o calor isostérico integral aumenta de 2426,688 a 2896,305 kJ kg<sup>-1</sup>, mesma tendência foi registrada para a entropia diferencial apresentando valores de 0,174 a 2,484 kJ kg<sup>-1</sup> K<sup>-1</sup>. Para a energia livre de Gibbs a tendência foi contrária apresentando valores de -21,820 a -353,347 kJ kg<sup>-1</sup>. Como conclusão quanto menor o teor de água no produto maior é a energia necessária para retirar a água, maior é energia que representa os espaços de sorção e maior a espontaneidade para a torta de *Moringa oleifera* L. O conhecimento das isotermas de sorção permitiu identificar a faixa segura de atividade de água ( $a_w$ ) para o armazenamento da torta.

**Palavras chaves:** Equilíbrio higroscópico, modelos matemáticos, atividade de água.

### 1. INTRODUÇÃO

*Moringa oleifera* é uma planta de origem da Índia, a qual foi introduzida no Brasil adaptando-se a suas condições climáticas. Esta pertence à família Moringaceae, composta por um gênero e quatorze espécies, da qual *Moringa oleifera* é a mais conhecida (ANWAR et al., 2007).

Raízes, córtex da árvore, folhas, grãos desta espécie são utilizadas em setores da indústria, para o consumo animal e humano como também na medicina. Uma das aplicações citadas para essa planta, especificamente dos grãos desta árvore é da proteína catiônica contida na semente que atua como clarificante natural de águas residuárias (PEÑA et al., 2013; AGUSTINI et al., 2015).

As condições do ambiente, fertilidade do solo e principalmente genética da planta são responsáveis pela variação da composição química do grão (SANCHEZ-MACHADO et al. 2010). Para o processamento de oleaginosas quando utilizado o processo físico de extração



por prensa mecânica, por ser um processo menos eficiente, há sobra de óleo na torta (SINGH & BARGALE, 2000).

Os constituintes de produtos agrícolas como amido, gordura, proteínas, etc. podem ter afinidade ou não com a água. Produtos com maior parte de constituintes lipídicos apresentam menores teores de água de equilíbrio quando comparados com produtos amiláceos nas mesmas condições de armazenamento (temperatura e umidade relativa) (BROOKER et al., 1992).

Os produtos agrícolas são higroscópicos, ou seja, quando em contato com o meio ambiente podem perder ou ganhar água sob a forma de vapor, estes fenômenos são conhecidos como adsorção e dessorção. Estes produtos tendem a permanecer em um balanço com a umidade relativa e a temperatura do ar resultando no teor de água de equilíbrio ou equilíbrio higroscópico o qual pode mudar dependendo das características dos constituintes (ALMEIDA et al., 2013; GRANELLA et al., 2020; ISQUIERDO et al., 2020).

Na secagem e armazenagem de produtos agrícolas este teor de água de equilíbrio é importante na determinação de ganho ou perda de água sob determinadas condições de temperatura e umidade relativa (GHODAKE et al., 2007). Segundo Borém (2008) quando o produto está em equilíbrio higroscópico com o ambiente a atividade de água ( $a_w$ ) e a umidade relativa são aproximadamente iguais, esta atividade de água ( $a_w$ ) pode ser entendida como a água livre no produto biológico.

A água livre pode comprometer a qualidade dos produtos agrícolas, por se encontrar disponível para reações químicas, físicas e biológicas (WELTI-CHANES & VERGARA, 1997). Segundo Ramos et al. (2017), atividade de água acima de 0,7 permite o desenvolvimento de fungos, o que permite a deterioração do produto.

O comportamento higroscópico dos produtos biológicos pode ser estudado com a análise das isotermas de sorção, as quais podem determinar as condições de estabilidade química, física e microbiana para manter a qualidade do produto armazenado (SOGI et al., 2003; CORRÊA et al., 2015). Segundo Goneli et al. (2007), por meio das isotermas de sorção pode se conhecer as faixas de atividade de água ( $a_w$ ) do produto onde microrganismos se desenvolvem.

Modelos matemáticos podem prever o teor de água de equilíbrio de um produto sob determinadas condições ambientais, estas curvas formadas pelos modelos são conhecidas como isotermas de sorção. Modelos empíricos são mais utilizados que modelos teóricos, já que este último não prediz com precisão o teor de água de equilíbrio para uma ampla faixa de atividade de água e temperatura (RESENDE et al., 2006; CORRÊA et al., 2016).

As Isotermas de sorção construídas através de modelos matemáticos vem sendo pesquisadas numa ampla variedade de produtos agrícolas, entre os modelos ajustados aos dados experimentais para diferentes produtos se encontra os modelos de Copace e GAB em Feijão Adzuki (ALMEIDA et al., 2013), os modelos de Henderson, Henderson Modificado, Cavalcanti Mata, Chung Pfof, Chung Pfof Modificado, Chen Clayton em pimenta Cabacinha (SILVA et al., 2015), o modelo de Chung-Pfof em sementes de Crotalaria (GRANELLA et al., 2020) e o modelo de Chung-Pfof em sementes de Tunge (COSTA et al., 2021).

Para o entendimento da relação entre o produto, a água e a análise de energia requerida em projetos de equipamentos de secagem de produtos agrícolas (OLIVEIRA et al., 2013), além da compreensão da sorção na armazenagem, as propriedades termodinâmicas são necessárias. As Propriedades termodinâmicas como entalpia, entropia e energia livre de Gibbs (CORRÊA et al., 2010) são as mais utilizadas e podem ser calculadas por meio das isotermas de sorção (SILVA et al., 2015).

Segundo McMinn et al. (2005), no processo de sorção, a variação de energia pela interação das moléculas de água com os constituintes do produto causa uma alteração na entalpia. A entropia está relacionada com o grau de ordem ou desordem no sistema na relação água-constituintes do produto. Segundo Oliveira et al. (2014), a energia livre de Gibbs, fornece a informação da energia requerida para as moléculas da água do produto passar para o estado vapor e vice versa.

Diante da importância da higroscopicidade dos produtos agrícolas e sua relação com seus constituintes, o objetivo deste trabalho foi determinar as isotermas de sorção da torta de grãos de *Moringa oleifera* Lam., ajustar modelos matemáticos a esses dados experimentais como calcular as propriedades termodinâmicas.

## **2. MATERIAL E MÉTODOS**

A colheita dos grãos foi feita depois de atingir o ponto de maturidade fisiológica, quando atingiram a cor marrom nas vagens (AGUSTINI et al., 2015). Os grãos foram retirados das vagens, colocados em caixas de isopor e enviados pela empresa Controle Consultoria Ambiental no Estado de Pará a Universidade Federal de Lavras (UFLA) onde foi conduzido o experimento.

A secagem dos grãos foi feita no laboratório de processamento de produtos agrícolas. Foi realizada uma secagem artificial num secador convectivo de laboratório, a temperatura do

ar de secagem foi de 40 °C e uma velocidade de ar de 0,33 m.s<sup>-1</sup>, a secagem foi até os grãos ter um teor de água de 6 %. O teor de água antes e depois da secagem foi determinado pelo método de estufa 105 ± 3 °C durante 24h (BRASIL, 1992). A secagem foi realizada em triplicata, com ± 0,55 kg cada bandeja.

Já a extração do óleo dos grãos e análise de higroscopicidade da torta foi realizada no laboratório de Plantas Oleaginosas, Óleos, Gordura e Biodiesel, pertencente ao Departamento de Engenharia Agrícola da mesma universidade. A extração do óleo do grão secado foi realizada em uma prensa tipo expeller da marca Scott Tech do modelo ERT 50 a uma mesma pressão. Foram retiradas amostras das tortas provenientes da extração para o posterior teste de higroscopicidade.

Foi adotada a metodologia utilizada por Isquierdo et al. (2020), para a modelagem das isotermas de sorção da torta de moringa. Foi utilizada a torta proveniente da secagem a 40 °C sendo determinado o teor de água inicial, em seguida foram colocados em recipientes herméticos “Gerbox” com a solução salina saturada, e levados as BOD (Biochemical Oxygen Demand) com temperaturas controladas de 20, 30, 55 e 70 °C.

Foi utilizado o método estático-gravimétrico para a determinação do teor de água de equilíbrio higroscópico, e em cada repetição foram colocados 2 ± 0,3 g de torta no interior dos recipientes herméticos. As pesagens das amostras da torta de moringa foram feitas utilizando uma balança semianalítica com precisão de 0,01 g, a cada 24h até não haver mais variação de massa, momento que foi considerado como ponto de equilíbrio higroscópico entre a torta e o ambiente. Neste ponto determinou-se o teor de água de equilíbrio pela diferença de massa de água do ponto inicial ao final.

Estão apresentadas na tabela 1 as soluções salinas que foram utilizadas, como também as umidades relativas que elas geram quando expostas a determinadas temperaturas. Para este trabalho foram feitas três repetições para cada combinação de temperatura e umidade relativa.

Tabela 1 – Soluções salinas com suas respectivas umidade relativas quando expostas a diferentes temperaturas.

Temperatura (°C)	Sais	UR (%)
20	Cloreto de Magnésio MgCl <sub>2</sub>	33,07 ± 0,18
	Cloreto de Lítio LiCl	11,31 ± 0,31
	Cloreto de Potássio KCl	85,11 ± 0,29
	Nitrato de Magnésio Mg(NO <sub>3</sub> )	54,38 ± 0,23
	Acetato de Potássio CH <sub>3</sub> COOK	23,11 ± 0,25

30	Cloreto de Magnésio	MgCl <sub>2</sub>	32,44 ± 0,14
	Cloreto de Lítio	LiCl	11,28 ± 0,24
	Cloreto de Potássio	KCl	83,62 ± 0,25
	Nitrato de Magnésio	Mg(NO <sub>3</sub> )	51,40 ± 0,24
	Acetato de Potássio	CH <sub>3</sub> COOK	21,61 ± 0,53
55	Cloreto de Lítio	LiCl	11,03 ± 0,23
	Cloreto de Potássio	KCl	80,70 ± 0,35
	Brometo de Sódio	NaBr	50,15 ± 0,65
	Cloreto de Magnésio	MgCl <sub>2</sub>	29,93 ± 0,16
70	Cloreto de Lítio	LiCl	10,75 ± 0,33
	Cloreto de Potássio	KCl	79,49 ± 0,57

Fonte: (GREENSPAN, 1977).

Foram feitas simulações matemáticas com equações (tabela 2) que descrevem o fenômeno de higroscopicidade em diferentes produtos. Isto com o objetivo de obter as isotermas de equilíbrio higroscópico da torta de moringa para diferentes atividades de água.

Tabela 2 – Modelos matemáticos para a obtenção das isotermas

Nome do modelo	Modelo	Equação
BET <sup>1</sup>	$Ue = \left\{ \frac{1}{[(1 - a_w) (1/a \cdot b + ((a - 1)/a \cdot b))]} \right\}$	(1)
Chung Pfo <sup>2</sup>	$Ue = a - b \ln[-(T + c) \ln(a_w)]$	(2)
Copace <sup>3</sup>	$Ue = \exp[a - (bT) + (c a_w)]$	(3)
GAB	$Ue$	(4)
modificado <sup>4</sup>	$= (a \cdot b \cdot a_w) \cdot \frac{(c / T)}{[1 - b \cdot a_w + (c / T) \cdot b \cdot a_w] \cdot (1 - b \cdot a_w)}$	
Henderson	$Ue = \{\ln(1 - a_w) / [-a (T + b)]\}^{1/c}$	(5)
modificado <sup>5</sup>		
Sabbab <sup>6</sup>	$Ue = a (a_w^b / T^c)$	(6)
Sigma Copace <sup>7</sup>	$Ue = \exp\{a - (bT) + [c \exp(a_w)]\}$	(7)
Halsey	$Ue = \left( \frac{\exp(a - (b \cdot T))}{-\log(a_w)} \right)^{1/c}$	(8)
modificado <sup>8</sup>		
Andrade <sup>9</sup>	$Ue = \exp\{(a \cdot a_w) + (T^b) + \left[ \left[ \frac{(T - a_w)^b}{a_w} \right] \right]^c\}$	(9)

(Brunauer, Emmett & Teller, 1938)<sup>1</sup>; (Chung & Pfof, 1967)<sup>2</sup>; (Corrêa, Martins & Melo, 1995)<sup>3</sup>; (Berg, 1984)<sup>4</sup>; (Thompson, Peart & Foster, 1968)<sup>5</sup>; (Mesquita et al., 2001)<sup>6</sup>; (Corrêa, Martins & Melo, 1995)<sup>7</sup>; (Iglesias & Chirife, 1976)<sup>8</sup>; (Andrade et al., 2017)<sup>9</sup>.

Ue – teor de água do produto, em b.s.; T- temperatura do ar ambiente, °C; Tabs – temperatura absoluta do ar ambiente, em K; a<sub>w</sub> –atividade de água, decimal; a, b, c – parâmetros que dependem da natureza do produto.

Para o ajuste dos modelos matemáticos aos dados experimentais foi utilizado o método de Quase-Newton. A escolha do melhor modelo que representa os dados de higroscopicidade da torta de moringa foi feito com base na magnitude do coeficiente de determinação ajustado ( $R_a^2$ ), erro médio relativo (P) e erro médio estimado (SE). Conforme as equações 10, 11 e 12.

Para se comparar modelos com diferentes números de parâmetros foi utilizado o coeficiente de determinação ajustado, o qual considera a quantidade de parâmetros do modelo. No modelo estimado o coeficiente de determinação  $R^2$  não faz ponderações quanto aos parâmetros (RATKOWSKI, 1983; DRAPER & SMITH, 1998).

$$R_a^2 = 1 - \left[ \frac{(n - i)(1 - R^2)}{n - p} \right] \quad (10)$$

Em que:

$R_a^2$  = Coeficiente de determinação ajustado;

$R^2$  = Coeficiente de determinação;

n = número de observações;

i = está relacionado com o ajuste do intercepto da curva, sendo igual a 1 se houver intercepto e igual a 0 se não houver intercepto no modelo;

p = quantidade de parâmetros.

A fórmula ajusta o número de variáveis entre um modelo e outro e nos permite fazer uma comparação homogênea.

$$P = \frac{100}{n} \sum \frac{|Y_{obs} - \hat{Y}_{est}|}{Y_{obs}} \quad (11)$$

$$SE = \sqrt{\sum \frac{(Y_{obs} - \hat{Y}_{est})^2}{GLR}} \quad (12)$$

Em que:

$Y_{obs}$  = razão de teor de água observado experimentalmente;

$\hat{Y}_{est}$  = razão de teor de água estimado pelo modelo;

$n$  = número de observações experimentais;

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

Foi determinado o modelo matemático que melhor se ajusta aos dados experimentais de sorção, e este modelo foi utilizado para obter as propriedades termodinâmicas com base nos teores de água de equilíbrio preditos.

Foram utilizadas as equações 13 e 14 para a determinação do calor latente de vaporização da água livre e o calor isostérico integral de sorção ou entalpia, respectivamente (CHAVES et al., 2015):

$$L = 2502,2 - 2,39 \cdot T_m \quad (13)$$

$$Q_{st} = q_{st} + L \quad (14)$$

Em que:

$Q_{st}$  – Calor Isostérico Líquido de Sorção,  $\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$ ;

$L$  – Calor latente de vaporização da água livre,  $\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$ ;

$T_m$  – Faixa de temperatura média do estudo,  $^{\circ}\text{C}$ .

Segundo Wang e Brennan (1991), o calor isostérico líquido de sorção ou entalpia diferencial para cada teor de água de equilíbrio pode ser obtido mediante a equação 15:

$$\ln(a_w) = -\left(\frac{\Delta q_{st}}{R}\right) \cdot \frac{1}{T_{abs}} + C \quad (15)$$

Em que:

$q_{st}$  = calor isostérico líquido de sorção,  $\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$ ;

$T_{abs}$  = temperatura absoluta,  $\text{K}$ ;

$R$  = constante universal dos gases para o vapor de água,  $0,4619 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ ;

C= coeficiente do modelo.

Segundo Rizvi (1995), a entropia diferencial pode ser calculada a partir da equação 16 de Gibbs-Helmholtz:

$$\Delta S = \frac{\Delta q_{st} - \Delta G}{T_{abs}} \quad (16)$$

Onde,

$\Delta S$  = entropia diferencial, kJ. kg<sup>-1</sup>. K<sup>-1</sup>;

$\Delta G$  = energia livre de Gibbs, kJ. kg<sup>-1</sup>.

Segundo Oliveira et al. (2013), a energia livre de Gibbs pode ser calculada a partir da equação 17:

$$\Delta G = R \cdot T_{abs} \cdot \ln(a_w) \quad (17)$$

### 3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

#### Isotermas de Sorção e Modelagem

A tabela 3 apresenta o ajuste dos modelos matemáticos aos dados experimentais de sorção da torta de *Moringa oleifera* L. Assim, percebe-se que os modelos de Sigma Copace, Halsey modificado e GAB Modificado são os que melhor representaram o fenômeno de sorção, com coeficientes de determinação próximos a 100 %, erros médios relativos inferiores a 10 % e estimados próximos a 0.

Tabela 3 – Modelos matemáticos ajustados aos dados experimentais de sorção da torta de *Moringa oleifera* L. com seus parâmetros, e avaliadores de ajuste; coeficiente de determinação (R<sup>2</sup>), erro médio relativo (P), e erro médio estimado (SE).

Modelo	a	b	c	R <sup>2</sup> (%)	P (%)	SE (decimal)
BET	0,100	36,903	-	87,401	20,062	0,041
Chung Pfof	0,362	0,048	405,353	90,149	15,304	0,036
Copace	-3,469	0,004	2,080	93,225	10,725	0,030
GAB Modificado	0,041	0,885	1895,685	92,555	9,519	0,032

Henderson	0,147	197,432	1,570	91,183	15,729	0,034
Modificado						
Sabbab	0,241	0,964	0,088	86,718	21,673	0,042
Sigma Copace	-4,426	0,003	1,170	93,739	8,595	0,029
Halsey modificado	-4,836	0,004	1,771	93,385	9,249	0,030
Andrade	-1,236	0,028	-1,590	92,251	11,202	0,032

Fonte: Do autor (2023).

Pode-se se observar na tabela 3 que os modelos de Sigma Copace e Halsey modificado obtiveram valores de 93,739, 93,385 % para  $R^2$ , 8,595 e 9,249 para P e 0,029 e 0,030 para SE, respectivamente. E por meio da equação 10 foi calculado o  $R^2_a$ , sendo este de 90,608 e 90,077 %, respectivamente. Para o cálculo das propriedades termodinâmicas da torta de *Moringa oleifera* L. foi utilizado o modelo de Halsey modificado por não dar valores negativos no momento do cálculo da atividade de ( $a_w$ ) para as diferentes combinações dos teores de água de equilíbrio e temperaturas.

Na literatura encontram-se diversos modelos matemáticos ajustados aos dados experimentais de higroscopicidade de produtos agrícolas, como o modelo de Andrade em pimenta Dedo-de-Moça (ANDRADE et al., 2017), o modelo de Smith em sementes de girassol (CAMPOS et al., 2019), modelo de Chung-Pfost em sementes de Tunge (COSTA et al., 2021), o modelo de Chung-Pfost em sementes de Cártamo (BESSA et al, 2021).

As soluções salinas da tabela 4 naquelas temperaturas geram certas condições de umidade relativa de equilíbrio. E quando a torta chegou ao teor de água de equilíbrio sob essas condições de temperatura e umidade relativa, então, nesse momento a umidade relativa é aproximadamente igual à atividade de água da torta (SAUER, 1995).

Na tabela 4 pode se observar o teor de água de equilíbrio estimado pelo modelo de Halsey modificado, além da temperatura absoluta utilizada nos cálculos. Nesta tabela pode-se observar, também, que para uma mesma temperatura quando a Umidade Relativa do ambiente é incrementada o teor de água de equilíbrio segue a mesma tendência.

Tabela 4 – Teor de água de equilíbrio estimado com o modelo Halsey modificado para a torta de *Moringa oleifera* L.

Sal	UR (decimal)	Temp °C	Teor de Água de Equilíbrio Calculado (b.s.)	Teor de Água de Equilíbrio Estimado (b.s.)	$T_{abs}$	$1/T_{abs}$
Cloreto de potássio	0,851	20	0,157	0,174	293	0,0034



Nitrato de magnésio	0,544	20	0,081	0,082	293	0,0034
Acetato de potássio	0,231	20	0,048	0,050	293	0,0034
Cloreto de potássio	0,836	30	0,176	0,160	303	0,0033
Nitrato de magnésio	0,514	30	0,078	0,076	303	0,0033
Acetato de potássio	0,216	30	0,046	0,048	303	0,0033
Cloreto de lítio	0,110	55	0,042	0,036	328	0,0030
Cloreto de potássio	0,807	55	0,162	0,136	328	0,0030
Cloreto de lítio	0,108	70	0,032	0,035	343	0,0029
Cloreto de potássio	0,795	70	0,103	0,126	343	0,0029

Fonte: Do autor (2023).

Na tabela 5 pode se observar as atividades de água em decimal para a torta de *Moringa oleifera* L. conforme cada teor de água de equilíbrio (b.s.) e temperatura (°C) estimadas pelo modelo de Halsey modificado.

Tabela 5 – Atividade de água ( $a_w$ ) estimadas pelo modelo de Halsey modificado para a torta de *Moringa oleifera* L. conforme ao teor de água de equilíbrio (b.s.) e temperatura (°C).

	Teor de Água de Equilíbrio (b.s.)			
	20	30	55	70
0,035	0,063	0,071	0,093	0,107
0,036	0,077	0,086	0,110	0,127
0,048	0,202	0,216	0,253	0,276
0,050	0,231	0,246	0,284	0,307
0,076	0,499	0,514	0,550	0,571
0,082	0,544	0,558	0,592	0,612
0,126	0,752	0,761	0,783	0,795
0,136	0,779	0,788	0,807	0,818
0,160	0,830	0,836	0,852	0,860
0,174	0,851	0,857	0,871	0,878

Fonte: Do autor (2023).

Pode ser observado na tabela 5 para uma mesma temperatura o aumento da atividade de água paralelamente o teor de água de equilíbrio aumenta, resultando em maior disponibilidade de água na torta. Como encontrado em Campos et al. (2019) para sementes de girassol.

Atividades de água entre 0,6 e 0,7 podem prevenir o crescimento de microrganismos em muitos alimentos (BELL & LABUZA, 1992). Segundo Christensen & Kaufmann (1974), o desenvolvimento dos principais fungos em produtos de origem vegetal para uma faixa de temperatura de 26 a 30 °C dá-se nas atividades de água de 0,70 a 0,85 para as espécies de *Aspergillus* e 0,85 para *Penicillium* (diversas espécies). No que se refere este trabalho os valores iguais ou abaixo de 0,082 (b.s.) no teor de água de equilíbrio apresenta-se na faixa segura para o armazenamento nas temperaturas de 20, 30, 55 e 70 °C por se manter em atividades próximas a 0,544, 0,558, 0,592, 0,612, respectivamente.

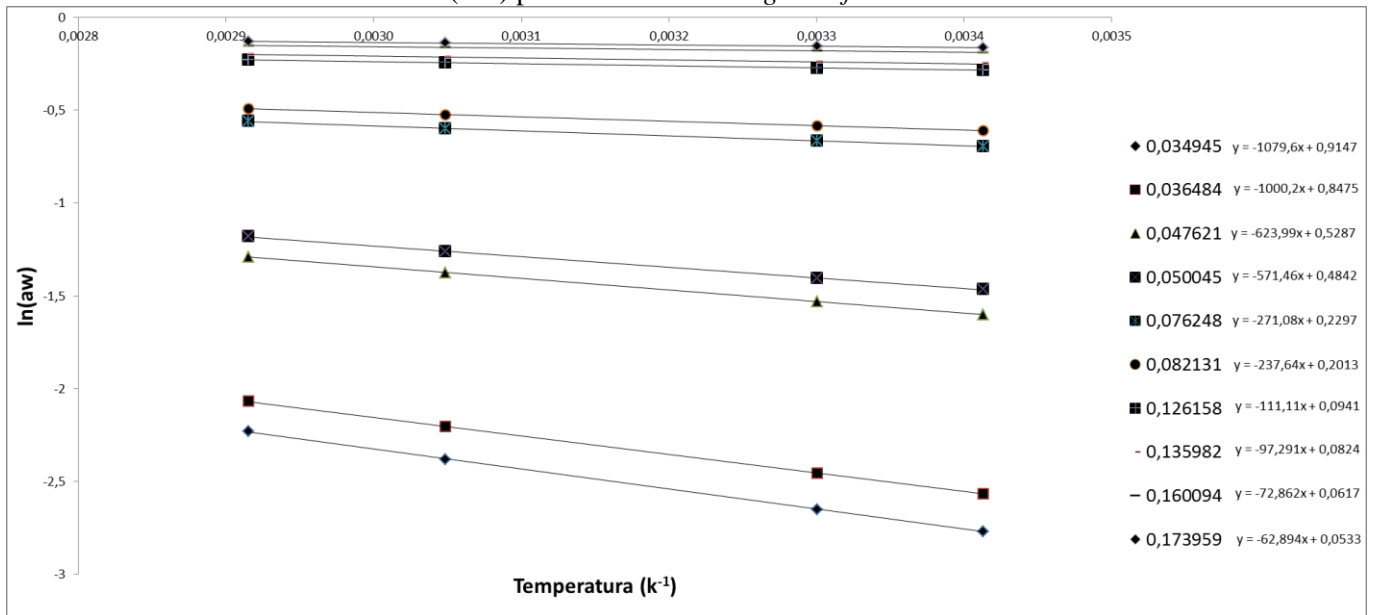
Na figura 1 pode se observar o coeficiente do ângulo de inclinação das equações para cada teor de água de equilíbrio (b.s.) obtidas mediante o gráfico de  $\ln(a_w) \times (T_{abs}^{-1})$ . Este ângulo de inclinação de cada teor de água de equilíbrio (b.s.) foi utilizado para o cálculo do calor isostérico líquido de sorção (ou entalpia diferencial) conforme a equação 15.

Para o cálculo do calor isostérico líquido de sorção (ou entalpia diferencial) foi preciso calcular o calor latente de vaporização da água livre conforme a equação 13, utilizando a temperatura média utilizada no experimento que foi de 43,75 °C se obteve um calor latente de vaporização para água livre de 2397,638 kJ kg<sup>-1</sup>. Resultados dos coeficientes do ângulo de inclinação, calor isostérico líquido de sorção, calor isostérico integral calculado e estimado (equação 18) para cada teor de água de equilíbrio (b.s.) são apresentados na tabela 6.

Foi utilizada a equação 18 para o cálculo do calor isostérico integral estimado para cada teor de água de equilíbrio (b.s.) os coeficientes foram; a: 1526,556 e b: -33,1903 com um coeficiente de determinação (R<sup>2</sup>) de 98,327 %.

$$Q_{st} = a. \exp(b. U_e) + 2397,638 \quad (18)$$

Figura: 1 – Valores dos coeficientes dos ângulos de inclinação para cada teor de água de equilíbrio (b.s.) para a torta de *Moringa oleifera* L.



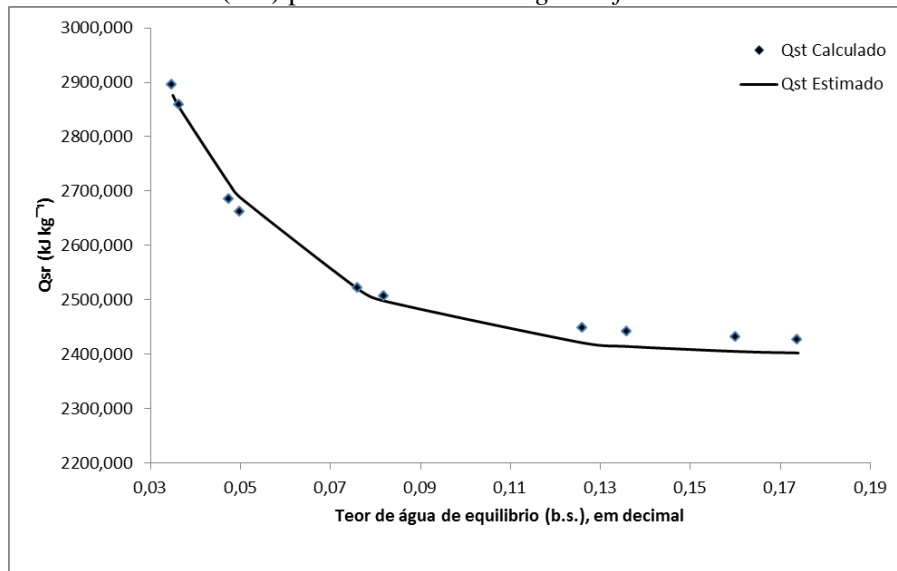
Fonte: Do autor (2023).

Tabela 6 – Coeficiente da inclinação da reta, calor isostérico líquido, calor isostérico integral calculado e estimado pelo modelo para a torta de *Moringa oleifera* L.

Inclinação da reta	Calor isostérico líquido (kJ kg <sup>-1</sup> )	Calor isostérico integral	
		Qst Calculado (kJ kg <sup>-1</sup> )	Qst Estimado (kJ kg <sup>-1</sup> )
-1079,6	498,667	2896,305	2876,271
-1000,2	461,992	2859,630	2852,437
-623,99	288,221	2685,858	2711,896
-571,46	263,957	2661,595	2687,603
-271,08	125,212	2522,849	2519,157
-237,64	109,766	2507,403	2497,602
-111,11	51,322	2448,959	2420,824
-97,291	44,939	2442,576	2414,372
-72,862	33,655	2431,292	2405,155
-62,894	29,051	2426,688	2402,382

Fonte: Do autor (2023).

Figura: 2 – Calor isostérico integral calculado e estimado em função do teor de água de equilíbrio (b.s.) para a torta de *Moringa oleifera* L.



Fonte: Do autor (2023).

Para valores de teores de água de equilíbrio entre 0,035 a 0,174 (b.s.) os valores calculados para o calor isostérico integral encontrados estão entre 2426,688 a 2896,305 kJ kg<sup>-1</sup>. Na figura 2 pode-se observar conforme o teor de água de equilíbrio (b.s.) diminui o calor isostérico integral de sorção aumenta, indicando a maior energia necessária para retirar a água do produto, como demonstrado por Isquierdo et al. (2020) em sementes de maracujá e Teixeira et al. (2018) em sementes de abóbora.

Segundo Aviara & Ajibola (2002), a diminuição do calor isotérico integral com o aumento do teor de água de equilíbrio (b.s.) confirma a diminuição da força de ligação entre as moléculas de água e a matéria seca. Segundo Kaya & Kahyaoglu (2005), precisa-se maior energia e calor de sorção, para remover a água em produtos com teores de água baixos.

Para o cálculo da entropia diferencial e a energia livre de Gibbs foram utilizadas as equações 16 e 17, respectivamente. Na tabela 7 pode se observar os valores de energia livre de Gibbs e Entropia diferencial para cada teor de água de equilíbrio (b.s.) para a torta de *Moringa oleifera* L.

Tabela 7 - Energia Livre de Gibbs e Entropia diferencial para cada teor de água de equilíbrio (b.s.) para a torta de *Moringa oleifera* L.

Teor de Água de Equilíbrio (b.s.)	Calor isostérico líquido (kJ kg <sup>-1</sup> )	Energia Livre de Gibbs Entropia diferencial		
		R	(kJ kg <sup>-1</sup> ) ΔG	(kJ kg <sup>-1</sup> K <sup>-1</sup> ) ΔS

0,035	498,667	0,462	-353,347	2,484
0,036	461,992	0,462	-333,998	2,427
0,048	288,221	0,462	-214,412	1,659
0,050	263,957	0,462	-198,256	1,578
0,076	125,212	0,462	-93,145	0,721
0,082	109,766	0,462	-82,444	0,656
0,126	51,322	0,462	-36,366	0,256
0,136	44,939	0,462	-32,487	0,236
0,160	33,655	0,462	-25,036	0,194
0,174	29,051	0,462	-21,820	0,174

Fonte: Do autor (2023).

Para teores de água de equilíbrio (b.s.) entre 0,035 a 0,174 foram encontrados valores de -353,347 a -21,820 kJ kg<sup>-1</sup> para a energia livre de Gibbs, e valores de 2,484 a 0,174 kJ kg<sup>-1</sup> K<sup>-1</sup> para a entropia diferencial.

Pode se observar na tabela 7 conforme o teor de água de equilíbrio (b.s.) aumenta o processo se apresenta menos espontâneo, representado pela energia livre de Gibbs. Para a entropia diferencial conforme o teor de água de equilíbrio aumenta, os valores de entropia diferencial diminuem. Este fato demonstra que existe menos energia utilizada por consequência da diminuição dos espaços de sorção, por causa da saturação e a menor mobilidade das moléculas de água na torta de *Moringa oleifera* L. Tendências similares na energia livre de Gibbs e entropia diferencial podem ser encontrados no trabalho de Oliveira et al. (2022) para sementes de chia.

Segundo McMinn et al. (2005) a propriedade termodinâmica da energia livre de Gibbs informa se o processo de sorção é espontâneo ( $\Delta G < 0$ ) ou não espontâneo ( $\Delta G > 0$ ) e nos fornece informação sobre a afinidade entre o produto e a água. Variação nos valores da energia livre de Gibbs durante o processo de sorção de produtos é a energia necessária para mudar de estado as moléculas de água, de uma superfície sólida ao estado gasoso ou no sentido inverso (NAYAK & PANDEY, 2000).

A um nível específico de energia a quantidade de sítios de sorção disponíveis está relacionada proporcionalmente à entropia diferencial. O qual sugere o estado de mobilidade das moléculas de água no material (AL-MUHTASEB; MCMINN & MAGEE, 2004). Com o aumento do teor de água os sítios de sorção começam a se saturar provocando uma menor

movimentação rotacional das moléculas de água e como resultado ocorre diminuição da entropia diferencial (AVIARA et al., 2004).

Propriedades termodinâmicas dos produtos agrícolas foram estudadas por Campos et al. (2019) em sementes de girassol onde encontrou que o calor isotérico integral de desorção aumentou com a diminuição do teor de água de equilíbrio, entre 1787 a 2670 kJ kg<sup>-1</sup> para 0,198 a 0,052 (decimal, b.s.) respectivamente. A energia livre de Gibbs variou de 3,636 a 200,173 kJ kg<sup>-1</sup>.

#### 4. CONCLUSÃO

Os modelos de Sigma Copace e Halsey modificado são os que melhor representam a higroscopicidade da torta de *Moringa oleifera* L.

Para uma mesma temperatura o aumento da umidade relativa (UR) ocasiona um aumento do teor de água de equilíbrio da torta de *Moringa oleifera* L.

Com a diminuição do teor de água de equilíbrio da torta de *Moringa oleifera* L. os valores do calor isotérico integral de sorção e a entropia diferencial aumentam e a energia livre de Gibbs diminui.

O processo de sorção da torta de *Moringa oleifera* L. é espontâneo, evidenciados pelos valores negativos da energia livre de Gibbs.

O Conhecimento das isotermas de sorção da torta de *Moringa oleifera* L. permitiu identificar a faixa segura de atividade de água ( $a_w$ ) para o armazenamento, onde microrganismos prejudiciais não encontrem condições de se desenvolver.

#### REFERÊNCIAS

- AGUSTINI, M. A. B.; WENDT, L.; PAULUS, C.; MALAVASI, M. M.; GUSATTO, F. C. **Maturidade fisiológica de sementes de *Moringa oleifera* Lam.** Revista Inova Ciência & Tecnologia, v.8, p. 267-278, 2015.
- ALMEIDA, D. P.; RESENDE, O.; COSTA, L. M.; MENDES, U. C. **Higroscopicidade das sementes de feijão adzuki.** Científica, v. 41, n. 2, p. 130-137, 2013.
- AL-MUHTASEB, A.H.; MCMINN, W.A.M.; MAGEE, T.R.A. **Water sorption isotherms of starch powders. Part 2: Thermodynamic characteristics.** Journal of Food Engineering, v.62, p.135–142, 2004.
- ANDRADE, E. T.; FIGUEIRA, V. G.; TEIXEIRA, L. P.; TAVEIRA, J. H. D. S.; BORÉM, F. M. **Determination of the hygroscopic equilibrium and isosteric heat of aji chili pepper.** Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental, v. 21, p. 865-871, 2017.

ANWAR, F.; LATIF, S.; ASHRAF, M.; GILANI, A. H. **Moringa oleifera: A planta alimentar com múltiplos usos medicinais.** *Phytotherapy Research*, v.21, p.17-25, 2007.

AVIARA, N.A.; AJIBOLA, O.O. **Thermodynamics of moisture sorption in melon seed and cassava.** *Journal of Food Engineering*, v.55, n.2, p.107-113, 2002.

AVIARA, N.A.; AJIBOLA, O.O.; ONI, S.A. **Sorption Equilibrium and Thermodynamic Characteristics of Soya Bean.** *Biosystems Engineering*, v.87, n.2, p.179-190, 2004.

BELL, L. N.; LABUZA, T. P. **Composition influence on the pH of reduced-moisture solutions.** *Journal Food Science*. 57: 732-734, 1992.

BERG, C. **Description of water activity of food for engineering purposes by means of the GAB model sorption.** In: McKenna, B.M. *Engineering and foods*. New York: Elsevier Science, p.119-131. 1984.

BESSA, J. F.; RESENDE, O.; OLIVEIRA, D. E.; LIMA, R. R. D.; QUEQUETO, W. D.; SIQUEIRA, V. C. **Adsorption isotherms and thermodynamic properties of *Carthamus tinctorius* L. seeds.** *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, 25, 696-702, 2021.

BORÉM, F. M. **Pós-colheita do café.** Lavras: Editora UFLA, 2008. 631p.

BRASIL. Ministério da Agricultura e Reforma Agrária. **Regras para análise de sementes.** Brasília: SNDA/DNDV/CLAV, 1992.

BROOKER, D.B.; BAKKER-ARKEMA, F.W.; HALL, C.W. **Drying and storage of grains and oilseeds.** New York: Van Nostrand Reinhold, 450 p. 1992.

BRUNAUER, S.; EMMETT, P. H.; TELLER, E. **Adsorption of gases in multimolecular layers.** *Journal of the American chemical society*, v. 60, n. 2, p. 309-319, 1938.

CAMPOS, R. C.; CORREA, P. C.; ZAIDAN, I. R.; ZAIDAN, Ú. R.; LEITE, R. A. **Moisture sorption isotherms of sunflower seeds: Thermodynamic analysis.** *Ciência e Agrotecnologia*, v.43, 2019.

CHAVES, T. H.; RESENDE, O.; OLIVEIRA, D. E. C. (d), SOUZA SMANIOTTO, T. A. (d); SOUSA, K. A. **Isotermas e calor isostérico das sementes de pinhão-mansão.** *Revista Engenharia na Agricultura-REVENG*, v. 23, n. 1, p. 9-18, 2015.

CHRISTENSEN, C. M.; KAUFMANN, H. H. **Microflora.** In: Christensen, C. M. **Storage of cereal grain and their products.** St. Paul: American Association of Cereal Chemists, p.158-192, 1974.

CHUNG, D.S.; PFOST, H.B. **Adsorption and desorption of water vapors by cereal grains and their products Part II.** *Transactions of the ASAE*, v.10, p.549-551, 1967.

- CORRÊA, P. C.; DE OLIVEIRA, G. H. H.; DE OLIVEIRA, A. P. L. R.; GONELI, A. L. D.; BOTELHO, F. M. **Isotermas de dessorção de sementes de beterraba**. Revista Engenharia na Agricultura-REVENG, v. 24, n. 1, p. 15-21, 2016.
- CORRÊA, P. C.; MARTINS, D. S. R.; MELO, E. C. **Programa para o cálculo do teor de umidade de equilíbrio para os principais produtos agrícolas**. Viçosa: Centro Nacional de Treinamento em Armazenagem, 1995.
- CORRÊA, P. C.; OLIVEIRA, G. H. H.; BOTELHO, F. M.; GONELI, A. L. D.; CARVALHO, F. M. **Modelagem matemática e determinação das propriedades termodinâmicas do café (Coffea arabica L.) durante o processo de secagem**. Revista Ceres, v. 57, p. 595-601, 2010.
- CORRÊA, P. C.; REIS, M. F. T.; OLIVEIRA, G. H. H. D.; OLIVEIRA, A. P. L. R. D.; BOTELHO, F. M. **Moisture desorption isotherms of cucumber seeds: modeling and thermodynamic properties**. Journal of Seed Science, v. 37, p. 218-225, 2015.
- COSTA, L. M.; RESENDE, O.; JUNIOR, W. N. F.; OLIVEIRA, D. E. C.(d); SILVA, I. O. F. **Isotermas e calor isostérico de dessorção das sementes de tungue**. Revista Principia-Divulgação Científica e Tecnológica do IFPB, n. 54, p. 163-171, 2021.
- GHODAKE, H. M.; GOSWAMI, T. K.; CHAKRAVERTY, A. **Moisture sorption isotherms, heat of sorption and vaporization of withered leaves, black and green tea**. Journal of Food Engineering, v. 78, n. 3, p. 827-835, 2007.
- GONELI, A. L. D.; CORRÊA, P. C.; RESENDE, O.; NOGUEIRA, B. L.; BOTELHO, F. M. **Modelagem matemática do equilíbrio higroscópico dos grãos de arroz em casca obtidos pelos métodos estático e dinâmico**. Revista Brasileira de Armazenamento, v. 32, p. 152-160, 2007.
- GRANELLA, S. J.; BECHLIN, T. R.; CHRIST, D. **Modelagem das isotermas de dessorção e do calor isostérico de sementes de crotalária**. Nativa, v. 8, n. 1, p. 124-128, 2020.
- GREENSPAN, L. **Humidity fixed points of binary saturated aqueous solutions**. Journal of research of the National Bureau of Standards. Section A, Physics and chemistry, v. 81, n. 1, p. 89, 1977.
- IGLESIAS, H.A.; CHIRIFE, J. **Prediction of the effect of temperature on water sorption isotherms of food materials**. Journal of Food Technology, v.11, p.109-116, 1976.
- ISQUIERDO, E. P.; CALDEIRA, D. S.; SIQUEIRA, V. C.; MARTINS, E. A.; QUEQUETO, W. D. **Fittings of adsorption isotherm models and thermodynamic properties of urunday seeds**. Engenharia Agrícola, v. 40, p. 374-380, 2020.
- ISQUIERDO, E. P.; SIQUEIRA, V. C.; BORÉM, F. M.; ANDRADE, E. T.; LUZ, P. B.; QUEQUETO, W. D. **Isotermas de sorção e propriedades termodinâmicas de sementes de maracujá doce**. Research, Society and Development, v. 9, n. 5, 2020.
- KAYA, S.; KAHYAOGU, T. **Thermodynamic properties and sorption equilibrium of pestil (grape leather)**. Journal of Food Engineering, v.71, n.2, p.200-207, 2005.



MCMINN, W. A. M.; AL-MUHTASEB, A. H.; MAGEE, T. R. A. **Enthalpy–entropy compensation in sorption phenomena of starch materials.** Food Research International, v. 38, n. 5, p. 505-510, 2005.

MCMINN, W.A.M.; AL-MUHTASEB, A.H.; MAGEE, T.R.A. **Enthalpy-entropy compensation in sorption phenomena of starch materials.** Food Research International, n.38, p.505-510, 2005.

MESQUITA, J. B.; ANDRADE, E. T.; CORRÊA, P. C. **Modelos matemáticos e curvas de umidade de equilíbrio de sementes de jacarandá-da-bahia, angico-vermelho e óleo-copaíba.** Cerne, v. 7, n. 2, p. 12-21, 2001.

NAYAK, L.; PANDEY, J.P. **Free energy change and monolayer moisture content of paddy and milled rice.** Journal of the Institution of Engineers, v.80, p.43-45, 2000.

OLIVEIRA, D. E. C. D.; RESENDE, O.; CHAVES, T. H.; SOUZA, K. A.; SMANIOTTO, T. A. D. S. **Propriedades termodinâmicas das sementes de pinhão-manso.** Biosci. j.(Online), p. 147-157, 2014.

OLIVEIRA, D. E. C. D.; RESENDE, O.; SMANIOTTO, T. A. D. S.; SOUSA, K. A. D.; CAMPOS, R. C. **Propriedades termodinâmicas de grãos de milho para diferentes teores de água de equilíbrio.** Pesquisa Agropecuária Tropical, v. 43, p. 50-56, 2013.

OLIVEIRA, G. H. H.; OLIVEIRA, A. P. L. R.; CORRÊA, P. C.; BAPTESTINI, F. M.; ZEYMER, J. S. **Adsorção de água em sementes de chia: modelagem e propriedades termodinâmicas.** Brazilian Journal of Animal and Environmental Research, v. 5, n. 3, p. 2892-2909, 2022.

PEÑA, Y. A. S.; AVILA, G. C. M.; GARCÍA, S. R. S.; RODRÍGUEZ, J. A. V. **Moringa oleifera; importancia, funcionalidad y estudios involucrados.** Revista Científica de la Universidad Autónoma de Coahuila, v. 5, n. 9, p. 25-30, 2013.

RAMOS, A. P.; GUERRERO; K. M. L.; ROMERO, J. T.; LOPES FILHO, J. F. **Isotermas e calor isostérico de adsorção da água do amido de quinoa.** Biotecnología en el Sector Agropecuario y Agroindustrial, v. 15, n. 1, p. 95-104, 2017.

RESENDE, O.; CORRÊA, P. C.; GONELI, A. L. D.; RIBEIRO, D. M. Isotherms and isosteric heats of sorptions of the edible bean. **Food Science and Technology**, v. 26, n. 3, p. 626-631, 2006.

RIZVI, S. S. H. **Thermodynamic properties of foods in dehydration.** In Engineering properties of foods (p. 261-348). CRC Press. 1995.

SÁNCHEZ-MACHADO, D. I., NÚÑEZ-GASTÉLUM, J. A., REYES-MORENO, C., RAMÍREZ-WONG, B., & LÓPEZ-CERVANTES, J. **Nutritional quality of edible parts of Moringa oleifera.** Food analytical methods, v. 3, n. 3, p. 175-180, 2010.

SAUER, D.B. **Storage of Cereal Grains and Their Products.** Fourth Edition, Ed. American Association of Cereal, Inc. 1992, p.615. 1995.

SILVA, H. W. D.; COSTA, L. M.; RESENDE, O.; DE OLIVEIRA, D. E.; SOARES, R. S.; VALE, L. S. **Higroscopicidade das sementes de pimenta (*Capsicum chinense* L.)**. Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental, v. 19, p. 780-784, 2015.

SINGH, J.; BARGALE, P. C. **Development of a small capacity double stage compression screw press for oil expression**. Journal of food engineering, v. 43, n. 2, p. 75-82, Feb. 2000.

SOGI, D. S.; SHIVHARE, U. S.; GARG, S. K.; BAWA, A. S. **Water sorption isotherm and drying characteristics of tomato seeds**. Biosystems Engineering, v. 84, n. 3, p. 297-301, 2003.

TEIXEIRA, L. P.; ANDRADE, E. T. D.; DEVILLA, I. A. **Isosteric heat, entropy, and gibbs free energy of pumpkin seeds (*Cucurbita moschata*)**. Engenharia Agrícola, v. 38, p. 97-102, 2018.

THOMPSON, T. L.; PEART, R. M.; FOSTER, G. H. **Mathematical simulation of corn drying - a new model**. Transactions of ASAE, v.11, p.582-586, 1968.

WANG, N.; BRENNAN, J. G. **Moisture sorption isotherm characteristics of potatoes at four temperatures**. Journal of Food Engineering, 14(4), 269-287. 1991.

WELTI-CHANES, J.; VERGARA, B. F. **Actividad de agua. Concepto y aplicación en alimentos con alto contenido de humedad**. Temas de Tecnología de Alimentos, v.1, 1997.