



**LUCIANO DA COSTA PEREIRA**

**SECAGEM DO FRUTO DO JAMBEIRO**  
**(*Syzygium malaccense* L.)**

**LUCIANO DA COSTA PEREIRA**

**SECAGEM DO FRUTO DO JAMBEIRO**  
**(*Syzygium malaccense* L.)**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Colegiado de Curso da Engenharia Química do Centro de Ciências Exatas e Tecnologia da Universidade Federal do Maranhão, como parte dos requisitos para obtenção do diploma de Graduação em Engenharia Química.

Orientadora: Prof.<sup>a</sup> Dr.<sup>a</sup> Audirene Amorim Santana

São Luís  
2018

DA COSTA PEREIRA, LUCIANO.

SECAGEM DO FRUTO DO JAMBEIRO *Syzygium malaccense* L /  
LUCIANO DA COSTA PEREIRA. - 2018.

65 f.

Orientador(a): Audirene Amorim Santana.

Monografia (Graduação) - Curso de Engenharia Química,  
Universidade Federal do Maranhão, São Luís, 2018.

1. Jambo. 2. Modelos Matemáticos. 3. Propriedades  
termodinâmicas. 4. Secagem. I. Amorim Santana, Audirene.  
II. Título.

**BANCA EXAMINADORA:**

---

Prof.<sup>a</sup> Dr.<sup>a</sup> AUDIRENE AMORIM SANTANA  
Orientador – COEQ/CCET/UFMA

---

Prof. Mestre LOURYVAL COELHO PAIXÃO  
BICT/CCET/UFMA

---

Eng. Mestre DENNYS CORREIA DA SILVA  
DEQ/UFRN

**12 de Dezembro de 2018**

**Luciano da Costa Pereira**

**NASCIMENTO** 23/10/1993 – ZÉ DOCA / MA

**FILIAÇÃO** Vilani da Costa Pereira  
Antonio Martinho Alves Pereira

**2012/2018** Curso de Graduação  
Engenharia Química - Universidade Federal do Maranhão

Dedico este trabalho aos meus pais, irmãos e esposa que de muitas formas me incentivaram e ajudaram para que eu chegasse a essa etapa de minha vida.

## AGRADECIMENTOS

Acima de tudo e em primeiro lugar agradeço a Deus, razão de tudo e de todos nós.

À minha orientadora Prof.<sup>a</sup> Dr.<sup>a</sup> Audirene Amorin Santana, pelo incentivo, orientação e auxílio, sempre disposta a esclarecer as dúvidas que surgiam.

Ao meu amigo Dennys Correia da Silva pelo seu apoio na elaboração deste trabalho, ao seu incentivo e dedicação sempre disposto a me ajudar nos momentos mais necessários.

A minha esposa Diana Diniz de Albuquerque, meus pais Antonio Martinho Alves Pereira e Vilani da Costa Pereira e meus Irmãos Adriana da Costa Pereira, Antonia da Costa Pereira, Alane da Costa Pereira e Leandro da Costa Pereira pelo amor incondicional, pela educação, pelo incentivo e pelo cuidado de sempre.

A Universidade Federal do Maranhão por ter me recebido de braços abertos e com todas as condições que me proporcionaram dias de aprendizagem muito ricos.

Aos Professores do Curso de Engenharia Química pelo esforço, paciência e sabedoria. Foram eles que me deram recursos e ferramentas para evoluir um pouco mais todos os dias.

E por fim, às demais pessoas que contribuíram, direta e indiretamente, para o desenvolvimento desse trabalho.

Muito obrigado!

PEREIRA, Luciano da Costa. **Secagem do fruto do jameiro (*Syzygium malaccense* L.)**. 2018. 57 f. Trabalho de Conclusão de Curso de Engenharia Química do Centro de Ciências Exatas e Tecnologia da Universidade Federal do Maranhão, São Luís, 2018.

## RESUMO

O processo de secagem de produtos agrícolas tem sido uma técnica muito empregada para redução do teor de água dos produtos com o intuito de dificultar o crescimento microbiano e a ocorrência de reações químicas e bioquímicas, possibilitando o armazenamento seguro por longos períodos, bem como a redução a massa e volume a ser transportado. O presente trabalho teve por objetivo realizar um estudo de cinética de secagem do fruto do jameiro (*Syzygium malaccense* L.) para as temperaturas de 40, 50, 60 e 70 °C. A secagem foi realizada em uma estufa (FANEM, 515). Os dados da secagem foram coletados e, posteriormente, analisados para realizar a caracterização das curvas de secagem por meio dos seguintes modelos matemáticos: Lewis; Handerson e Pabis; Page; Logarítmico; Midilli et al.; Dois termos; Aproximação de Difusão; Handerson e Pabis Modificada; Thompson; Cavalcanti Mata e Verma. Para o ajuste dos modelos matemáticos, foram realizadas análises de regressão não linear pelo método Quasi-Newton, utilizando o software Statistica 12.5. Para determinação do coeficiente de difusão (D) foi utilizado a ferramenta solver do Excel 2010, com aproximação de 21 termos. Com os resultados obtidos pode-se observar que os modelos que apresentaram os melhores ajustes, ou seja, aqueles com elevados R<sup>2</sup> e baixos MQD e SE, foi o do Cavalcanti Mata, seguidos pelo modelo logarítmico e o do Midilli. A energia de ativação para a difusão no processo de secagem do jambo foi de 52,421 KJ/mol. A entalpia do processo de secagem diminuiu com o aumento da temperatura de secagem, com os valores de 49,817, 49,734, 49,651 e 49,568 KJ mol<sup>-1</sup> respectivamente para as temperaturas 40, 50, 60 e 70°C. O valor da entropia permaneceu aproximadamente constante e igual a -0,273 KJ mol<sup>-1</sup> K<sup>-1</sup> e a energia de livre de Gibbs aumentou com o aumento da temperatura, atingindo valores de 135, 137, 140 e 143 KJ mol<sup>-1</sup> para as temperaturas 40, 50, 60 e 70°C, respectivamente. A difusão líquida aumenta com a elevação da temperatura apresentando valores entre 6,75x10<sup>-11</sup> e 3,60x10<sup>-10</sup> m<sup>2</sup>s<sup>-1</sup>.

**Palavras-chave:** Secagem. Jambo. Modelos Matemáticos. Propriedades termodinâmicas.



PEREIRA, L. C. **Drying of Malay Apple (*Syzygium malaccense* L.)**. 2018. 57 f. Graduate Work (Graduate in Chemical Engineering) – Curso de Engenharia do Centro de Ciências Exatas e Tecnologia da Universidade Federal do Maranhão, São Luís, 2018.

### ABSTRACT

The drying process of agricultural products has been a very used technique to reduce the water content of the products in order to hinder microbial growth and the occurrence of chemical and biochemical reactions, allowing the long term safe storage as well as reducing the mass and volume to be transported. The objective of the present work was to study the dehydration of Malay Apple (*Syzygium malaccense* L.) at temperatures of 40, 50, 60 and 70° C. Drying was performed in a drying oven (FANEM, 515). The drying data were collected and later analyzed to perform the characterization of the drying curves by means of the following mathematical models: Lewis; Handerson and Pabis; Page; Logarithmic; Midilli et al.; Two terms; Aproximation of diffusion; Handerson and Modified Pabis; Thompson; Cavalcanti Mata and Verma. For the adjustment of the mathematical models, non-linear regression analyzes were performed using the Quasi-Newton method, using Statistica 12.5 software. For the determination of the diffusion coefficient (D), the solver tool of Excel 2010 was used, with approximation of 21 terms. With the results obtained it can be observed that the models that presented the best adjustments, that is, those with high R<sup>2</sup> and low MQD and SE, were the Cavalcanti Mata, followed by the logarithmic model and the Midilli et al.. The activation energy for diffusion in the drying process of the Malay apple fruit was 52.421 KJ mol<sup>-1</sup>. The enthalpy of the drying process decreased with increasing drying temperature, the values of 49.817, 49.734, 49.651 and 49.568 KJ mol<sup>-1</sup> respectively were found at temperatures 40, 50, 60 and 70°C. The entropy value remained approximately constant and equal to -0.273 KJ mol<sup>-1</sup> K<sup>-1</sup> and Gibbs free energy increased with increasing temperature, reaching values of 135, 137, 140 and 143 KJ mol<sup>-1</sup> at temperatures 40, 50, 60 and 70°C. The net diffusion increases with the elevation of the temperature presenting values between 6,75x10<sup>-11</sup> e 3,60x10<sup>-10</sup> m<sup>2</sup>s<sup>-1</sup>.

**Keywords:** Drying. Malay apple. Mathematical Models. Thermodynamic Properties.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Jambo vermelho ( <i>Syzygium malaccense</i> L.).....	4
Figura 2 – Taxas generalizadas de reações de deterioração em alimentos como função da $A_w$ em temperatura ambiente .....	7
Figura 3 – Diferentes tipos de Isoterma .....	11
Figura 4 – Isotermas de adsorção e dessorção, mostrando o fenômeno de histerese .....	12
Figura 5 – Etapas do processo de secagem com o tempo .....	14
Figura 6 – Diferentes tipos de curvas de secagem.....	15
Figura 7 – Umidade do alimento durante o processo de secagem.....	18
Figura 8 – Estufa utilizada nos experimento de secagem. ....	24
Figura 9 – Balança analítica utilizada para pesagem das amostras. ....	25
Figura 10 – Curvas de secagem experimentais obtidas para a temperatura de 40 e 50 °C.....	30
Figura 11 – Curvas de secagem experimentais obtidas para a temperatura de 60 e 70 °C.....	30
Figura 12 – Valores médios dos coeficientes de difusão ( $m^2s^{-1}$ ) obtidos para a secagem do Jambo nas temperaturas de 40, 50, 60 e 70 °C. ....	35
Figura 13 – Representação de Arrhenius para o coeficiente de difusão, em função da temperatura de secagem do Jambo. ....	36

**LISTA DE TABELAS**

Tabela 1 – Modelos matemáticos testados.....	27
Tabela 2 – Parâmetros de ajustes dos modelos cinéticos obtidos para a secagem do jambo..	32
Tabela 3 – Coeficiente de Determinação ( $R^2$ ), Desvio Padrão da Estimativa (SE), Desvio Quadrático Médio (DQM).....	33
Tabela 4 – Propriedades termodinâmicas da secagem do jambo, entalpia ( $\Delta H$ ), entropia ( $\Delta S$ ) e energia de Gibbs ( $\Delta G$ ).....	37

**LISTA DE SÍMBOLOS**

$A_w$	atividade de água (adimensional)
$f$	fugacidade (Pa, bar, atm)
$P$	pressão de vapor (Pa, bar, atm)
UR	umidade relativa (%)
URE	umidade relativa de equilíbrio
RU	razão da umidade (adimensional)
$X$	teor de umidade (g/g, base seca)
$t$	tempo (min, segundo)
$k$	constante de secagem ( $\text{min}^{-1}$ )
$a, b, c$	coeficientes dos modelos (adimensionais)
SE	desvio padrão da estimativa
DQM	desvio quadrático médio
$R^2$	coeficiente de determinação
$C_v$	coeficiente de variação de Pearson
$y$	valor experimental
$\bar{y}$	média dos valores experimentais
$\hat{y}$	valor estimado
DP	desvio padrão
GLR	grau de liberdade do modelo
$D$	coeficiente de difusão efetivo ( $\text{m}^2\text{s}^{-1}$ )
$V$	volume ( $\text{m}^3$ )
$S$	área superficial ( $\text{m}^2$ )
$T_a$	temperatura absoluta (K)
$D_0$	fator pré-exponencial ( $\text{m}^2\text{s}^{-1}$ )
$R$	constante universal dos gases
$E_a$	energia de ativação ( $\text{J mol}^{-1}$ , $\text{KJ mol}^{-1}$ ),
$\Delta H$	entalpia ( $\text{J mol}^{-1}$ , $\text{KJ mol}^{-1}$ ),
$\Delta S$	entropia ( $\text{J mol}^{-1} \text{K}^{-1}$ , $\text{KJ mol}^{-1}\text{K}^{-1}$ ),
$\Delta G$	energia de Gibbs ( $\text{J mol}^{-1}$ , $\text{KJ mol}^{-1}$ ),
$k_b$	constante de Boltzman
$h_p$	constante de Planck

## SUMÁRIO

<b>FOLHA DE APROVAÇÃO .....</b>	<b>iii</b>
<b>DADOS CURRICULARES .....</b>	<b>iv</b>
<b>DEDICATÓRIA.....</b>	<b>v</b>
<b>AGRADECIMENTOS.....</b>	<b>vi</b>
<b>RESUMO .....</b>	<b>vii</b>
<b>ABSTRACT .....</b>	<b>viii</b>
<b>LISTA DE FIGURAS .....</b>	<b>ix</b>
<b>LISTA DE TABELAS.....</b>	<b>x</b>
<b>LISTA DE SÍMBOLOS.....</b>	<b>xi</b>
<b>SUMÁRIO.....</b>	<b>xii</b>
<b>1 INTRODUÇÃO.....</b>	<b>1</b>
<b>2 OBJETIVOS .....</b>	<b>3</b>
<b>2.1 Objetivo Geral.....</b>	<b>3</b>
<b>2.2 Objetivos Específicos.....</b>	<b>3</b>
<b>3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....</b>	<b>4</b>
<b>3.1 Generalidades da cultura da Jambo.....</b>	<b>4</b>
<b>3.1.1 TAXONOMIA E CARACTERÍSTICAS GERAIS .....</b>	<b>4</b>
<b>3.2 Umidade em Alimentos .....</b>	<b>5</b>
<b>3.2.1 A ÁGUA NOS ALIMENTOS .....</b>	<b>5</b>
<b>3.2.2 ATIVIDADE DE ÁGUA .....</b>	<b>6</b>
<b>3.3 Isotermas de sorção .....</b>	<b>8</b>
<b>3.3.1. HISTERESE .....</b>	<b>11</b>
<b>3.4 Secagem .....</b>	<b>12</b>
<b>3.4.1 MÉTODOS DE SECAGEM.....</b>	<b>16</b>
<b>3.5 Metodologia para determinação de umidade em alimentos .....</b>	<b>16</b>
<b>3.5.1 SECAGEM EM ESTUFAS .....</b>	<b>17</b>
<b>3.5.2 SECAGEM POR RADIAÇÃO INFRAVERMELHA.....</b>	<b>17</b>
<b>3.5.3 SECAGEM EM FORNOS DE MICRO-ONDAS .....</b>	<b>17</b>
<b>3.6 Cinética de Secagem.....</b>	<b>18</b>
<b>3.6.1 VARIÁVEIS IMPORTANTES NA SECAGEM DE ALIMENTOS .....</b>	<b>19</b>
<b>3.6.2 EFEITO DA TEMPERATURA E VELOCIDADE DO AR DE SECAGEM .....</b>	<b>21</b>
<b>3.6.3 MODELOS CINÉTICOS .....</b>	<b>22</b>
<b>4 MATERIAL E MÉTODOS .....</b>	<b>24</b>
<b>4.1 Matéria prima .....</b>	<b>24</b>
<b>4.2 Equipamentos e Utensílios .....</b>	<b>24</b>

<b>4.3 Procedimentos experimentais .....</b>	<b>25</b>
4.3.1 SELEÇÃO E PREPARAÇÃO DA MATÉRIA PRIMA.....	25
4.3.2 DETERMINAÇÃO DO TEOR DE UMIDADE .....	25
<b>4.4 Experimento de secagem.....</b>	<b>26</b>
<b>4.5 Análise estatística, métodos e procedimentos experimentais.....</b>	<b>26</b>
<b>5 RESULTADOS E DISCUSSÃO .....</b>	<b>30</b>
<b>6 CONCLUSÃO .....</b>	<b>39</b>
<b>REFERÊNCIAS.....</b>	<b>40</b>
<b>APÊNDICE A – MODELOS COM OS MELHORES AJUSTES.....</b>	<b>46</b>

## 1 INTRODUÇÃO

Na conservação de alimentos, a desidratação ou secagem é apontada como um dos procedimentos mais importantes para diminuição da atividade de água ( $A_w$ ), sendo o processo comercial mais utilizado para preservar o alimento quando comparado com outros métodos de conservação de períodos longos, como a centrifugação, tratamentos químicos, irradiação, entre outros. Apresenta-se como um processo de baixo custo e de operação mais simples (ALEXANDRE et al., 2009). Ao diminuir o teor de água do produto reduz-se o risco de contaminação por microrganismo e a ocorrência de reações enzimáticas preservando-lhes, a qualidade, o valor nutritivo e ainda assegurando o poder germinativo, além de reduzir significativamente os custos de transporte e manuseio de alimentos (ANDRADE et al., 2006).

Com os resultados dos avanços tecnológicos na área de conservação de alimentos, o mercado tem disponibilizado uma variedade de produtos desidratados que apresentam grande diversificação e aplicação, como por exemplo: sopas instantâneas com vegetais desidratados, sucos de frutas em pó, maçã, abacaxi, manga, banana, cogumelos desidratados, polpas de frutas em pó e o tomate seco em conservas, além de outros (BEZERRA, 2009). Além disso, frutas tropicais de apreciável sabor e aroma, porém, altamente perecíveis, requerem a remoção de água para sua preservação, sendo frequentemente utilizado a secagem por permitir atingir níveis mais baixos de atividades de água (BORGES; MENEGALLI, 1994).

Entre as miríades de espécies fartamente distribuídas em nossos biomas, temos o jambeiro, cujo fruto é uma drupa periforme, com 5 a 8 cm de comprimento, peso médio de 85 g, superfície lisa, cor vermelha e roxa. Apresenta casca fina e suave, polpa branca, suculenta de aspecto esponjoso, aroma agradável e uma semente de 2 a 3 cm de diâmetro, de cor marrom (ALMEIDA et al., 2008).

Segundo Augusta et al. (2010), a polpa do jambo apresenta características adequadas para o consumo devido aos seus atributos de qualidade, como alto rendimento em polpa e forma levemente elíptica ou oval que lhe confere um formato exótico. Possui composição química adequada para enriquecer alimentos ou como fonte para extração de corante e antioxidante, usados na indústria de alimentos devido ao alto teor de carboidratos, elevada acidez e altas concentrações de ácido ascórbico, antocianinas e fibra alimentar. Mas a sua perecibilidade dificulta o aumento da vida útil dos frutos frescos, bem como o seu transporte para mercados distantes (BEZERRA, 2009).

Dito isso, a secagem é o processo industrial bastante adequado para a preservação da qualidade do jambo. Consiste na remoção de grande parte da água inicialmente contida no

produto logo após a maturidade fisiológica, para que promova longos períodos de armazenamento e durabilidade (SANTOS et al., 2016).

Nesse sentido, a secagem demonstra ser uma técnica viável para aproveitar o excedente da produção, disponibilizando para o mercado consumidor produtos estáveis e seguros, além de possibilitar uma alternativa de renda para agricultores e pessoas ligadas ao ciclo de produção e comercialização do jambo.

No entanto, poucos dados estão disponíveis na literatura sobre a cinética de secagem do jambo. Deste modo, esse estudo justifica-se pela necessidade de analisar a cinética de secagem do fruto do jameiro (*Syzygium malaccense* L.) muito conhecido e apreciado nos estados do Norte e Nordeste brasileiro.

A aplicação de parâmetros e modelos matemáticos é de fundamental importância para representar o processo de secagem, haja vista que as informações geradas são de grande valor para o desenvolvimento de projetos, equipamentos e predição dos tempos de secagem.



## **2 OBJETIVOS**

### **2.1 Objetivo Geral**

Estudar a cinética de secagem da polpa do jambo (*Syzygium malaccense* L.) em estufa devidamente controlada nas temperaturas de 40, 50, 60 e 70°C.

### **2.2 Objetivos Específicos**

- Determinar por meio dos dados experimentais as curvas de secagem de jambo nas diferentes temperaturas definidas;
- Avaliar o comportamento da curva de secagem de jambo, para cada temperatura, analisando e fazendo as devidas modelagens e análise estatísticas;
- Determinar as constantes e parâmetros de secagem para todos os modelos matemáticos ajustados, indicando o que mais se adequa;
- Determinar os coeficientes de difusividade e os parâmetros da equação de Arrhenius para o caso proposto;
- Determinar as propriedades termodinâmicas da secagem.

### 3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

#### 3.1 Generalidades da cultura do Jambo

O *Syzygium malaccense* L., vulgarmente chamado de jambo vermelho (Figura 1), também é conhecida como maçã da montanha ou maçã da malásia; tem sido cultivado por tão longo tempo que sua origem é incerta, embora se estime que seja nativo da região indo-malaio ou sudeste asiático. O jambo vermelho se disseminou por diversas regiões tropicais do mundo, especialmente na África e América do sul (WHISTLER; ELEVITCH, 2006).

Figura 1- Jambo vermelho (*Syzygium malaccense* L.).



Fonte: Oliveira et al., (2011).

##### 3.1.1 TAXONOMIA E CARACTERÍSTICAS GERAIS

Os frutos de jambo-vermelho são piriformes, carnosos, indeiscentes, do tipo bacóide, com uma ou duas sementes hemisférica de 1,6 a 2,0 cm de largura, alguns são inteiramente sem sementes. Os frutos possuem de 5 a 10 cm de comprimento, 2,5 a 7,5 cm de largura no ápice e peso médio de 85 g. O epicarpo é delgado, liso e de coloração que varia de acordo com o estágio de maturação podendo ser rosa, vermelho a vermelho bem escuro. O mesocarpo e o endocarpo são esbranquiçados e succulentos, constituindo a polpa (COSTA et al., 2006).

O Jambo vermelho (*Syzygium malaccense* L.) pode ser consumido *in natura*, em forma de compotas, doce em massa, geleias, licores e aguardente, e ainda pode ser utilizado para a produção de corante e antioxidante natural para uso em vários segmentos da indústria.

Os frutos do jамbeiro apresentam cor vermelho escuro, levemente adocicado, exalando aroma de rosas, persistente e bastante agradável ao olfato. As características físicas dos frutos, como cor, tamanho, número de sementes, quantidade de polpa e o conteúdo de água, podem influenciar no seu consumo, tanto ao natural quanto pela indústria. O jамbo contém vitaminas A, B<sub>1</sub>, C, proteínas, antocianinas, além de cálcio, ferro e fósforo (AUGUSTA et al., 2010).

A polpa que constitui 84% do fruto, apresenta °Brix de 6,8 e acidez de 0,4 mg.100 g<sup>-1</sup> de polpa, no final da maturação (COSTA et al., 2006). O fruto tem uma aparência atrativa em função da cor vermelha intensa e da forma, é apreciado pelo seu sabor e aroma exóticos e possui propriedades aromáticas interessantes que o favorece como agente flavorizante em alimentos e bebidas. Ocorre um grande desperdício de jамbo na época da safra, em virtude da elevada produção de frutos por árvore, do curto período da safra e da reduzida vida útil do fruto *in natura* (ALMEIDA et al., 2005).

### **3.2 Umidade em Alimentos**

Umidade ou teor de água de um alimento constitui-se em um dos mais importantes e mais avaliados índices em alimentos. É de grande importância econômica por refletir o teor de sólidos de um produto e sua perecibilidade. Umidade fora das recomendações técnicas resulta em grandes perdas na estabilidade química, na deterioração microbiológica, nas alterações fisiológicas (brotação) e na qualidade geral dos alimentos (CARNEIRO et al., 2012).

#### **3.2.1 A ÁGUA NOS ALIMENTOS**

A água é um nutriente essencial, compondo 60 a 65 % do corpo humano e da maioria dos animais. Dentre as várias funções da água no organismo, cita-se: é o solvente universal, indispensável aos processos metabólicos; manutenção da temperatura corporal; manutenção da pressão osmótica dos fluídos e do volume das células; participação como reagente de um grande número de reações metabólicas (VICENZI, 2017).

Os alimentos podem apresentar frações muito pequenas ou grandes porcentagens de água em seu interior, atingindo valores de até 98% de sua massa para produtos frescos. A água influencia diretamente as propriedades reológicas térmicas e elétricas do produto, além de agir decisivamente sobre a transferência de massa. A presença de mais ou menos água num produto líquido o torna mais ou menos viscoso, enquanto que num produto sólido afeta a sua

resposta a força, ou seja, quanto maior o teor de água, maior a deformação do produto quando uma força age sobre ele, além de ser um excelente meio de transmissão de calor, sendo eficiente tanto para resfriar quanto para aquecer (LEWICKI, 2004).

Conforme Vicenzi (2017) a água é considerada o adulterante universal dos alimentos, por isso sua determinação é de grande importância. Usualmente a quantidade de água nos alimentos é expressa pelo valor da determinação da água total contida no alimento. Porém, este valor não fornece informações de como está distribuída a água neste alimento nem permite saber se toda a água está ligada do mesmo modo ao alimento.

Isso leva a crer que existem moléculas de água com propriedades e distribuição diferentes no mesmo alimento. Pode-se concluir que há dois tipos de água nos alimentos: água livre, que é aquela fracamente ligada ao substrato, funcionando como solvente, permitindo o crescimento dos microrganismos e reações químicas e que é eliminada com facilidade; água combinada, fortemente ligada ao substrato, mais difícil de ser eliminada e que não é utilizada como solvente e não permite o desenvolvimento de microrganismos, retardando as reações químicas (VICENZI, 2017).

### 3.2.2 ATIVIDADE DE ÁGUA

Conforme Krüger e Dalagnol (2014) o principal fator na estabilidade de um alimento, ou seja, aquele que governa a conservação ou deterioração de um alimento não é o teor de umidade deste, mas sim a disponibilidade da água para o crescimento de microrganismos e reações químicas, conforme mostra a Figura 2. A atividade de água ( $A_w$ ), que indica o teor de água livre do alimento, é expressa pela razão entre a fugacidade da água no alimento ( $f$ ) e a fugacidade da água numa mesma temperatura ( $f_0$ ), conforme Equação (1).

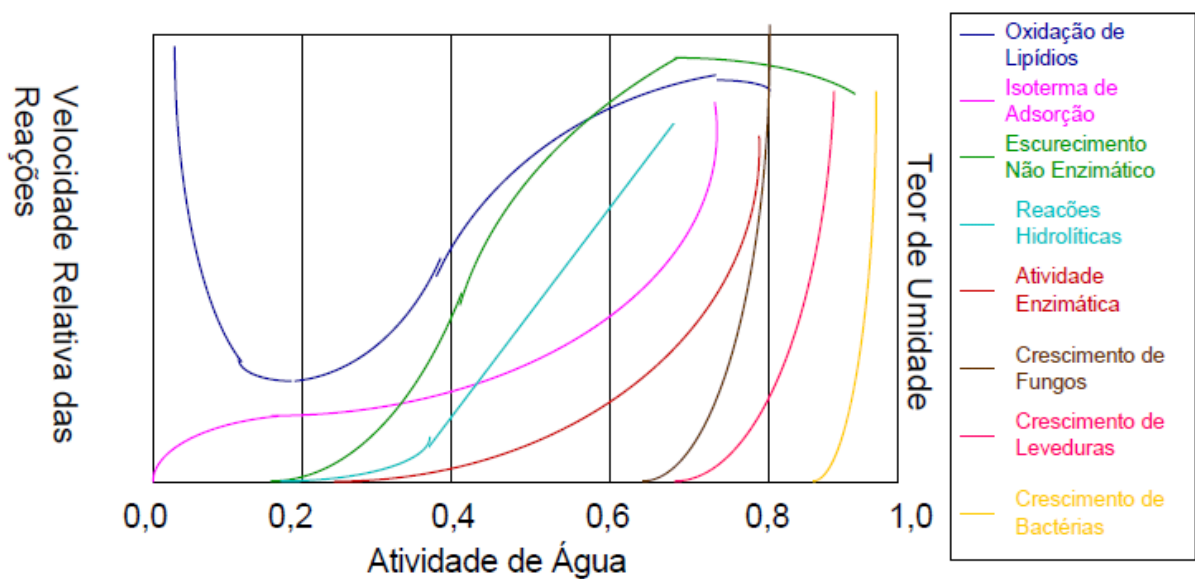
$$A_w = \frac{f}{f_0} \quad (1)$$

Para baixas temperaturas e pressões, pode-se escrever conforme a Equação (2), que é mais comum.

$$A_w = \frac{P}{P_0} \quad (2)$$

Em que  $P$  é pressão de vapor da água no alimento e  $P_0$  é a pressão de vapor da água pura, à mesma temperatura. A determinação da atividade de água é uma das medidas mais importantes no processamento e na análise dos materiais biológicos, devido a sua importância no que diz respeito à qualidade e estabilidade. A afinidade existente entre a água e os outros componentes de um produto define sua higroscopicidade que é muito marcante nos produtos e a torna uma característica fundamental a influenciar os processos de manuseio, estocagem e consumo de materiais biológicos (CARDOSO, 2012).

Figura 2 - Taxas generalizadas de reações de deterioração em alimentos como função da  $A_w$  em temperatura ambiente.



Fonte: Ditchfield, (2000).

A umidade corresponde à perda em peso sofrida pelo produto quando aquecido em condições nas quais a água é removida. Isso porque na realidade, não apenas água é removida, mas também outras substâncias se volatilizam nessas condições.

Nos alimentos desidratados, o decréscimo da atividade de água é responsável pela inibição da atividade enzimática e do crescimento microbiano. A secagem é um procedimento eficiente para causar essa inibição, pois secar o produto é reduzir sua  $A_w$  (GUSMÃO et al., 2014).

Segundo Almeida (2006) o valor da  $A_w$  pura é 1. Nos alimentos ricos em água, essa atividade corresponde a valores acima de 0,90, os quais nestas condições sofrem facilmente contaminação microbiológica e deterioração, enquanto que com a  $A_w$  próxima de 0,6, tem-se pequeno ou nenhum crescimento de microrganismos, contudo, reações de oxidação, escurecimento e atividade enzimática podem ocorrer em conteúdo de baixa umidade. Os

efeitos da variação da  $A_w$  num alimento não só estão ligados ao crescimento de microrganismos ou à sua deterioração química, mas também a deterioração da sua consistência, tornando tais alimentos impróprios para o consumo ou, pelo menos diminuindo sua aceitação.

A Atividade de água ( $A_w$ ) de um produto não depende apenas do conteúdo de água, mas também de substâncias as quais exercem o efeito de ligação da água na estrutura do alimento. Produtos com o mesmo conteúdo de umidade podem desta forma, ter diferentes  $A_w$ , dependendo, sobretudo, do seu conteúdo de água ligando substâncias a sua estrutura. Por isso, a estabilidade de um alimento é mais bem entendida quando se faz referência à  $A_w$ , pois esta caracteriza a intensidade com que a água está associada aos solutos no alimento, ou seja, indica o seu grau de disponibilidade para participar de reações de degradação físicas, químicas e biológicas (MARCINKOWSKI, 2006).

No equilíbrio, existe uma relação entre a  $A_w$  de um alimento e a umidade relativa (UR) do ar (expressa em %) no ambiente fechado em que esse se encontra e, portanto, é sempre 100 vezes maior que o valor de  $A_w$ , conforme Equação (3):

$$UR (\%) = A_w \times 100 \quad (3)$$

Essa relação entre UR e  $A_w$  permite prever quais alimentos irão ganhar ou perder umidade, quando forem expostos a um ar com determinada umidade. Existem diferentes métodos que podem ser empregados para a medida da atividade de água, que podem ser complexos ou simples, dispendiosos ou não. Um dos principais métodos é a medida da umidade relativa de equilíbrio (URE) de um sólido ou líquido. Uma forma de medir a URE é por meio das Isotermas de Sorção (BETIOL, 2016).

### 3.3 Isotermas de sorção

Quando um material biológico é exposto a uma determinada umidade, ele reage no sentido de ajustar sua própria umidade a uma condição de equilíbrio com o ambiente. Este ajuste ocorre quando a pressão de vapor de água na superfície do material se iguala à pressão de vapor de água do ar que o envolve. Nesse ponto, no qual a umidade do produto é definida como umidade de equilíbrio e a UR do ar é dita URE, o alimento não ganha nem perde peso.

Neste sentido, as isotermas de sorção fornecem uma relação do conteúdo de umidade com a UR ou  $A_w$  numa temperatura específica. Trata-se de uma predição da capacidade do

produto adsorver ou dessorver água (ARAÚJO et al., 2001). Estes dados são indispensáveis para produtos alimentícios, no desenvolvimento de processos e no controle de qualidade das indústrias de alimentos, pois têm ampla aplicação no campo da secagem, embalagem e armazenamento, o que faz das isotermas de sorção ferramentas úteis para prever a estabilidade de alimentos em diversas condições atmosféricas. As informações obtida com as isotermas é fundamental na formulação de misturas de alimentos, evitando a migração de água entre os diversos ingredientes. Além disso, fornece a determinação da permeabilidade requerida no material embalado, e do teor de umidade que impede o crescimento dos microrganismos e na predição da estabilidade química, física, enzimática e microbiológicas dos alimentos em função do conteúdo de água (OLIVEIRA, 2008).

O comportamento das isotermas de sorção pode ser previsto a partir do ajuste dos dados experimentais por modelos propostos por diversos autores, que são úteis no conhecimento das características dos produtos. Cada alimento apresenta um conjunto único de isotermas de sorção a diferentes temperaturas. A forma característica das isotermas de cada alimento é devida a diferenças na composição física, ligação da água no interior do alimento e da estrutura física.

As isotermas de sorção são determinadas de diferentes formas, uma das mais utilizadas é o método gravimétrico, o qual baseia-se na determinação da variação de massa da amostra em equilíbrio com diferentes pressões de vapor de água. Variações no método dizem respeito ao monitoramento do peso da amostra, que pode ser feito de forma contínua (com uma balança acoplada ao equipamento) ou descontínua e ao tipo de isoterma que podem ser dinâmicas (comportamento ao longo do tempo) ou estáticas. Após obtido o equilíbrio higroscópico da amostra com o ambiente, determina-se o teor de umidade do produto. Os resultados são representados graficamente (PUZZI, 2000).

O procedimento mais habitual para a preservação da qualidade dos alimentos é a redução da  $A_w$  a níveis suficientemente baixos, para a inibição do crescimento microbiano, portando a obtenção das isotermas de sorção é essencial para se estabelecer os limites de umidade a partir dos quais se inibe o crescimento microbiano e a produção de toxinas durante o armazenamento (CASTILLO et al., 2003).

A curva da isoterma pode se apresentar de duas formas: isotermas de adsorção, obtida quando um alimento totalmente seco é colocado em atmosferas com diversos incrementos de umidade relativa, sendo medido o aumento de peso desse alimento devido ao ganho de água; e isoterma de dessorção, obtida quando o alimento inicialmente úmido é colocado sob as mesmas condições atmosféricas criadas para adsorção sendo medida neste

caso a diminuição de peso do alimento, provocada pela perda de água (OLIVEIRA, 2008). Estas curvas de adsorção e dessorção não coincidem, e esta diferença entre as isotermas é conhecida como o fenômeno de histereses.

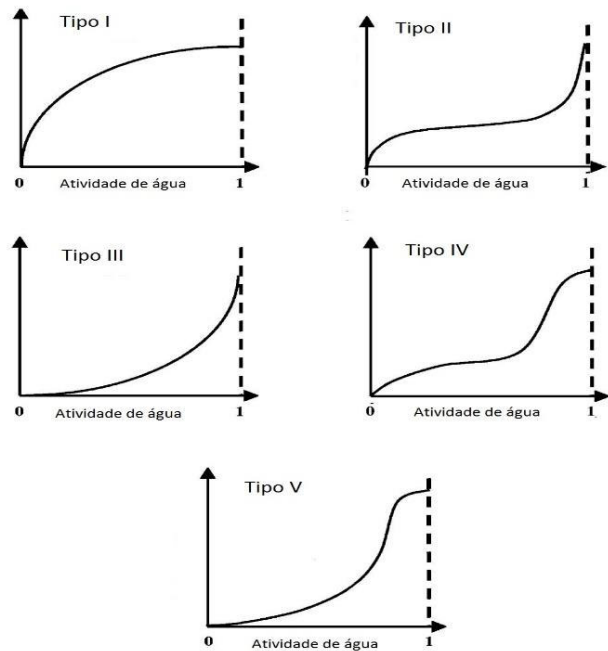
Conforme Oliveira, Costa e Afonso (2014) inúmeros modelos matemáticos têm sido propostos para descrever o comportamento das isotermas de sorção de alimentos. Não há uma equação geral que descreva todas as isotermas dos alimentos visto que a atividade de água depende bastante da composição do alimento e da interação de seus diferentes constituintes com a água em condições de equilíbrio termodinâmico.

Uma isoterma de sorção pode apresentar três regiões, dependendo do estado de água presente no alimento: a primeira região representa a adsorção na monocamada molecular de um filme de água, cujas principais características são ser estável, não congelar e não ser removida durante a secagem do produto. É uma região entre 0 e 35% de umidade relativa. Na segunda região, a força de ligação entre a água e o produtos é muito fraca. Nela iniciam-se as reações químicas e bioquímicas que necessitam de água. Localiza-se entre 35 e 60% de umidade relativa o que representa a adsorção nas camadas adicionais acima da monocamada. A terceira região, localizada acima de 60% de umidade relativa, representa a água condensada nos poros do material e tem praticamente água livre condensada nas estruturas capilares ou nas células do alimento. Nela a água está mantida no interior do alimento por forças de ligação fracas, sendo facilmente congelada ou removida por secagem, além de que está totalmente livre para reação e está disponível para o crescimento microbiano e para atividade enzimática, de tal forma que o alimento cuja umidade encontra-se nesta zona estar suscetível à deterioração (SHIBATA, 2016), a Figura 4 mostra as três regiões da isoterma.

Na Figura 3 tem-se os 5 tipos mais comuns de isotermas. Pode-se observar que a isoterma tipo I é onde a água está fortemente ligada ao produto. Na tipo II, a água está pouco ligada ao produto e geralmente presente em pequenos capilares. Na tipo III, o conteúdo de água presente no produto encontra-se em grandes capilares onde pode ser considerada como água livre. As curvas tipo IV e V, a adsorção máxima ocorre a uma pressão inferior à pressão de vapor do ar. Nos sólidos, o tamanho dos poros da estrutura interna resulta ser uma limitante para adsorver água, porém as isotermas de sorção da maioria dos alimentos são não-lineares, geralmente sigmoidais. A forma das isotermas pode ser modificada correspondentemente, passando do tipo II para III e do tipo IV para V (BETIOL, 2016).



Figura 3 – Diferentes tipos de Isoterma.



Fonte: Baucour e Daudin, (2000).

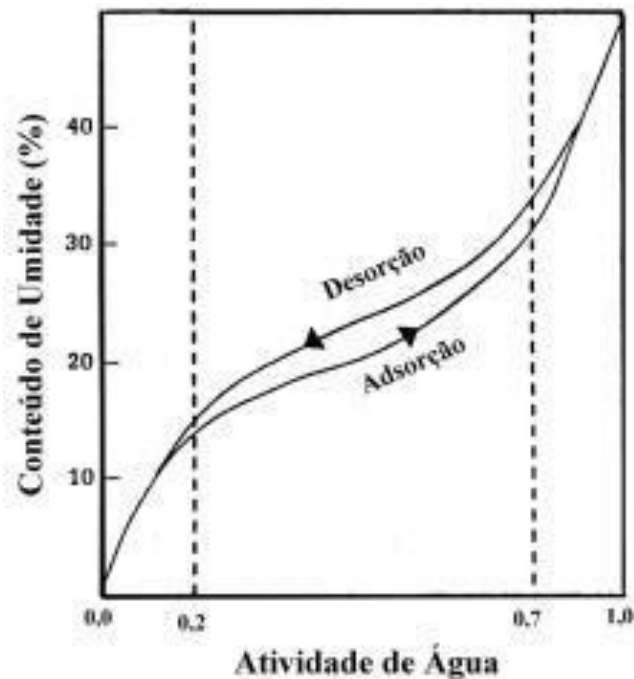
### 3.3.1. HISTERESE

Comumente, é observada nas isotermas de sorção uma diferença quando o alimento foi desidratado e, então, re-umidificado (adsorção), ou quando foi primeiramente umidificado e, posteriormente, desidratado (dessorção). A declividade da curva de isoterma varia de acordo com o fenômeno envolvido, ou seja, caso a água seja removida ou adicionada ao alimento. Essa diferença observada entre as curvas é denominada histerese (Figura 4). Para muitas substâncias, inclusive grãos e cereais, curvas de isotermas de dessorção são marcadamente deslocadas para a esquerda das curvas de isotermas de adsorção, isto é, o teor de umidade do produto a determinada temperatura, corresponde a dois valores de umidade relativa, dependendo se o material está sorvendo ou dessorvendo umidade. Ou seja, observa-se que para a dessorção é necessária menor pressão de vapor para atingir a umidade de equilíbrio do que para a adsorção. A mais provável explicação para este fenômeno é a dificuldade de remoção da água contida no interior do alimento submetido à dessorção (MARCINKOWSKI, 2006).

De acordo com Fioreze (2004), nos métodos estáticos, se o produto atinge o equilíbrio cedendo água ao ambiente (dessorção), ou ganhando água do ambiente (adsorção), os valores finais de umidade de equilíbrio obtidos pelos processos são distintos, quando o

previsto seria que fossem iguais, pois o produto é o mesmo, e o ambiente está nas mesmas condições de temperatura e umidade. Portanto, o fenômeno da histerese está relacionado com o rearranjo das moléculas do produto durante e após a secagem, diminuindo pontos de cargas elétricas moleculares na matéria seca, que poderiam reter moléculas de água entre pólos de carga elétrica opostas.

Figura 4 – Isotermas de adsorção e dessorção, mostrando o fenômeno de histerese.



Fonte: Puzzi, (2000).

### 3.4 Secagem

A secagem é a eliminação da água do material por meio de evaporação, e provoca as mesmas alterações da desidratação osmótica, com exceção da incorporação de sólidos. Assim a perda da quase totalidade da água livre presente não ocorre pela diferença de pressão osmótica, mas pela vaporização ou sublimação da água. Em secagens com ar quente esta vaporização ocorre pela diferença de temperatura entre o ar quente e o alimento determinando uma diferença de pressão de vapor entre o ar e a superfície do alimento, e, ocasionando a transferência de massa de água para o ar, na forma de vapor de água (PARK; BIN; BROD, 2001).

Conforme Fioreze (2004) a secagem de frutas como uma alternativa para a obtenção de produtos mais nobres, por meio de desidratação, como frutas cristalizadas ou então passas,

é um processo muito antigo, porém pouco conhecido. A operação de secagem é fundamental no sistema de produção, evitando perdas de natureza diversa. Dentre as várias vantagens de se utilizar o processo de secagem são destacadas: a facilidade na conservação do produto; estabilidade dos componentes aromáticos à temperatura ambiente por longos períodos de tempo; proteção contra degradação enzimática e oxidativa; redução do peso; economia de energia por não necessitar de refrigeração e a disponibilidade do produto durante qualquer época do ano.

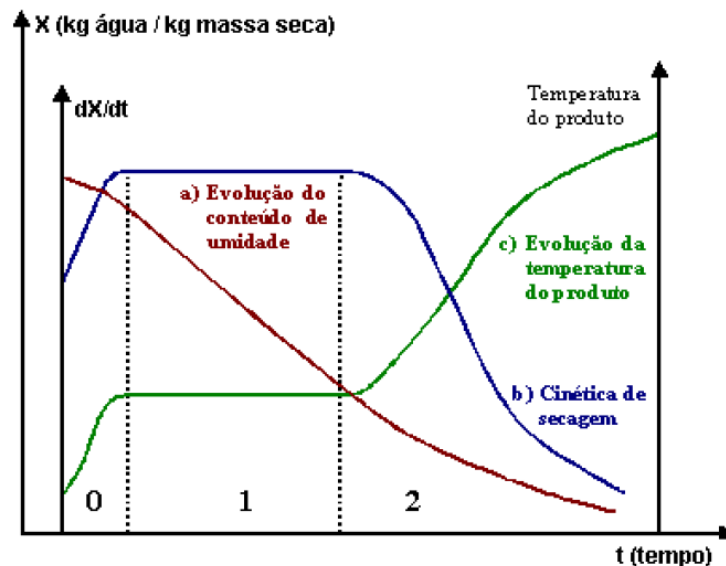
O processo de secagem é analisado através da obtenção das curvas de secagem, apresentadas na forma de umidade adimensional em função do tempo. Durante a secagem, é na superfície do material que ocorre a evaporação da água livre, a qual foi transportada do interior do sólido. Os mecanismos mais importantes desse transporte são: difusão líquida, difusão de vapor e fluxo de líquido e de vapor (PARK; YADO; BROD, 2001). A energia envolvida no processo de secagem será correspondente ao calor latente de vaporização. Apesar das diferenças entre conteúdo inicial e final (equilíbrio) de umidade do material, da relação da água com a estrutura sólida, do tipo de material biológico e do transporte da água do interior do material até a sua superfície, a transferência de calor e de massa entre o ar de secagem e o produto é fenômeno comum a qualquer condição de secagem (BROD; ALONSO; PARK, 1999).

O processo de secagem, fundamentado na transferência de calor e de massa, pode ser dividido em três períodos ao longo do tempo, de acordo com a evolução das transferências simultâneas de calor e de massa, no curso da operação de secagem: período 0 ou período de se entrar em regime operacional; período 1 ou período de secagem à taxa constante; e período 2 ou de secagem à taxa decrescente, conforme Figura 5 (PRADO; PARK; ALONSO, 2000; BROD; ALONSO; PARK, 1999).

Na Figura 5 tem-se a evolução do tempo ( $t$ ), o teor de água do produto ( $X$ ), a temperatura do produto ( $T$ ), e a velocidade de secagem ( $dX/dt$ ), para o ar com propriedades constantes. A curva (a) representa a diminuição do teor de água do produto durante a secagem, conteúdo de umidade do produto em base seca ( $X$ ), em relação à evolução do tempo de secagem ( $t$ ), isto é, é a curva obtida pesando o produto durante a secagem numa determinada condição de secagem. A curva (b) representa a velocidade (taxa) de secagem do produto, variação do conteúdo de umidade do produto por tempo,  $dX/dt$  em relação à evolução do tempo ( $t$ ), ou seja, é a curva obtida diferenciando a curva (a). A curva (c) representa a variação da temperatura do produto ( $T$ ) durante a secagem em relação à evolução do tempo  $t$ , sendo assim, é a curva obtida medindo a temperatura do produto durante a

secagem. Segundo Almeida (2006), observa-se na curva, que no início da secagem como em geral o produto está a uma temperatura mais baixa que o ar de secagem, ocorre aumento da temperatura (fase zero). A temperatura eleva-se até que a transferência de calor seja igual à energia necessária para evaporar a água (transferência de massa), (fase 1), quando a quantidade de água livre é grande com pressão de vapor de água na superfície do produto constante e a temperatura igual a temperatura de bulbo úmido. Este período permanece enquanto a migração de água do interior do produto for suficiente para compensar a perda por evaporação na superfície.

Figura 5 – Etapas do processo de secagem com o tempo.



Fonte: Prado et al., (2000).

Os períodos podem ser analisados da seguinte maneira: O primeiro período representa o início da secagem. Nesse período ocorre uma elevação gradual da temperatura do produto e da pressão de vapor de água. Essas elevações têm prosseguimento até o ponto em que a transferência de calor seja equivalente à transferência de massa (PARK; YADO; BROD, 2001).

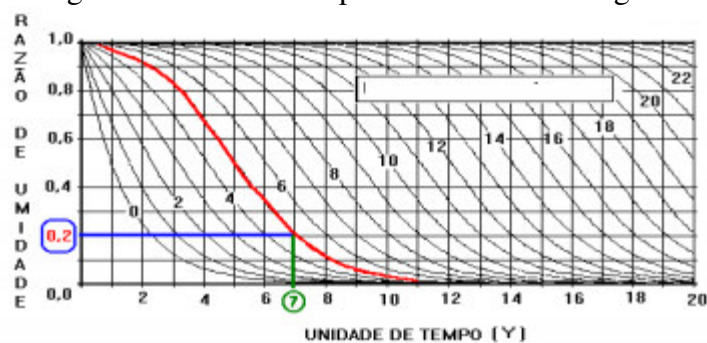
O segundo período é caracterizado pela taxa constante de secagem. A água evaporada é a água livre. A transferência de massa e de calor é equivalente e, portanto, a velocidade de secagem é constante. Enquanto houver quantidade de água na superfície do produto suficiente para acompanhar a evaporação, ou seja, enquanto a migração de água do interior do produto for suficiente para compensar a perda por evaporação na superfície, a taxa de secagem será constante (PARK; YADO; BROD, 2001).

No terceiro período (fase 2), a taxa de secagem é decrescente, pois o produto atinge o conteúdo de umidade crítica, como a transferência de calor não é mais compensada pela transferência de massa, ocorre elevação da temperatura do produto que tende para a temperatura do ar. Neste período o fator limitante é a migração interna de água para a superfície do produto. Quando o produto atinge o ponto de umidade de equilíbrio em relação ao ar de secagem, o processo é encerrado (PARK; YADO; BROD, 2001).

De acordo com Almeida et al. (2002), o período de secagem a taxa decrescente pode ser dividido em duas fases: na primeira fase a água livre presente no interior do produto é contínua, sem a presença de ar, e ocupa todos os poros do produto. O movimento de água do interior para a superfície ocorre por capilaridade e este mecanismo controla a velocidade de secagem. Na segunda fase a remoção de água da superfície de evaporação provoca a entrada de ar no interior do produto, o que dá origem a bolsas de ar que ficam dispersas na fase líquida dentro dos poros. Nesta fase ocorre o escoamento capilar em alguns pontos localizados.

Segundo Almeida (2006), as curvas de secagem à taxa decrescente podem ser côncavas, convexas ou aproximar-se de uma linha reta (Figura 6); podem apresentar um ponto de inflexão quando ocorre uma mudança na forma física do material, como por exemplo, quando se produz contração e ruptura, e quando se forma uma película na superfície do material parcialmente seco.

Figura 6 – Diferentes tipos de curvas de secagem.



Fonte: Silva et al., (2009).

As informações acerca da umidade de equilíbrio são importantes no processamento e armazenamento dos alimentos, pois implica em alterações que o material possa sofrer. No processo de secagem, a umidade de equilíbrio é a umidade final, que o produto pode atingir se o processo for conduzido num longo período de tempo. Em uma determinada umidade relativa, na condição de equilíbrio com o ambiente, o material não perde nem ganha água, isto

ocorre quando a pressão de vapor d'água na superfície do material se iguala à pressão de vapor d'água do ar que o envolve (PARK; BIN; BROD, 2001).

### 3.4.1 MÉTODOS DE SECAGEM

Existem dois métodos básicos de secagem: natural e artificial. Conforme Gava (1984) a secagem natural é a simples exposição do alimento ao sol colocados em local apropriado, capaz de reter calor e fazer com que o alimento perca água por aquecimento do piso e superfície ligeiramente próxima ou ainda em galpões com ventiladores e aspiradores. É o método mais comum em pequenas propriedades que trabalham com grãos. Este método é bastante econômico já que não emprega gasto de energia para uso de equipamentos sofisticados de secagem. Porém, é um método lento e necessita de grandes áreas de exposição dos alimentos. As condições climáticas da região onde se deseja por em prática a secagem do alimento devem ser consideradas, pois as propriedades psicrométricas como umidade relativa do ar, temperatura de bulbo úmido, temperatura de bulbo seco, etc. São determinantes para uma secagem efetiva.

Segundo Gava (1984) a secagem artificial é um método de desidratação de alimentos. O calor é produzido artificialmente em estufas ou galpões (armazéns climatizados) preparados para esta finalidade. Há um maior controle de temperatura, umidade e corrente do ar. É um método relativamente rápido, não exige grandes áreas de secagem e exige capital e mão de obra especializada. A desidratação dos alimentos é feita por meio de vapor superaquecido, sistema a vácuo, uso de gases inertes ou pela aplicação direta de calor.

## 3.5 Metodologia para determinação de umidade em alimentos

De acordo com Rossi (2017) em geral a determinação de umidade parece um método simples, mas pode se tornar complicado em função da precisão dos resultados. As dificuldades encontradas geralmente são as seguintes:

- Separação incompleta da água do produto;
- Decomposição do produto com formação de água além da original;
- Perda das substâncias voláteis do alimento.

Na prática tem-se preferido um método que determine um maior valor de umidade, proveniente da decomposição de componentes orgânicos e volatilização de compostos

voláteis, do que aqueles métodos onde a água é negligenciada, ou removida incompletamente.

Os métodos para determinação de umidade são fundamentalmente baseados na secagem da amostra, em reações químicas com a água, em destilação da água e na interação física da água.

### 3.5.1 SECAGEM EM ESTUFAS

É o método mais utilizado em alimentos e está baseado na remoção da água por aquecimento, onde o ar quente é absorvido por uma camada muito fina do alimento e é então conduzido para o interior por condução. Como a condutividade térmica dos alimentos é geralmente baixa, costuma levar muito tempo para o calor atingir as porções mais internas do alimento. Por isso, este método costuma levar muitas horas, 6 a 18 horas em 100 a 105 °C, ou até peso constante (ROSSI, 2017).

### 3.5.2 SECAGEM POR RADIAÇÃO INFRAVERMELHA

Este tipo de secagem é mais efetivo e envolve entrada de calor dentro da amostra, o que encurta o tempo de secagem em até 1/3 do tempo. O método consiste em uma lâmpada de radiação infravermelha com 250 a 500 watts, cujo filamento desenvolve uma temperatura entre 2000 a 2500°K (700 °C). A distância entre a lâmpada e a amostra é crítica e deve ser cerca de 10 cm para não haver decomposição da amostra. A espessura da amostra deve ficar entre 10 e 15 mm. O tempo de secagem varia com a amostra (20 minutos para produtos cárneos, 10 minutos para grãos, etc), e o peso da amostra deve variar entre 2,5 a 10 g dependendo do conteúdo da água (ROSSI, 2017).

### 3.5.3 SECAGEM EM FORNOS DE MICRO-ONDAS

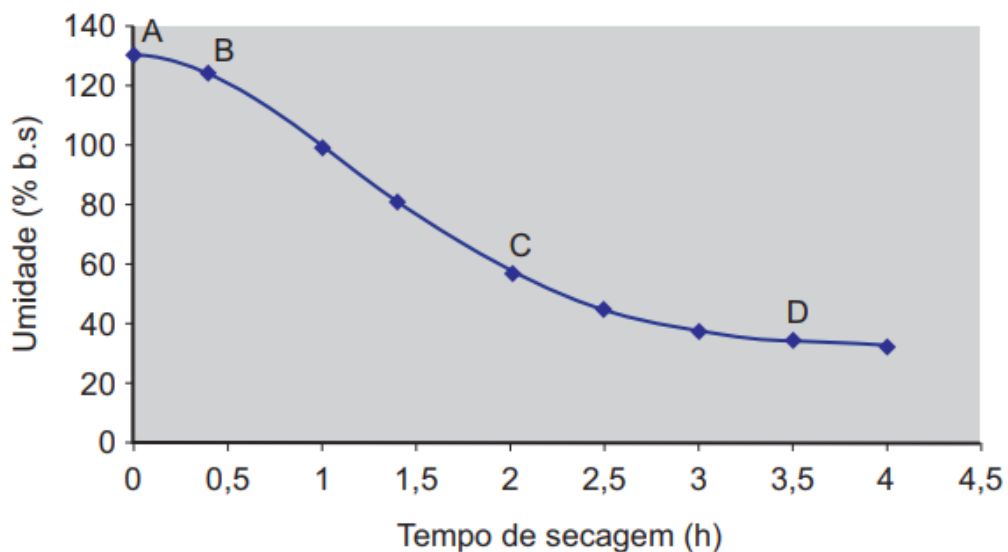
É um método novo e muito rápido, porém não é um método padrão. A energia de micro-ondas é uma radiação eletromagnética com frequência variando entre 3 Mhz e 30.000 Ghz. Os dois maiores mecanismos que ocorrem no aquecimento por micro-ondas de um material dielétrico são rotação dipolar e polarização iônica. Quando uma amostra úmida é exposta à radiação de micro-ondas, moléculas com cargas elétricas dipolares, tal como a da água, giram na tentativa de alinhar seus dipolos com a rápida mudança do campo elétrico. A fricção resultante gera calor, que é transmitido para as moléculas vizinhas. Deste modo, o

calor é distribuído uniformemente tanto na superfície como internamente no alimento, facilitando a evaporação da água e evitando a formação de crosta na superfície, como é característico na secagem em estufa. A amostra é misturada com cloreto de sódio e óxido de ferro, onde o primeiro evita que a amostra seja espirrada fora do cadinho e o segundo absorve fortemente radiação de micro-ondas acelerando a secagem (ROSSI, 2017).

### 3.6 Cinética de Secagem

Segundo Celestino (2010) a cinética de secagem, ou seja, a rapidez com que o alimento perde umidade, é controlada pelas características da matriz do alimento e pelas variáveis temperatura, velocidade e umidade relativa do ar. O conteúdo de umidade de um alimento, durante um processo de secagem, apresenta o comportamento mostrado pela curva da Figura 7. Para obtenção dessa curva, amostras do alimento são retiradas de tempos em tempos e a umidade determinada pela equação de base úmida ou pela equação de base seca. Vale observar que as amostras retiradas do processo de secagem estarão quentes e deverão ser resfriada em dessecadores até uma temperatura próxima da ambiente para a determinação do peso inicial e, imediatamente depois, colocadas em estufa a 105 °C até peso constante (peso Final).

Figura 7 – Umidade do alimento durante o processo de secagem.



Fonte: Celestino, (2010).

De acordo com Celestino (2010) na Figura 7, o Segmento AB corresponde ao



período em que o alimento se adapta às condições de secagem e sua temperatura atinge um valor constante, sendo igual a temperatura de bulbo úmido do ar, enquanto a água livre estiver sendo evaporada. Essa igualdade se mantém durante o segmento BC. Durante o período BC, a superfície exposta do alimento está saturada, existindo um filme contínuo de água sobre o sólido, que age como se não existisse sólido, ou seja, a água do alimento não tem nenhuma resistência para “sair” dele. A água removida nesse período é principalmente a água superficial se o sólido for não poroso (cereais, vegetais e outros), sendo curto esse período. Se o sólido for poroso (sal, açúcar, ácido cítrico e outros), o período BC é um pouco mais longo, pois a água superficial vai sendo substituída pela do interior do sólido, que não encontra dificuldades de escoamento em razão dos poros do alimento. Portanto, o período de secagem constante (segmento BC) é mais pronunciado em materiais com umidade elevada.

O ponto C corresponde ao fim do período de secagem constante, e a umidade, nesse ponto, é conhecida como umidade crítica. A partir desse ponto, há um aumento na resistência interna e o movimento de líquido do interior para a superfície do sólido é insuficiente para não compensar o líquido que está sendo evaporado, iniciando-se o primeiro período decrescente (segmento CD). No segmento CD, cada vez menos líquido está na superfície do sólido para evaporar, e essa se torna cada vez mais seca, podendo haver rachaduras na superfície do alimento. Do ponto D em diante, têm-se o segundo período de velocidade decrescente, em que a umidade do alimento diminui até alcançar a umidade de equilíbrio para as condições de temperatura e umidade relativa do ar. Quando a umidade de equilíbrio (teor mínimo de umidade) é atingida, cessa-se o processo de secagem (CELESTINO, 2010).

A umidade de equilíbrio é atingida quando o alimento é deixado por tempo suficientemente longo em determinada condição de temperatura e umidade relativa do ar que o envolve. Nessa condição, a pressão parcial de vapor da água na superfície do produto é igual a pressão parcial de vapor de água contida no ar (CELESTINO, 1998).

### 3.6.1 VARIÁVEIS IMPORTANTES NA SECAGEM DE ALIMENTOS

Conforme Moraes e Rodrigues (2006) e Cassini (2004), diversos fatores determinam o perfil de secagem de um alimento. Entre os mais importantes destaca-se:

Pressão de vapor ( $P_{vs}$ ) é a pressão exercida pelo vapor de água, e assim como a pressão atmosférica, exerce influência em todas as direções. Para cada temperatura do ar, existe uma quantidade de vapor que o ar “consegue” carregar sem que o vapor se transforme em água. Quanto maior a temperatura, maior será a quantidade de vapor de água presente no

ar. Quando o ar comporta o máximo de vapor possível a uma dada temperatura, diz-se que ele se encontra saturado e a pressão de vapor nesta situação é máxima. Se a quantidade de vapor de água não for suficiente para saturar o ar, a pressão é dita parcial de vapor ( $P_v$ ). Este parâmetro influencia a relação de equilíbrio da água e, assim, pode influenciar o processo de secagem: quando este se dá sob vácuo, a pressão de vapor do ar é reduzida, acelerando-se, assim, o período de taxa constante de secagem. Mas, quando o fator limitante do processo é a migração interna de umidade, a operação sob vácuo quase não exerce influência na taxa de secagem. É muito importante ter conhecimento da quantidade de vapor no ar, pois isto é determinante quando se quer extrair água de um alimento que perderá água apenas para um ambiente que apresente um gradiente a seu vapor, isto é, o alimento perderá água para um meio mais seco. Essas pressões são conhecidas a partir das medidas de temperatura de bulbo seco e úmido.

Razão de mistura ( $W$ ) é definida como a relação entre o peso do vapor de água e a unidade do peso do ar completamente seco; é simplesmente a proporção de vapor presente no ar seco.

Temperatura de bulbo seco ( $T_{bs}$  ou  $T$ ) é a temperatura medida em um termômetro comum; é a medida de temperatura do ar seco. Temperatura de bulbo úmido ( $T_{bu}$ ) marca a temperatura do mesmo termômetro de bulbo seco, mas envolto por uma malha úmida.

Umidade relativa do ar ( $UR$ ) é a relação entre pressão parcial de vapor e das moléculas de água no ar e a pressão de saturação na mesma temperatura. Influencia o período de taxa constante de secagem, pois afeta diretamente a força motriz deste período do processo, ou seja, o gradiente de umidade existente entre a superfície do produto e o ar de secagem. Quanto maior a umidade relativa do ar utilizado na desidratação do produto, menor será o gradiente de umidade e, por consequência, mais lentamente se dará a secagem. Além disso, se a atividade de água do produto for inferior à umidade relativa do ar de secagem, ao invés de ocorrer a secagem do alimento, este absorverá a umidade presente no ar. Mas, assim como visto para o parâmetro velocidade (a umidade relativa do ar também é um fator externo), esta não exerce significativa influência na taxa de secagem do período decrescente. Além disso, no processo de secagem como um todo, este parâmetro é fator determinante na umidade de equilíbrio, ou seja, no teor de umidade atingido pelo produto ao final do processo (quando este é levado até o fim).

Volume específico ( $v$ ) do ar úmido é a relação entre o volume e a massa de ar seco ( $m^3/Kg$  de ar seco). A potência requerida por um ventilador, em um sistema de secagem, é afetada pelo volume específico de ar úmido.

### 3.6.2 EFEITO DA TEMPERATURA E VELOCIDADE DO AR DE SECAGEM

De acordo com Fioreze (2004) os sistemas de secagem variam conforme diversos parâmetros, tais como: o tamanho do sistema, tipo de combustível, modo de operação (contínuo, batelada, etc.), produto a ser seco, entre outros, porém há dois deles que estão sob constante pesquisa de otimização: a qualidade do produto no final do processo e o custo da operação. Para pesquisar estes dois fatores, um grande número de variáveis tem sido levada em consideração para o ar de secagem e o produto seco.

Segundo Cassini (2004) a taxa de secagem é mais elevada se o processo se dá com ar aquecido a altas temperaturas. No período de taxa constante, a temperatura age aumentando a transferência de calor do ar para a superfície do sólido. Além disso, a umidade relativa do ar de secagem diminui com o aumento da temperatura, aumentando, assim, o gradiente de umidade entre a superfície do produto e o ar, facilitando a secagem. Já no período decrescente, a temperatura influencia diretamente a migração da umidade interna, pois quanto mais quente o ar, maior é a facilidade de migração das moléculas de água no interior do produto. Entretanto, a elevação da temperatura até valores muito elevados pode causar reações químicas ou físicas indesejáveis no alimento, além de provocar o ressecamento e endurecimento excessivo da superfície. Assim, deve-se ter consciência do limite aceito por cada produto.

Conforme Cassini (2004) a velocidade na qual o ar de secagem atinge a superfície do produto a ser desidratado influencia diretamente a taxa de transferência da umidade da superfície para o ar de secagem. Isso ocorre porque um aumento na velocidade de escoamento do ar causa um aumento na taxa de transferência de massa por convecção, ou seja, quanto maior a velocidade do ar de secagem, mais curto será o período de taxa constante de secagem. No período de taxa de secagem decrescente, como o fator limitante da taxa é a migração interna de umidade, a velocidade do ar de secagem, sendo um fator externo, não exerce influência significativa.

A taxa de secagem pode ser acelerada com o aumento da temperatura do ar de secagem e, ou, com o aumento do fluxo de ar que passa pelo produto por unidade de tempo. A quantidade de ar utilizada para a secagem depende de vários fatores. Entre eles: a umidade inicial do produto e a espessura da camada (ALMEIDA, 2006).

Diversos autores que estudam a cinética de secagem consideram a temperatura do ar como o parâmetro de maior influência na taxa de secagem. Rodrigues et al. (2002) quando estudaram o efeito da temperatura do ar de secagem, sobre a cinética de secagem da goiaba,

entre 76 e 100 °C e velocidade do ar de secagem, variando entre 0,8 e 2,2 m s<sup>-1</sup> verificaram que a velocidade do ar exerce pouca influência na taxa de secagem, mas o aumento da temperatura tem grande influência. Silva, Silva e Porto (2010) secando polpa de cupuaçu verificaram que a temperatura exerce maior influência que a velocidade do ar, resultado semelhante foi observado por Rosa e Ricardo (2014) ao estudarem a secagem das folhas de eucalipto.

### 3.6.3 MODELOS CINÉTICOS

A secagem é um assunto abrangente e de alta complexidade, pois envolve trocas simultâneas de calor, massa e momento. Vários parâmetros afetam o processo de secagem, sendo que muitos deles são dependentes da estrutura do sólido e podem apresentar variações para um mesmo produto que tenha passado por diferentes processos ou até mesmo em lotes diferentes do mesmo processo (ARRUDA et al., 2009).

Apesar de muitas teorias terem sido publicadas ao longo dos anos, a falta de comparação com resultados experimentais tem levado os fabricantes de secadores industriais a optarem pelo emprego de métodos de projeto empíricos baseados em testes em plantas pilotos para *scale-up*. Experiências mal sucedidas de aplicações dessas teorias no projeto de secadores ocorreram mediante algumas considerações errôneas no desenvolvimento do modelo, aliado ao grande número de parâmetros requeridos, os quais são difíceis de serem medidos e podem levar a erros cumulativos (KEMP; OAKLEY, 2002).

A modelagem matemática do fenômeno de secagem é regida por um sistema de equações diferenciais que representam os balanços de massa, energia e quantidade de movimento. Associado a estes modelos fenomenológicos, uma série de equações empíricas (constitutivas) devem ser empregadas para que esse fenômeno altamente não linear possa ser representado. Cabe ressaltar que estes modelos isoladamente não são capazes de descrever o processo de transferência de calor e massa em camadas espessas, uma vez que os balanços de massa e energia da fase gasosa não são considerados. Entretanto, estes estudos são indispensáveis na predição dos fenômenos de transferência de massa e calor (ARRUDA et al., 2009).

Em se tratando da cinética de secagem, a literatura especializada apresenta uma série de modelos com aplicações em diferentes áreas da ciência e da engenharia. Em cada um destes modelos, a determinação dos parâmetros que caracterizam a cinética de secagem é obtida através da formulação e resolução de um problema de otimização, que consiste na

obtenção dos melhores parâmetros que minimizam o somatório dos desvios quadráticos entre o modelo proposto e os pontos experimentais (BARBOSA; LOBATO, 2016).

Para produtos biológicos geralmente a secagem ocorre predominantemente à taxa decrescente. Nesta condição a resistência interna ao transporte de umidade predomina e os mecanismos de transporte de umidade são vários, entre os quais podemos citar: a difusão líquida, o escoamento capilar e a difusão de vapor. Desta forma os modelos empíricos são os mais adequados para descrever o processo de secagem decrescente, ou seja, interno ao alimento. Esses modelos são úteis para estimar a taxa de secagem decrescente em qualquer condição de umidade do material e também o tempo deste processo (COSTA, 2013).

## 4 MATERIAL E MÉTODOS

### 4.1 Matéria prima

Os jambos foram adquiridos na região de comércio do centro na cidade de São Luís e foram transportadas em sacolas plásticas vedadas até o laboratório de Química Experimental do curso Bacharelado e Interdisciplinar em Ciência e Tecnologia da Universidade Federal do Maranhão (UFMA), Campus Bacanga em São Luís – MA, para a realização dos experimentos. Os jambos foram lavados, em água corrente clorada, e selecionados para a retirada dos impróprios, antes do experimento.

### 4.2 Equipamentos e Utensílios

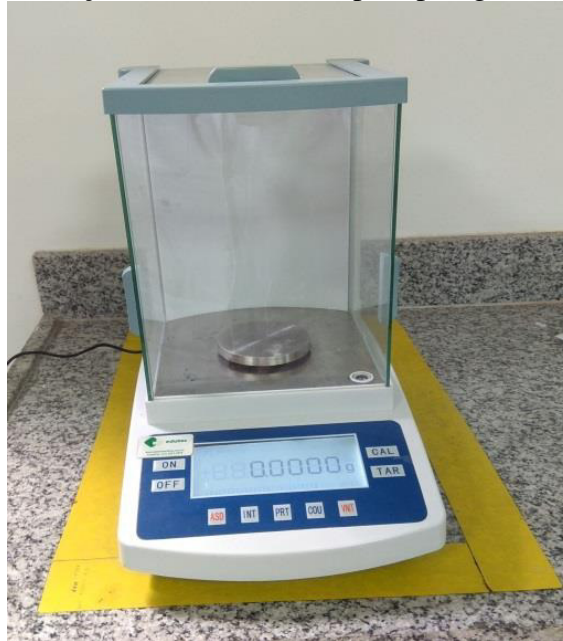
Na presente pesquisa foram empregados os seguintes equipamentos: Estufa (FANEM, 515, 2014), (Figura 8), Balança analítica digital (EDUTECH, EEQ9003, 2013), (Figura 9), Dessecador, Faca, Paquímetro manual (NOVE54, 150 mm), Bandeja de plástico, Pinça, Cápsula de Porcelana e Termômetro de Mercúrio.

Figura 8 - Estufa utilizada nos experimento de secagem.



Fonte: Próprio Autor (2018).

Figura 9 – Balança analítica utilizada para pesagem das amostras.



Fonte: Próprio Autor (2018).

### 4.3 Procedimentos experimentais

#### 4.3.1 SELEÇÃO E PREPARAÇÃO DA MATÉRIA PRIMA

Foram selecionados os frutos que apresentavam boa qualidade visual e maiores dimensões. Os frutos com avarias que comprometessem sua qualidade foram descartados. Os frutos foram cortados em formatos de paralelepípedo retangulares, com suas dimensões medidas com o uso de um paquímetro, para então, serem utilizadas nos experimentos.

#### 4.3.2 DETERMINAÇÃO DO TEOR DE UMIDADE

Pedaços de jambos foram cortados em formatos de paralelepípedo retangulares, em triplicatas, com dimensões determinadas com o uso de um paquímetro, foram pesados em balança analítica com precisão de 0,0001 g. Após a pesagem, as amostras foram levadas para a estufa em cápsulas de porcelana, ficando na temperatura de 105°C por 24h para determinação do teor de umidade em base seca (g/g) (AOAC, 2006).

#### 4.4 Experimento de secagem

As amostras de jambos, preparadas nas mesmas condições das utilizadas para determinação do teor de umidade, foram levadas a estufa (Figura 8) em cápsulas de porcelanas, em triplicatas. A secagem foi realizada nas temperaturas de 40, 50, 60 e 70°C. As amostras foram pesadas em intervalos de tempo predefinidos durante o processo de secagem (controle gravimétrico). A fim de avaliar a cinética para cada condição, registrou-se com o uso de uma balança analítica (Figura 9) com precisão de 0,0001 g a perda de água até atingir o peso constante (estado de equilíbrio) (AOAC, 2006).

#### 4.5 Análise estatística, métodos e procedimentos experimentais

Os experimentos de secagem de alimentos, muitas vezes, são realizados com amostras de diferentes lotes ou de um processo contínuo, os quais necessariamente não apresentam o mesmo teor de umidade inicial ao longo de todo o experimento. A necessidade de utilizar uma variável que seja capaz de indicar a variação de umidade do produto, independentemente da umidade inicial do mesmo, é interessante para esse tipo de situação (MARCINKOWSKI, 2006).

Desta forma, na análise dos dados de secagem, foi definida que a razão de umidade (RU), é essencial para ajustar os diferentes modelos de secagem. Para a determinação desta razão utilizou-se a Equação (4).

$$RU = \frac{X - X_e}{X_o - X_e} \quad (4)$$

Onde,

$X$  é o teor de umidade (base seca) (g água/g);

$X_e$  é o teor de umidade de equilíbrio (base seca) (g água/g);

$X_o$  é o teor de umidade inicial (base seca) (g água/g).

Para o ajuste dos modelos matemáticos, foram realizadas análises de regressão não linear pelo método Quasi-Newton, utilizando-se o software Statística 12.5. Foram testados 11 modelos matemáticos utilizados em estudo de cinética de secagem, conforme mostrado na Tabela 1.



Tabela 1 – Modelos matemáticos testados.

Designação do Modelo	Modelos	(Eq.)
Lewis (Lewis 1921)	$RU = \exp(-k_1 t)$	(5)
Handerson e Pabis (Handerson e Pabis 1961)	$RU = a * \exp(-k_1 t)$	(6)
Page (Page 1949)	$RU = \exp(-k_1 t^n)$	(7)
Logarítmico (Yagcioglu et al. 1999)	$RU = a * \exp(-k_1 t^n) + c$	(8)
Midilli (Midilli et al. 2002)	$RU = a * \exp(-k_1 t^n) + bt$	(9)
Dois termos (Handerson 1974)	$RU = a * \exp(-k_1 t) + b * \exp(-k_2 t)$	(10)
Aproximação de Difusão (Kassem 1998)	$RU = a * \exp(-k_1 t) + (1 - a) * \exp(-k_1 bt)$	(11)
Handerson e Pabis Modificado (Karathanos 1999)	$RU = a * \exp(-k_1 t) + b * \exp(-k_2 t) + c * \exp(-k_3 t)$	(12)
Thompson (Thompson et al. 1968)	$RU = \exp\left(\frac{-a - (a^2 + 4bt)^{0,5}}{2b}\right)$	(13)
Cavalcanti Mata (Cavalcanti Mata et al. 2006)	$RU = a * \exp(-k_1 t^m) + b * \exp(-k_1 t^n) + c$	(14)
Verma (Verma et al. 1985)	$RU = a * \exp(-k_1 t) + (1 - a) * \exp(-k_2 t)$	(15)

Fonte: Próprio Autor (2018).

Onde,

$t$  = tempo de secagem, (min)

$k_1, k_2$  e  $k_3$  = constante de secagem, (min)<sup>-1</sup>

$a, b$  e  $c$  = coeficiente dos modelos, (adimensionais)

A escolha do modelo mais adequado para a cinética de secagem baseou-se nos seguintes parâmetros estatísticos: desvio padrão da estimativa (SE), Desvio quadrático médio (DQM), coeficiente de determinação (R<sup>2</sup>), e do coeficiente de variação de Pearson (Cv) para

avaliar a sensibilidade de cada modelo, foram calculados usando as Equações (16), (17), (18) e (19).

$$SE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (y - \hat{y})^2}{GLR}} \quad (16)$$

$$DQM = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (y - \hat{y})^2}{n}} \quad (17)$$

$$R^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (\hat{y} - \bar{y})^2}{\sum_{i=1}^n (y - \bar{y})^2} \quad (18)$$

$$Cv = \frac{DP}{|\bar{y}|} \quad (19)$$

Onde,

$y$  - valor experimental;  $\bar{y}$  - média dos valores experimentais;  $\hat{y}$  - valor estimado (previsto); DP - Desvio padrão; GLR - grau de liberdade do modelo (número de observações experimentais menos o número de coeficientes do modelo).

Para determinação do coeficiente de difusão efetivo, fez-se o ajuste dos dados experimentais de secagem do jambo ao modelo matemático de difusão líquida, para forma geométrica de placa plana, indicado na Equação (20).

$$RU = \frac{X - X_e}{X_o - X_e} = \frac{8}{\pi^2} \sum_{n=0}^{\infty} \frac{1}{(2n+1)^2} \exp\left[-\frac{(2n+1)^2 \pi^2 D t}{4} \left(\frac{S}{V}\right)^2\right] \quad (20)$$

Onde,

$D$  - coeficiente de difusão efetivo ( $m^2s^{-1}$ );  $S$  - área superficial da amostra ( $m^2$ );  $V$  - volume da amostra ( $m^3$ );  $t$  - tempo de secagem (segundo).

A solução analítica dessa equação se apresenta na forma de uma série infinita e, portanto, o número finito de termos ( $n$ ) no truncamento, define a precisão dos resultados. Esta equação é a solução analítica para a Segunda Lei de Fick, desconsiderando-se contrações volumétricas das amostras e a condição de contorno de teor de água conhecida na superfície.

Para a resolução da Equação (20) e determinação do coeficiente de difusão ( $D$ ) foi utilizado a ferramenta solver do Excel 2010, com aproximação de 21 termos.

Para a análise da relação do efeito da temperatura sobre o coeficiente de difusão efetivo (D) utilizou-se a Equação (21), conhecida como equação de Arrhenius.

$$D = D_0 * \exp\left(-\frac{E_a}{RT_a}\right) \quad (21)$$

Onde,

$D_0$  – fator pré-exponencial ( $\text{m}^2\text{s}^{-1}$ );  $E_a$  – energia de ativação ( $\text{J mol}^{-1}$ );  $T_a$  – Temperatura absoluta (K);  $R$  – constante universal dos gases, ( $8,314 \text{ J mol}^{-1} \text{ K}^{-1}$ ).

A obtenção dos coeficientes do modelo de Arrhenius,  $D_0$  e  $E_a$  foi realizada com a aplicação do logarítmico, representada pela Equação (22).

$$\ln(D) = \ln(D_0) - \frac{E_a}{RT_a} \quad (22)$$

Para a determinação das propriedades termodinâmicas da secagem, foram realizados os cálculos da entalpia ( $\Delta H$ ) pela Equação (23), a entropia ( $\Delta S$ ) pela Equação (24) e a energia de Gibbs ( $\Delta G$ ) pela Equação (25).

$$\Delta H = E_a - RT_a \quad (23)$$

$$\Delta S = R \left[ \ln(D_0) - \ln\left(\frac{k_b}{h_p}\right) - \ln(T_a) \right] \quad (24)$$

$$\Delta G = \Delta H - T_a \Delta S \quad (25)$$

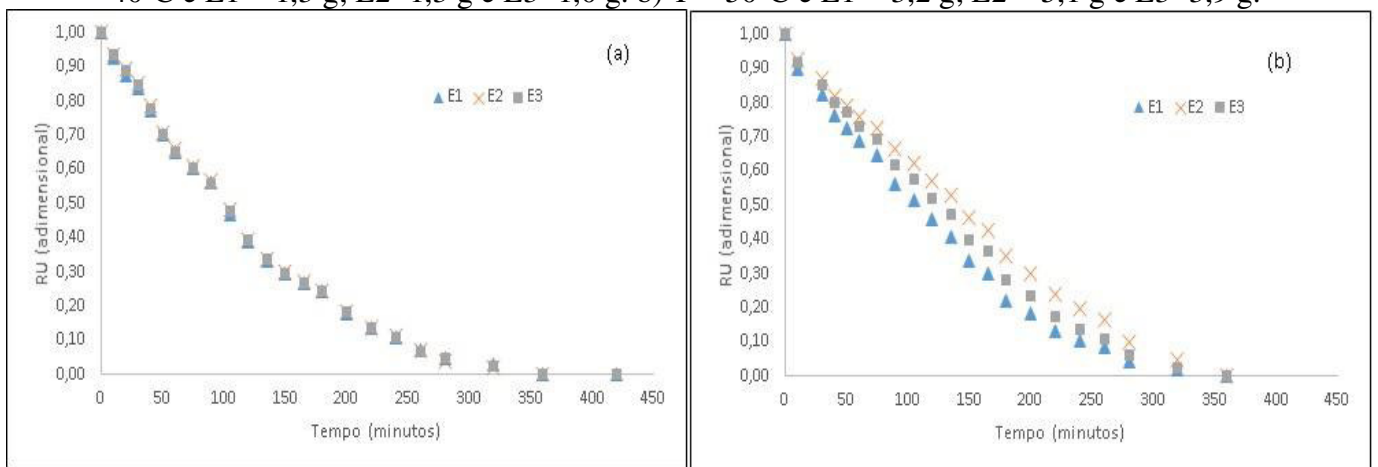
Onde,

$\Delta H$  – entalpia ( $\text{J mol}^{-1}$ );  $\Delta S$  – entropia ( $\text{J mol}^{-1} \text{ K}^{-1}$ );  $k_b$  – constante de Boltzman, ( $1,38 \times 10^{-23} \text{ JK}^{-1}$ );  $h_p$  - constante de Planck, ( $6,626 \times 10^{-34} \text{ Js}^{-1}$ );  $\Delta G$  – energia livre de Gibbs ( $\text{J mol}^{-1}$ ).

## 5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

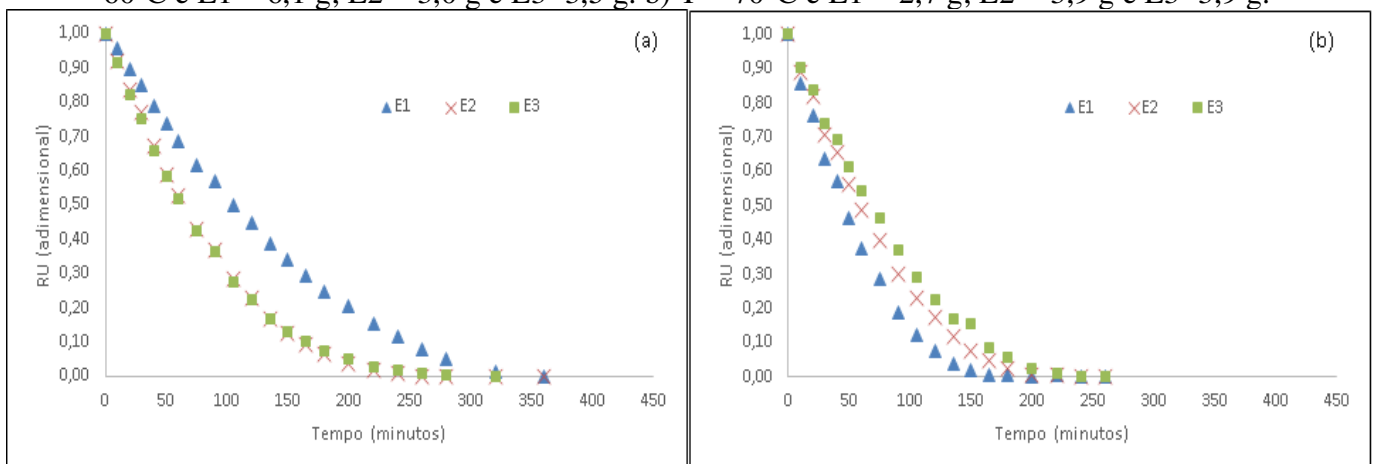
As curvas experimentais de secagem do jambo (*Syzygium malaccense* L.), para as diferentes secagens nas temperaturas estudadas, estão representadas na Figura 10 e 11. Os valores apresentados no gráfico estão na forma adimensional de razão de teor de água (RU) em função do tempo de secagem. Conforme visto nas figuras, as secagens foram feitas em triplicatas, com as amostras sendo identificada como E1, E2 e E3, com diferentes massas.

Figura 10 - Curvas de secagem experimentais obtidas para a temperatura de 40 e 50 °C. a) T= 40°C e E1 = 1,3 g; E2=1,3 g e E3=1,0 g. b) T = 50°C e E1 = 3,2 g; E2 = 5,1 g e E3=3,9 g.



Fonte: Próprio Autor (2018).

Figura 11 - Curvas de secagem experimentais obtidas para a temperatura de 60 e 70 °C. a) T= 60°C e E1 = 6,1 g; E2 = 3,0 g e E3=3,5 g. b) T = 70°C e E1 = 2,7 g; E2 = 3,9 g e E3=3,9 g.



Fonte: Próprio Autor (2018).

Observando os quatro gráficos nas Figuras 10 e 11, nota-se que para uma mesma temperatura é observado ligeiras diferenças na curva de secagem das amostras. Isso é devido

ao fato das amostras não serem uniformes, possuindo diferentes massas cada. Apenas no primeiro gráfico, Figura 10 (a), a curva de secagem para as três amostras são coincidentes, isso porque as amostras possuíam pouca diferença de massas entre si. Para essa temperatura as curvas de secagem alcançaram o equilíbrio a partir do tempo 360 minutos.

Na Figura 10 (b), na temperatura 50°C, as curvas de secagem já não são coincidentes, isso porque a diferença de massa entre as amostras já é mais significativa que no primeiro caso. Apesar disso, as amostras alcançaram o equilíbrio simultaneamente a partir de 320 minutos.

Na Figura 11(a), à temperatura de 60°C, para as curvas de secagem das amostras vale ressaltar os seguintes detalhes: a amostra E1 apresentou quase o dobro de massa das amostras E2 e E3, assim a secagem ocorreu mais lentamente para a mesma. Enquanto a primeira alcançou o equilíbrio depois do tempo de 320 minutos, às demais amostras, E2 e E3, alcançaram em um tempo de 240 minutos.

Na figura 11(b), para a temperatura 70°C, pode-se observar ligeiras diferenças entre as curvas justificadas pelas diferentes massas entre as mesmas, embora menos significativa que do caso anterior. O equilíbrio foi alcançado no tempo 165 minutos para a amostra E1, e no tempo 200 e 220 minutos para as amostra E2 e E3, respectivamente.

Esses resultados estão em consonância com a literatura, pois a curva de cinética de secagem é influenciada por fatores como temperatura de secagem, dimensões das amostras e massas das mesmas. Quanto maior a massa, mais água conterà, mais tempo leva para alcançar o equilíbrio. Já o aumento da temperatura provocou o aumento da taxa de secagem e conseqüentemente, diminuição do tempo de secagem.

Comportamento semelhante, é observado por Santos et al. (2016), ao estudarem a cinética de secagem do fruto da palma nas temperaturas de 50, 60 e 70°C e espessuras de 4, 5 e 6 cm, por Silva et al. (2016), ao estudarem a cinética de secagem da polpa de carambola, por Galdino et al. (2016) na cinética de secagem da polpa de atemoya e por Andre et al. (2014) ao estudarem a cinética de secagem de cascas de Manga Espada.

Na Tabela 2 encontra-se o resultado dos coeficientes/parâmetros de ajustes dos modelos aos dados experimentais. Foram testados onze modelos: Lewis, Handerson e Pabis, Page, Logarítmico, Midilli et al., Dois termos, Aproximação de Difusão, Handerson e Pabis modificado, Cavalcanti Mata e Verma.

Foram obtidos no programa Statistica 12.5, através de regressão não linear utilizando o método Quase-Newton. Embora se tenha aplicado a regressão para cada amostra (triplicatas) individualmente, os coeficientes/parâmetros apresentados na Tabela 2, refere-se à

média dos valores obtidos nas regressões de cada amostra de uma mesma temperatura, para cada modelo.

Para avaliar a qualidade do ajuste, empregou-se o coeficiente de determinação ( $R^2$ ), o Desvio quadrático médio (MQD) e o Desvio padrão de estimativa (SE), todos mostrado na Tabela 3. E uma média desses valores por modelos, possibilitando uma comparação mais objetiva entre os mesmos.

Tabela 2 – Parâmetros de ajustes dos modelos cinéticos obtidos para a secagem do jambo.

<b>Modelos Matemáticos</b>	<b>T(°C)</b>	<b>a</b>	<b>b</b>	<b>c</b>	<b>m</b>	<b>n</b>	<b>k1</b>	<b>k2</b>	<b>k3</b>
<b>Lewis</b>	40°C						0,0079		
	50°C						0,0066		
	60°C						0,0105		
	70°C						0,0142		
<b>Handerson e Pabis</b>	40°C	1,0531					0,0083		
	50°C	1,0531					0,0070		
	60°C	1,0606					0,0112		
	70°C	1,0558					0,0150		
<b>Page</b>	40°C					1,2279	0,0026		
	50°C					1,3016	0,0016		
	60°C					1,2453	0,0035		
	70°C					1,2678	0,0044		
<b>Logarítmico</b>	40°C	1,0415		-0,0527		1,1760	0,0030		
	50°C	1,4459		-0,4694		1,1283	0,0020		
	60°C	1,0462		-0,0517		1,1844	0,0040		
	70°C	1,0137		-0,0344		1,2449	0,0044		
<b>Midili et al.</b>	40°C	1,0317	-0,0003			1,0312	0,0126		
	50°C	0,9630	-0,0003			1,2680	0,0014		
	60°C	0,9921	-0,0001			1,2079	0,0038		
	70°C	0,9771	-0,0001			1,2679	0,0041		
<b>Dois termos</b>	40°C	0,5265	0,5266				0,0083	0,0083	
	50°C	0,5265	0,5265				0,0070	0,0070	
	60°C	0,5303	0,5303				0,0112	0,0112	
	70°C	0,5279	0,5279				0,0150	0,0150	
<b>Aproximação de Difusão</b>	40°C	-7,9402	0,9241				0,0144		
	50°C	-59,7280	0,9876				0,0124		
	60°C	-67,8696	0,9901				0,0186		
	70°C	-74,2096	0,9906				0,0253		
<b>Handerson e Pabis Modificada</b>	40°C	0,3510	0,3510	0,3511			0,0083	0,0083	0,0083
	50°C	0,3510	0,3510	0,3510			0,0070	0,0070	0,0070
	60°C	0,3536	0,3536	0,3534			0,0112	0,0112	0,0112
	70°C	0,3519	0,3519	0,3519			0,0150	0,0150	0,0150

Fonte: Próprio Autor (2018).

Tabela 2 – Continuação...

<b>Thompson</b>	40°C	-153,1660	-15,0006						
	50°C	-178,1687	-22,2759						
	60°C	-132,8839	-15,3848						
	70°C	-76,1338	-5,6170						
<b>Cavalcanti mata</b>	40°C	0,8658	0,3548	-0,2308	1,18042	0,9649	0,0029		
	50°C	0,7072	0,5749	-0,3067	0,741613	0,9201	0,0019		
	60°C	0,48661	0,6953	-0,1880	0,935772	0,9400	0,0039		
	70°C	0,6160	0,5098	-0,1466	0,888001	1,2459	0,0043		
<b>Verma</b>	40°C	-6,0252					0,0108	0,0104	
	50°C	-8,4175					0,0130	0,0119	
	60°C	-9,9378					0,0192	0,0180	
	70°C	-20,9567					0,0135	0,0135	

Fonte: Próprio Autor (2018).

Analisando a Tabela 3, verifica-se que o modelo que apresentou os melhores ajustes, ou seja, aqueles com elevado  $R^2$  e baixo MQD e SE, foi o do Cavalcanti Mata, seguidos respectivamente, pelo modelo Logarítmico e o do Midilli et al.. Os modelos de Page, Aproximação de difusão e Verma também apresentaram ajustes satisfatórios, com ressalvas para o modelo de Verma que embora tenha apresentado o sexto melhor  $R^2$ , teve um valor de MQD e SE ligeiramente mais alto.

Tabela 3 – Coeficiente de Determinação ( $R^2$ ), Desvio Padrão da Estimativa (SE), Desvio Quadrático Médio (DQM).

Modelos Matemáticos	T(°C)	$R^2$	DQM	SE	$R^2$ (média)	DQM (média)	SE (média)	$Cv^1$	$Cv^2$
<b>Lewis</b>	40°C	98,44%	0,0401	0,0410	97,90%	0,0450	0,0461	0,1494	0,3433
	50°C	96,39%	0,0575	0,0589					
	60°C	98,50%	0,0393	0,0403					
	70°C	98,25%	0,0432	0,0444					
<b>Handerson e Pabis</b>	40°C	98,84%	0,0345	0,0361	98,32%	0,0539	0,0567	0,0745	0,1723
	50°C	96,88%	0,1098	0,1154					
	60°C	98,96%	0,0327	0,0343					
	70°C	98,61%	0,0386	0,0408					
<b>Page</b>	40°C	99,66%	0,0186	0,0195	99,50%	0,0208	0,0218	0,1740	0,2156
	50°C	98,86%	0,0324	0,0341					
	60°C	99,82%	0,0133	0,0139					
	70°C	99,67%	0,0188	0,0199					
<b>Logarítmico</b>	40°C	99,81%	0,0140	0,0155	99,80%	0,0135	0,0150	0,2914	0,4839
	50°C	99,61%	0,0190	0,0212					
	60°C	99,95%	0,0075	0,0083					
	70°C	99,83%	0,0133	0,0149					

Fonte: Próprio Autor (2018).

Tabela 3 – Continuação...

<b>Midili et al.</b>	40°C	99,24%	0,0242	0,0267	99,66%	0,0160	0,0178	0,3542	0,3957
	50°C	99,64%	0,0182	0,0202					
	60°C	99,94%	0,0080	0,0089					
	70°C	99,82%	0,0138	0,0155					
<b>Dois termos</b>	40°C	98,84%	0,0345	0,0380	98,32%	0,0539	0,0599	0,0745	0,1723
	50°C	96,88%	0,1098	0,1220					
	60°C	98,96%	0,0327	0,0362					
	70°C	98,61%	0,0386	0,0434					
<b>Aproximação de Difusão</b>	40°C	99,68%	0,0180	0,0193	99,51%	0,0362	0,0391	0,0792	0,3108
	50°C	98,85%	0,0949	0,1025					
	60°C	99,82%	0,0132	0,0142					
	70°C	99,67%	0,0187	0,0204					
<b>Handerson e Pabis Modificada</b>	40°C	98,84%	0,0180	0,0193	98,32%	0,0362	0,0391	0,0745	0,1723
	50°C	96,88%	0,0949	0,1025					
	60°C	98,96%	0,0132	0,0142					
	70°C	98,61%	0,0187	0,0204					
<b>Thompson</b>	40°C	98,71%	0,0360	0,0377	97,81%	0,0424	0,0446	0,3494	0,3956
	50°C	97,63%	0,0464	0,0488					
	60°C	96,23%	0,0510	0,0535					
	70°C	98,67%	0,0364	0,0385					
<b>Cavalcanti mata</b>	40°C	99,81%	0,0140	0,0164	99,80%	0,0133	0,0158	0,7069	0,2500
	50°C	99,62%	0,0187	0,0221					
	60°C	99,95%	0,0074	0,0087					
	70°C	99,84%	0,0132	0,0160					
<b>Verma</b>	40°C	99,66%	0,0187	0,0201	99,48%	0,0378	0,0409	0,4022	0,3602
	50°C	98,85%	0,0949	0,1025					
	60°C	99,82%	0,0132	0,0143					
	70°C	99,61%	0,0244	0,0266					

Fonte: Próprio Autor (2018).

<sup>1</sup>Varição dos parâmetros/coeficientes para uma mesma temperatura

<sup>2</sup>Varição dos parâmetros/coeficientes para diferentes temperatura.

Também foi feita uma comparação dos diferentes resultados para avaliar qual deles sofreram as maiores variações dos parâmetros/coeficientes utilizando uma média do coeficiente de variação de Pearson, também chamado de coeficiente de variação (Cv). Isso foi avaliado para cada equação, considerando a variação dentro da amostra na mesma temperatura, e outro considerando uma variação para as diferentes temperaturas. Esta avaliação mostra qual das fórmulas demonstra mais consistência em seus parâmetros, ou seja, quais os modelos cujos parâmetros resistem mais a variação de seus valores com a alteração da temperatura.



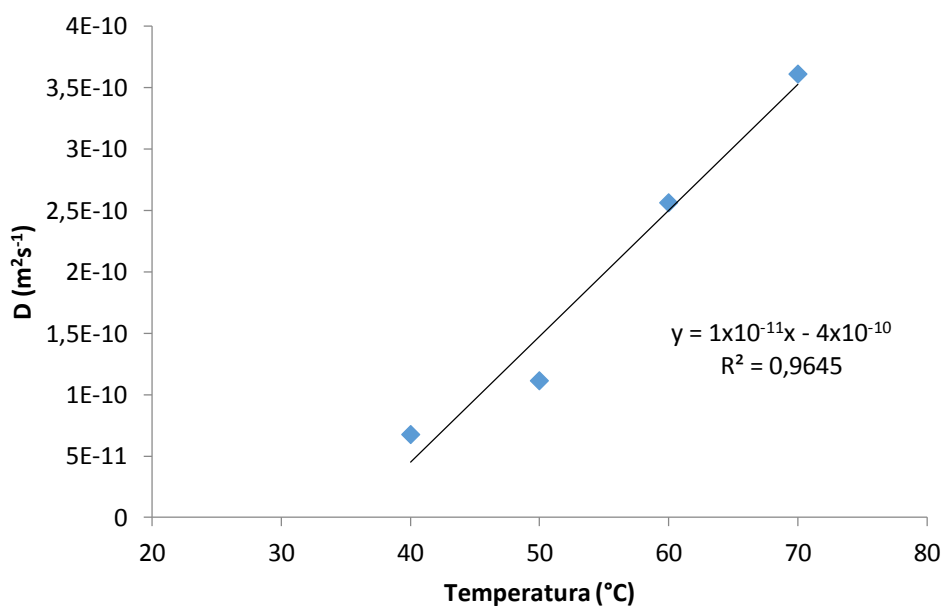
Os resultados conforme pode-se verificar na Tabela 3, indicam que os modelos cujos parâmetros que sofreram menos alterações numa mesma temperatura, foram os modelos de Handerson e Pabis, Dois termos e Aproximação de difusão. Considerando a sensibilidade dos parâmetros com alteração da temperatura, os menos sensíveis foram os modelos Dois termos e de Handerson e Pabis. Vale destacar também, que os três apresentaram os mesmos valores médio do coeficiente de Pearson, o que pode ser explicado pela semelhança dos modelos entre si o que leva a resultados e precisões muito semelhantes.

É possível observar que quanto mais sensível à temperatura torna-se os parâmetros de um determinado modelo, mais preciso o modelo se torna. Observa-se uma flexibilidade em relação ao modelo para se adaptar o melhor possível aos dados, logo ele tende a apresentar os melhores resultados.

Para a determinação do coeficiente de difusão, utilizou-se o modelo difusivo de Fick, indicado pela Equação (20), empregando a ferramenta solver do Excel.

Na Figura 12 são apresentados os valores do coeficiente de difusão efetivo do jambo para as temperaturas 40, 50, 60 e 70°C, apresentando os seguintes valores médio (das amostras em triplicata por temperatura):  $6,75 \times 10^{-11}$ ,  $1,11 \times 10^{-10}$ ,  $2,56 \times 10^{-10}$  e  $3,60 \times 10^{-10} \text{ m}^2\text{s}^{-1}$ . Para 40, 50, 60 e 70°C, respectivamente observa-se claramente que o coeficiente de difusão aumenta significativamente com a elevação da temperatura.

Figura 12 - Valores médios dos coeficientes de difusão ( $\text{m}^2\text{s}^{-1}$ ) obtidos para a secagem do Jambo nas temperaturas de 40, 50, 60 e 70 °C.

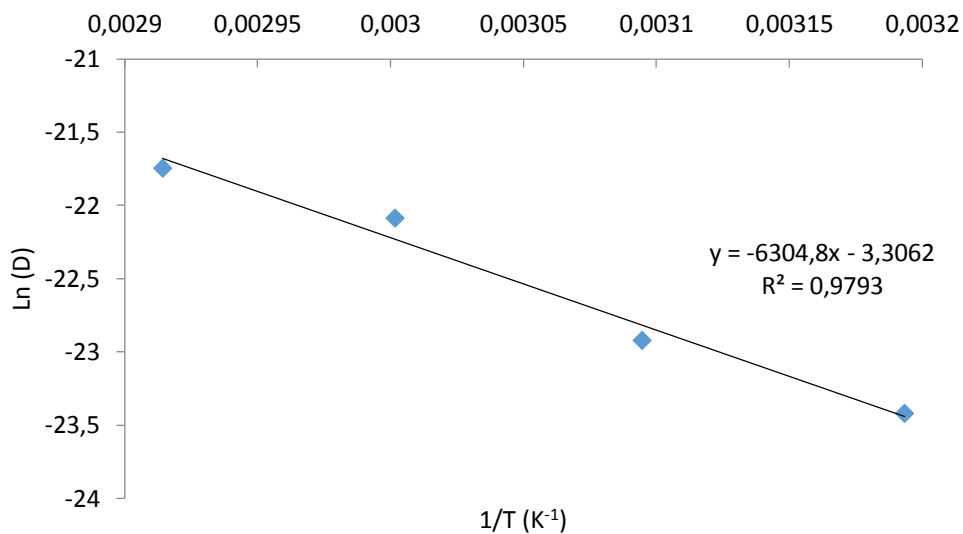


Fonte: Próprio Autor (2018).

De acordo com Madamba, Driscoll e Buckle (1996), os valores do coeficiente de difusão efetivo para a secagem de produtos agrícolas, apresentam-se na ordem de  $10^{-9}$  a  $10^{-11}$   $m^2s^{-1}$ . Portanto os valores determinados encontram-se dentro da faixa esperada.

O coeficiente de difusão efetivo é uma variável da equação de difusão líquida que descreve a velocidade da saída da água da amostra. A linearidade do coeficiente com a temperatura do ar de secagem presume que este controla todo o processo de difusão da água (CORRÊA et al., 2007). O efeito contrário indicaria uma possível interferência das condições externas de secagem. Sua dependência com relação à temperatura é conhecida, e descrita pela equação de Arrhenius (21), conforme apresentado na Figura 13. A inclinação da curva da representação de Arrhenius fornece a relação  $E_a/R$ , enquanto sua interseção com o eixo das ordenadas indica o logaritmo do valor do fator pré-exponencial ( $D_0$ ).

Figura 13 - Representação de Arrhenius para o coeficiente de difusão, em função da temperatura de secagem do Jambo.



Fonte: Próprio Autor (2018).

Na Equação (26), tem-se a Equação de Arrhenius com seus coeficientes ajustados para difusão do jambo.

$$D = 0,036655 \exp\left(-\frac{52421,02}{RT}\right) \quad (26)$$

Como observado na equação, a energia de ativação para a difusão no processo de secagem do jambo foi de 52,421 KJ/mol. Nos processos de secagem, quanto menor a energia de ativação, maior será a difusividade de água no produto.

O valor da energia de ativação encontra-se de acordo com a faixa apresentada por Zogzas, Mauroulis e Marinos-Kouris (1996), que varia de 12,7 a 110 KJ mol<sup>-1</sup> para produtos agrícolas. Outros autores, Breure e Terra (2016), Silva et al. (2016), Leite et al. (2015) e Goneli et al. (2007), encontraram respectivamente, os valores de 31,682 e 27,6446 KJ mol<sup>-1</sup> para o fruto do macaúba, para as velocidades do ar de secagem 0,4 e 2,0 m s<sup>-1</sup> respectivamente; 62,5 KJ mol<sup>-1</sup> para a polpa de carambola; 30,17 KJ mol<sup>-1</sup> para a banana variedade Terra; e 42,00 KJ mol<sup>-1</sup> para difusão líquida nos grãos de trigo.

A energia de ativação é uma barreira que deve ser ultrapassada para que o processo de difusão possa ser desencadeado no produto. A energia de ativação diminui com a elevação do teor de água inicial do produto durante o processo de secagem. De acordo com Correa et al. (2010), a elevação da temperatura reduz a viscosidade da água, influenciando diretamente na resistência do fluido ao escoamento, fazendo com que sua redução acarrete em maior facilidade da difusão das moléculas de água nos capilares do produto.

Para a determinação das propriedades termodinâmicas, utilizou-se as Equações (23), (24) e (25). Os valores determinados podem ser observados na Tabela 4. Observa-se que a entalpia ( $\Delta H$ ) reduziu de 49,817 para 49,568 KJ mol<sup>-1</sup> com o aumento da temperatura de 40 para 70°C. De acordo com Correa et al. (2010), isto indica que uma menor quantidade de energia é requerida para que a secagem ocorra em temperaturas mais elevadas.

Tabela 4 – Propriedades termodinâmicas da secagem do jambo, entalpia ( $\Delta H$ ), entropia ( $\Delta S$ ) e energia de Gibbs ( $\Delta G$ ).

<b>Temperatura</b> (°C)	<b><math>\Delta H</math></b> (KJ mol <sup>-1</sup> )	<b><math>\Delta S</math></b> (KJ mol <sup>-1</sup> K <sup>-1</sup> )	<b><math>\Delta G</math></b> (KJ mol <sup>-1</sup> )
<b>40</b>	49,817	-0,273	135,251
<b>50</b>	49,734	-0,273	137,981
<b>60</b>	49,651	-0,273	140,713
<b>70</b>	49,568	-0,274	143,448

Fonte: Próprio Autor (2018).

Para a entropia ( $\Delta S$ ) a pequena variação deveu-se à metodologia utilizada, que se baseia nos números de Planck e de Boltzmann (constantes), sendo a variação de entropia apenas retratada pela variação de temperatura, pois os demais parâmetros são constantes. Como a variação da temperatura é baixa, os logaritmos naturais das temperaturas são muito próximos, relatando essa variação mínima na entropia.

A energia livre de Gibbs busca medir a totalidade de energia associada a um sistema termodinâmico e o seu valor positivo é explicado por uma adição de energia que envolve o

produto para a ocorrência da mudança de fase (líquido para vapor). Meze'e, Ngamveng e Bardet (2008), relata que a energia livre de Gibbs é atribuída ao trabalho necessário para tornar os locais de sorção disponíveis. Essa energia aumentou com o aumento da temperatura, e seus valores foram positivos, indicando que a secagem nas condições do presente trabalho não foi espontânea. O valor positivo da energia livre de Gibbs é característico de uma reação endotérmica, em que requer uma adição de energia proveniente do meio em que o produto está envolvido para que ocorra a secagem.

A não espontaneidade do processo de secagem descrito corrobora os valores de entalpia e entropia mostrados anteriormente. Analisando a Equação (25), observa-se que os processos não espontâneos ocorrem em três situações distintas: em que as variações de entalpia e entropia são positivas, mas o valor de  $\Delta H$  é maior que  $T\Delta S$ ; em que a entalpia e a entropia são negativas, mas o valor de  $\Delta H$  é menor que  $T\Delta S$ ; em que a variação de entalpia é positiva e a variação de entropia é negativa, que é o caso deste trabalho.

## 6 CONCLUSÃO

- Os modelos matemáticos de Cavalcanti Mata, logarítmico e o de Midilli et al. apresentaram os melhores resultados, representando satisfatoriamente os dados experimentais para a descrição da cinética de secagem do jambo (*Syzygium malaccense* L.).

- A temperatura mostrou-se como o principal fator controlador do processo de secagem, embora a geometria e massa das amostras também influenciaram as taxas de secagem.

- A difusão líquida aumenta com a elevação da temperatura, com valores do coeficiente de difusão entre  $6,75 \times 10^{-11}$  e  $3,60 \times 10^{-10} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$ .

- Observou-se a dependência da difusividade com a temperatura que foi analisada a partir da equação de Arrhenius, que forneceu uma energia de ativação de  $52,421 \text{ KJ mol}^{-1}$ .

- Os valores de entalpia e entropia decrescem com o aumento da temperatura, sendo a entalpia positiva e a entropia negativa, em todas as condições de secagem do presente trabalho;

- A energia livre de Gibbs aumentou com a temperatura, sendo positiva em todas as condições de secagem. Ficou observado a não espontaneidade do processo de secagem, requerendo-se a inserção de energia para que o processo ocorra.

## REFERÊNCIAS

- AOAC. Official Methods of Analysis of AOAC International. 2006. 8th Edition, Association of Official Analytical Chemistry International, Maryland, 2006.
- ALEXANDRE, H.V.; GOMES, J.P; NETO, A.L.B.; SILVA, F.L.H. Cinética de secagem de abacaxi cv pérola em fatias. *Revista Brasileira de produtos agroindustriais*, Campina Grande, v.11, n.2, p.123-128, 2009.
- ALMEIDA, E.J.; SCALOPII, E.M.T.; JESUS, N.; MARTINS, A.B.G. Propagação de jambeiro vermelho (*Syzyguim malaccense* L.) por estaquia de ramos herbáceos. *Biosci.J.*, Uberlandia, v.24.n.1, p.39-45, jan./mar.2008.
- ALMEIDA, J. B. O.; SEVERO Jr., J. B.; CORREIA, E. C. O.; MELO, V. V.; SANTANA, J. C. C.; SOUZA, R. R. Uso de leveduras de vinhos de frutas tropicais na alimentação humana. *Brazilian Journal of Food Technology*, p. 65-69, 2005. 5ª SPIAL.
- ALMEIDA, C.A. Estudo da Cinética de Secagem da Acerola (*Malpighia emarginata* D. C.). 2006. 89 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Agrícola)– Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande - PB, 2006.
- ALMEIDA, F.A.C.; GOUVEIA, J.P.G.; VILLAMIL, J.M.P.; SILVA, M.M. Secagem natural e artificial de vagens de algaroba. *Revista Brasileira de Armazenamento*, Viçosa, v.27, n.1, p.48–57, 2002.
- AUGUSTA, I.M.; RESENDE, J.M.; BORGES, S.V.; MAIA, M.C.A.; COUTO, M.A.P.G. Caracterização física e química da casca e polpa de jambo vermelho (*Syzygium malaccensis*, (L.) Merryl & Perry). *Ciênc. Tecnol. Aliment.*, Campinas, out-dez, 2010.
- ARRUDA, E. B.; LOBATO, F. S.; ASSIS, A. J.; BARROZO, M. A. S. Modeling of fertilizer drying in roto-aerated and conventional rotary dryers. *Drying Technology*, London United Kingdom, v. 27, n. 3, p. 1192–1198, 2009.
- ARAÚJO, M.E.R.; ALMEIDA, F.A.C.; GOUVEIA J.P.G.; SILVA, M.M. Atividade de água em goiaba (*Psidium guajava* L.). In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA AGRÍCOLA, 30, Foz do Iguaçu. Anais... Sociedade Brasileira de Engenharia Agrícola, 2001.
- ANDRADE, E.T.; CORREA, P.C.; TEIXEIRA, L.P.; PEREIRA, R.G.; CALOMENI, J.F. Cinética de secagem e qualidade de sementes de feijão. *Engevista*, v.8, n.2, p.83-95, dezembro 2006.
- ANDRÉ, A.M.M.C.N.; CASTRO, D.S.; ALMEIDA, R.D.; OLIVEIRA, V.F.; MOREIRA, I.S. Comparação de Modelos Matemáticos da Cinética de Secagem de cascas de Manga Espada. *Revista Verde (Pombal - PB - Brasil)*, v 9., n. 3, p. 19 – 27, jul-set, 2014.

- BARBOSA, T. A.; LOBATO, F.S. Determinação da cinética de secagem de produtos alimentícios usando algoritmos genéticos. *Revista de Agricultura Neotropical*, Cassilândia-MS, v. 3, n. 3, p. 28-37, jul./set. 2016.
- BAUCOUR; P.; DAUDIN, J. D. Development of a new method for fast measurement of water sorption isotherms in the high humidity range. Validation on gelatine gel. *Journal of Food Engineering*, v. 44, p. 97-107, 2000.
- BORGES, S.B.; MENEGALLI, F.C. Influência da desidratação osmótica sobre a cinética de secagem de manga. *Pesq. agropec. bras.*, Brasília, v.29, n.4, p.637-642, abr.1994.
- BEZERRA, T. S. Comportamento higroscópico de pós de diferentes Variedades de manga (*mangifera indica* L.). 101 f. Dissertação (Mestrado em Tecnologia de Alimentos); Universidade Federal Do Ceará, Fortaleza, 2009.
- BREURE, R. F.; TERRA, M. T. C. Cinética de secagem dos frutos de macaúba (*Acrocomia aculeata*). 2016. 34 f. Monografia (Engenheiro Agrônomo) - Universidade Federal da Grande Dourados, Dourados – MS.
- BETIOL, L. F. L. Estudo das isothermas de adsorção do bagaço de mandioca proveniente da indústria de fécula. 2016. 87 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de alimentos) – Universidade Federal Paulista, São José do Rio Preto, 2016.
- BROD, F.P.R.; ALONSO, L.F.T.; PARK, K.J. Secagem de produtos agrícolas. XI SEMEAGRI – Semana de Engenharia Agrícola da Unicamp. Agrológica – Empresa Jr. de Eng<sup>a</sup> Agrícola, Campinas, 122 p, 1999.
- CASTILLO, M.D.; MARTÍNEZ, E.J.; GONZÁLEZ, H.H.L.; RESNIK, S.L. Study of mathematical models applied to sorption isotherms of Argentina black beans varieties. *Journal of Food Engineering*, Oxford, v.27, p.45-61, 2003.
- CARNEIRO, J.G.; CAVALCANTE, A.B.D.; TEIXEIRA, D.M.A.; PEREIRA, I.K.D.; CARNEIRO, M.A.; BARBOSA, M.C.F. Potencial nutricional das algas vermelhas *Hypnea musciformis* e *Solieria filiformis*: Análises da composição centesimal. In: Congresso norte e nordeste de ensino e inovação, Palmas, Tocantis, VI CONNEPI, 2012.
- CARDOSO, F. F. Propriedades de adsorção de água em farinhas mistas de arroz e bagaço de cevada pré-gelatinizadas por extrusão termoplástica. 2012. 52 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola). Programa de Pós Sistemas Agroindustriais. Universidade Estadual de Goiás, UEG, 2012.
- CASSINI, A.S. Análise das Características de Secagem da Proteína Texturizada de Soja. 2004. 117 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) – Programa de Pós-graduação em Engenharia Química, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2004.

- COSTA, R.S.; OLIVEIRA, I.V.M.; MÔRO, F.V.; MARTINS, A.B.G. Aspectos morfológicos e influência do tamanho da semente na germinação do jambo vermelho. *Revista Brasileira de Fruticultura*, v. 28, n. 1, p. 117-120, 2006.
- COSTA, A. B. S. Secagem convectiva de folhas de hortelã: análise baseada no ajuste de correlações empíricas, superfícies de resposta e redes neurais. 2013. 91 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) – Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2013.
- CORRÊA, P. C. RESENDE, O.; MARTINAZZO, A.P.; GONELI, A. L.D; BOTELHO, B.F.M. Modelagem matemática para a descrição do processo de secagem do feijão (*Phaseolus vulgaris* L.) em camadas delgadas. *Engenharia Agrícola*, Jaboticabal, v. 27, n. 2, p. 501-510, 2007.
- 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*, Viçosa, v. 57, n.5, p. 595-601, 2010.
- CELESTINO, S.M.C. Princípio de Secagem de alimentos. Embrapa Cerrados Planaltina, DF. 2010.
- CELESTINO, S. M. C. Transferência de Calor e Massa em Leito Deslizante e Escoamentos Concorrentes: Secagem de Sementes de Soja. 1998. 81 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química). Universidade Federal de Uberlândia, 1998.
- DITCHFIELD, C. Estudos dos métodos para a medida da atividade de água. 200. 195 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia) Escola Politécnica, Universidade de São Paulo. 2000.
- FIGUEIREDO, R. Princípios de secagem de produtos biológicos. João Pessoa. Ed. Universitária/UFPB, 2004. 229p.
- GAVA, A. J. Princípios de tecnologia de alimentos. São Paulo: Nobel, 1984
- GALDINO, P.O.; FIGUEIRÊDO, R. M. F.; QUEIROZ, A. J.M.; GALDINO, P. O. Drying kinetics of Atemoya pulp. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*. v. 20, n.7, p.672-677, 2016.
- GONELI, A.L.D.; CORRÊA, P.C.; RESENDE, O.; NETO, S.A.R. Estudo da difusão de umidade em grãos de trigo durante a secagem. *Ciênc. Tecnol. Aliment.*, Campinas, v. 27(1), p. 135-140, jan.-mar. 2007
- GUSMÃO, R.P.; GUSMÃO, T.A.S.; FILHO, R.S.F.; AOUAR, A.A.E. Efeito da secagem convectiva no conteúdo de carotenóides totais e atividade de água da palma forrageira (*Opuntia ficus indica* Mill). *Revista Brasileira de Produtos Agroindustriais*, Campina Grande, v.16, n.2, p.205-212, 2014.



- KEMP, I. C.; OAKLEY, D. E. Modeling of particulate drying in theory and practice. *Drying Technology*, London-United Kingdom, v. 20, n. 45, p. 1699–1750, 2002.
- KRÜGER, C.; DALAGNOL, M. T. Desidratação osmótica como tratamento preliminar na secagem de abacaxi (*Ananas comosus* L. MERRIL) variedade smooth cayenne. 2014. 57 f. Monografia (Bacharelado em Química) - Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Pato Branco, 2014.
- LEITE, A. L. M. P.; SILVA, F. S.; PORTO, A. G.; PIASSON, D.; SANTOS, P. Contração volumétrica e cinética de secagem de fatias de banana variedade Terra. *Pesquisa Agropecuária Tropical*, v. 45, n. 2, p. 155-162, 2015.
- LEWICKI, P.P. Water as the determinant of food engineering properties. A review. *Journal of food engineering*, Elsevier, v. 61, n. 4, p.483-495, 2004.
- MARCINKOWSKI, E.A. Estudo da cinética de secagem, curvas de sorção e predição de propriedades termodinâmicas da proteína texturizada de soja. 2006. 128 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia). Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2006.
- MADAMBA, P.S.; DRISCOLL, R.H.; BUCKLE, K.A. Enthalpy-entropy compensation models for sorption and browning of garlic. *Journal of Food Engineering*, v.28, n.1, p.109-119, 1996.
- MORAES, S.O.; RODRIGUES, V.C. Secagem de Alimentos. Universidade de São Paulo. Escola superior de agricultura Luiz de Queiroz. Piracicaba, SP. 2006.
- MEZE'E, Y.N.N.; NGAMVENG, J.N.; BARDET, S. Effect of enthalpy–entropy compensation during sorption of water vapour in tropical woods: the case of bubinga. *Thermochimica Acta*, 468, pg.1-5, 2008.
- OLIVEIRA, F.C. Estudos tecnológicos e de engenharia para o armazenamento e processamento do pinhão. 2008. Tese (Doutorado em Engenharia) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2008.
- OLIVEIRA, F.I.P.; GALLÃO, M.I.; RODRIGUES, S.; FERNANDES, F.A.N.; Dehydration of Malay apple (*Syzygium malaccense* L.) using ultrasound as pre-treatment. Published in *Food and Bioprocess Technology*, v. 4, p. 610-615, 2011.
- OLIVEIRA, G.S.; COSTA, J.M.C.; AFONSO, M.R.A. Caracterização e comportamento higroscópico do pó da polpa de cajá liofilizada. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, v.18, n.10, p.1059–1064, 2014.
- PUZZI, D. Abastecimento e armazenagem de grãos. Instituto Campineiro de Ensino Agrícola, Campinas/SP, 2000. 603p.

PARK, K.J.; BIN, A.; BROD, F.P.R. Obtenção das isotermas de sorção e modelagem matemática para a pêra bartlett (*Pyrus sp.*) com e sem desidratação osmótica. *Ciência e Tecnologia de Alimentos, Campinas*, v. 21, n. 1, p. 73-77, 2001.

PARK, K.J.; YADO, M.K.M.; BROD, F.P.R. Estudo de secagem de pêra bartlett (*Pyrus sp.*) em fatias. *Ciência e Tecnologia de Alimentos, Campinas*, v. 21, n. 3, p 288-292, 2001b.

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

RICARDO, L. P.; ROSA, G. S.; Análise da influência da velocidade e da temperatura do ar na secagem de folhas de eucalipto através da técnica de planejamento experimental. 2014. In: X Congresso Brasileiro de Engenharia Química Iniciação Científica. Vassouras, RJ, Brasil.

RODRIGUES, M.E.A.; ALMEIDA, F.A.C.; GOUVEIA, J.P.G.; SILVA, M. M. Avaliação da temperatura e velocidade do ar na secagem de goiaba. *Revista Brasileira de Produtos Agroindustriais, Campina Grande*, v.4, n.2, p.141-147, 2002.

ROSSI, D. umidade em alimentos. Escola Técnica Estadual Tiquatira. Disponível em:< <http://www.professordanielrossi.yolasite.com/resources/Umidade%20em%20Alimentos.pdf>. Acesso em: 25 nov.2017

SANTOS, A. E.; MARTINS, G.M.V; CANUTO, M.F.C.S.; SEGUNDO, J.E.D.V.; ALMEIDA, R.D. Modelagem matemática para a descrição da cinética de secagem do fruto da palma (*Opuntia fícus indica*). *Revista Verde, Pombal, PB*, v. 11, n.1, p.01-06, jan-mar, 2016.

SHIBATA, T.M. Equações de isoterma de sorção de umidade. 2016. Disponível em:<<http://atividadedeagua.blogspot.com/2016/12/equacoes-de-isoterma-de-sorcaode.html>> Acesso em 02 nov.2018

SILVA, R.B.; SILVA, F.S.; PORTO, A.G. Influência da temperatura e da velocidade do ar nas taxas de secagem da polpa de cupuaçu (*theobroma grandiflorum*). 2010. Disponível em:<[http://www.unemat.br/eventos/jornada2008/resumos\\_conic/Expandido\\_00625.pdf](http://www.unemat.br/eventos/jornada2008/resumos_conic/Expandido_00625.pdf)>. Acesso em 15 nov. 2018

SILVA, R.B.; SILVA, F.S.; PORTO, A.G.; ALVES, A.P. Estudo da cinética de secagem de polpa de carambola. *R. bras. Tecnol. Agroindustr.*, Ponta Grossa, v. 10, n. 2, p. 2069-2080, jul./dez. 2016.

SILVA, J. S.; QUEIROZ, D. M.; LOPES, D. C.; SOUSA, F.F. Secagem e armazenagem de produtos agrícolas: estudo da secagem em camada espessa. 2009. Disponível em:< <ftp://ftp.ufv.br/dea/poscolheita/>>. Acesso em:19.12.2018

VICENZI, R. Apostilha de Bromatologia. UNIJUI - Universidade Regional Do Noroeste Do Estado Do Rs. Disponível em: <<https://www.passeidireto.com/arquivo/36798668/-arquivos-prof-394-apostila-de-bromatologia-nutria-a-o-unijui>>. Acesso em: 07 dez. 2017

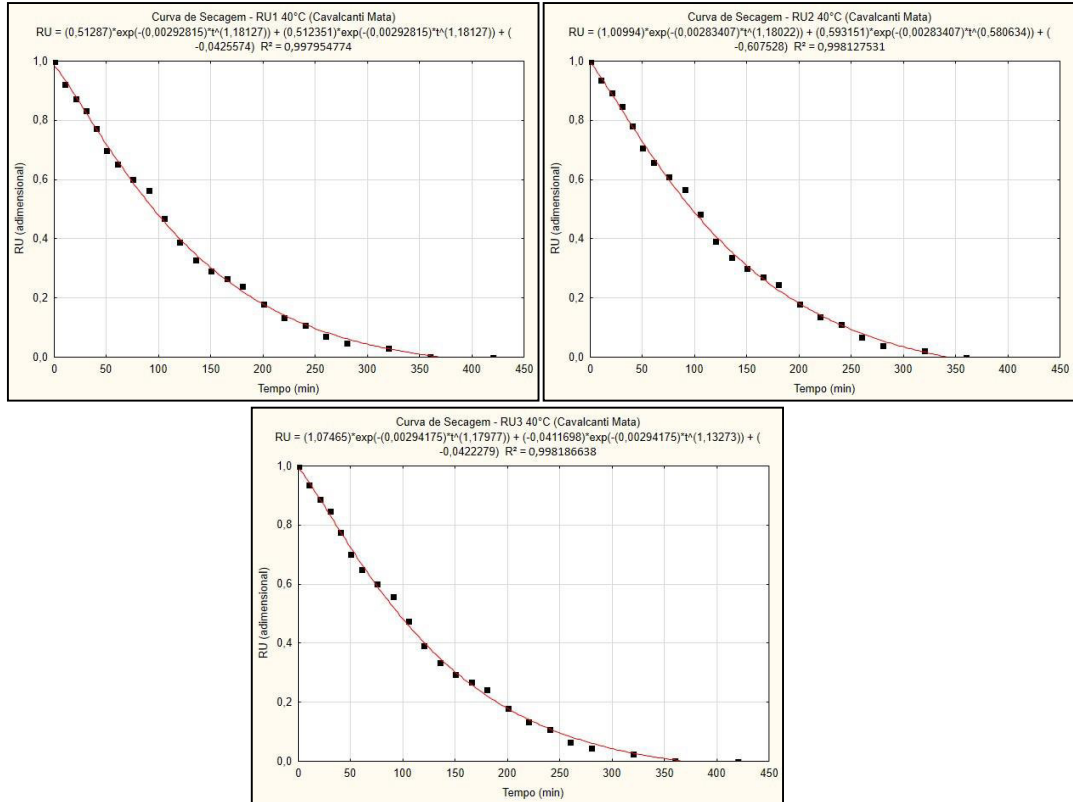
WHISTLER, W.A.; ELEVITCH, C.R. *Syzygium malaccense* (Malay apple). Species Profiles for Pacific Island Agroforestry. Permanent Agriculture Resources (PAR), Hōlualoa, Hawai‘I, April 2006.

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

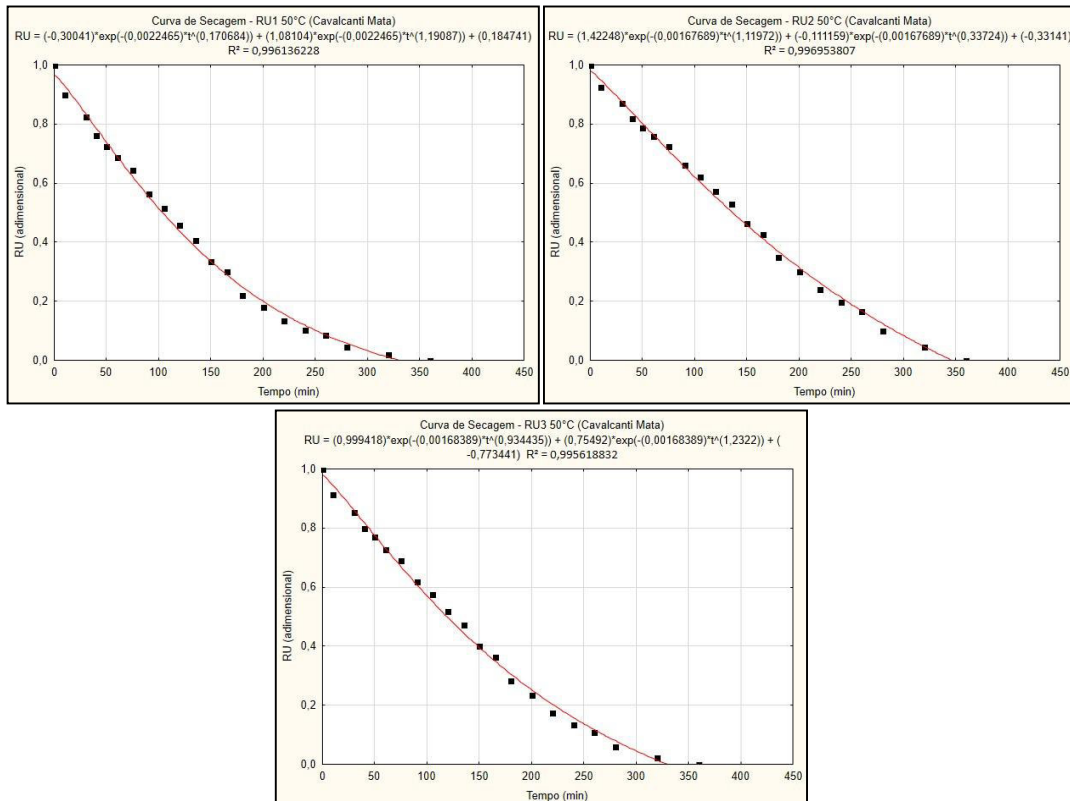
## APÊNDICE A – MODELOS COM OS MELHORES AJUSTES.

- Cavalcanti Mata

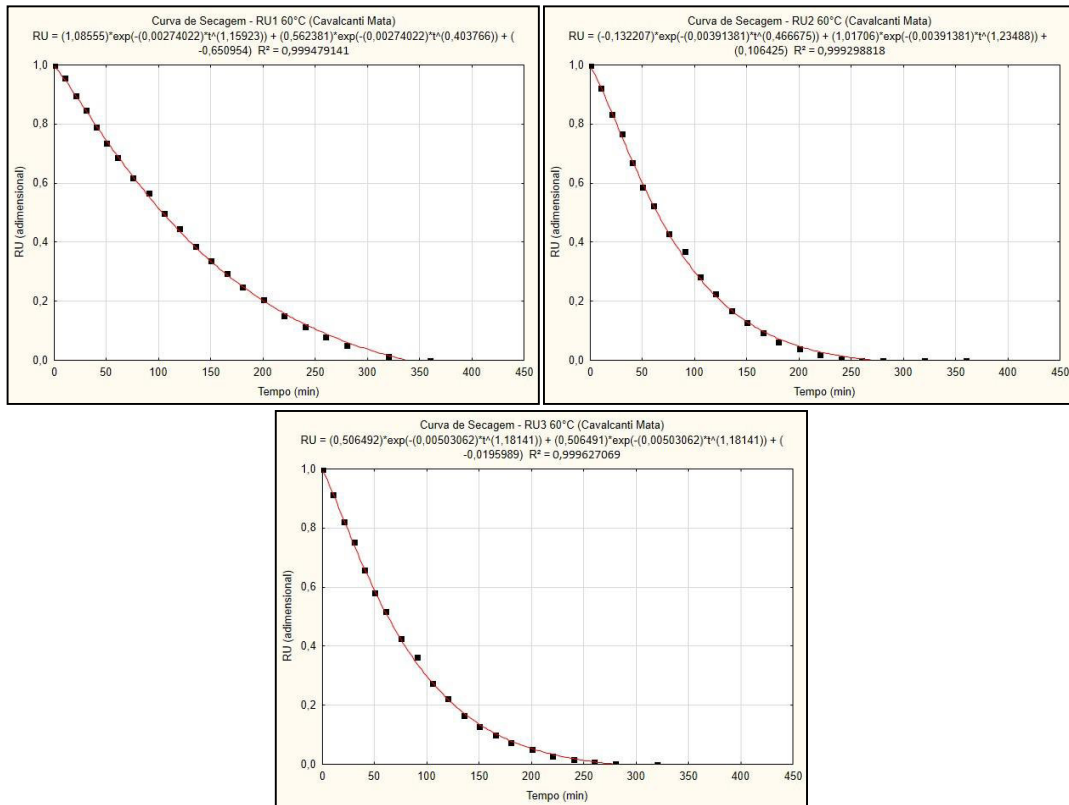
40°C



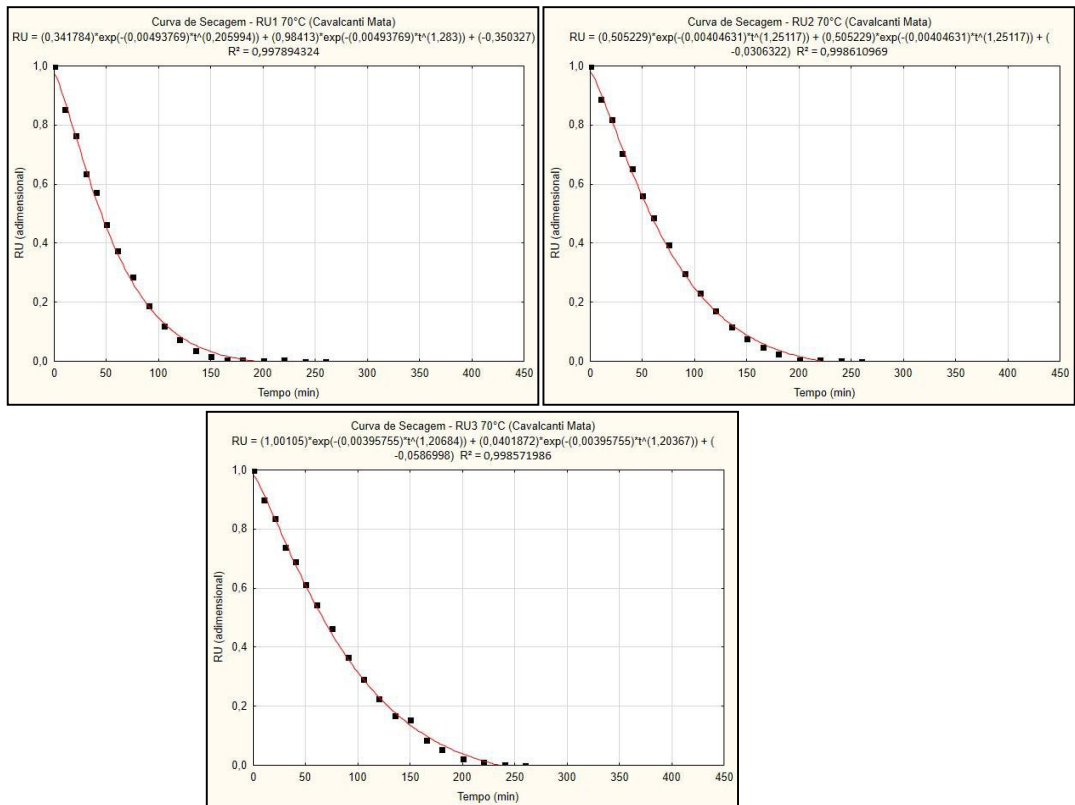
50°C



60°C



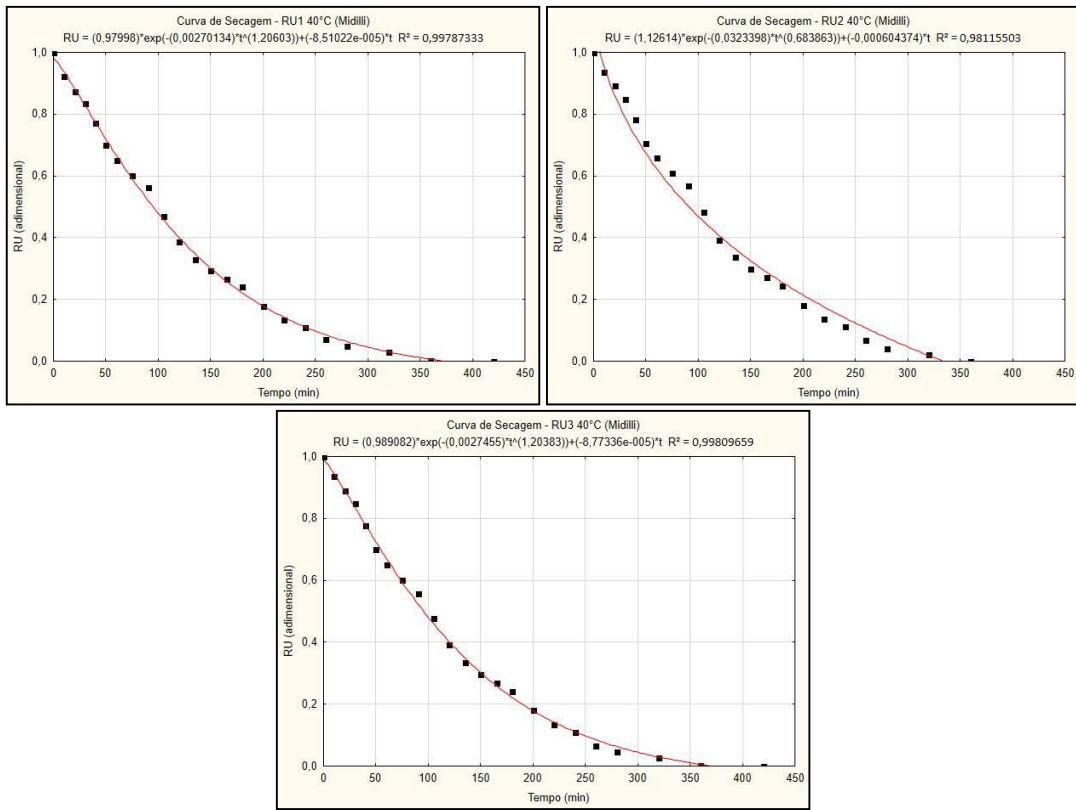
70°C



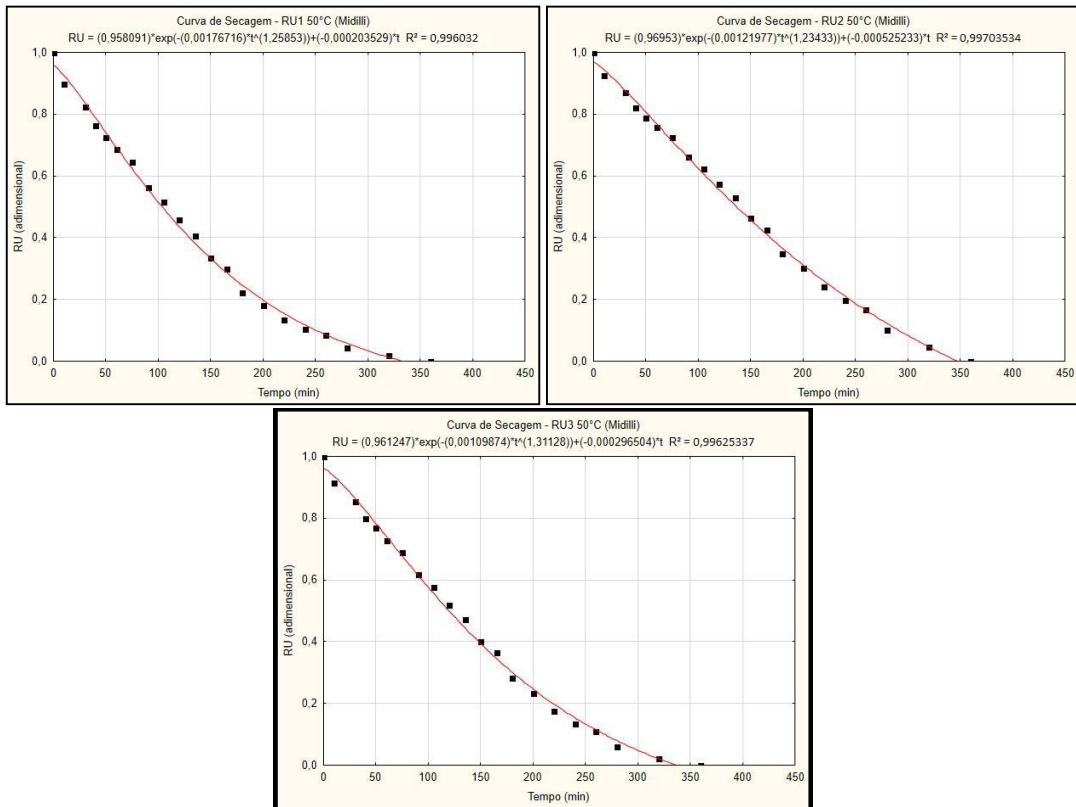
- Miidilli et al.



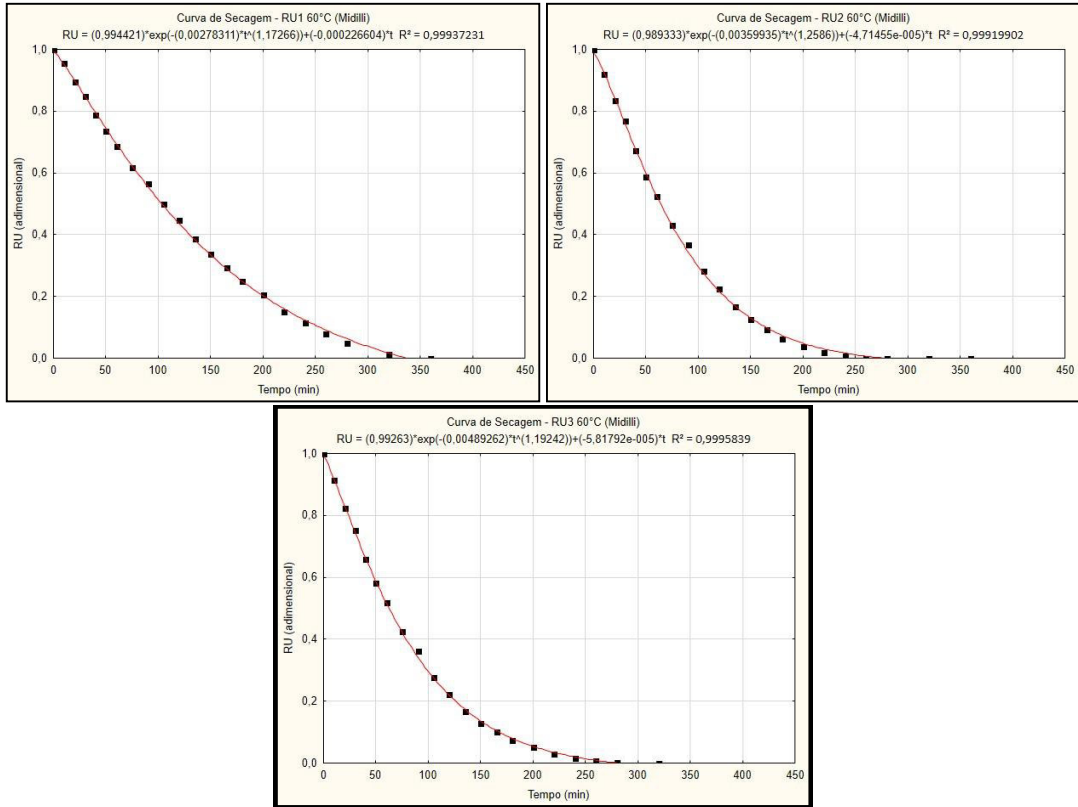
40°C



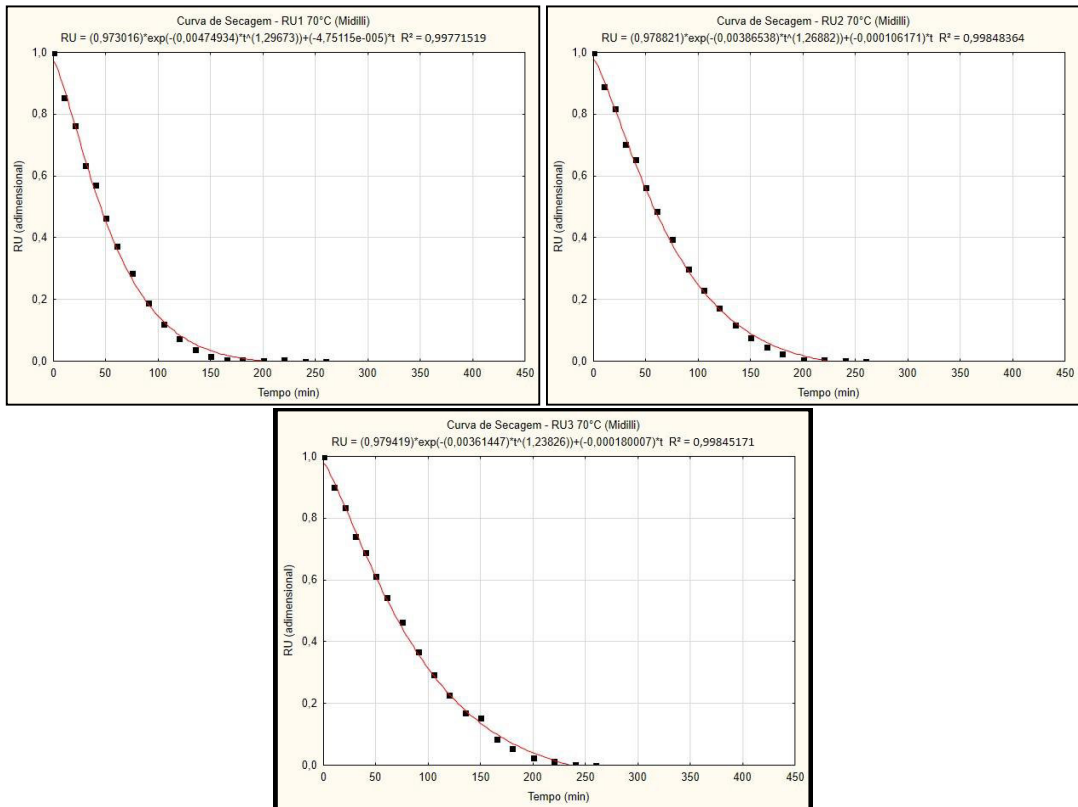
50°C



60°C

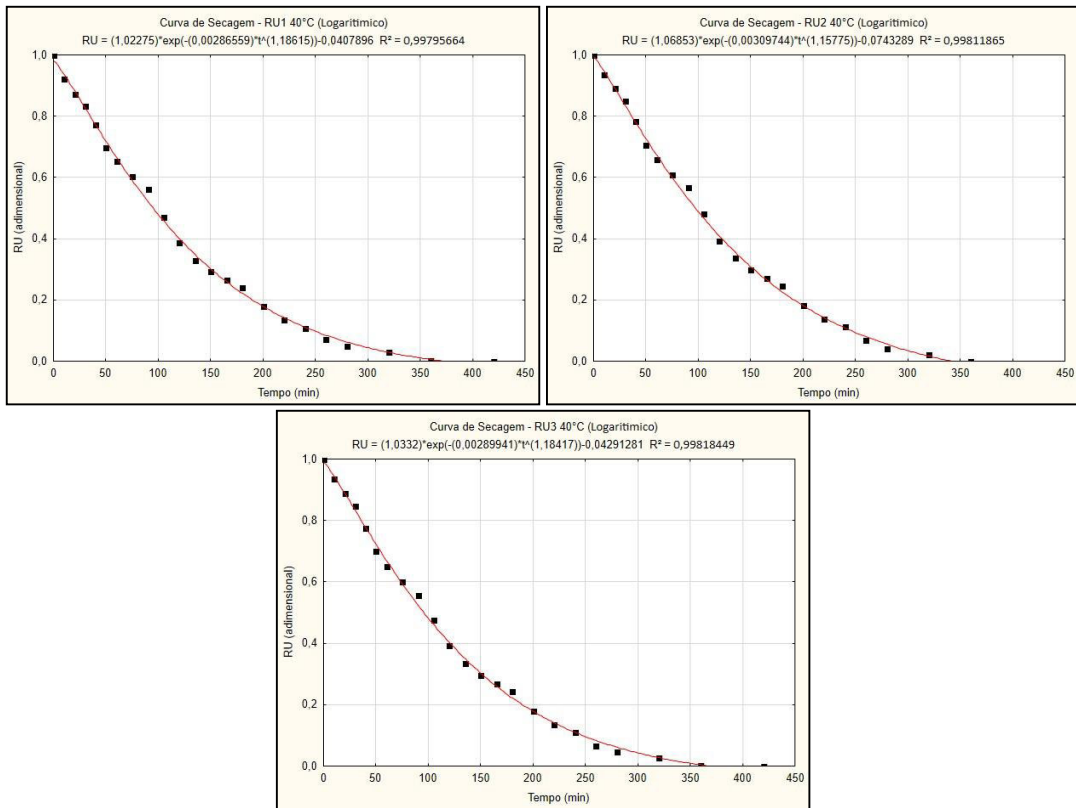


70°C

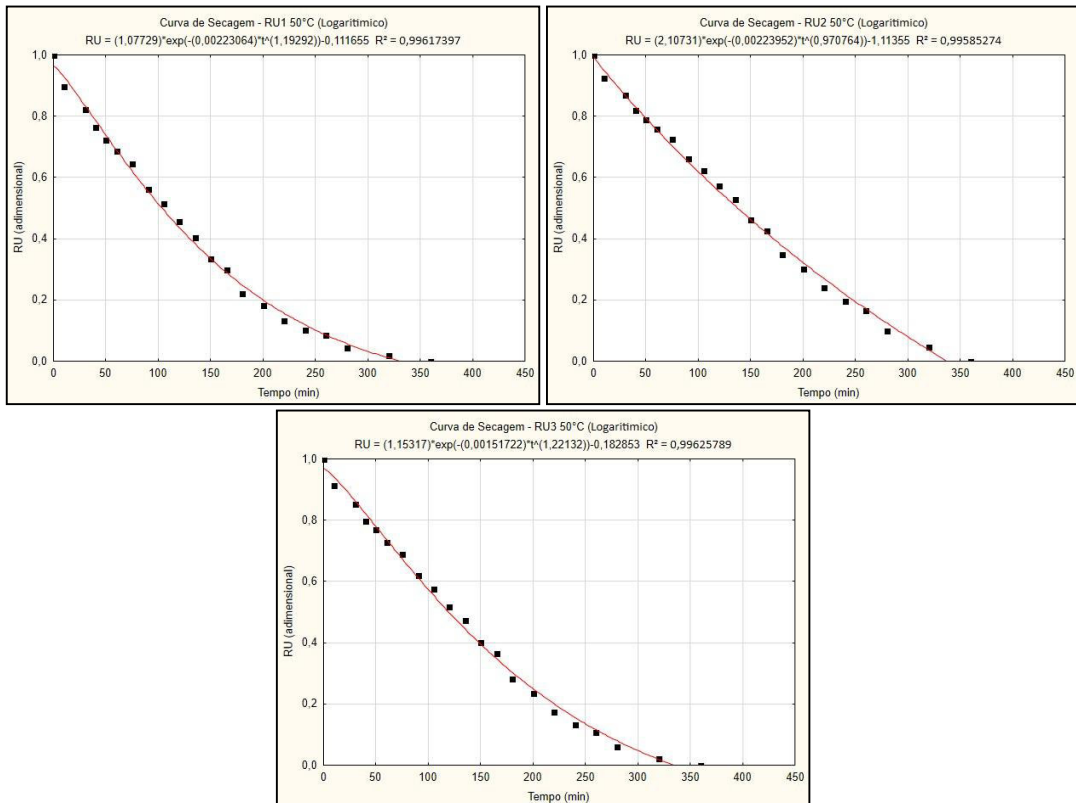


- Logaritmo

40°C

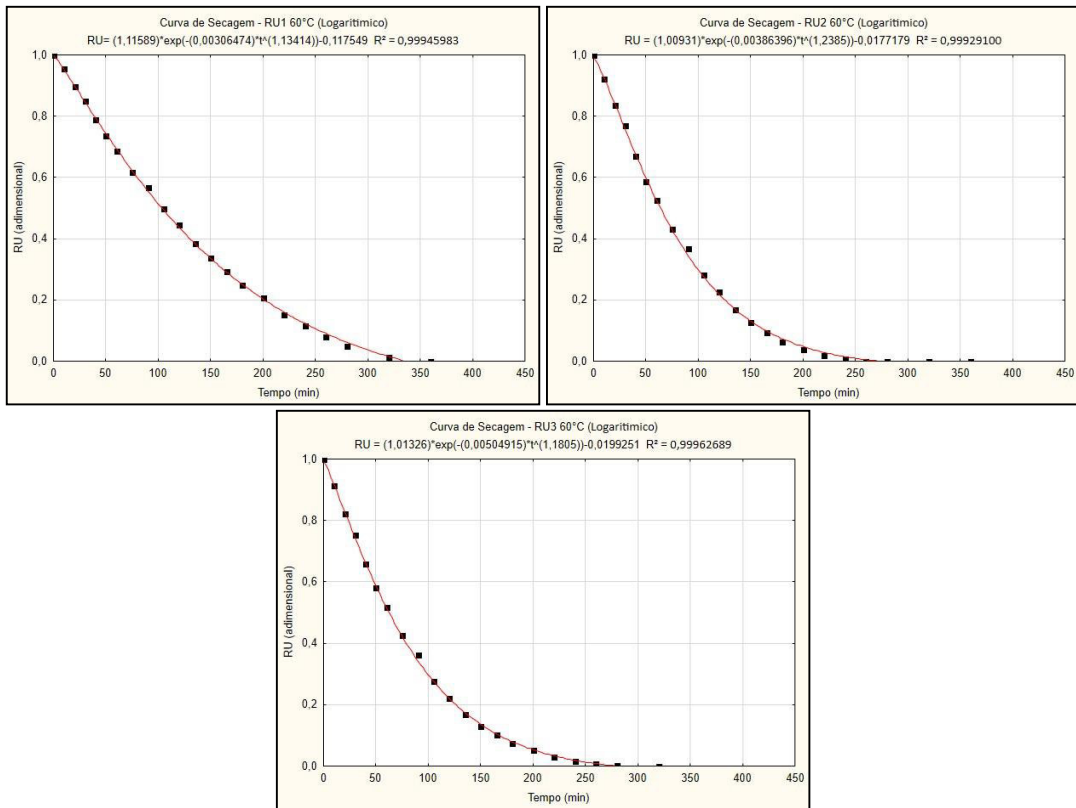


50°C





60°C



70°C

