

# Isotermas e calor isostérico de dessorção das sementes de tungue

Lílian Moreira Costa <sup>[1]</sup>, Osvaldo Resende <sup>[2]</sup>, Weder Nunes Ferreira Junior <sup>[3]</sup>, Daniel Emanuel Cabral de Oliveira <sup>[4]</sup>, Igor Olacir Fernandes Silva <sup>[5]</sup>

[1] mctpg@yahoo.com.br. [2] osvresende@yahoo.com.br. [3] wedernunesiftm@gmail.com. Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia Goiano – Campus Rio Verde/ Departamento de Ciências Agrárias – Agronomia. [4] oliveira.d.e.c@gmail.com. Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia Goiano – Campus Iporá/ Departamento de Agronomia. [5] igorolacirrv95@gmail.com. Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia Goiano – Campus Rio Verde/ Departamento de Ciências Agrárias – Agronomia.

## RESUMO

O tungue é uma espécie que apresenta potencial para a produção de biodiesel. Para um armazenamento seguro, há necessidade de conhecer sua higroscopicidade. Objetivou-se com este trabalho determinar as isotermas de dessorção, a partir da recomendação de um modelo matemático, definir os teores de água seguro para armazenamento e obter o calor isostérico, para as sementes de tungue. Para obtenção do teor de água de equilíbrio higroscópico, foi utilizado o método estático, utilizando-se 20 g de sementes, envolvidas por um tecido permeável e colocadas no interior dos dessecadores, contendo soluções de sais, em câmara tipo BOD com temperaturas de 20°C, 25°C, 30°C e 35°C; a atividade de água variou entre 0,14 e 0,812 decimal. Para ajuste dos modelos matemáticos, utilizaram-se os critérios de informação de Akaike (AIC), e, para auxiliar na escolha do melhor modelo, critérios de informação bayesiano de Schwarz (BIC). Dentre os modelos testados, foi selecionado o de Chung-Pfost, para representar as isotermas de dessorção das sementes de tungue. Os valores de calor isostérico integral de dessorção na faixa do teor de água de equilíbrio de 2,08 a 8,35 (% b.s.) variaram de 3754 kJ kg<sup>-1</sup> a 2555 kJ kg<sup>-1</sup>.

**Palavras-chave:** *Aleurites fordii* Hemsl. Higroscopicidade. Teor de água. ChungPfost. Armazenamento.

## ABSTRACT

*The tung is a species that has potential for biodiesel production, so for safe storage there is a need to get to know its hygroscopicity. The objective of this work was to determine the desorption isotherms based on the recommendation of a mathematical model, to define the safe moisture content for storage, and to obtain the isosteric heat for the tung seeds. In order to obtain the hygroscopic equilibrium water content, the static method was used, with 20g of seeds surrounded by a permeable tissue, and placed inside the desiccators containing salt solutions, in a BOD chamber with temperatures of 20, 25, At 30 and 35 °C, water activity ranged from 0.14 to 0.812 decimal. The Akaike information criterion (AIC) and Bayesian Schwarz information criterion (BIC) were used to adjust the mathematical models and to help choose the best one. Among the tested models, Chung-Pfost was selected to represent the desorption isotherms of tung seeds. Integral isosteric desorption heat values in the equilibrium moisture content range from 2.08 to 8.35 (% b.s.) ranged from 3754 to 2555 kJ kg<sup>-1</sup>.*

**Keywords:** *Aleurites fordii* Hemsl. Hygroscopicity. Moisture content. Chung-Pfost. Storage.

## 1 Introdução

O tungue (*Aleurites fordii* Hemsl) é uma planta perene, arbórea de médio porte, da família *Euphorbiaceae*. Adaptada ao clima temperado, esta planta tem despertado a atenção de produtores e pesquisadores, principalmente pelo alto teor de óleo nas sementes, contendo em torno de 43%. Este óleo apresenta alta porcentagem de ácido oleostearico – 71% a 82% –, sendo amplamente utilizado na indústria de tintas e resinas. Além disso, apresenta-se como fonte alternativa para a produção de biodiesel (DYER *et al.*, 2004).

No sistema produtivo, a disponibilidade de sementes de boa qualidade é fator de extrema importância para que se obtenha uma alta produção de mudas desta espécie. Além disso, o armazenamento é prática fundamental para ajudar a manutenção da qualidade fisiológica da semente, pois, por meio dele, é possível manter o vigor até a futura sementeira. O processo de secagem das sementes é fator primordial no sistema de produção, sendo efetuado com o objetivo de reduzir o seu teor de água até níveis seguros, visando à melhor conservação do potencial fisiológico das sementes durante o armazenamento (MARCOS FILHO, 2015).

Ramos *et al.* (2017) mencionam que, para um armazenamento seguro, há necessidade de determinação da atividade de água ( $a_w$ ), teor de água de equilíbrio ( $X_e$ ), umidade relativa e da temperatura do ambiente. Sabe-se que, com  $a_w$  acima de 0,7, os fungos se desenvolvem e proporcionam deterioração à semente. Os autores relatam que as curvas de isotermas de sorção determinam a dependência da  $a_w$  com a  $X_e$ , as quais podem ser representadas mediante diversos modelos matemáticos, e que essas propriedades podem ser estudadas, determinando-se, experimentalmente, as isotermas de adsorção ou de desorção.

As curvas de equilíbrio higroscópico são necessárias para definir limites de desidratação do produto, estimar as mudanças no teor de água sob determinada condição de temperatura e umidade relativa do ambiente bem como contribuir para estimar teores de água adequados ao início da atividade de microrganismos durante o armazenamento (HALL, 1980).

Diante da importância do conhecimento da higroscopicidade dos produtos vegetais, o objetivo do presente trabalho foi determinar as isotermas

de desorção, a partir da recomendação do modelo matemático com melhor ajuste, definir os teores de água para armazenamento e estimar o calor isostérico para as sementes de tungue (*Aleurites fordii* Hemsl).

## 2 Material e métodos

O experimento foi realizado no Laboratório de Pós-colheita de Produtos Vegetais do Instituto Federal Goiano - Campus Rio Verde. As sementes de tungue foram utilizadas com teor de água inicial de  $8,3\% \pm 0,19\%$  base seca (b.s.), adquiridas do Instituto Agrônomo do Paraná (IAPAR).

Para a obtenção do teor de água de equilíbrio higroscópico, foi utilizado o método estático, utilizando-se três repetições, com 20 g de sementes cada uma; as sementes foram envolvidas em um tecido permeável (voile) para permitir a passagem do ar através do material. Após esse procedimento, as amostras foram colocadas no interior de dessecadores. Visando ao controle da umidade relativa do ar no interior dos dessecadores, utilizaram-se soluções saturadas de diferentes sais (descritos na Tabela 1), com uma espessura de 3 cm em cada dessecador.

**Tabela 1** – Valores da umidade relativa (UR) do ar no interior dos dessecadores para determinação do equilíbrio higroscópico

| Composto Químico                  |                     | UR (decimal)    |
|-----------------------------------|---------------------|-----------------|
| LiCl                              | Cloreto de lítio    | $0,14 \pm 0,16$ |
| CaCl <sub>2</sub>                 | Cloreto de cálcio   | $0,35 \pm 0,30$ |
| Ca(NO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub> | Nitrato de cálcio   | $0,48 \pm 0,20$ |
| NaCl                              | Cloreto de sódio    | $0,74 \pm 0,20$ |
| KBr                               | Brometo de potássio | $0,79 \pm 0,32$ |

Fonte: Autoria Própria.

Os dessecadores foram colocados em câmaras incubadoras tipo B.O.D. (*Biochemical Oxygen Demand*), reguladas para as temperaturas de 25°C, 30°C, 35°C e 40°C. A temperatura e a umidade relativa do ar foram monitoradas por meio de um datalogger digital, modelo LogBox – RHT-LCD, inserido no interior dos dessecadores.

As amostras foram pesadas periodicamente até massa constante, ou seja, peso invariável por três pesagens consecutivas, em uma balança semianalítica, com precisão de 0,01 g. O teor de água de equilíbrio higroscópico foi determinado em estufa com circulação de ar, com três repetições, a  $105 \pm 3^\circ\text{C}$ , por 24h (BRASIL, 2009).

Os dados experimentais de teor de água de equilíbrio foram ajustados aos modelos matemáticos frequentemente utilizados para representação da higroscopicidade de produtos vegetais, cujas expressões estão apresentadas na Tabela 2.

**Tabela 2** – Modelos matemáticos utilizados para prever o fenômeno de higroscopicidade das sementes de tungue (*Aleurites fordii* Hemsl)

| Designação do modelo   | Modelo          |     |
|--|-----------------|-----|
| $X_e = a \cdot \left( a_w \frac{b}{T^c} \right)$                                     | Sabbah          | (1) |
| $X_e = a \cdot b \cdot \ln \left[ -(T+c) \cdot \ln(a_w) \right]$                     | Chung-Pfost     | (2) |
| $X_e = \exp \left[ a \cdot (b \cdot T) + (c \cdot a_w) \right]$                      | Copace          | (3) |
| $X_e = \left[ \exp(a \cdot b \cdot T) / -\ln(a_w) \right]^{1/c}$                     | Halsey Mod.     | (4) |
| $X_e = \left[ \ln(1 - a_w) / -a(T + b) \right]^{1/c}$                                | Henderson Mod.  | (5) |
| $X_e = a \cdot \left[ a_w / (1 - a_w) \right]^b$                                     | Oswin           | (6) |
| $X_e = \left[ \log(1 - a_w) / (a \cdot T^b) \right]^{1/c}$                           | Cavalcanti Mata | (7) |
| $X_e = (a + b \cdot T) / \left[ (1 - a_w) / a_w \right]^{1/c}$                       | Oswin Mod.      | (8) |
| $X_e = \exp \left\{ a \cdot (b \cdot T) + \left[ c \cdot \exp(a_w) \right] \right\}$ | Sigma Copace    | (9) |

X<sub>e</sub> – Teor de água de equilíbrio (% b.s.); T – Temperatura (°C); a<sub>w</sub> – Atividade de água do produto/ umidade relativa do ar (decimal); a, b, c – coeficientes dos modelos dependentes do produto (decimal).

Fonte: Autoria própria.

Para o ajuste dos modelos matemáticos, foi realizada a análise de regressão não linear, pelo método Gauss Newton. Para verificar o grau de ajuste de cada modelo, foi considerada a significância dos coeficientes estimados para o modelo (teste de t), os critérios de informação de Akaike (AIC), os critério de informação bayesino de Schwarz (BIC), a significância do coeficiente de regressão pelo teste t ao nível de 5%, a magnitude do coeficiente de determinação (R<sup>2</sup>), os valores do erro médio relativo (P), do erro médio estimado (SE) e o teste de Qui-quadrado (X<sup>2</sup>) ao nível de significância de 5% e o intervalo de confiança a 95% (P<0,05).

Os critérios de informação de Akaike (AIC) são utilizados para comparar modelos não aninhados

ou quando estão sendo comparados três ou mais modelos. Menores valores de AIC refletem um melhor ajuste (AKAIKE, 1974), conforme expressão:

$$AIC = -2 \loglike + 2p \tag{10}$$

Em que, *p*: é o número de parâmetros; e *loglike*: o valor do logaritmo da função de verossimilhança, considerando as estimativas dos parâmetros.

Os critérios de informação bayesino de Schwarz (BIC), Equação 15, também consideram o grau de parametrização do modelo – da mesma forma, quanto menor for o valor de BIC (SCHWARZ, 1978), melhor será o ajuste do modelo. É um critério assintótico, cuja adequação está fortemente relacionada com a magnitude do tamanho de amostra. Em relação à penalização aplicada na quantidade de parâmetros, esta será mais rigorosa do que a do AIC, para amostras pequenas.

$$BIC = -2 \loglike + p \cdot \ln(n) \tag{11}$$

Em que, *n*: é o número de observações utilizadas para ajustar a curva.

Os erros médios relativos e estimados e o teste de Qui-quadrado para cada modelo, foram calculados conforme as seguintes expressões, respectivamente:

$$SE = \sqrt{\frac{\sum(Y - \hat{Y})^2}{GLR}} \tag{12}$$

$$P = \frac{100}{n} \sum \frac{|Y - \hat{Y}|}{Y} \tag{13}$$

$$\chi^2 = \sum \frac{(Y - \hat{Y})^2}{GLR} \tag{14}$$

Em que, *Y*: valor experimental; *Ŷ*: valor estimado pelo modelo; *n*: número de observações experimentais; e *GLR*: graus de liberdade do modelo (número de observações menos o número de parâmetros do modelo).

Para os cálculos do calor isostérico líquido de sorção, para cada teor de água de equilíbrio, foi utilizada a equação de Clausius-Clayperon (IGLESIAS & CHIRIFE, 1976):

$$\frac{\partial \ln(a_w)}{\partial T} = \frac{\Delta h_{st}}{RT_a^2} \quad (15)$$

Em que,  $a_w$ : atividade de água (decimal);  $T_a$ : temperatura absoluta (K);  $\Delta h_{st}$ : entalpia diferencial ou calor isostérico líquido de sorção ( $\text{kJ kg}^{-1}$ );  $R$ : constante universal dos gases ( $8,314 \text{ kJ kmol}^{-1} \text{ K}^{-1}$ ), sendo, para o vapor d'água, de  $0,4619 \text{ kJ kg}^{-1} \text{ K}^{-1}$ .

Integrando-se a equação de Clausius-Clayperon e assumindo-se que o calor isostérico líquido de sorção é independente da temperatura, pode-se encontrar o calor isostérico líquido de sorção, para cada teor de água de equilíbrio, conforme a seguinte equação (WANG & BRENNAN, 1991):

$$\ln(a_w) = - \left( \frac{\Delta h_{st}}{R} \right) \cdot \frac{1}{T_a} + C \quad (16)$$

Em que,  $C$ : coeficiente do modelo.

O calor isostérico integral de dessorção foi obtido adicionando-se, aos valores de calor isostérico líquido de sorção, o valor do calor latente de vaporização da água livre, de acordo com a equação:

$$Q_{st} = \Delta h_{st} + L = a \cdot \exp(-b \cdot X_e) + L \quad (17)$$

Em que,  $Q_{st}$ : calor isostérico integral de sorção ( $\text{kJ kg}^{-1}$ );  $a$ ,  $b$ ,  $c$ : coeficientes do modelo.

O calor latente de vaporização da água livre ( $L$ )  $\text{kJ kg}^{-1}$  necessário ao cálculo de  $Q_{st}$  foi obtido utilizando-se a temperatura média ( $T$  °C), na faixa em estudo, por meio da seguinte equação:

$$L = 2502,2 - 2,39.T \quad (18)$$

Em que:  $L$  = calor latente de vaporização da água livre  $\text{kJ kg}^{-1}$ .

### 3 Resultados e discussão

Os valores médios do teor de água de equilíbrio higroscópico das sementes de tungue obtidos por dessorção, para as temperaturas de 20°C, 25°C, 30°C, 35°C e atividade de água entre 0,14 a 0,81 (decimais), são apresentados na Tabela 3.

**Tabela 3** – Valores médios do teor de água de equilíbrio % b.s. (Xe) das sementes de tungue (*Aleurites fordii* Hemsl) obtidos pelo método estático e por dessorção em relação à atividade de água ( $a_w$ ) e temperatura

| Atividade de água (decimal) | Temperatura (°C) |      |      |      |
|-----------------------------|------------------|------|------|------|
|                             | 20               | 25   | 30   | 35   |
| 0,140                       | -                | 2,97 | -    | -    |
| 0,150                       | 3,29             | -    | -    | 2,09 |
| 0,155                       | -                | -    | 2,44 | -    |
| 0,340                       | -                | -    | -    | 3,48 |
| 0,360                       | -                | 3,93 | -    | -    |
| 0,370                       | 4,04             | -    | 3,77 | -    |
| 0,480                       | -                | 5,08 | -    | 4,94 |
| 0,485                       | 5,47             | -    | -    | -    |
| 0,500                       | -                | -    | 4,98 | -    |
| 0,730                       | -                | -    | 7,14 | -    |
| 0,745                       | -                | 7,40 | -    | -    |
| 0,750                       | 8,06             | -    | -    | 7,10 |
| 0,780                       | -                | -    | 7,99 | -    |
| 0,790                       | -                | 8,06 | -    | 7,83 |
| 0,812                       | 8,35             | -    | -    | -    |

Fonte: Autoria própria.

Nota-se que, em uma mesma temperatura, com o aumento da atividade de água ( $a_w$ ), eleva-se o teor de água de equilíbrio ( $X_e$ ) e, com o acréscimo da temperatura, o teor de água de equilíbrio das sementes de tungue decrescem para a mesma atividade de água (Tabela 3), assim como para diversos produtos agrícolas estudados, como, por exemplo, pinhão-manso (*Jatropha curcas* L.) (CHAVES *et al.*, 2015), crambe (*Crambe abyssinica*) (COSTA *et al.*, 2015a).

Constata-se que, na faixa de  $a_w$  entre 0,140 a 0,500, o  $X_e$  variou de 2,09% a 5,47% b.s. entre as quatro temperaturas; esses valores representam teores de água seguros para inibir o desenvolvimento de microrganismo em sementes oleaginosas por um período de armazenamento mais longo.

De acordo com Ayranci & Duman (2005), é importante definir os teores de água adequados – a fim de se evitem as proliferações de microrganismos – e os limites de secagem do produto, para prever o ambiente mais favorável ao seu armazenamento, o que minimiza a possibilidade de decompositores o degradarem.

Na tabela 4, estão apresentados os coeficientes dos modelos ajustados, para representar as isotermas de dessorção das sementes de tungue. Nota-se que

os modelos de Sabbah, Halsey Modificado, Henderson Modificado e Sigma Copace apresentam pelo menos um coeficiente com estimativa não significativa pelo teste de t; isso pode representar um erro de estimativa no ajuste destes modelos aos dados experimentais – autores, como Barbosa *et al.* (2016), recomendaram modelos que apresentaram estimativas dos coeficientes não significativas.

Segundo Mohapatra e Rao (2005), o erro médio relativo acima de 10% indica que o modelo não representa o fenômeno estudado. Conforme este critério, portanto, todos os modelos analisados se ajustaram bem aos dados experimentais, com o valor de P variando de 4,79% a 7,83% (Tabela 4).

**Tabela 4** – Valores dos coeficientes dos modelos (decimal) ajustados aos teores de água de equilíbrio higroscópico para as sementes de tungue (*Aleurites fordii* Hemsl), com seus respectivos valores de critérios de informação de Akaike (AIC, adimensional), critérios de informação bayesiano de Schwarz (BIC, adimensional), coeficientes de determinação ( $R^2$ , %), erros médios relativos (P, %), *Qui*-quadrado ( $\chi^2$ , decimal), erros médios estimados (SE, decimal)

| Modelos         | Coeficientes  | AIC   | BIC   | $R^2$ | P    | SE   | $\chi^2$ |
|-----------------|---|-------|-------|-------|------|------|----------|
| Sabbah          | a = 16,32845*<br>b = 0,77143*<br>c = 0,17004 <sup>ns</sup>  | 27,87 | 31,85 | 96,34 | 7,83 | 0,45 | 0,206    |
| Chung-Pfost     | a = 14,93098*<br>b = 2,60972*<br>c = 38,79855**             | 10,29 | 14,27 | 98,48 | 4,79 | 0,28 | 0,077    |
| Copace          | a = 0,94766*<br>b = 0,00609*<br>c = 1,64971*                | 10,81 | 14,79 | 98,44 | 5,59 | 0,28 | 0,079    |
| Halsey Mod.     | a = 3,17142*<br>b = 0,01103 <sup>ns</sup><br>c = 2,05781*   | 21,98 | 25,27 | 97,27 | 6,79 | 0,37 | 0,139    |
| Henderson Mod.  | a = 0,00034**<br>b = 59,36968 <sup>ns</sup><br>c = 1,91990* | 16,90 | 20,88 | 97,88 | 5,81 | 0,33 | 0,106    |
| Oswin           | a = 5,00183**<br>b = 0,36153**                              | 14,72 | 18,70 | 98,10 | 6,15 | 0,31 | 0,096    |
| Cavalcanti Mata | a = 0,01058**<br>b = 0,30815**<br>c = 1,92024*              | 16,86 | 20,84 | 97,89 | 5,80 | 0,33 | 0,106    |
| Oswin Mod.      | a = 5,78514*<br>b = 0,02824**<br>c = 2,78580*               | 19,65 | 22,64 | 97,31 | 5,06 | 0,28 | 0,076    |
| Sigma Copace    | a = 0,16333 <sup>ns</sup><br>b = 0,00584**<br>c = 0,98492*  | 21,09 | 25,07 | 97,39 | 6,49 | 0,36 | 0,133    |

\*\*Significativo a 1%; \* Significativo a 5% pelo teste t; ns não significativo pelo teste t.

Fonte: Autoria própria.

Para o teste de *Qui*-quadrado ( $\chi^2$ ), segundo Foo & Hameed (2010), quanto menores os valores, melhores serão os ajustes específicos para as curvas de desorção. O teste serve para comparar os dados

experimentais observados com os dados estimados pelo modelo. Conforme constatado neste estudo, todos os modelos analisados estão no intervalo de confiança de 95%, indicando que não houve diferença entre os

dados estimados com os observados, sendo o maior valor, de  $\chi^2$  0,206 (decimal), encontrado para o modelo de Sabbah.

Havendo uma relação com coeficiente de determinação ( $R^2$ ) que, indicando, em percentagem, quanto o modelo consegue explicar os valores observados, verifica-se que, quanto menor o  $R^2$ , consequentemente menor será o ajuste as amostras experimentais. Nota-se que, de modo geral, os modelos ajustados apresentaram elevados coeficientes de determinação com  $R^2 > 96\%$  (Tabela 4), sendo que os maiores valores foram obtidos para os modelos de Chung-Pfost, Copace e Oswin Modificado com  $R^2 > 98\%$ . Consta-se também que esses modelos apresentaram bons indicadores para os erros médios relativos e estimados e teste de *Qui*-quadrado ( $P < 7\%$ ,  $SE < 0,31$  e  $\chi^2 < 0,096$ ), respectivamente.

Para a modelagem das isotermas de produtos vegetais, são comumente utilizados o coeficiente de determinação ( $R^2$ ), erro médio relativo (P), erro médio estimado (SE), teste de *Qui*-quadrado ( $\chi^2$ ) como parâmetros estatísticos, com intuito de identificar o melhor modelo. Atualmente, na literatura, vêm-se aplicando os critérios de informação de Akaike (AIC) e critérios de informação bayesiano de Schwarz (BIC) na modelagem matemática de processos pós-colheita (GOMES *et al.*, 2018; FERREIRA JUNIOR *et al.*, 2018; QUEQUETO *et al.*, 2019; SOUZA *et al.*, 2019).

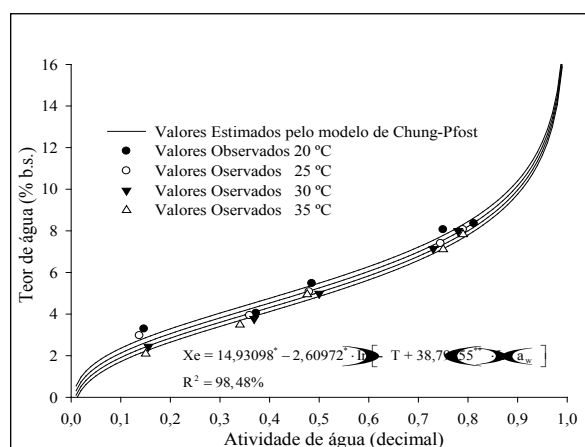
Ainda na Tabela 4, nota-se que o modelo de Chung-Pfost apresentou os menores valores para os critérios AIC e BIC. Ferreira Junior *et al.* (2018), estudando a higroscopicidade de sementes de jatobá (*Hymenaea stigonocarpa* Mart.), utilizaram esses parâmetros no ajuste dos modelos matemáticos, indicando a utilização desses parâmetros para auxiliar na escolha do melhor modelo. De acordo com o relato desses autores e de Gomes *et al.* (2018), menores valores para AIC e BIC indicam melhor ajuste do modelo ao fenômeno estudado.

Dentre os modelos que apresentaram os melhores ajustes estatísticos, o de Chung-Pfost apresentou os menores valores de AIC, BIC e erro médio relativo (P), sendo este selecionado para representar as isotermas de dessecção das sementes de tungue, conforme apresentado na Figura 1.

O modelo apresenta a vantagem de ser relativamente simples, por sua versatilidade, representando a higroscopicidade de diferentes produtos, tanto para produtos amiláceos como para oleogionosas. Em consonância com os resultados

deste estudo, o modelo de Chung-Pfost foi o que melhor representou a higroscopicidade das sementes de sorgo-sacarino (*Sorghum bicolor* (L.) Moench) e sementes de beterraba (*Beta vulgaris*), obtidos por dessecção, para diferentes condições de temperatura e atividades de água (ULLMANN *et al.*, 2016; CORRÊA *et al.*, 2016).

**Figura 1** – Valores experimentais de teor de água de equilíbrio ( $X_e$ ) e isotermas de dessecção estimadas pelo modelo Chung-Pfost, nas sementes de tungue (*Aleurites fordii* Hemsl), em diferentes condições de temperatura e atividades de água ( $a_w$ )



\*\*Significativo a 1%; \* Significativo a 5% pelo teste t

Fonte: Autoria própria.

O comportamento higroscópico de sementes de pimenta cabacinha (*Capsicum chinense* L.), na faixa de atividade de água entre 0,213 a 0,975 (decimal), sob o método estático-indireto, pode ser representada pelo modelo de Chung-Pfost de acordo com Silva *et al.* (2015).

Verifica-se que, para uma atividade de água constante, os valores de teor de água de equilíbrio higroscópico das sementes diminuem com o aumento da temperatura (Figura 1). Tal fato deixa evidente que o aumento da atividade de água favorece a elevação do teor de água de equilíbrio em todas as temperaturas testadas. Comportamento similar foi observado por Sousa *et al.* (2016) no estudo das isotermas de dessecção dos diásporos de pequi (*Caryocar Brasiliense*, CAMB.)

Observa-se que as curvas das isotermas do tungue, calculadas pelo modelo de Chung-Pfost, para as temperaturas entre 20°C e 35°C podem ser classificadas como sigmoidal do tipo II (, 1985). De acordo com Alothman (2012), a isoterma do tipo II é característica de materiais macroporosos ou não

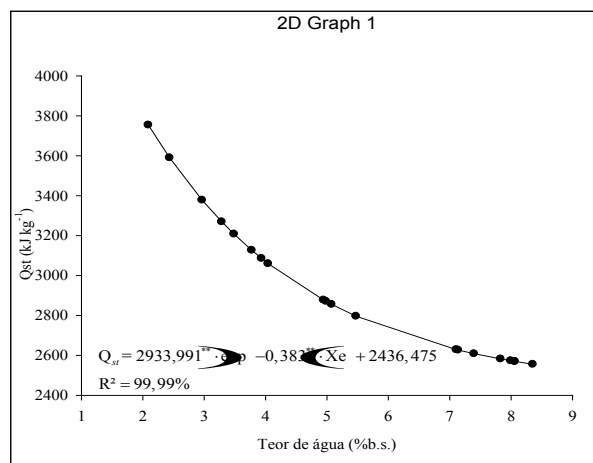
poroso. Para a maioria dos produtos agrícolas, as isotermas apresentam a forma típica sigmoideal (tipo II), como, por exemplo, mamona (*Ricinus communis* L.) (GONELI *et al.*, 2016), frutos de baru (*Dipteryx alata* Vog.) (OLIVEIRA *et al.*, 2017).

Fabra *et al.* (2009) concluíram que a forma típica de uma curva isotérmica reproduz a maneira pela qual a água se liga ao complexo de membranas do produto. Assim, interações fracas entre as moléculas de água e a superfície do produto geram maior atividade de água. Quando as interações são fortes, a atividade de água é menor, tornando-se o produto menos propício às deteriorações durante o armazenamento.

De acordo com Oliveira *et al.* (2005), o início do desenvolvimento de microrganismo em produtos vegetais armazenados ocorre a partir da atividade de água de 0,7 (decimal); com isso, a partir das estimativas do modelo de Chung-Pfost (Figura 1), os teores de água para armazenamento das sementes de tungue não podem ultrapassar de 7,22%; 6,99%; 6,78% e 6,58% b.s., para as temperaturas controladas de 20°C, 25°C, 30°C e 35°C.

Na Figura 2, são apresentados os valores do calor isotérmico integral de dessorção (Qst) em função do teor de água de equilíbrio (% b.s.). Nota-se que os valores de calor isotérmico integral de dessorção para as sementes de tungue, na faixa do teor de água de equilíbrio de 2,09 a 8,35 (% b.s.), variaram de 3.754 kJ kg<sup>-1</sup> a 2.555 kJ kg<sup>-1</sup>.

**Figura 2** – Valores experimentais e estimados do calor isotérmico integral de dessorção (Qst) estimados em função do teor de água de equilíbrio (Xe) das sementes de tungue (*Aleurites fordii* Hemsli)



\*\*Significativo a 1%; \* Significativo a 5% pelo teste t.

À medida que o teor de água da semente de tungue diminui, mais energia é necessário fornecer para a remoção da água que está fortemente ligada à estrutura do material, tal como fibras de celulose e grânulos de amido. Essa energia está representada pelos valores do calor isotérmico integral de dessorção, conforme observado para diversos produtos agrícolas, sendo que as diferenças nos valores de Qst desses produtos agrícolas estão relacionados com a composição química, faixa de temperatura trabalhada e teor de água. Ferreira Junior *et al.* (2013) verificaram que os valores de Qst para as sementes de jatobá (*Hymenaea stigonocarpa* Mart.), na faixa do teor de água de equilíbrio de 3,96% a 8,55% b.s., variaram de 4.316,22 kJ kg<sup>-1</sup> a 2.760,80 kJ kg<sup>-1</sup>.

Confirmando a diferença entre os valores de calor isotérmico de dessorção, Costa *et al.* (2015b) encontraram, para as sementes de boca boa, (*Buchenavia capitata* (Vahl) Eichler), na faixa de teor de água de equilíbrio de 13,31% a 7,21% b.s., os valores de 2.667,93 kJ kg<sup>-1</sup> a 2.819,56 kJ kg<sup>-1</sup>. enquanto, para os aquênios de cajuzinho-do-cerrado (*Anacardium humile* St. Hil.), os valores para Qst foram de 2.734,82 kJ kg<sup>-1</sup> a 2548,49 kJ kg<sup>-1</sup>, para a faixa de teor de água de equilíbrio de 4,51% a 13,40% b.s. (BARBOSA *et al.*, 2016).

## 4 Conclusão

Recomenda-se o modelo Chung-Pfost para a descrição do teor de água de equilíbrio higroscópico das sementes de tungue.

Os teores de água seguros para o armazenamento das sementes de tungue, para as temperaturas de 20°C, 25°C, 30°C e 35°C, devem ser inferiores a 7,22%; 6,99%; 6,78% e 6,58% b.s., respectivamente.

Os valores de calor isotérmico integral de dessorção para as sementes de tungue na faixa do teor de água de equilíbrio de 2,08 a 8,35 (% b.s.) variaram de 3.754 kJ kg<sup>-1</sup> a 2.555 kJ kg<sup>-1</sup>.

## REFERÊNCIAS

- AKAIKE, H. A new look at the statistical model identification. **IEEE Transaction on Automatic Control**, v. 19, n. 6, p. 716-723, 1974.
- ALOTHMAN, Z. A. A. A review: Fundamental aspects of silicate mesoporous materials. **Materials**, v. 5, n. 12, p. 2874-2902, 2012.

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, n. 1, p. 83-91, 2005.

BARBOSA, K. F.; SALES, J. F.; RESENDE, O.; OLIVEIRA, D. E. C.; ZUCHI, J.; SOUSA, K. A. Desorption isotherms and isosteric heat of 'cajuzinho-do-cerrado' achenes. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 20, n. 5, p. 481-486, 2016.

BRASIL. MINISTÉRIO DA AGRICULTURA E REFORMA AGRÁRIA. Secretaria Nacional de Defesa Agropecuária. **Regras para Análise de Sementes**, 395 p., 2009.

CHAVES, T. H.; RESENDE, O.; OLIVEIRA, D. E. C.; SMANIOTTO, T. A. S.; SOUSA, K. A. Isotermas e calor isostérico das sementes de pinhão-mansô. **Engenharia na agricultura**, v. 23, n. 1, p. 9-18, 2015.

CORRÊA, P. C.; OLIVEIRA, G. H. H.; OLIVEIRA, A. P. L. R.; GONELI, A. L. D.; BOTELHO, F. M. Isotermas de dessorção de sementes de beterraba. **Engenharia na Agricultura**, v. 24, n. 1, p. 15-21, 2016.

COSTA, L. M.; RESENDE, O.; OLIVEIRA, D. E. C. Determinação das isotermas de equilíbrio higroscópico de frutos de crambe pelo método dinâmico. **Bioscience Journal**, v. 31, n. 2, p. 382-391, 2015a.

COSTA, L. M.; RESENDE, O.; OLIVEIRA, D. E. C.; SOUSA, K. A. Isotermas e calor isostérico de sementes de *Buchenavia capitata* (Vahl) Eichler. **Revista Ciência Agronômica**, v. 46, n. 3, p. 516-523, 2015b.

DYER, J.; CHAPITAL, D. C.; KUAN, J. W.; SHEPHERD, H. S.; TANG, F.; PEPPERMAN, A. B. Production of linolenic acid in yeast cells expressing an omega-3 desaturase from tung (*Aleurites fordii*). **Journal of the American Oil Chemists' Society**, v. 81, n. 7, p. 647-651, 2004.

FABRA, M. J.; TALENS, P.; MORAGA, G.; MARTÍNEZ-NAVARRETE, N. Sorption isotherm and state diagram of grapefruit as a tool to improve product processing and stability. **Journal of Food Engineering**, v. 93, n. 1, p. 52-58, 2009.

FERREIRA JUNIOR, W. N.; RESENDE, O.; OLIVEIRA, D. E. C.; COSTA, L. M. Isotherms and isosteric heat desorption of *Hymenaea stigonocarpa* Mart. Seeds. **Journal of Agricultural Science**, v. 10, n. 10, p. 504-512, 2018.

FOO, K. Y.; HAMEED, B. H. Insights into the modeling of adsorption isotherm systems. **Chemical Engineering Journal**, v. 156, n. 1, p. 2-10, 2010.

GOMES, F. P.; RESENDE, O.; SOUSA, E. P.; OLIVEIRA, D. E. C.; ARAÚJO NETO, F. R. Drying kinetics of crushed mass of 'jambu: Effective diffusivity and activation energy. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 22, n. 7, p. 499-505, 2018.

GONELI, A. L. D.; CORRÊA, P. C.; BOTELHO, F. M.; OLIVEIRA, G. H. H.; RESENDE, O.; MAUAD, M. Moisture sorption isotherms of castor beans. Part 1: Mathematical modeling and hysteresis. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 20, n. 8, p. 751-756, 2016.

HALL, C. W. **Drying and storage of agricultural crops**. Westport: The AVI Publishing Company, 381p., 1980.

IGLESIAS, H.; CHIRIFE, J. Prediction of the effect of temperature on water sorption isotherms of food material. **Journal of Food Technology**, v. 11, n. 2, p. 109-116, 1976.

MARCOS FILHO, J. **Fisiologia de sementes de plantas cultivadas**. Londrina, ABRATES, 660 p., 2015.

MOHAPATRA, D.; RAO, P. S. A thin layer drying model of parboiled wheat. **Journal of Food Engineering**, v. 66, n. 4, p. 513-518, 2005.

OLIVEIRA, M. M. DE; CAMPOS, A. R. N.; GOMES, J. P.; SILVA, F. L. H. Isotermas de sorção do resíduo agroindustrial de casca do abacaxi (*Ananas comosus* L. Mer). **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 9, n. 4, p. 565-569, 2005.

OLIVEIRA, D. E. C.; RESENDE, O.; COSTA, L. M.; FERREIRA JUNIOR, W. N.; SILVA, I. O. F. Hygroscopicity of baru (*Dipteryx alata* Vogel) fruit. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 21, n. 4, p. 279-284, 2017.

QUEQUETO, W. D.; RESENDE, O.; SILVA, P. C.; SILVA, F. A. S.; SILVA, L. C. M. Drying kinetics of noni seeds. **Journal of Agricultural Science**, v. 11, n. 5, p. 250-258, 2019.

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. **Bioteecnología en el Sector Agropecuario y Agroindustrial**, v. 15, n. 1, p. 95-104, 2017.



SCHWARZ, G. Estimating the dimension of a model. **Annals of Statistics**, v. 6, n. 2, p. 461-464, 1978.

SILVA, H. W.; COSTA, L. M.; RESENDE, O.; OLIVEIRA, D. E. C.; SOARES, R. S.; VALE, L. S. R. Higroscopicidade das sementes de pimenta (*Capsicum chinense* L.). **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 19, n. 8, p. 780-784, 2015.

SOUSA, K. A.; RESENDE, O.; CARVALHO, B. 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.

SOUZA, D. G.; RESENDE, O.; MOURA, L. C.; FERREIRA JUNIOR, W. N.; ANDRADE, J. W. S. Drying kinetics of the sliced pulp of biofortified sweet potato (*Ipomoea batatas* L.). **Engenharia Agrícola**, v. 39, n. 2, p. 176-181, 2019.

ULLMANN, R.; RESENDE, O.; OLIVEIRA D. E. C.; COSTA, L. M.; CHAVES, T. H. Higroscopicidade das sementes de sorgo-sacarino. **Engenharia Agrícola**, v. 36, n. 3, p. 515-524, 2016.

WANG, N.; BRENNAN, J. G. Moisture sorption isotherm characteristics of potato at four temperatures. **Journal of Food Engineering**, v. 14, n. 4, p. 269-287, 1991.