



MARIA LUIZA DE OLIVEIRA BARBOSA

**MODELAGEM MATEMÁTICA DA
HIGROSCOPICIDADE DOS GRÃOS DE *MORINGA*
OLEIFERA LAM.**

LAVRAS- MG

2021

MARIA LUIZA DE OLIVEIRA BARBOSA

**MODELAGEM MATEMÁTICA DA HIGROSCOPICIDADE DOS GRÃOS DE
MORINGA OLEIFERA LAM.**

Monografia apresentada à Universidade Federal de Lavras, como parte das exigências do Curso de Engenharia Agrícola, para a obtenção do título de Bacharel.

Prof. Dr. Ednilton Tavares de Andrade

Orientador

Ma. Bárbara Lemes Outeiro Araújo

Coorientadora

LAVRAS – MG

2021

MARIA LUIZA DE OLIVEIRA BARBOSA

**MODELAGEM MATEMÁTICA DA HIGROSCOPICIDADE DOS GRÃOS DE
MORINGA OLEIFERA LAM.**

**MATHEMATICAL MODELING OF THE HIGROSCOPICITY OF THE
GRAINS OF *MORINGA OLEIFERA* LAM.**

Monografia apresentada à Universidade Federal de Lavras, como parte das exigências do Curso de Engenharia Agrícola, para a obtenção do título de Bacharel.

APROVADA em 15 de junho de 2021

Ma. Bárbara Lemes Outeiro Araújo, UFLA

Dr. Ednilton Tavares de Andrade, UFLA

Dra. Giselle Borges de Moura, UFLA

Prof. Dr. Ednilton Tavares de Andrade

Orientador

Ma. Bárbara Lemes Outeiro Araújo

Coorientadora

LAVRAS – MG

2021

*A minha mãe Maria das Neves pelo apoio e amor
dedicado todo esse tempo, e por ser meu maior exemplo
de força, garra e superação.*

Dedico

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus pela saúde proporcionada, e pela oportunidade de estar concluindo mais uma etapa da minha vida.

Agradeço a minha mãe Maria das Neves, por todo suporte e ser meu porto seguro nessa caminhada.

Aos meus amigos de curso que sempre me incentivaram. À família Enagri Jr. por todo aprendizado profissional e crescimento pessoal.

As minhas amigas Claudiane, Amanda, Alexandra, Flaviana e Yara por me apoiarem e ajudarem em todos os momentos.

Ao Laboratório de Processamento de Produtos Agrícolas, ao qual tive meu primeiro contato com a área.

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pelo apoio financeiro.

Muito Obrigada!

*“O sucesso é a soma de pequenos esforços
repetidos dia após dia.”*

(Robert Collier)

RESUMO

A *Moringa oleifera* Lam. é uma planta da família Moringaceae, originária na Índia, de crescimento rápido e tem capacidade de sobreviver em solos pouco enriquecidos. Seus grãos possuem alto teor de óleo e proteína. Este trabalho teve como objetivo determinar as isotermas de sorção dos grãos de moringa oleífera em diferentes condições controladas de temperatura e umidade relativa do ar, e ajustar diferentes modelos matemáticos aos dados experimentais, selecionando aquele que melhor represente este fenômeno. Foram utilizados grãos de *Moringa oleifera* Lam. da cidade de Barreirinhas (MA). Os testes de higroscopicidade foram realizados em câmara incubadora BOD e estufa, sendo as amostras armazenadas de forma hermética em gerbox com controle de temperatura e umidade relativa do ar. As temperaturas do experimento foram obtidas a partir das regulagens da câmara e estufa, e a umidade relativa a partir das soluções utilizadas, sendo as temperaturas experimentadas de 20°C, 30°C, 55°C e 70°C. Foram utilizadas soluções salinas as quais promoveram umidades relativas entre 10,75% a 83,62%. Para a análise dos dados foi considerada a atividade de água (a_w) como sendo igual à umidade relativa do ar, em decimal. Para estimar os parâmetros dos modelos matemáticos ajustados aos dados experimentais foi utilizado o programa STATISTICA versão 5.0, com modelagem não linear, aplicando os modelos matemáticos de Sigma Copace, Sabbah, Henderson Modificado, Copace, Chung Pfost, Smith e Halsey Modificado. Com base nos parâmetros utilizados para cada modelo aplicado, o que se melhor se adequou aos dados experimentais foi o modelo Sabbah, que teve coeficiente de determinação (R^2) de 98,61%, erro médio relativo (P) de 3,53% e estimado (SE) de 0,0070. O grau de ajuste de cada modelo considera a magnitude do R^2 , P e SE, sendo o de melhor ajuste o que tiver R^2 superior à 90% e P inferior à 10% e baixo SE.

Palavras-chave: Absorção, equilíbrio higroscópico, armazenamento.

SUMÁRIO

INTRODUÇÃO.....	9
REFERENCIAL TEÓRICO.....	10
Moringa oleifera	10
PROCESSAMENTO DE PRODUTOS AGRÍCOLAS	12
Secagem de grãos.....	12
Higroscopicidade de grãos.....	14
OBJETIVO	15
METODOLOGIA.....	16
RESULTADOS E DISCUSSÃO	18
CONCLUSÃO.....	21
REFÊRENCIAL TEÓRICO.....	22

INTRODUÇÃO

A *Moringa oleifera* Lam. é uma planta tropical cultivada inicialmente na Índia e introduzida no Brasil há quase 70 anos, resistente a seca e capaz de sobreviver em solos pobres, obtendo até três colheitas por ano. Possui propriedades flocculantes e coagulantes, usada em muitos países como método natural, eficiente e econômico na purificação de água. Além dessa potencialidade, por seu alto valor proteico, pode ser usada na alimentação, como também na indústria de cosméticos, devido ao alto teor de óleo, matéria prima para combustíveis renováveis, e ainda, no combate de doenças.

Na etapa de pós-colheita, a secagem é um processo utilizado para assegurar a qualidade e estabilidade dos grãos, considerando que a diminuição da quantidade de água reduz a atividade biológica e as mudanças químicas e físicas. Entende-se então por equilíbrio higroscópico o teor de água no qual a pressão de vapor d'água no produto é igual à pressão de vapor do ar que o envolve.

Os produtos agrícolas possuem a propriedade de realizar trocas de água sob a forma de vapor, com o ambiente que os envolve. Essas trocas podem acontecer por meio do ganho ou da perda de água, fenômenos conhecidos, respectivamente, por adsorção e dessorção, de acordo com as características higroscópicas recíprocas do produto e do ar. A afinidade existente entre a água e os outros componentes (gordura, amido, açúcar, proteínas, etc.) de um produto define sua higroscopicidade.

Vários pesquisadores têm estudado o comportamento higroscópico de diversos produtos agrícolas, que descrevem modelos para expressar o teor de água de equilíbrio em função da temperatura e da umidade relativa do ar. Entretanto, para o estabelecimento de isotermas que representam essa relação de equilíbrio, são utilizados modelos matemáticos empíricos, uma vez que nenhum modelo teórico desenvolvido tem sido capaz de estimar, com precisão, o teor de água de equilíbrio para uma ampla faixa de temperatura e umidade relativa do ar.

Considerando a importância da secagem e o conhecimento da higroscopicidade dos produtos agrícolas para o armazenamento, existe a escassez de informações a respeito dos fenômenos que ocorrem durante a secagem e o armazenamento da moringa, assim, fazem-se necessários mais estudos sobre a espécie, e neste intuito que se busca aplicar tal pesquisa.

Sendo assim, este trabalho teve como objetivo determinar as isotermas de sorção dos grãos de moringa oleifera em diferentes condições controladas de temperatura e umidade relativa do ar, e ajustar diferentes modelos matemáticos aos dados experimentais, selecionando aquele que melhor represente este fenômeno.

REFERENCIAL TEÓRICO

Moringa oleifera

A *Moringa oleifera* Lam é uma espécie exótica nativa da Índia, pertencente à família Moringaceae, composta por apenas um gênero (*Moringa*) e 14 espécies, com ampla distribuição por todo o mundo, principalmente em países tropicais, a qual é tolerante à seca, tornando-a uma cultura bastante viável economicamente. (SILVA et al., 2019).

É uma árvore de pequeno porte, cujo crescimento é rápido, podendo atingir até 12 m de altura (ALMEIDA et al., 2017), popularmente conhecida como árvore milagrosa, por possuir diversos usos e ter grande teor de nutrientes. A introdução no Brasil deu-se por volta de 1950, e atualmente é encontrada em maior número na região Nordeste, principalmente nos estados do Maranhão, Piauí e Ceará (SILVA et al., 2013), e seu estudo tem crescido cada vez mais em nosso país, após a realização anual do Encontro Nacional de *Moringa*, que deu início em 2009.

A *Moringa* é considerada uma fonte de vitaminas, sendo o alto teor de proteínas provindo de suas folhas, galhos e do óleo de suas sementes. O uso na alimentação humana e animal, no tratamento de água, na produção de biodiesel, na indústria cosmética, na medicina e indústria farmacêutica, são exemplos do aproveitamento dos benefícios ocasionados pelas particularidades da *Moringa oleifera* (ALMEIDA et al., 2017), isso se deve ao fato de praticamente todas as suas partes serem utilizadas para diversos fins. Em diversos locais do mundo, especialmente países tropicais é difícil definir corretamente o uso da *Moringa oleifera* como alimentício ou medicinal, pois ela é usada tanto pelas qualidades nutricionais como por seus atributos medicinais, os quais são reconhecidos há muitos anos (BRILHANTE et al., 2017).

Por ser uma excelente fonte alternativa de proteína, países como a Índia, Paquistão, Filipinas, Havaí e muitas partes da África utilizam partes da planta em programas de nutrição à população carente. Na região de Corumbá-MS (Brasil), caules e folhas são misturados com a cana-de-açúcar para auxiliar na nutrição do gado. A madeira é usada na produção de papel e fibras têxteis.

A casca é espessa, mole e reticulada, de cor pardo-clara com presença de látex. Devido ao seu alto valor nutricional, a planta também apresenta surpreendentes atributos medicinais e pode ser aplicada no tratamento de inflamações, distúrbios hepatorenais, doenças infecciosas, cardiovasculares, gastrointestinais, hematológicas, entre outras doenças. Sua semente é utilizada nos processos de tratamento de água e efluentes, devido à presença de uma proteína floculante, que age como coagulante natural, sendo sua eficácia comparada ao do sulfato de alumínio (ALMEIDA, 2015).

Segundo Anwar e Bhanger (2003), a semente é composta em 40% do seu peso por óleo, com predominância do ácido oleico (76%). O óleo extraído da semente, conhecido comercialmente como óleo “Ben” ou “Behen”, apresenta alto valor alimentício e industrial, sendo utilizado no preparo de alimentos, na fabricação de cosméticos, lubrificantes e combustíveis. De acordo com Rashid et al. (2011) o biodiesel derivado do óleo de moringa é um possível substituto para o petrodiesel, visto que possui um elevado valor de cetano e uma boa estabilidade à oxidação.

PROCESSAMENTO DE PRODUTOS AGRÍCOLAS

Secagem de grãos

A secagem consiste em um complexo processo que envolve a transferência de calor e massa, simultaneamente, entre o ar de secagem e o produto a ser seco, em que o aumento de temperatura provoca o aumento da pressão parcial de vapor do produto, provocando a diminuição no teor de água. Um dos parâmetros mais importantes no estudo de secagem é a temperatura do agente de secagem, normalmente o ar. Seus efeitos podem ser notados no tempo de secagem e, por consequência, na taxa de secagem, bem como nas características finais do produto seco. (CARVALHO et al., 2015).

No caso dos grãos, a secagem é aplicada para reduzir o teor de água de produtos agrícolas, a fim de preservar sua qualidade. Também é responsável por provocar uma redução do peso e do volume substancial do material, minimizando gastos com transporte e armazenamento (DOYMAZ, 2005). Além de que, a operação de secagem é usualmente realizada antes do processo de extração do óleo, pois assim aumenta o contato entre o solvente e o soluto (óleo), ocasionando em maiores rendimentos na extração de óleo e menor custo de produção.

Segundo Oliva et al. (2012), a escolha do método de secagem a que os grãos serão submetidos depende da espécie, da estrutura e equipamentos disponíveis, do volume dos grãos e dos mecanismos que possam reduzir os custos operacionais, diminuir o tempo de secagem e a energia consumida. A secagem de grãos em terreiro é simples e de baixo custo, porém exige mão-de-obra operacional e baixo volume de material, além de depender das condições climáticas. A secagem artificial dos grãos, utilizando ventilação com ar em temperatura ambiente, preserva a qualidade dos mesmos, porém pode necessitar um prolongado período de tempo, enquanto a utilização do ar aquecido à temperatura adequada possibilita reduzir o teor de água dos grãos em menor tempo. A secagem é fundamental para o processo produtivo e demanda conhecimentos específicos para cada espécie, para que a qualidade dos grãos não seja afetada.

Segundo Lima et. al. (2008), na secagem é importante avaliar a taxa de secagem, ou seja, a velocidade com que a água é retirada do produto, pois um processo muito rápido pode degradar os princípios ativos, enquanto um processo lento pode propiciar o surgimento de microrganismos indesejáveis. Portanto, deve-se operar em condições que levem a uma taxa de secagem satisfatória para o material de estudo, de modo que características físico-químicas importantes não sejam alteradas.

Um processo de secagem eficaz é aquele que, além de reduzir o teor de água do produto, aumenta seu potencial de conservação pós-colheita e preserva suas características físicas e propriedades tecnológicas, atribuindo-lhe alto valor comercial (ATHIÉ et al., 1998).

A redução do teor de água dos grãos, além de provocar o encolhimento dos grãos, influencia, diretamente, sobre as propriedades físicas. Alterações das propriedades físicas em função do teor de água e de outros fatores, durante a secagem de grãos, tendo sido estudados por diversos autores (LANG; SOKHANSANJ, 1993; PRADO et al., 2000; CORRÊA et al, 1998; PARK et al, 2007 e BOTELHO et al, 2015).

Durante o processo de secagem a perda de água dos grãos possibilita com que aconteçam mudanças físicas na estrutura celular do produto, provocando modificações na forma e nas dimensões dos grãos (MAYOR; SERENO, 2004).

Quando não conduzido adequadamente, a redução no teor de água dos grãos no processo de secagem conseqüentemente pode levar à perda da qualidade de grãos e sementes em virtude da perda de solutos, uma vez que este fator, além de indicar o comprometimento das membranas celulares e conseqüentemente a perda de constituintes celulares importantes, pode fornecer substrato propício ao desenvolvimento de microrganismos (SANTOS et al.,2005).

De acordo com Oliveira et al. (2014), a secagem é o principal método para manutenção da qualidade pós-colheita, uma vez que a redução do teor de água dos grãos reduz a atividade biológica e metabólica. Porém, elevadas taxas de remoção de água podem prejudicar a qualidade do produto e promover maiores alterações físicas aos grãos.

Higroscopicidade de grãos

Para correta realização das operações de secagem e armazenagem torna-se necessário o conhecimento das relações existentes entre a temperatura e a umidade relativa do ar e as condições desejáveis de conservação do produto.

A forma de reduzir as perdas na pós-colheita é pelo processo de secagem, pois assegura a qualidade e estabilidade, considerando que a diminuição da quantidade de água no grão reduz a atividade biológica e as alterações químicas e físicas que ocorrem durante o armazenamento. A adequada secagem viabiliza o correto armazenamento do produto por um maior período de tempo (FONSECA et al., 2020).

Assim como diversos tipos de produtos agrícolas, os grãos possuem a capacidade de ceder ou absorver água do ambiente. Se o teor de água aumenta, o risco de aparecimento de fungos torna-se maior, comprometendo seriamente a qualidade do produto. Por outro lado, a redução do teor de água promove perdas econômicas devido à perda de massa do produto (YAZDANI et al., 2006). Essas mudanças no teor de água prosseguem até que o produto entre em equilíbrio com as condições do ar que o circunda.

Quando o teor de água do grão entra em equilíbrio com a umidade do ar ambiente ocorre o fenômeno denominado equilíbrio higroscópico. As informações relacionadas ao equilíbrio higroscópico podem ser utilizadas diretamente nos processos de secagem e armazenamento (HESSINI et al., 2015).

A higroscopicidade de qualquer produto agrícola necessita propriamente da afinidade entre a água e os demais constituintes (gorduras, proteínas, açúcares, amido, etc.) do material (SILVA, 2017). A relação entre as características químicas, físicas e de estabilidade dos produtos desidratados ou parcialmente desidratados, pode ser conhecida através do comportamento das isotermas de sorção (HUBINGER et al., 2009).

A relação entre o teor de água de um determinado produto e a umidade relativa de equilíbrio para uma temperatura específica pode ser expressa por equações matemáticas, que são denominadas isotermas de sorção ou curvas de equilíbrio higroscópico (KAYMAK-ERTEKIN & GEDIK, 2004).

As isotermas, ou curva de equilíbrio higroscópico, consistem em modelos matemáticos que são capazes de expressar a relação entre o teor de água do grão e a atividade de água para uma determinada temperatura (SOUSA et al., 2016; GONELI et al., 2014).

De acordo com Ayranci e Duman (2005), as curvas de equilíbrio higroscópico ou isotermas de sorção são importantes para definir limites de desidratação do produto, bem como estimar as mudanças de teor de água sob determinada condição de temperatura e umidade relativa do ambiente e definir os teores de água adequados ao início da atividade de microrganismos, que podem provocar a deterioração do produto.

O comportamento higroscópico de diversos produtos agrícolas tem sido estudado por vários pesquisadores, que descrevem modelos diferenciados para expressar o teor de água de equilíbrio em função da temperatura e umidade relativa do ar. Entretanto, para o estabelecimento de isotermas que representam essa relação de equilíbrio são utilizados modelos matemáticos empíricos, uma vez que nenhum modelo teórico desenvolvido tem sido capaz de prever com precisão o teor de água de equilíbrio para uma ampla faixa de temperatura e umidade relativa do ar. Atualmente, na literatura, existem mais de 200 equações propostas para representar o fenômeno de equilíbrio higroscópico dos produtos agrícolas. Estes modelos diferem na sua base teórica ou empírica e na quantidade de parâmetros envolvidos (MULET et al., 2002).

OBJETIVO

Determinar as isotermas de sorção dos grãos de moringa oleífera.

METODOLOGIA

O presente trabalho foi realizado na Universidade Federal de Lavras, utilizando grãos de *Moringa oleifera* Lam. provenientes da cidade de Barreirinhas (MA), os quais foram secos em secador mecânico de laboratório em camada fixa com convecção forçada, até o equilíbrio higroscópico.

Os testes de higroscopicidade dos grãos foram feitos em câmara incubadora BOD e estufa, sendo as amostras armazenadas de forma hermética em gerbox com controle de temperatura e umidade relativa do ar. As temperaturas utilizadas foram de 20°C, 30°C e 55°C e 70°C, com umidades relativas entre 10,75% a 85,11%, com a utilização de soluções salinas. Para a análise dos dados foi considerada a atividade de água (a_w) como sendo igual a umidade relativa do ar, em decimal.

Para a determinação da higroscopicidade dos grãos de moringa oleifera em diferentes condições de temperatura, foi realizada uma simulação matemática a partir de equações que descrevem este fenômeno. (PFOST et al.,1976; BROOKER et al.,1992; SOKHANSANJ & YANG,1996; CHEN & JAYAS, 1998; CORRÊA et al.,1998). Para o ajuste dos modelos matemáticos aos dados experimentais foi utilizado o programa STATISTICA versão 5.0, com modelagem não linear, aplicando os modelos de Sigma Copace, Sabbah, Henderson Modificado, Copace, Chung Pfof, Smith e Halsey Modificado. As equações utilizadas no trabalho estão dispostas na Tabela 1.

Tabela 1. Modelos matemáticos utilizados para predizer o fenômeno de higroscopicidade de produtos agrícolas.

Modelo	Equação
Sigma Copace	$U_e = \exp\{a-(bT) + [c.\exp(a_w)]\}$
Sabbah	$U_e = a.(a_w^b / T^c)$
Henderson Modificado	$U_e = \{\ln(1 - a_w) / [- a(T + b)]\}^{1/c}$
Copace	$U_e = \exp[a-(bT) + (ca_w)]$
Chung Pfof	$U_e = a - b.\ln[-(T + c) \ln(a_w)]$
Smith	$U_e = a-(b.T)-c.\ln(1-a_w)$
Halsey Modificado	$U_e = [\exp(a - bT) / - \ln(a_w)]^{1/c}$

Em que: U_e é o teor de água do produto, em b.s.;

a_w é a atividade de água, decimal;

T é a temperatura do ar ambiente, °C;

a, b, c são os parâmetros que dependem da natureza do produto.

Para verificar o grau de ajuste de cada modelo, foi considerada a significância do coeficiente de regressão, os valores do erro médio relativo (P), do erro médio estimado (SE) em nível de significância de 1% e o intervalo de confiança a 99% ($p < 0,01$). Os erros médios relativo e estimado, para cada um dos modelos, foram calculados conforme as seguintes expressões:

$$P = \frac{100}{N} \sum \frac{|Y - \hat{Y}|}{Y}$$

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

Em que:

Y – valor experimental

\hat{Y}

Y – valor estimado pelo modelo

N – número de observações experimentais

GLR – grau de liberdade do modelo (número de observações menos o número de parâmetros do modelo).

Para a determinação da higroscopicidade dos grãos de moringa, as amostras foram colocadas em estruturas herméticas contendo distintas soluções químicas saturadas, que em equilíbrio, condicionavam um ambiente com diferentes umidades relativas (GREENSPAN, 1977), em função da temperatura imposta, foram preparadas de acordo com a metodologia descrita por DHINGRA & SINCLAIR (1995). As soluções utilizadas para o experimento e suas respectivas temperaturas do ar ambiente e atividade de água estão dispostas na Tabela 2.

Tabela 2. Soluções salinas utilizadas para o experimento.

T (°C)	Solução		A_w
20	Acetato de potássio	CH ₃ COOK	0,23 ± 0,25
	Cloreto de magnésio	MgCl ₂	0,33 ± 0,18
	Nitrato de magnésio	Mg(NO ₃)	0,54 ± 0,23
	Cloreto de potássio	KCl	0,85 ± 0,29
30	Cloreto de lítio	LiCl	0,11 ± 0,24
	Acetato de potássio	CH ₃ COOK	0,22 ± 0,53
	Cloreto de magnésio	MgCl ₂	0,32 ± 0,14
55	Cloreto de lítio	LiCl	0,11 ± 0,23
70	Cloreto de lítio	LiCl	0,11 ± 0,33

RESULTADOS E DISCUSSÃO

De acordo com os modelos descritos, na Tabela 2, foi desenvolvida a modelagem mais representativa para os dados experimentais, com base nos parâmetros de coeficientes de determinação (R^2), erro médio relativo (P) e estimado (SE), para cada modelo matemático aplicado. Dentre eles, o mais representativo foi o de Sabbah, apresentado na Tabela 3, com coeficiente de determinação (R^2) de 98,61%, erro médio relativo (P) de 3,53% e estimado (SE) de 0,0070. O grau de ajuste de cada modelo considera a magnitude do R^2 , P e SE, sendo o de melhor ajuste o que tiver R^2 superior à 90% e P inferior a 10% e baixo SE. É importante o conhecimento que o coeficiente de determinação (R^2) é embasado no número de parâmetros do modelo, sendo assim, um critério que define o êxito do modelo ao mesmo tempo em que avalia a mudança dos dados experimentais, tem vantagem quando se compara modelos com número diferente de coeficientes embutidos (VILLA-VÉLEZ et al., 2012; CANOHIGUITA et al., 2015).

Tabela 3. Modelagem matemática da higroscopicidade dos grãos de Moringa oleifera.

Modelo	a	B	c	R^2 (%)	P (%)	SE (decimal)
Sigma Copace	-2,93143	0,013522	0,472316	96,20	5,63	0,0115
Sabbah	0,257360	0,391170	0,238453	98,61	3,53	0,0070
Henderson Modificado	256,5393	-1,30594	3,717058	98,24	4,85	0,0078
Copace	-2,57025	0,012284	0,835511	97,30	4,97	0,0097
Chung Pfof	0,141231	0,021187	-3,94597	98,45	3,73	0,0073
Smith	0,080826	0,000746	0,028684	95,84	6,69	0,0120
Halsey Modificado	-9,74793	0,056040	4,321121	96,61	5,43	0,0109

De acordo com a Tabela 3, todos os modelos matemáticos da higroscopicidade tiveram bom ajuste aos dados experimentais, uma vez que todos possuem R^2 superior a 90% e P inferior a 10%. Entretanto, o melhor modelo foi de Sabbah, por ter maior valor de R^2 (98,61%) e menor valor de P (3,53%), seguido assim os modelos por ordem de maiores R^2 , Chung Pfof (98,45%), Henderson Modificado (98,24%), Copace (97,30%), Halsey Modificado (96,61%), Sigma Copace (96,20%) e Smith (95,84%). Atenta-se que ocorreu o comportamento oposto entre o coeficiente de determinação (R^2) e o

erro médio estimado (P), à medida que o primeiro parâmetro diminui o segundo aumenta.

Teixeira (2014) estudou a higroscopicidade dos grãos de abóbora e verificou que o Modelo de Copace foi o que melhor se adequou, apresentando R² de 98,8%, P e SE de, respectivamente, 3,02% e 0,01, sendo que os modelos Chung Pfof, Halsey Modificado, Henderson Modificado, Sabbah e Sigma Copace também se ajustaram aos dados experimentais, representando do fenômeno de higroscopicidade de grãos de abóbora, tendo R² superiores a 84,55% e P e SE inferiores, respectivamente, a 9,92 e 0,0318. Almeida (2013) fez o mesmo experimento para sementes de feijão adzuki, e obteve os modelos de Copace (R² 97,66 %) e GAB (R² 96,54 %) como os que melhor representaram a higroscopicidade da cultura, quando comparados aos outros modelos testados.

Na Tabela 4, temos os valores médios do teor de água de equilíbrio, de acordo com a temperatura e a atividade de água. Notou-se que a temperatura de 20°C e atividade de água de 0,85, da solução de cloreto de potássio - KCl, foi a melhor combinação, resultando assim um valor de teor de água de equilíbrio de 0,12 (b.s).

Tabela 4. Valores médios do teor de água de equilíbrio (b.s.) para as diferentes combinações de atividade de água e temperatura (°C) após 96h.

T (°C)	Solução		A _w	UE (b.s)
20	Acetato de potássio	CH ₃ COOK	0,23 ± 0,25	0,08
	Cloreto de magnésio	MgCl ₂	0,33 ± 0,18	0,08
	Nitrato de magnésio	Mg(NO ₃)	0,54 ± 0,23	0,09
	Cloreto de potássio	KCl	0,85 ± 0,29	0,12
30	Cloreto de lítio	LiCl	0,11 ± 0,24	0,05
	Acetato de potássio	CH ₃ COOK	0,22 ± 0,53	0,06
	Cloreto de magnésio	MgCl ₂	0,32 ± 0,14	0,08
55	Cloreto de lítio	LiCl	0,11 ± 0,23	0,04
70	Cloreto de lítio	LiCl	0,11 ± 0,33	0,03

Na figura 1, apresenta os valores experimentais do teor de água de equilíbrio e os valores das isotermas de sorção do modelo que apresentou melhor ajuste aos dados experimentais. De acordo com a classificação de Brunauer et al. (1938), para produtos agrícolas as curvas se assemelham a um formato sigmoidal, características de curvas do tipo II, porém no trabalho apresentou-se a curva a partir dos dados experimentais, ou seja, a curva se inicia em 0,03796 do teor de água de equilíbrio (b.s), sendo assim não é possível afirmar qual o perfil do gráfico, uma vez que para ser sigmoidal os dados teriam que se iniciar em zero.

Podemos notar a influência da temperatura sobre a higroscopicidade nos grãos de moringa. Assim, para a atividade de água, o teor de água de equilíbrio diminui com o aumento da temperatura ou para o teor de água de equilíbrio, requer o aumento da atividade de água e da temperatura. (CORRÊA et al, 2014).

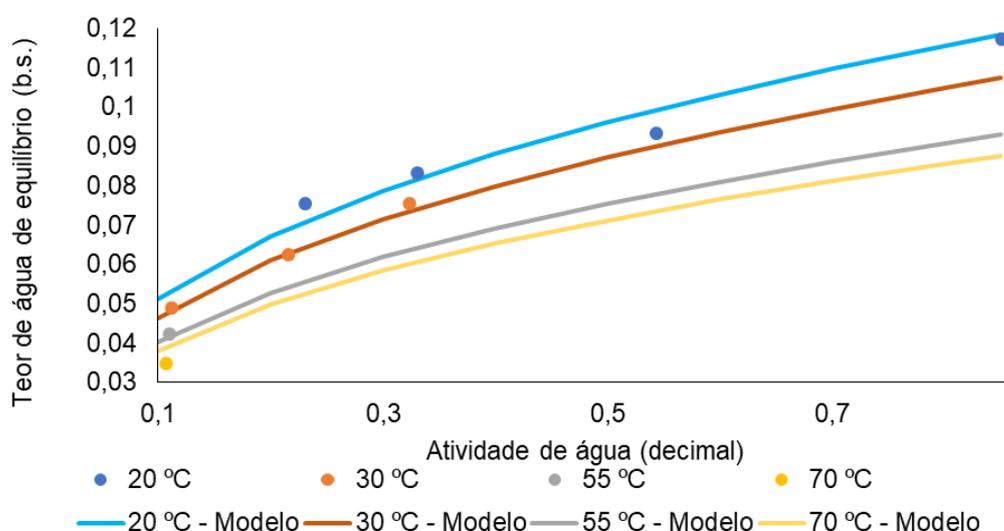


Figura 1 - Valores experimentais e estimados pelo Modelo de Sabbah do teor de água de equilíbrio das sementes de moringa em função da atividade de água (a_w) e da temperatura.

De acordo com Campos et al. (2009), o decréscimo do teor de água de equilíbrio com o aumento de temperatura pode ser justificado com base no aumento da pressão de vapor da água no ar e na superfície do produto. Palipane & Driscoll (1992) também evidenciam este fenômeno, alegando que com o aumento da temperatura provoca o aumento dos níveis energéticos das moléculas de água tornando-se termodinamicamente menos estáveis

favorecendo a quebra da ligação entre a água e os locais de sorção reduzindo, assim, o teor de água do produto.

CONCLUSÃO

A partir dos resultados foi possível verificar que o produto apresenta características higroscópicas, sendo assim, determinamos as isotermas de sorção dos grãos de moringa. No que envolve a simulação do processo de higroscopicidade para os grãos de *moringa oleifera* Lam. constatou-se que o modelo de Sabbah é o que apresenta melhor representatividade, por ter maior valor de R^2 (98,61%) e menor valor de P (3,53%).

REFÊRENCIAL TEÓRICO

ALMEIDA, C. B. L. et al. **ESTUDO PROSPECTIVO DA MORINGA NA INDÚSTRIA DE COSMÉTICOS**. Cadernos de Prospecção, v. 10, n. 4, p. 905, 2017.

ALMEIDA, D. P., RESENDE, O., COSTA, L.M., MENDES, U.C.; **Higroscopicidade das sementes de feijão adzuki**. Científica, Jaboticabal, v.41, n.2,p.130-137,2013.

ALMEIDA, F. N. C. **Estudo do processo de extração do óleo da semente de *moringa oleifera* lam.** visando a produção de biodiesel. 2015. Tese (Mestrado em Desenvolvimento de Processos) - UEM.

ANWAR, F.; BHANGHER, M.I. Analytical Characterization of Moringa oleifera Seed Oil Grown in Temperate Regions of Pakistan. **Journal Agricultural and Food Chemistry**, v. 51, p. 6558-6563, 2003.

ATHIÉ, I.; CASTRO, M. F. P. M., GOMES, R. A. R.; VALENTINI, S. R. T **Conservação de Grãos**. Campinas: Fundação Cargill, 1998. p. 15-191.

AYRANCI, E.; DUMAN, O. Moisture sorption isotherms of cowpea (*Vigna unguiculata* L. Walp) and its protein isotate at 10, 20 and 30°C. **Journal of Food Engineering**, v.70, p.83-91, 2005.

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

BRILHANTE, R.S.N.; SALES, J.A.; PEREIRA, V.S.; CASTELO-BRANCO, D.S.C.M.; CORDEIRO, R.A.; SAMPAIO, C.M.S.; SANTOS, J.B.F.; SIDRIM, J.J.C.; ROCHA, M.F.G. Research advances on the multiple uses of Moringa oleifera: A sustainable alternative for socially neglected population. **Asian Pacific journal of tropical medicine**, v.10, n.7, p. 621-630, 2017.

Brooker DB, Bakker-Arkema FW, Hall CW (1992) **Drying and storage of grains and oilseeds**. Westport: AVI Publishing Company. 450p.

BRUNAUER, S; EMMETT, P.H; TELLER, E. Adsorption of gases in multimolecular layer. *Journal of American Chemistry Society*, v. 60, n. 1, p. 309-312, 1938.

Campos, A. N. R.; Silva F. L. H.; Gomes, J. P.; Oliveira, L. S. C.; Oliveira, M. M. Isotermas de adsorção e calor isostérico da palma forrageira enriquecida proteicamente. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, Campina Grande, v. 13, n. 6, p. 734 – 740, 2009.

CANO-HIGUITA, D.M.; VILLA-VÉLEZ, H.A.; TELIS-ROMERO, J.; VÁQUIRO, H.A.; TELIS, V.R.N. Influence of alternative drying aids on water sorption of spray dried mango mix powders: a thermodynamic approach. *Food and Bioproducts Processing*, v.93, p.19- 28. 2015.

CARVALHO Y. O. et al. **CINÉTICA DE SECAGEM DAS FOLHAS DE MORINGA OLEÍFERA LAM.** Congresso Brasileiro de Sistemas Particulares, 2015.

CHEN, C.; JAYAS, D. S. Evaluation of the GAB equation for the isotherms of agricultural products. *Transactions of ASAE*, St. Joseph, v. 41, n. 6, p. 1755-1760, Nov./Dec. 1998.

CORRÊA, P.C; BOTELHO, F.M; BOTELHO, S.D.C.C; 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

CORRÊA, P.C.; CHRIST, D.; MARTINS, J.H.; MANTOVANI, B.H.M. Curvas de desorção e calor latente de vaporização para as sementes de milho pipoca (*Zea mays*). *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, Campina Grande, v.2, n.1, p.75-79, 1998.

DHINGRA, O. D.; SINCLAIR, J. B. **Basic plant pathology methods.** 2nded. Boca Raton: CRC Press, 1995. 434p

DOYMAZ, I. Drying behaviour of green beans. *Journal of Food Engineering*, v.66, p. 161-165, 2005.

Fonseca, NN, Resende, O, Ferreira Jr, WN, Silva, LCM, Andrade, EG & Oliveira, LP (2020). Desorption isotherms of graniferous sorghum grains. *Research, Society and Development*, 9(7): 1-16, e466973661.

Goneli ALD, Nasu AK, Gancedo R, Araújo WD, Sarath KLL (2014) **Cinética de secagem de folhas de erva baleeira (Cordia verbenacea DC.).** Revista Brasileira de Plantas Mediciniais. 16(1):434–443.

Greenspan,L.(1977) **Humidity Fixed Points of Binary Saturated Aqueous Solutions.** *Journal of Research of National Bureau of Standards – A Physics and Chemistry*, 81A, 89-96.

HESSINI L.; BETTAIEB, E; DESMORIEUX, H; TORRES, S.S; TOUIL, A. **Desorption isotherms and thermodynamic properties of prickly pear seeds.** *Industrial Crops and Products.* Elsevier. v.67, n.1, p. 457-465, 2015).

HUBINGER, M.D.; VIVANCOPEZANTES, D.; KUROZAWA, L.E.; SOBRAL, P.J.A. Isotermas de desorção de filé de bonito (*Sarda sarda*) desidratado osmoticamente e defumado. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, v.13, n.3, p.305-311, 2009.

KAYMAK-ERTEKIN, F.; GEDIK, A. **Sorption isotherms and isosteric heat of sorption for grapes, apricots, apples and potatoes.** *Lebensm. Wiss. Technol.*, v.37, p.429-438, 2004.

Lang, W.; Sokhansanj, S. Bulk volume shrinkage during drying of wheat and canola. **Journal of Food Process Engineering**, Trumbull, v.16, n.4, p.305-314, 1993

LIMA, S. M.; ROCHA, A. P. T.; ARAÚJO, G. T.; VASCONCELOS, R. F. Avaliação da cinética de secagem de folhas de braúna. **II Congresso Norte Nordeste de Química.** João Pessoa - PB, 2008.

MAYOR, L.; SERENO, A. M. Modelling shrinkage during convective drying of food materials: a review. **Journal of Food Engineering**, London, v.61, p.373-386, 2004.

Mulet, A.; Garcya-Pascual, P.; Sanjuán, N; Garcia-Reverter, J. Equilibrium isotherms and isosteric heats of morel (*Morchella esculenta*). **Journal of Food Engineering**, London, v.53, p.75-81. 2002.

OLIVA, A.C.E.; BIAGGIONI, M.A.M.; CAVARIANI, C. Efeito imediato do método de secagem na qualidade de sementes de crambe. **Revista Energia na Agricultura**, v. 27, n.3, p.16-30, 2012.

OLIVEIRA, D. E. C.; RESENDE, O.; MENDES, U. C.; SMANIOTTO, T. A. S.; DONADON, J. R. Modelagem da contração volumétrica do feijão-adzuki durante a secagem. **Científica**, v.42, n.1, p.23-31, 2014.

PALIPANE, K. B; DRISCOLL, R. H. **moisture sorption characteristics of in shell macadamia nuts.** **Journal of Food Engineering**, v.18, p.63-76, 1992.

PFOST, H.B.; MOURER, S.G.; CHUNG, D.S.; MILLIKEN, G.A. Summarizing and reporting equilibrium moisture data for grains. ASAE Paper No. 76-3520. St Joseph, Mich.: ASAE, 1976.

PARK, K.J; ANTONIO, G.C.; OLIVEIRA, R.A. DE; PARK, K.J.B. **Conceitos de processo e equipamentos de secagem.** 121p. 2007.

PRADO, M.E.T.; PARK, K.J.; ALONSO, L.F.T. Srinkage of dates (*Phoenix dactilyfera*). **Drying Technology**, Estados Unidos: v.18, n.1/2, p.295 310, 2000.

RASHID, U.; ANWAR, F.; ASHRAF, M.; SALEEM, M.; YUSUP, S. Application of response surface methodology for optimizing transesterification of Moringa oleifera oil: Biodiesel production. **Energy Conversion and Management**, v. 52, p. 3034–3042, 2011.

SANTOS, C. M. R; MENEZES, N. L. de; VILLELA, F. A. Modificações fisiológicas e bioquímicas em sementes de feijão no armazenamento. **Revista Brasileira de Sementes**, v.27, n.1, p.104-114, 2005.

SILVA, Fernanda Pimentel. **Cinética de secagem, higroscopicidade e propriedades físicas dos grãos de niger (*Guizotia abyssinica* (L.f.) Cass.)**. 2017. 61p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) – Universidade Federal da Grande Dourados, Dourados - MS.

Silva, G.V., Souto, J.S., Santos, J.B. (2019). Cultivo de moringa: importância nutricional, uso e aplicações. **Meio Ambiente (Brasil)**, v.1, n.3, p.23-32.

SILVA, T. C. S., NUNES, T. P.; **Utilização de Sementes de Moringa Oleífera Lam, como Alternativa para Produção de Biodiesel**. Revista GEINTEC. Vol.3, n.2, p.012-025, 2013.

SOUSA, K.A.D; RESENDE, O; CARVALHO, B.D.S. **Determination of desorption isotherms, latent heat and isosteric heat of pequi diaspore**. Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental, v. 20, n. 5, p. 493-498, 2016.

SOKHANSANJ, S.; YANG, W. Revision of the ASAE standard D245.4: moisture relationships of grains. **Transactions of ASAE**, St. Joseph, v. 39, n. 2, p. 639-642, Mar./Apr. 1996.

Teixeira, L. P., Andrade, E. T., Figueira, V. G.; **Determinação do Equilíbrio Higroscópico dos Grãos de Abóbora**. XLII Congresso Brasileiro de Engenharia Agrícola – CONBEA 2014. Campo Grande – MS, Brasil.

VILLA-VÉLEZ, H.A.; VÁQUIRO, H.A.; BON, J.; TELIS-ROMERO, J. **Modelling thermodynamic properties of banana waste by analytical derivation of desorption isotherms**. International Journal of Food Engineering, v.8, p.1-21, 2012.

YAZDANI, M.; SAZANDEHCHI, P.; AZIZI, M.; GHOBADI, P. Moisture sorption isotherms and isosteric heat for pistachio. **European Food Research Technology**, v.223, p. 577-584, 2006.