



**NARIELE JADNA SANTOS VILELA**

**ESTUDO DA SECAGEM DA POLPA DO CUPUAÇU A  
DIFERENTES TEMPERATURAS**

São Luís  
2021

**NARIELE JADNA SANTOS VILELA**

**ESTUDO DA SECAGEM DA POLPA DO CUPUAÇU A  
DIFERENTES TEMPERATURAS**

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.

Orientador: Prof. Dr. Harvey Alexander Villa Vélez

São Luís  
2021

Ficha gerada por meio do SIGAA/Biblioteca com dados fornecidos pelo(a) autor(a).  
Diretoria Integrada de Bibliotecas/UFMA

Vilela, Nariete Jadna Santos.

ESTUDO DA SECAGEM DA POLPA DO CUPUAÇU A DIFERENTES  
TEMPERATURAS / Nariete Jadna Santos Vilela. - 2021.  
41 f.

Orientador(a): Harvey Alexander Villa Vélez.  
Monografia (Graduação) - Curso de Engenharia Química,  
Universidade Federal do Maranhão, São Luís-Maranhão, 2021.

1. Cinética de Secagem. 2. Modelagem. 3. Polpa de  
cupuaçu. I. Vélez, Harvey Alexander Villa. II. Título.

**BANCA EXAMINADORA:**

---

Prof. Dr. HARVEY ALEXANDER VILLA VÉLEZ  
Orientador – COEQ/CCET/UFMA

---

Prof. Dr. PAULO HENRIQUE DA SILVA LEITE  
COEQ/CCET/UFMA

---

Prof. Dr. ROMILDO MARTINS SAMPAIO  
COEQ/CCET/UFMA

**29 de abril de 2021**

**DADOS CURRICULARES****Nariele Jadna Santos Vilela**

<b>NASCIMENTO</b>	26/06/1992 – ANAJATUBA / MA
<b>FILIAÇÃO</b>	Ademilton Correia Vilela Luizabeth Santos Vilela
<b>2012/2021</b>	Curso de Graduação Engenharia Química - Universidade Federal do Maranhão

*Dedico este trabalho a minha mãe, que sempre acreditou em mim e que foi o pilar para a minha educação e hoje não se faz presente.*

## AGRADECIMENTOS

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

A minha família, em especial a minha mãe que tanto me incentivou nesta caminhada, até o dia do seu falecimento. Ao meu pai Ademilton, meu padrasto Sabino, minhas irmãs (Mozaniele, Adelciele e Joysielma) e ao meu marido Welligton Júnior, por toda força e por acreditarem em mim.

A minha filha Maria Luiza por ser minha inspiração e fonte de força para a conclusão deste trabalho.

Ao meu orientador, Prof. Harvey, pelo incentivo, orientação e amizade. Sempre disposto a me auxiliar na vida acadêmica e sendo um ser humano altruísta.

Ao professor Romildo por todo apoio neste trabalho.

Ao Professor Paulo, membro da banca, pela disponibilidade e todas as considerações.

As amigas e colegas de curso, Talita, Valkerline, Girléia, Renata, que estiveram presentes nos momentos alegres e tristes na minha caminhada acadêmica e pessoal.

À UNICONTROL BRASIL LTDA, empresa onde conclui meu estágio e adquiri conhecimentos fundamentais para o meu crescimento acadêmico e profissional.

VILELA, NARIELE JADNA SANTOS. **Estudo da secagem da polpa de cupuaçu a diferentes temperaturas.** 2021. Trabalho de Conclusão de Curso de Engenharia Química do Centro de Ciências Exatas e Tecnologia da Universidade Federal do Maranhão, São Luís, 2021.

## RESUMO

A secagem por desidratação tem a capacidade de preservar os alimentos, aumentando o valor comercial e a vida de prateleira dos mesmos, além de disponibilizar um produto fora da sua época de safra que diminui os custos e volumes no processo de acondicionar, armazenar e transportar. O cupuaçu, apesar de possuir um potencial nutricional e valor econômico acentuado, não é produzido o ano todo e é muito perecível. O presente trabalho tem como objetivo modelar as cinéticas de secagem da polpa de cupuaçu (*Theobroma grandiflorum*) às temperaturas de 30, 40 e 60 °C. Para o processo de secagem, a polpa de cupuaçu foi colocada em placas de alumínio posicionadas no centro de uma estufa de secagem de ar convectivo, mantida à temperatura constante, de forma que as amostras foram secas ao longo do tempo até atingir massa constante. Para o cálculo do coeficiente difusivo utilizou-se a solução da segunda lei de Fick para placa plana infinita no software interativo MATLAB versão R2013a. Os resultados das cinéticas foram expressos em função do conteúdo de umidade em função do tempo de secagem, sendo observado um comportamento de aumento da taxa de secagem com o aumento da temperatura, como descrito na literatura. Na modelagem dos dados experimentais foram usados dez modelos de camada fina empíricos, sendo que todos representaram de forma satisfatória o comportamento dos dados experimentais, apresentando  $R^2_{adj} > 0,934$  e  $MRE < 7,101\%$ . Pela avaliação dos parâmetros estatísticos calculados, os modelos de Midilli, Peleg, Logaritmico apresentaram os melhores ajustes aos dados experimentais. Através da relação entre o coeficiente difusivo e a temperatura (Arrhenius), foi encontrado um valor da energia de ativação de 12,286 kJ/mol, com um  $R^2 = 0,957$ . Os resultados obtidos são similares aos encontrados na literatura para polpas de frutas, mostrando que o estudo é de relevância para conservação de polpas de cupuaçu.

**Palavras-chave:** Polpa de cupuaçu. Cinética de secagem. Modelagem.

VILELA, N. J. S. **Study of cupuaçu pulp drying at different temperatures.** 2021. Graduate Work (Graduate in Chemical Engineering) – Curso de Engenharia do Centro de Ciências Exatas e Tecnologia da Universidade Federal do Maranhão, São Luís, 2021.

### ABSTRACT

Drying is a unit operation that preserve the organoleptic and nutritional properties in food, enhance their commercial value and shelf life. In addition, this process provides a product outside the harvest season and reduces costs with volume from packaging, storing and transporting. Cupuaçu, despite its nutritional potential and strong economic value, is not produced all year and is very perishable. Thus, this work aims to modeling the drying kinetics of the cupuaçu pulp (*Theobroma grandiflorum*) at the temperatures of 30, 40 and 60 °C. For this, cupuaçu pulp was placed on aluminum plates and followed, positioned in the center of a convective air-drying oven at constant temperature. In the sequency, the samples were dehydrated over time to reach constant weight. For the calculation of the diffusive coefficient, the solution of Fick second Law for infinite plate it was used in the interactive software Matlab version R2013a. The results of the drying kinetics were expressed as a function of the moisture content vs. drying time, being observe an increase of the drying rate as the temperature increasing, since this behavior similar as the described from the literature. In the modeling of the experimental data, ten empirical thin layer models were used, all of which satisfactorily statistical results ( $R^2_{adj}>0.934$  e  $MRE<7.101\%$ ), with goodness of the fitting of the experimental data. Between all models, Midilli, Peleg and Logaritmico presented the best results. Through the relation of the Arrhenius-type between the diffusive coefficient and the temperature, it was obtained a value of the activation energy of 12.286 kJ / mol, with an  $R^2=0.957$ . The results obtained are similar with those found in the literature for fruit pulps, showing that the study is relevant for the conservation of cupuaçu pulps.

**Keywords:** Cupuaçu pulp. Drying kinetics. Modeling.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Curva genérica de secagem em condições constantes .....	09
Figura 2 – Conteúdo de umidade ( $X_e$ , kg/kg, b.s.) vs. tempo de secagem (s) da polpa de cupuaçu nas temperaturas de 30 (●), 40 (▲) e 60 °C (■).....	15
Figura 3 - Taxa de secagem da polpa de cupuaçu nas temperaturas de 30 (●), 40 (▲) e 60 °C (■).....	16
Figura 4 - Curvas de secagem experimental da polpa de cupuaçu às temperaturas de 30 (●), 40 (▲) e 60 (■) °C e simuladas com o modelo de Midilli (---). Figura à direita mostra a relação entre os valores dos resíduos dos valores experimentais e calculados pelo modelo.....	20
Figura 5 - Curvas de secagem experimental da polpa de cupuaçu às temperaturas de 30 (●), 40 (▲) e 60 (■) °C e simuladas com o modelo de Logarítimo (---). Figura à direita mostra a relação entre os valores dos resíduos dos valores experimentais e calculados pelo modelo.....	20
Figura 6 - Curvas de secagem experimental da polpa de cupuaçu às temperaturas de 30 (●), 40 (▲) e 60 (■) °C e simuladas com o modelo de Peleg (---). Figura à direita mostra a relação entre os valores dos resíduos dos valores experimentais e calculados pelo modelo.....	20
Figura 7 – Linearização do coeficiente difusivo em função da temperatura através da Equação do tipo Arrhenius .....	21

**LISTA DE TABELAS**

- Tabela 1 – Médias das espessuras do material para as diferentes temperaturas de secagem . 15
- Tabela 2 – Resultados dos parâmetros estatísticos e de ajuste dos modelos de camada fina . 17
- Tabela 3 – Resultados do coeficiente difusivo para as diferentes temperaturas de secagem. 20

**LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS**

AOAC	Association of Official Agricultural Chemists
b.s	Base seca.

## LISTA DE SÍMBOLOS

$X$	Conteúdo de umidade no tempo $t$ (kg/kg, b.s).
$X_{eq}$	Umidade de equilíbrio (kg/kg, b.s).
$X_0$	Umidade inicial (kg/kg, b.s).
$t$	Tempo (s)
$k$	Constante de velocidade de secagem (s-1), para os modelos de Weibull, Lewis e Page.
$k_1$	Constante de velocidade de secagem (s-1), para os modelos Peleg, Henderson-Pabis, Aproximação por difusão, Midilli, Logarítmico, Wang and Sing e Dois Termos.
$k_2$	Constante de velocidade de secagem (s-1), para os modelos Peleg, Henderson-Pabis, Aproximação por difusão, Midilli, Logarítmico, Wang and Sing e Dois Termos.
$k_3$	Constante de velocidade de secagem (s-1), para os modelos de Aproximação por difusão, Midilli, Logarítmico e Dois Termos.
$k_4$	Constante de velocidade de secagem (s-1) do modelo Dois termos.
$D_{ef}$	Coefficiente de difusão efetivo ( $m^2 s^{-1}$ ).
$D_0$	Fator pré exponencial ( $m^2 s^{-1}$ ).
$E_A$	Energia de ativação para difusão ( $J mol^{-1}$ ).
$T$	Temperatura (K).
$R$	Constante dos gases ideais ( $J K^{-1} mol^{-1}$ ).
$R^2$	Coefficiente de correlação quadrático.
$n$	Número de pontos experimentais usados na análise de regressão.
$X_i^*$	Conteúdo de umidade experimentais (kg/kg, b.s.).
$X_i$	Conteúdo de umidade estimados (kg/kg, b.s.).

## SUMÁRIO

	FOLHA DE APROVAÇÃO.....	iii
	DADOS CURRICULARES.....	iv
	DEDICATÓRIA.....	v
	AGRADECIMENTOS.....	vi
	RESUMO.....	vii
	ABSTRACT.....	viii
	LISTA DE FIGURAS.....	ix
	LISTA DE TABELAS.....	x
	LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS.....	xi
	LISTA DE SÍMBOLOS.....	xii
	SUMÁRIO.....	xiii
<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO.....</b>	<b>01</b>
<b>2</b>	<b>OBJETIVOS.....</b>	<b>03</b>
2.1	Objetivos gerais.....	03
2.2	Objetivos específicos.....	03
<b>3</b>	<b>REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....</b>	<b>04</b>
3.1	Secagem de alimentos.....	04
3.1.1	Teoria Básica de secagem.....	05
3.2	Classificação dos métodos e Equipamentos de secagem.....	06
3.3	Cinética de secagem.....	07
3.4	Processo de secagem de camada fina.....	10
3.3.4	Modelos Matemáticos.....	10
<b>4</b>	<b>METODOLOGIA.....</b>	<b>12</b>
4.1	Matéria-prima.....	12
4.2	Determinação do conteúdo de umidade.....	12
4.3	Procedimento de secagem experimental.....	12
4.4	Modelagem matemática.....	13
4.5	Efeito da temperatura sobre o coeficiente difusivo.....	14
4.6	Análise estatística.....	14
<b>5</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÃO.....</b>	<b>15</b>
5.1	Cinéticas de secagem.....	15

5.2	Modelagem matemática das curvas de secagem.....	17
5.3	Efeito da temperatura sobre a difusão.....	20
<b>6</b>	<b>CONCLUSÃO.....</b>	<b>22</b>
	<b>REFERÊNCIAS.....</b>	<b>23</b>

## 1 INTRODUÇÃO

O mundo globalizado e o crescente aumento populacional traz um enorme desafio de como produzir alimentos para suprir a demanda de consumidores. Diante disso, buscam-se, além de formas de produção, meios para diminuir as perdas existentes na cadeia de produção.

O cupuaçu, nativo da Amazônia oriental, está disseminado por toda Bacia Amazônica e pelo Maranhão, ocorrendo também em outros estados (VENTURIERI, et al., 1993). O cupuaçu é um fruto que possui um potencial nutricional e valor econômico bastante acentuado. Porém, além de não ser produzido o ano todo, é muito perecível. A polpa do cupuaçu congelada é sua principal forma de comercialização, tendo crescido de forma significativa, porém existe certa limitação quando se trata da exportação para o mercado externo (GOLDIM, et al., 2001).

A polpa é considerada a parte mais importante do cupuaçu, sendo seu sabor doce-ácido amplamente aceitável no Brasil e internacionalmente. É consumido principalmente na forma de suco, cremes, sorvetes, entre outras. Outra forma de utilização da polpa, é a extração do aroma da mesma, sendo utilizada como insumo para a fabricação de produtos, como bebidas alcoólicas e não alcoólicas (SANTOS et al., 2010).

A secagem por desidratação de frutos vem sendo objeto de pesquisas por sua capacidade de preservação de alimentos utilizados pelos homens. A secagem também motiva o aprimoramento do alimento, colocando no mercado um novo produto que pode ser disponibilizado fora da sua época de safra e que diminui os custos e volumes no processo de acondicionar, armazenar e transportar (PARK, et al., 2002). A desidratação é um processo de preservação simples e dos mais antigos utilizados pelo homem.

O método de conservação impede a deterioração dos alimentos através da remoção da água existente nos mesmos, dificultando o desenvolvimento de microrganismos e reações bioquímicas, aumentando assim o seu valor comercial e a vida de prateleira dos mesmos (ALMEIDA et al., 2005).

O estudo de sistema de secagem, bem como sua otimização, utiliza-se modelos matemáticos que representam de forma satisfatória a perda da umidade do material durante o período da secagem, sendo os modelos de secagem baseados na teoria de difusão de líquidos mais usados na área de secagem de alimentos (AFONSO JÚNIOR; CORRÊA, 1999).

Portanto, estudos sobre a conservação desse fruto para melhorar sua comercialização e disponibilidade são importantes. Nesse sentido, o estudo da secagem por desidratação é um método bastante difundido e que, portanto, pode ser aplicado na preservação da polpa de

cupuaçu. Os estudos experimentais que envolvem modelagem matemática são relevantes, pois fornecem uma visão matemática e física para o entendimento do processo de secagem que envolve as trocas simultâneas de calor e massa entre o material e o ar (BARATI, 2011).

## **2 OBJETIVOS**

O desenvolvimento deste trabalho auxiliará no estudo da secagem do fruto do cupuaçu, cuja ocorrência no estado do Maranhão, potencial nutricional e valor econômico é acentuado.

O trabalho também contribuirá para o estudo sobre conservação de alimentos, permitindo, futuramente um maior consumo e utilização da polpa do cupuaçu, colocando no mercado produtos que podem ser disponibilizados fora da safra, além de diminuir os custos e volumes no processo de acondicionar, armazenar e transportar.

### **2.1 Objetivo geral**

Modelar o processo de secagem da polpa do cupuaçu a diferentes condições experimentais.

### **2.1 Objetivos específicos**

- ✓ Determinar experimentalmente as cinéticas de secagem às temperaturas de 30°C, 40°C e 60°C;
- ✓ Modelar a cinética de secagem nas temperaturas 30°C, 40°C e 60°C;
- ✓ Determinar o coeficiente difusivo de sorção da água no processo de secagem.

### 3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

O cupuaçu (*Theobroma grandiflorum*), da família *Sterculiaceae*, é nativo da Amazônia oriental. Árvores silvestres ocorrem no subsolo das florestas do leste do Pará e oeste do Maranhão, no Brasil. O cupuaçu é plantado e protegido por vários grupos indígenas e é cultivado em hortas domésticas no extremo oeste do Peru e da Colômbia por colonos não indígenas. Como em seu parente mais conhecido, o cacau (*T. cacao* L.), as sementes são ricas em gordura e envoltas por uma polpa suculenta, mas a gordura das sementes de cupuaçu tem um ponto de fusão inferior ao do cacau, portanto, o cupuaçu geralmente não é usado na fabricação de chocolate. No entanto, o sabor doce-ácido característico da polpa tem se mostrado amplamente aceitável no Brasil e internacionalmente e o cupuaçu está se expandindo rapidamente no mercado mundial de sabores de frutas exóticas para uso em sucos e sorvetes. Na década de 1980, a demanda ultrapassava a oferta e o cupuaçu era uma das frutas locais mais caras da Amazônia. (DARDENGO et al, 2021)

A produção comercial de cupuaçu exige que os frutos sejam processados para extrair o suco da polpa antes que a mesma fermente, e o suco extraído deve ser congelado ou pasteurizado. As fábricas de processamento dependem de uma carga de trabalho previsível e uniforme ao longo do ano para manter as máquinas e a força de trabalho operando em sua capacidade ideal. Assim, é importante prever a produtividade do cupuaçu o mais cedo possível a cada safra por este motivo e também para que os produtores possam alertar sobre possíveis problemas no cumprimento dos contratos (OTERO et al., 2020).

A polpa é considerada a parte mais importante do cupuaçu, sendo seu sabor doce-ácido amplamente aceitável no mercado de sabores de frutas exóticas. É consumido principalmente na forma de suco, cremes, sorvetes, entre outras. Outra forma de utilização da polpa, é a extração do aroma da mesma, sendo utilizada como insumo para a fabricação de produtos, como bebidas alcoólicas e não alcoólicas. (SANTOS et al., 2010).

#### 3.1 Secagem de Alimentos

Atualmente, em muitos processos industriais, a remoção de água ou resíduos de diferentes produtos acabados pode representar um sério problema técnico, econômico e ambiental. Para resolver isso, a operação unitária de “secagem” é empregada. Essa operação é o método mais antigo do mundo para conservar alimentos. Nos séculos passados, as pessoas

no Oriente guardavam as frutas embrulhando-as em folhas de palmeira secas e enterrando-as na areia quente para secar. Além disso, as pessoas no Ártico fizeram depósitos com o excedente de carne de morsa, “liofilizada”, empilhando pedras longe de sua casa para evitar que os predadores a devorem. Os nativos americanos nas partes do norte dos Estados Unidos empregaram a fumaça do fogo para secar carne, ervas, vegetais ou peixes por meio da recirculação de ar quente (CORREA et al., 2019).

Por muitos anos, os índios do Peru secaram batatas com um processo simples, mas eficaz. Em primeiro lugar, o material era congelado a noite toda ao ar livre e no dia seguinte as batatas eram descongeladas rapidamente, com isso o teor de umidade remanescente no material ficava livre. Em seguida, eles secavam as batatas ao sol até ficarem crocantes o suficiente para serem armazenadas. Quase em todo o mundo, as pessoas têm utilizado diferentes métodos de secagem de alimentos para conservar alimentos de uma estação para a outra, sejam grãos, carnes, frutas ou ervas, entre outros (CORREA et al., 2019).

### 3.1.1 TEORIA BÁSICA DE SECAGEM

O emprego eficiente de energia no processo de secagem, a redução de custos e o mínimo impacto ao meio ambiente são aspectos vantajosos para a indústria. Assim, recentemente, um número considerável de trabalhos foi desenvolvido em torno do tema da secagem sustentável nas áreas industrial e acadêmica. A secagem é intrinsecamente um campo multidisciplinar, que possui uma demanda muito ampla em áreas como agricultura, química, alimentação, têxtil, construção, curtume e outras aplicações (FURTADO et al., 2019). Para entender isso, é necessário um conhecimento ótimo dos três fenômenos do transporte e um conhecimento adequado da ciência dos materiais, pois a principal prioridade não é apenas conservar a energia, mas, além disso, alcançar uma melhor qualidade do produto por meio de um processo de secagem. Às vezes é necessário que os produtos atendam a alguns requisitos específicos após o processo de secagem, como tamanho do produto, movimento livre, resistência, distribuição granulométrica, solubilidade ou preservação do componente ativo (GIL et al., 2021).

O fenômeno de secagem pode ser definido como um processo simultâneo de transferência de calor, massa e momento, onde o resultado final é a eliminação da umidade dos produtos desejados por meio da evaporação (AFONSO JÚNIOR; CORRÊA, 1999). A secagem ocorre principalmente por meio de dois mecanismos: o movimento da umidade do interior de um material para o exterior e a evaporação da umidade da superfície quente de um

material para o ambiente. O transporte de água está intimamente relacionado a alguns fatores externos como, por exemplo, umidade, pressão de vapor, natureza e tipo de superfície exposta, temperatura e velocidade de fluxo. Devido à sua complexidade, as investigações sobre secagem ainda são uma área de interesse de inúmeros pesquisadores em todo o mundo (RIBEIRO et al., 2017).

Apesar do aumento do número de estudos e desenvolvimentos tecnológicos, o processo de secagem é hoje uma área importante a ser estudada, sendo o emprego de conhecimentos em termodinâmica e fenômenos de transporte, para a descrição da cinética de secagem, está entre os desafios modernos para a pesquisa nesta área (HALL, 2006).

### **3.2 Classificação dos Métodos e Equipamentos de Secagem**

Em geral, os métodos de secagem têm sido arranjados e diversificados de acordo com as necessidades específicas de cada produto. O processo de secagem ocorre de diferentes formas e emprega diversos tipos de equipamentos, dependendo dos requisitos estipulados pelo consumidor. O equipamento de secagem pode ser operado fundamentalmente de duas formas, que são comumente designadas como contínua e batelada, dependendo do tipo de operação. Embora o processo contínuo seja mais técnico e praticável, os secadores em batelada são mais comumente empregados, especialmente quando o controle de qualidade ou considerações de saúde são fatores importantes. Essa classe de processo é observada nas indústrias farmacêutica e alimentícia (RIBEIRO et al., 2017).

A secagem em batelada é um processo químico e geralmente preferido quando diferentes materiais são manuseados na mesma unidade de secagem, ou quando a secagem é extensa e difícil e em que o sistema em lote é colocado a jusante e a montante, por exemplo, madeira seca, tijolo, entre outros. A principal dificuldade de um sistema em batelada é que o desenvolvimento não atinge um estado estacionário e isso acarreta mudanças contínuas na função operativa. Em contraste, um sistema contínuo precisa de menos trabalho, espaço e energia. Isso garante uma uniformidade suplementar no produto seco a um custo inferior a um sistema de lotes de capacidade idêntica. A secagem tem muitas formas dependendo das especificações dos produtos e do uso de vários tipos de equipamentos (SALIMI; HOSEINNIA, 2020).

O calor aplicado durante a secagem pode ser estudado em quatro tipos diferentes de secadores: convectivo, radiativo, condutor e dielétrico. No processo em que o calor é aplicado por condutor, a transferência de calor ocorre se houver um gradiente de temperatura em um

sólido e o calor necessário for adquirido de uma fonte de calor como um aquecedor elétrico. A convecção é a transferência de energia térmica de algum gás ou ar para líquido, sólido ou gás. O calor adquirido no fluxo de gás é ocupado para evaporar a umidade de uma superfície. A fase de eliminação da umidade evaporada também faz uso da corrente gasosa como meio de transporte (MACEDO, 2016).

### 3.3 Cinética de Secagem

A remoção de umidade pode ser devido à transferência simultânea de calor e massa. Intencionalmente, é realizado para reduzir a água a um nível em que a deterioração microbiana e as reações de deterioração sejam bastante minimizadas. O produto seco obtido minimizará o custo de transporte, armazenamento, embalagem e tempo. Embora existam muitas maneiras de se conseguir a secagem, a escolha do método depende do material e do nível sanitário necessário. O uso de secagem de alimentos é muito comum para melhorar a estabilidade dos alimentos e minimizar as alterações químicas e físicas durante o armazenamento. Portanto, a secagem é a técnica mais amplamente utilizada para a preservação de alimentos (AGUIRRE; FILHO, 2002).

Além disso, existem vários tipos de técnicas de secagem que podem ser aplicadas para reduzir o teor de água e que atendem ao propósito de preservação dos alimentos, estes incluem secagem a ar, secagem a ar quente, secagem ao sol, secagem solar, secagem osmótica, secagem infravermelho, secagem em forno, secagem por pulverização, secagem em tambor, secagem por micro-ondas, liofilização, secagem a vácuo, secagem em tapete de espuma, secagem por impacto, secagem acústica, secagem por sopro por explosão e secadores híbridos (AOAC, 1997).

A modelagem cinética de parâmetros de processo é muito útil em processos alimentares. Os processos envolvidos são principalmente reações (bio) químicas e físicas. Essas mudanças ocorrem a certa taxa e com certa cinética. A modelagem cinética permite descrever essas mudanças e suas taxas quantitativamente, sendo uma ferramenta poderosa que pode ajudar a desvendar os mecanismos básicos de reação (ARAUJO, 1999).

Portanto, o estudo da cinética de secagem ajuda na identificação de métodos de secagem apropriados e no controle dos processos de secagem. Também é importante para a otimização da engenharia e do processo. Às vezes é caro conduzir um experimento em escala real para determinar as condições adequadas para a secagem. Assim, a cinética de secagem é utilizada para expressar o processo de remoção de umidade e sua relação com as variáveis do

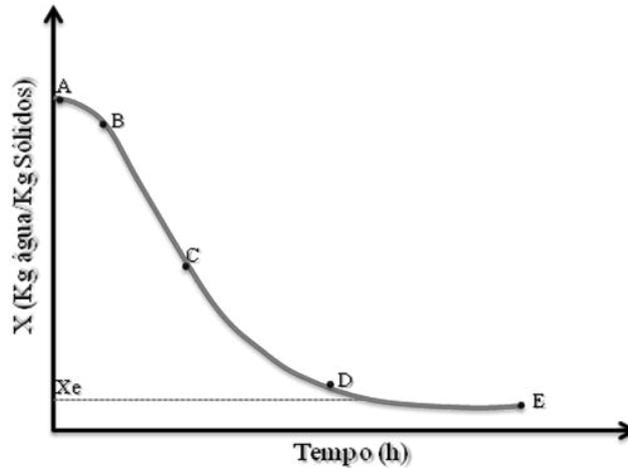
processo e, portanto, um bom entendimento da taxa de secagem é importante para desenvolver um modelo de secagem (AZEREDO, 2004).

Apesar da essência da cinética, a modelagem de partículas ou secagem em camada fina de materiais é necessária para entender o mecanismo de transporte fundamental e um pré-requisito para simular ou escalar com sucesso todo o processo para otimização ou controle das condições operacionais. Modelos simples com um significado físico razoável são eficazes para fins de engenharia. A modelagem matemática do processo de desidratação é uma parte inevitável do projeto, desenvolvimento e otimização de um secador (VIEIRA, 2014).

O estudo elaborativo da cinética de secagem, que descreve os mecanismos e a influência que certas variáveis do processo exercem na transferência de umidade. Em outras palavras, pode ser usado para estudar as variáveis de secagem, avaliar a cinética de secagem e otimizar os parâmetros e as condições de secagem. Um projeto de secador adequado requer conhecimento das características do material a ser seco e da cinética de secagem (CASTRO, 2003). Observa-se que temperaturas mais altas implicam em maior força motriz para transferência de calor. Também aceleram o processo de secagem, pois a temperatura proporciona um maior déficit de pressão de vapor d'água. Neste sentido, os principais mecanismos de secagem são a difusão superficial nas superfícies dos poros, a difusão de líquido ou vapor devido às diferenças de concentração de umidade e a ação capilar em alimentos granulares e porosos devido às forças superficiais (CORRÊA et al., 2010).

A Figura 1 mostra a curva genérica de secagem, apresentado os estágios de secagem no trecho AB é possível a ocorrência de uma taxa crescente ou decrescente; o trecho BC é definido como período de secagem de taxa constante; o ponto C é a umidade crítica e, a partir deste ponto, a umidade na superfície do sólido vai diminuindo e ocorre o primeiro período de taxa decrescente. (MARCINKOWSKI, 2006).

Figura 1: Curva genérica de secagem a condições constantes.



Fonte: (Marcinkowski, 2006)

Geralmente, os produtos higroscópicos secam a uma taxa constante e subsequentes períodos de taxa decrescente, a secagem para quando o equilíbrio é estabelecido (GAVA, 2000). O período de taxa constante de secagem, a forma física do produto e as condições externas como temperatura, velocidade do ar de secagem, direção do fluxo de ar e umidade relativa têm grande influência na superfície do produto que está sendo seco em difusão superficial. Quando a película superficial dos sólidos ou partículas parece estar seca e o teor de umidade foi reduzido ao seu teor de umidade crítico, então começa o primeiro período de queda da taxa. Ao contrário dos períodos de taxa constante, o período de taxa decrescente é controlado pela difusão do líquido como resultado das diferenças de concentração de umidade e das condições internas do produto. As condições internas como o teor de umidade, a temperatura e a estrutura do produto desempenham um papel importante nos períodos de queda da taxa (LIMA, 2017).

Este fenômeno é então substituído pelo segundo período de taxa decrescente de secagem, ou seja, difusão de vapor devido à diferença de concentração de umidade e também às condições internas dos produtos. Tem sido aceito que o fenômeno de secagem de produtos biológicos durante o período de taxa decrescente é controlado pelo mecanismo de difusão de líquido e/ou vapor. No entanto, apenas as teorias de difusão capilar e líquida são, geralmente, aplicáveis à secagem de materiais alimentícios. A difusão é o mecanismo físico dominante que rege o movimento da umidade no material, que depende do teor de umidade das amostras (AGUIRRE; FILHO, 2002).

A difusividade pode ser considerada como a facilidade da saída de água do produto, variando com base nas mudanças das condições do processo de secagem (temperatura e

velocidade do ar), e como não é do interior do material, ela pode ser chamada como difusividade efetiva. (MIRANDA, 2016). O coeficiente de difusão está diretamente correlacionado com a difusividade efetiva, envolvendo todos os fenômenos que possam dificultar o movimento da água, sendo que os valores encontrados são obtidos através de ajustes experimentais (OLIVEIRA, 2006).

A secagem também outras propriedades como a energia de ativação, que é a energia necessária para iniciar a difusão do líquido no interior do material, ou seja, a facilidade com que as moléculas migram no interior do produto, ultrapassando as barreiras de energia (SANTOS et al., 2014).

### **3.4 Processo de Secagem de Camada Fina**

Camada fina refere-se a uma camada de espessura de produto suficientemente pequena para que se possa considerar que as características do ar em toda a camada são idênticas, sem variação. O processo de secagem em camada fina também se refere à secagem de partículas individuais ou grãos de material que são totalmente expostos ao ar de secagem (AOAC, 1997). O processo é muitas vezes dividido em dois períodos de secagem, que são o período de taxa de secagem constante e o período de taxa de secagem decrescente. No período de secagem de taxa constante, o material contém tanta água, ocorrendo a evaporação da umidade livre contida na superfície, por outro lado, o período de taxa decrescente, a superfície do sólido encontra-se parcialmente saturada e os mecanismos convectivos e difusivos controlam a secagem neste período (RODRIGUES, 2019)

A radiação, condução ou convecção fornecem a energia necessária para a secagem. Na prática real, a secagem de produtos agrícolas ocorre no período de queda da taxa. O período da taxa de queda é limitado pelo teor de umidade de equilíbrio de uma curva de umidade de equilíbrio entre zero e quase 100% de umidade relativa. A secagem no período de taxa decrescente envolve dois processos, a saber; o movimento da umidade dentro do material para a superfície e a remoção da umidade da superfície (ARAÚJO, 1999).

### **3.5 Modelos Matemáticos**

Muitas vezes, as equações empíricas são vistas como um recurso que serve apenas para descrever a cinética de secagem em camada delgada de um produto agrícola. No entanto, vários métodos descrevem a secagem em leito profundo dividindo o domínio em muitas camadas finas. Assim, uma equação empírica, em conjunto com várias outras, é utilizada para

descrever o processo em cada camada. Nesse caso, expressões que envolvam a taxa de secagem em função do tempo e o tempo de secagem em função do teor de umidade são necessárias, e uma equação empírica pode ser usada com essa finalidade. Além disso, para descrever a penetração de calor em um corpo durante a retirada de água por ar quente, é necessária uma expressão envolvendo a taxa de secagem, e normalmente um modelo empírico é usado para determinar essa taxa (COSTA et al., 2011).

Os modelos de secagem em camada que descrevem a cinética de secagem de produtos higroscópicos podem ser classificados de três formas: modelos teóricos, semi-empíricos e empíricos. Os modelos teóricos consideram que variação da taxa de secagem ocorre de modo decrescente ao longo do processo, além de considerarem as operações externas do produto (como temperatura e umidade relativa) (MIDILLI et al., 2002). Já os modelos semi-empíricos e empíricos, levam em conta apenas a resistência externa do produto (como temperatura, a umidade relativa e o ar de secagem), satisfatórios para descrever os processos de secagem de produtos agrícolas. (MIDILLI et al., 2002; RESENDE et al., 2008).

A maior parte dos modelos utilizados são os semi-empíricos e geralmente são definidos por equações de camada fina. Quando diz respeito a expressar o processo difusivo, vários pesquisadores baseiam na segunda lei de Fick, aplicando a teoria da difusão líquida, estabelecendo relação entre o coeficiente de concentração do meio e o coeficiente difusivo, permitindo então, o cálculo do coeficiente de difusão efetiva, relacionado assim o mecanismo e as taxas de movimentação da água no interior dos alimentos (PIRES, 2013; RESENDE et al., 2008).

No estudo da secagem, vários modelos são usados para uma maior descrição da cinética do processo, sendo os modelos relacionados na teoria de difusão os preferidos dos pesquisadores, como por exemplo, o de Weibullo, Peleg, Henderson-Pabis, Logarítmico, Wang Sing, Lewis, Page, Midilli, Dois Termos e Aproximação por Difusão, entre outros. Tais modelos utilizam como variável de estudo a umidade adimensional, que é a quantidade de água livre removida em um intervalo de tempo pela quantidade total de água a ser removida em função do tempo. Isso ocorre porque nesses sistemas é comum que ocorra alteração nas umidades iniciais ao longo de todo o processo (MARCINKOWSKI, 2006).

Para o cálculo dos parâmetros dos modelos de secagem em camada fina são considerados variáveis que influenciam na taxa de secagem, tais como, a temperatura que geralmente está sempre presente nos modelos e o teor de umidade inicial, que normalmente está relacionada aos parâmetros de secagem (AFONSO JÚNIOR; CORRÊA, 1999).

## **4 METODOLOGIA**

### **4.1 Matéria-prima**

A polpa de cupuaçu (*Theobroma grandiflorum*) foi adquirida em feiras livres de São Luís, em lote único, transportada até o Laboratório de Engenharia de Processos e Biorrecursos- LEPEQ, na Universidade Federal do Maranhão e então congelada para posterior uso experimental.

### **4.2 Determinação do conteúdo de umidade**

O conteúdo de umidade da polpa de cupuaçu foi determinado em triplicata de acordo com os métodos de análises da AOAC 926.12 (AOAC, 2007). Para isto, amostras em triplicata foram colocadas em uma estufa na temperatura de 105 °C durante 24 h. Após, a massa das amostras foi mensurada em uma balança semi-analítica (modelo UX220H, Shimadzu, Japão), onde a umidade foi obtida pela diferença de peso entre a amostra inicial e final.

### **4.3 Procedimento de secagem experimental**

A polpa de cupuaçu foi desidratada utilizando secador convectivo (modelo PE14, Pardal, Brasil) nas temperaturas de 30, 40 e 60 °C e velocidade do ar de secagem de aproximadamente 2,0 m/s(velocidade de operação do equipamento). Utilizou esta faixa de temperaturas, pois a temperatura mais alta pode ocorrer reações de escurecimento não-enzimático, onde tem início na temperatura de 70 °C, ou até a caramelização da polpa do cupuaçu (CELESTINO 2010). Inicialmente, a amostra foi pesada e colocada em quatro placas cilíndricas de alumínio, com diâmetro de 9,2 cm e altura de 2,5 cm. Em seguida, foram realizadas as medições das espessuras, em quatro diferentes posições, denominadas B<sub>1</sub>, B<sub>2</sub>, B<sub>3</sub> e B<sub>4</sub>, com um paquímetro (modelo Vis, Polônia). Depois, as placas foram posicionadas no centro do secador, onde foram medidas as massas, utilizando uma balança semi-analítica (modelo UX220H, Shimadzu, Japão), em intervalos de tempo previamente definidos até atingir peso constante. Ao final da secagem, mediram-se novamente as espessuras do material. Durante os intervalos de secagem, também foi monitorada a umidade relativa, referente a cada intervalo de tempo, através de um higrômetro (modelo INS-28, Instrusul,

Brasil). O conteúdo inicial de água do material foi usado para expressar os resultados da cinética de secagem como uma função do conteúdo de água na base seca, “b.s.”

#### 4.4 Modelagem matemática

Neste estudo foram utilizados modelos de camada fina para ajustar as curvas da cinética de secagem da polpa de cupuaçu nos diferentes níveis de temperatura. Para isso, diferentes funções da biblioteca da *Statistic Toolbox do Matlab® 7.1* (The MathWorks Inc., Natick, MA, EUA) foram empregados para ajustar os dados experimentais. Os modelos de Weibull (Equação 1), Peleg (Equação 2), Henderson-Pabis (Equação 3), Logarítmica (Equação 4), Wang e Sing (Equação 5), Lewis (Equação 6), Page (Equação 7), Midilli (Equação 8), Dois Termos (Equação 9) e Aproximação por Difusão (Equação 10) (HENDERSON, 1974; MUJUMDAR, 1987; YAGCIOGLU, 1999; MIDILLI; KUCUK; YAPAR, 2002; CORZO et al., 2008; SARIMESELI, 2011; PERRÉ, 2015) foram ajustados aos dados experimentais por meio de uma regressão não-linear utilizando a função "*nlinfit*" e considerando a opção análise robusta.

$$X = X_e + (X_0 - X_e) \exp\left(-\frac{t}{k_1}\right) \quad (1)$$

$$X = X_0 - \left(\frac{t}{k_1 + k_2 t}\right) \quad (2)$$

$$X = X_e + (X_0 - X_e) k_2 \cdot \exp(-k_2 t) \quad (3)$$

$$X = X_e + (X_0 - X_e) k_1 \cdot \exp(-k_2 t) + k_3 \quad (4)$$

$$X = X_e + (X_0 - X_e) \cdot (k_1 t^2 + k_2 t + 1) \quad (5)$$

$$X = X_e + (X_0 - X_e) \exp(-k_1 t) \quad (6)$$

$$X = X_e + (X_0 - X_e) \exp(-k_1 t^{k_2}) \quad (7)$$

$$X = X_e + (X_0 - X_e) \exp(-k_1 t^{k_2}) + k_3 t \quad (8)$$

$$X = X_e + (X_0 - X_e) (k_1 \exp(-k_2 t) + k_3 \exp(-k_4 t)) \quad (9)$$

$$X = X_e + (X_0 - X_e) k_1 \exp(-k_2 t) + (1 - k_1) \exp(-k_2 (k_3 t)) \quad (10)$$

onde  $X$  é conteúdo de umidade (kg/kg, b.s.),  $X_e$  é o conteúdo de umidade de equilíbrio (kg/kg, b.s.),  $X_0$  é o conteúdo de umidade inicial (kg/kg, b.s.),  $t$  é o tempo (s), e  $k_1$ ,  $k_2$ ,  $k_3$  e  $k_4$  são as constantes de secagem (s; s<sup>-1</sup>; adimensional).

#### 4.5 Efeito da temperatura sobre o coeficiente difusivo

Para o cálculo do coeficiente difusivo utilizou-se a solução da segunda lei de Fick para placa plana infinita, desenvolvida por Crank (HOLMES et al., 1956), conforme apresentado na Equação (11). Para isso, aplicou-se o comando “*fminsearch*” no software interativo MATLAB versão R2013a, utilizando os dados experimentais de tempo (s) e  $X$  (kg/kg, b.s.) para cada temperatura. A energia de ativação foi obtida por meio da linearização da relação tipo Arrhenius (Equação 12), que descreve a dependência da  $D_{ef}$  com a temperatura.

$$X = X_e + (X_0 - X_e) \sum_{n=0}^{\infty} \frac{8}{\pi^2 (2n+1)^2} \exp \left\{ -D_{ef} \pi^2 (2n+1)^2 \frac{t}{4L^2} \right\} \quad (11)$$

$$D_{ef} = D_0 \exp \left\{ -\frac{E_a}{RT} \right\} \quad (12)$$

onde  $D_{ef}$  é o coeficiente de difusão efetivo,  $D_0$  é coeficiente de difusão máximo,  $E_a$  é a energia de ativação para difusão (J/mol),  $T$  é temperatura (K) e  $R$  constante dos gases ideais (J/mol).

#### 4.6 Análises Estatísticas

Para a avaliação da qualidade do ajuste dos modelos de secagem empregados, foram utilizados os coeficientes de determinação ajustados “ $R^2_{adj}$ ” (Equação 13) e o erro médio relativo “ $MRE, \%$ ” (Equação 14). Esses parâmetros permitem avaliar quão bem sucedido o modelo é, com base no número de parâmetros do mesmo, bem como, a proximidade entre os dados experimentais e os calculados (VILLA-VÉLEZ et al., 2012).

$$R^2_{adj} = 1 - \left( \frac{n-1}{n-n_p} \right) (1 - R^2) \quad (13)$$

$$MRE = \frac{100}{n} \sum_{i=1}^n \frac{|X_i - X_i^*|}{X_i^*} \quad (14)$$

Nas Equações 13 e 14,  $X_i^*$  representa os valores experimentais;  $X_i$  representa os valores estimados;  $n$  é o número de valores experimentais,  $m$  é o número de parâmetros estimados e  $R^2$  é o coeficiente de determinação (SABLANI; BAIK; MARCOTTE, 2002).

## 5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os resultados obtidos neste trabalho serão apresentados a seguir, em seções correspondentes a cinética de secagem, modelagem matemática e efeito da temperatura sobre a difusão.

### 5.1 Cinéticas de secagem

A Tabela 1 apresenta as médias das espessuras iniciais das amostras em quadruplicada utilizadas para cada cinética de secagem à temperatura de 30, 40 e 60 °C.

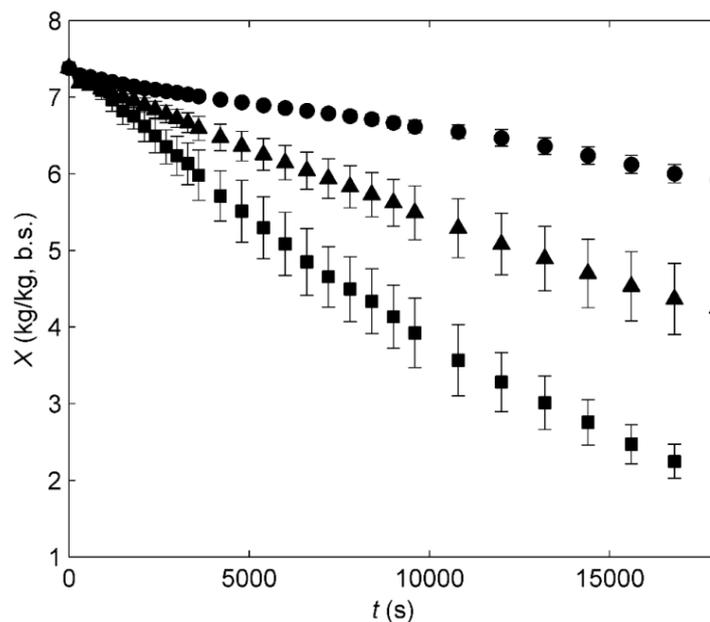
Tabela 1- Médias e desvio padrão das espessuras do material a diferentes temperaturas de secagem\*

Temperatura (°C)	30°C	40°C	60°C
B1	1,43±0,30	1,19±0,16	0,90±0,06
B2	1,47±0,31	1,28±0,24	0,84±0,03
B3	1,23±0,09	0,07±0,21	0,83±0,02
B4	1,48±0,13	0,25±0,00	0,95±0,03

\* B1, B2, B3 e B4 são as bandejas das amostras utilizadas para cada ensaio de cinéticas de secagem.

A Figura 2 mostra os resultados experimentais das cinéticas de secagem da polpa de cupuaçu nas temperaturas de 30, 40 e 60 °C. Os valores são mostrados graficamente com a média da triplicata e o desvio padrão.

Figura 2 - Conteúdo de umidade ( $X_e$ , kg/kg, b.s.) vs. tempo de secagem (s) da polpa de cupuaçu nas temperaturas de 30 (●), 40 (▲) e 60 °C (■).



Fonte: próprio Autor.

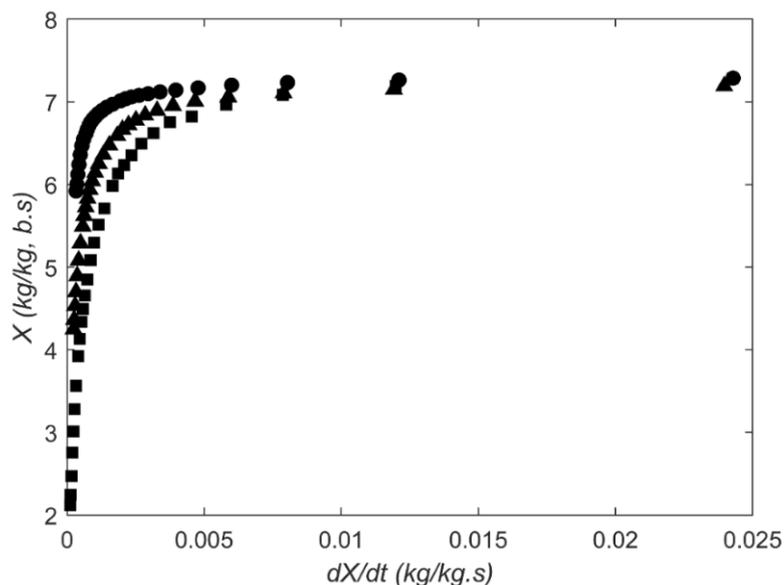
A realização dos experimentos ocorreu sob as seguintes condições: variação da temperatura de 1 a 3 °C, e teor de umidade relativa de 10 a 20%. Os ensaios foram conduzidos com conteúdo inicial de umidade de 7,382 kg/kg, b.s. e umidade de equilíbrio final de 5,920, 4,248 e 2,118 kg/kg b.s. para as temperaturas de 30, 40 e 60 °C, respectivamente. Portanto, o aumento na temperatura de secagem, provocou elevação da taxa de secagem levando a uma diminuição no teor final de umidade. Uma das razões está no fato que, a medida que aumenta a temperatura, as moléculas de água livre no material têm maior interação energética com o ar dessecante, fazendo com que a transferência de massa seja maior na maior temperatura (PERRÉ, 2015).

Além disso, observou-se que nas temperaturas menores (30 e 40 °C) a curva de secagem não apresentou curvatura e queda pronunciada. Isto pode ser devido ao alto conteúdo de fibras solúveis na polpa de cupuaçu, fazendo dela uma estrutura viscosa comparada a outras frutas (GONÇALVES et al., 2013). Esta estrutura fibrosa faz com que a água no interior não seja transferida de modo uniforme para o ar dessecante, o que, somado ao alto conteúdo de sólidos solúveis, influencie diretamente no processo.

O acréscimo no desvio padrão a medida que aumenta a temperatura, deve-se as condições experimentais, onde aconteceu trocas térmicas entre a temperatura de dentro do secador e do ambiente ao abrir o equipamento para as medições das massas.

A Figura 3 mostra a taxa de secagem da polpa de cupuaçu em função do conteúdo de umidade.

Figura 3 – Taxa de secagem da polpa de cupuaçu nas temperaturas de 30 (●), 40 (▲) e 60 °C (■).



Fonte: próprio Autor.

Na Figura 3, observa-se um período a taxa decrescente o que indica que o processo de transferência é governado pelo mecanismo de transporte difusivo. Neste período da secagem, a taxa de transporte de líquido do interior para o exterior é menor do que taxa da evaporação da água na superfície, sendo que, para materiais fibrosos, se dá pela difusão através do sólido (MARCINKOWSKI, 2006).

## 5.2 Modelagem matemática das curvas de secagem

Para a simulação das curvas experimentais foram utilizados diferentes modelos matemáticos para ajustar os dados de umidade em função do tempo, nas temperaturas de 30, 45 e 60 °C.

A Tabela 2 mostra os resultados dos parâmetros de ajuste dos modelos de camada fina e sua avaliação estatística na modelagem das cinéticas de secagem da polpa de cupuaçu nas temperaturas de 30, 40 e 60 °C.

Tabela 2 - Resultados dos parâmetros estatísticos e de ajuste dos modelos de camada fina.

<b>Modelos</b>	<b>Parâmetros</b>	<b>30°C</b>	<b>40°C</b>	<b>60°C</b>
Weibull	$k_1$	57873	21090	9216
	$R^2_{adj}$	0,989	0,995	0,984
	$MRE$	0,689	0,941	7,101
Peleg	$k_1$	10699	4347	2289
	$k_2$	0,123	0,075	0,057
	$R^2_{adj}$	0,988	0,999	0,999
	$MRE$	0,689	0,417	1,243
Henderson-Pabis	$k_1$	0,989	1,002	1,077
	$k_2$	$1,614 \times 10^{-5}$	$4,768 \times 10^{-5}$	$1,206 \times 10^{-4}$
	$R^2_{adj}$	0,989	0,995	0,976
Logaritmico	$MRE$	0,488	0,926	5,754
	$k_1$	14,259	1,871	1,714
	$k_2$	$9,948 \times 10^{-7}$	$2,114 \times 10^{-5}$	$5,177 \times 10^{-5}$
	$k_3$	-69,872	-4,654	-3,645
	$R^2_{adj}$	0,993	0,999	0,999
Wang e Sing	$MRE$	0,385	0,292	0,692
	$k_1$	$1,371 \times 10^{-10}$	$5,201 \times 10^{-10}$	$1,321 \times 10^{-9}$
	$k_2$	$-1,727 \times 10^{-5}$	$-4,260 \times 10^{-5}$	$-8,020 \times 10^{-5}$
	$R^2_{adj}$	0,988	0,999	0,999
Lewis	$MRE$	0,698	0,438	0,855
	$k_1$	$1,728 \times 10^{-5}$	$4,742 \times 10^{-5}$	$1,085 \times 10^{-4}$

	$R^2_{adj}$	0,989	0,995	0,984
	$MRE$	0,689	0,941	7,101
Page	$k_1$	$3,4439 \times 10^{-5}$	$2,606 \times 10^{-5}$	$3,5383 \times 10^{-6}$
	$k_2$	0,926	1,064	1,382
	$R^2_{adj}$	0,985	0,997	0,994
	$MRE$	0,631	0,645	2,638
Midilli	$k_1$	$1,651 \times 10^{-2}$	$1,395 \times 10^{-4}$	$1,640 \times 10^{-5}$
	$k_2$	$2,341 \times 10^{-8}$	$7,861 \times 10^{-1}$	1,179
	$k_3$	$-7,342 \times 10^{-5}$	$-1,004 \times 10^{-4}$	$-5,532 \times 10^{-5}$
	$R^2_{adj}$	0,995	0,999	1,000
	$MRE$	0,333	0,371	0,446
Dois Termos	$k_1$	0,012	-0,003	-0,092
	$k_2$	0,994	0,994	0,994
	$k_3$	0,988	1,003	1,092
	$k_4$	$1,602 \times 10^{-5}$	$4,772 \times 10^{-5}$	$1,230 \times 10^{-4}$
	$R^2_{adj}$	0,989	0,995	0,977
	$MRE$	0,444	0,918	5,468
Aproximação por difusão	$k_1$	0,989	1,002	1,055
	$k_2$	$1,610 \times 10^{-5}$	$4,769 \times 10^{-5}$	$9,891 \times 10^{-5}$
	$k_3$	3507	1668	-1,690
	$R^2_{adj}$	0,989	0,995	0,997
	$MRE$	0,478	0,924	1,667

Fonte: próprio Autor.

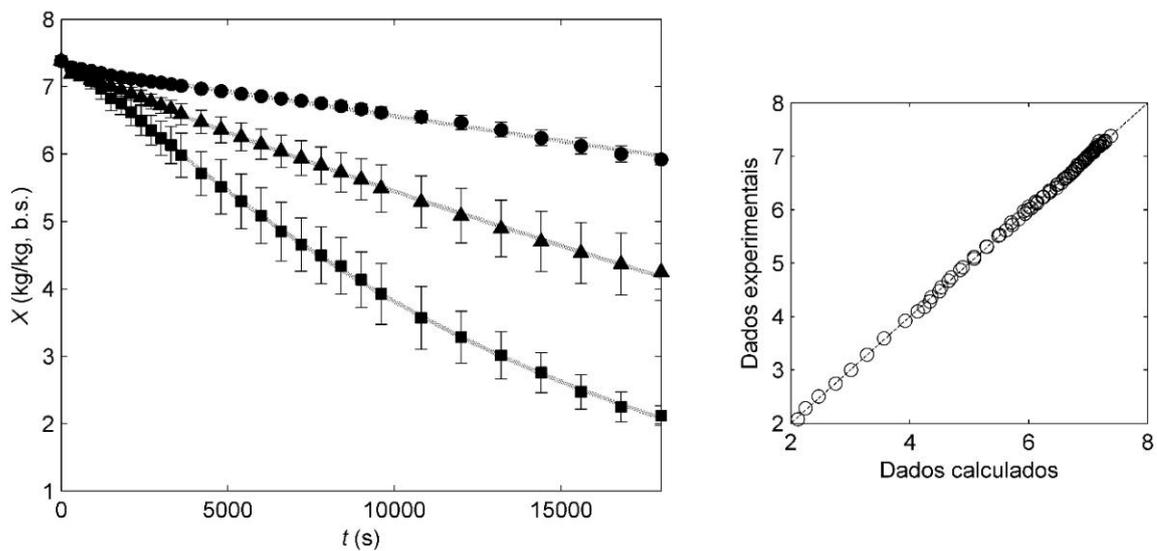
Na Tabela 2 pode ser observado que todos os modelos apresentaram um bom ajuste aos dados experimentais com  $R^2_{adj} > 0,934$  e  $MRE < 7,101\%$ . No entanto, os modelos que melhor apresentaram um ajuste, do ponto de vista estatístico, foi o de Midilli ( $R^2_{adj} = 0,995\%$  e  $MRE = 0,446$ ), o modelo Logaritmico ( $R^2_{adj} = 0,993$  e  $MRE = 0,692\%$ .) e o Peleg ( $R^2_{adj} = 0,988$  e  $MRE = 1,2243\%$ ). Estes modelos têm sido empregados satisfatoriamente na simulação de produtos como kiwi (BIALIK et al., 2017), nozes pistache (KASHANINEJAD et al., 2007), sementes de amaranto (ABALONE et al., 2006) e couve-flor (GUPTA; SEHGAL; ARORA, 2013), sendo que o valor das suas constantes está dentro da faixa de valores comumente encontrada em produtos agrícolas.

Por outro lado, as constantes cinéticas dos resultados não mostraram uma tendência linear em relação à temperatura, dificultando o uso desses modelos para encontrar uma relação do tipo Arrhenius ou até mesmo integrar suas constantes para relacioná-las a um coeficiente difusivo (SUHERMAN; PEGLOW; TSOTSAS, 2007; CORZO et al., 2008).

Mesmo assim, pode-se aplicar um modelo teórico difusivo a fim de encontrar essa correlação e determinar a taxa difusiva de água no processo de secagem da polpa de cupuaçu.

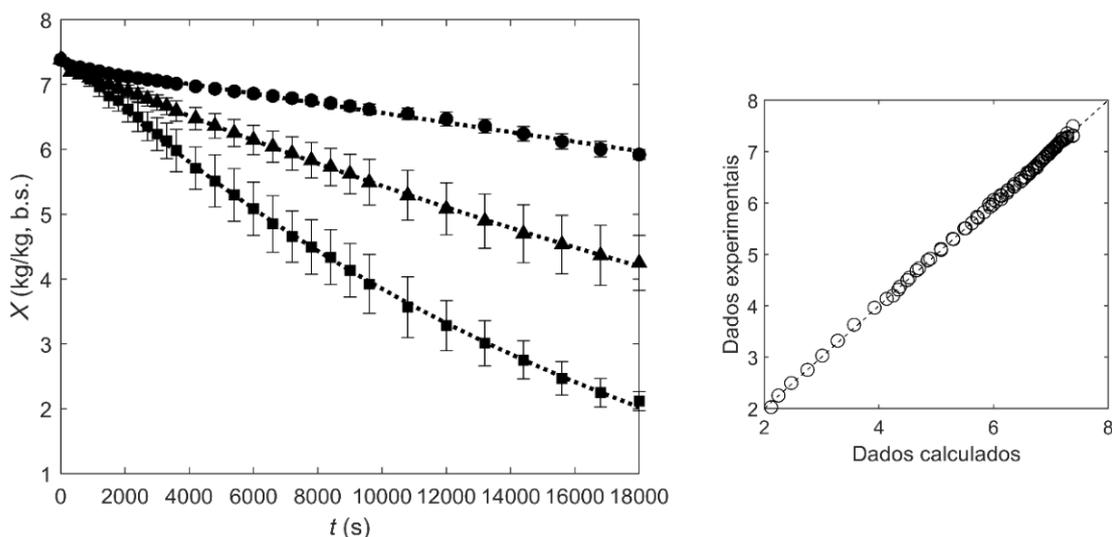
As Figuras 4, 5 e 6 mostram os resultados da modelagem das cinéticas de secagem da polpa de cupuaçu dos modelos que melhor apresentou ajuste para a temperatura de 30, 40 e 60°C.

Figura 4 – Curvas de secagem experimental da polpa de cupuaçu às temperaturas de 30 (●), 40 (▲) e 60 (■) °C e simuladas com o modelo de Midilli (---). Figura à direita mostra a relação entre os valores dos resíduos dos valores experimentais e calculados pelo modelo.



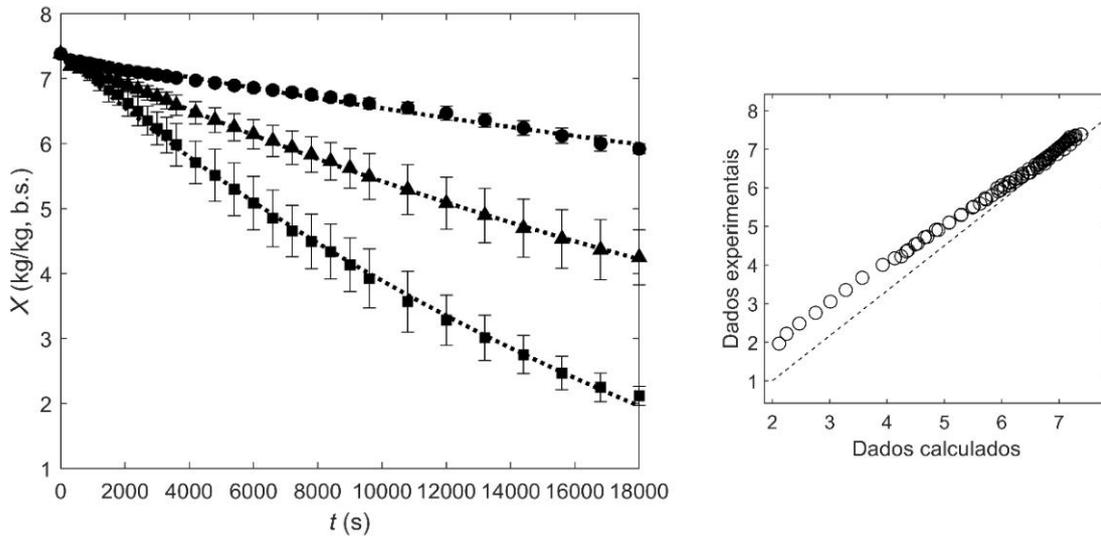
Fonte: próprio Autor.

Figura 5 – Curvas de secagem experimental da polpa de cupuaçu às temperaturas de 30 (●), 40 (▲) e 60 (■) °C e simuladas com o modelo de Logaritmico (---). Figura à direita mostra a relação entre os valores dos resíduos dos valores experimentais e calculados pelo modelo.



Fonte: próprio Autor.

Figura 6 – Curvas de secagem experimental da polpa de cupuaçu às temperaturas de 30 (●), 40 (▲) e 60 (■) °C e simuladas com o modelo de Peleg (---). Figura à direita mostra a relação entre os valores dos resíduos dos valores experimentais e calculados pelo modelo.



Fonte: próprio Autor.

### 5.3 Efeito da temperatura sobre a difusão

A determinação do coeficiente de difusão e da energia de ativação foi realizada conforme previamente descrito. Os resultados obtidos são mostrados na Tabela 3, sendo que esses valores foram usados para o cálculo da energia de ativação do sistema, como mostra a Figura 4, através da linearização da Equação 12, representada na Equação 15.

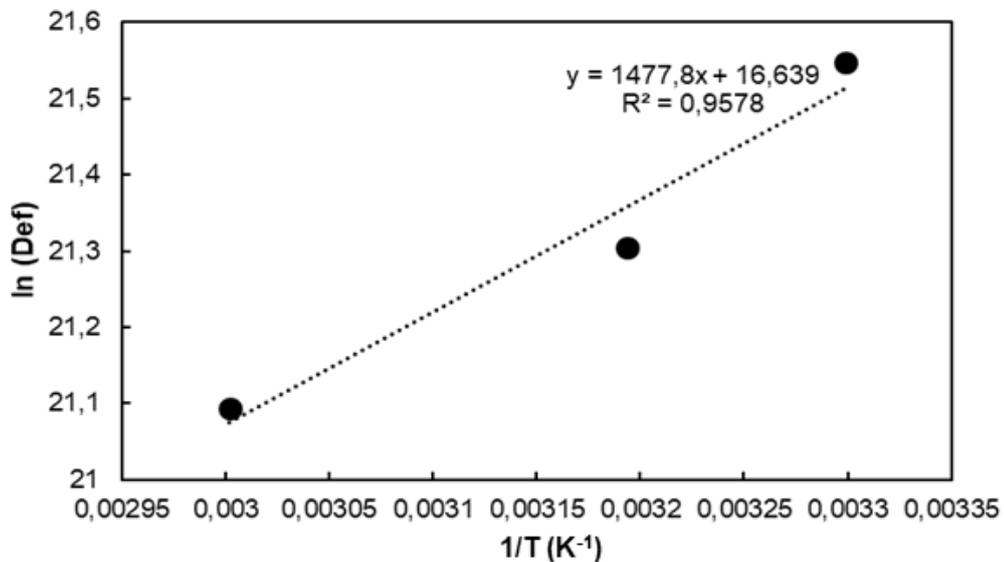
**Tabela 3** – Resultados do coeficiente difusivo para as diferentes temperaturas de secagem.

Temperatura (°C)	$D_{ef}(m^2s^{-1})$	$R^2_{adj}$
30	$4,384 \times 10^{-10}$	0,931
40	$5,591 \times 10^{-10}$	0,949
60	$6,906 \times 10^{-10}$	0,962

Fonte: próprio Autor.

Com os resultados da Tabela 2 observou-se um aumento do coeficiente difusivo efetivo com a temperatura, comportamento esperado para produtos deste tipo (DEVAHASTIN; NIAMNUY, 2010). De acordo com Bialik et al. (2017), a elevação da temperatura faz com que a pressão do vapor de água no material diminua, facilitando a difusão das moléculas na estrutura do material e, portanto, facilitando o transporte de massa pelo mecanismo difusivo.

Figura 7 – Linearização do coeficiente difusivo em função da temperatura através da equação do tipo Arrhenius.



Fonte: próprio Autor.

$$\ln(D_{ef}) = 16,639 - \frac{1477,8}{RT} \quad (15)$$

Segundo Kashaninejad (2007), a energia de ativação do processo difusivo é a energia mínima necessária para iniciá-lo. Os resultados mostraram um valor de energia de ativação ( $E_a$ ) de 12,286 kJ/mol para o processo de secagem da polpa de cupuaçu. Este resultado encontra-se em consonância com a literatura. De acordo com Zogzas et al. (1996), a energia de ativação para secagem de produtos agrícolas pode variar de 12,0 a 110 kJ/mol.

## 6 CONCLUSÃO

Foram determinadas experimentalmente as cinéticas de secagem da polpa de cupuaçu a três diferentes temperaturas. No processo foi observada uma tendência de aumento da taxa de secagem na maior temperatura, 60 °C, ‘quando comparada com 40 e 30 °C.

Os modelos matemáticos utilizados se mostraram adequados para descrever o processo de secagem da polpa de cupuaçu, no entanto, os modelos que melhor apresentaram um ajuste, do ponto de vista estatístico, foi o de Midilli ( $R^2_{adj} = 0,995\%$  e  $MRE = 0,446$ ), o modelo Logarítmico ( $R^2_{adj} = 0,993$  e  $MRE = 0,692\%$ .) e o Peleg  $R^2_{adj} = 0,988$  e  $MRE = 1,2243\%$ ). Estes modelos têm sido empregados satisfatoriamente na simulação de produtos como kiwi, apresentando coeficiente de correlação ajustável ( $R^2_{adj}$ ) mais próximo de 1 e erro médio relativo menor que 2% de acordo com a literatura.

Finalmente, foi observada uma tendência linear do coeficiente difusivo com a temperatura do tipo descrito pela equação de Arrhenius, sendo que a energia de ativação necessária para iniciar o processo de secagem é concomitante com os valores registrados pela literatura para polpas de frutas. Assim, os resultados obtidos mostram que o estudo é de relevância para a conservação de polpas de cupuaçu.

## REFERÊNCIAS

ABALONE, R.; GASTÓN, A.; CASSINERA, A.; LARA, M. A. Thin Layer Drying of Amaranth Seeds. **Biosystems Engineering**, v. 93, n. 2, p. 179-188, 2006.

AFONSO JÚNIOR, P. C.; CORRÊA, P. C. **Comparação de Modelos Matemáticos Para Descrição da Cinética de Secagem em Camada Fina de Sementes de Feijão**. Revista Brasileira Engenharia Agrícola Ambiental. Campina Grande, v.3, n.3, p.349-353, 1999.

AGUIRRE, J. M.; FILHO, J. G. **Desidratação de frutas e hortaliças: manual técnico**. Campinas, SP: Instituto de Tecnologia de Alimentos, 2002. 80 p.

ALMEIDA, F de A. C; RIBEIRO, C de F. A; TOBINAGA, S; GOMES, J. P. **Otimização do processo e secagem osmótica na obtenção de produtos secos da manga**. Campina Grande, 2005.

AOAC. **Official methods of analysis** Gaithersburg: AOAC International 2007.

AOAC. **Official methods of analysis**. 16. ed. Arlington, 1997.

ARAUJO, J. M. A. **Química de alimentos: teoria e pratica**. 2. ed. Viçosa, MG: Ed. UFV, 1999. 205 p.

AZEREDO, H. M. C. **Fundamentos de estabilidade de alimentos**. Fortaleza, CE: Embrapa Agroindústria Tropical, 2004. 195 p.

BARATI, E; ESFAHANI, J.A. **A New Solution Approach For Simultaneous Heat And Mass Transfer During Convective Drying Of Mango**. Journal Of Food Engineering 102, p. 302–309. 2011.

BIALIK, M.; GONDEK, E.; WIKTOR, A.; LATOCHA, P.; WITROWA-RAJACHERT. Mathematical modeling of *Actinidia rguta* (kiwiberry) drying kinetics. **Agricultural Engineering**, v. 21, n. 4, p. 5-13, 2017.

CASTRO, A. G. A. **A Química e a reologia no processamento de alimentos**. Lisboa: Ciência e Técnica, 2003. 295 p.

CELESTINO, S. M. C. Princípios da secagem de alimentos. Planaltina, DF: Embrapa Cerrados, 2010.

CORREA, Paulo Cesar et al. Dehydration of infrared ginger slices: heat and mass transfer coefficient and modeling. **Ciênc. agrotec.**, Lavras, v. 43, e025318, 2019.

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, 2010.

COSTA, L. M. et al. Coeficiente de difusão efetivo e modelagem matemática da secagem de sementes de crambe. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 15, n. 10, p. 1089-1096, 2011.

CORZO, O.; BRACHO, N.; PEREIRA, A.; VÁSQUEZ, A. Weibull distribution for modeling air drying of coroba slices. **LWT - Food Science and Technology**, v. 41, n. 10, p. 2023-2028, 2008.

DARDENGO, Juliana de Freitas Encinas et al. **Structure and genetic diversity of Theobroma speciosum (Malvaceae) and implications for Brazilian Amazon conservation.** Rodriguésia, Rio de Janeiro, v. 72, e02022018, 2021.

DEVAHASTIN, S.; NIAMNUY, C. Invited review: Modelling quality changes of fruits and vegetables during drying: a review. **International Journal of Food Science & Technology**, v. 45, n. 9, p. 1755-1767, 2010.

GOLDIM, T. M. S; THOMAZINI, M. J; CALVACANTE, M. J. B; SOUZA, J. M. L. **Aspectos da Produção de cupuaçu.** EMBRAPA, 2001.

FURTADO, Thais Destefani Ribeiro et al. Drying kinetics of jaboticaba pulp by regression models. **Rev. Bras. Frutic.**, Jaboticabal, v. 41, n. 1, e-097, 2019.

GAVA, A. J. **Princípios de tecnologia de alimentos.** São Paulo: Nobel, 2000. 200 p.

GIL, Bruna Valéria et al. Proximate composition and kinetics drying of sweet pine nuts compared to typical nuts of Araucaria angustifolia. **Cienc. Rural**, Santa Maria, v. 51, n. 4, e20200399, 2021.

GONÇALVES, M. V. V. A.; SILVA, J. P. L.; MATHIAS, S. P.; ROSENTHAL, A.; CALADO, V. M. A. Caracterização físico-química e reológica da polpa de cupuaçu

congelada (*Theobroma grandiflorum* Schum). **Ciências Exatas e Engenharia**, v. 3, n. 7, p. 46-53, 2013.

GUPTA, M. K.; SEHGAL, V. K.; ARORA, S. Optimization of drying process parameters for cauliflower drying. **Journal of food science and technology**, v. 50, n. 1, p. 62-69, 2013.

HALL, C. W. **Handbook of industrial drying**. Montreal: Taylor & Francis Group, 2006. 110 p.

HENDERSON, S. M. Progress in Developing the Thin Layer Drying Equation. **Transactions of the ASAE**, v. 17, n. 6, p. 1167, 1974.

HOLMES, F. H.; BRUNNSCHWEILER, D.; HOWITT, F. O.; CHAMBERLAIN, N. H.; BANDEY, E.; CLIBBENS, D. Reviews. **Journal of the Textile Institute Proceedings**, v. 47, n. 12, p. P1040-P1045, 1956.

KASHANINEJAD, M.; MORTAZAVI, A.; SAFEKORDI, A.; TABIL, L. G. Thin-layer drying characteristics and modeling of pistachio nuts. **Journal of Food Engineering**, v. 78, n. 1, p. 98-108, 2007.

LIMA, W. M. P. B. **Transferência de calor e massa em sólidos porosos com geometria complexa via análise concentrada: modelagem e simulação**. 2017.107 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica)- Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, 2017.

MACEDO, R.F. **Secagem de argila bentonita em secador rotativo industrial: modelagem, simulação e experimentação**. Dissertação de mestrado. Universidade federal de Campina Grande. Paraíba, 2016.

MARCINKOWSKI, E. de A. **Estudo da Cinética de Secagem, Curvas de Sorção e Predição de Propriedades Termodinâmicas da Proteína Texturizada de Soja**. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal do rio Grande do Sul. Porto Alegre, 2006.

MIDILLI, A.; KUCUK, H.; YAPAR, Z. A new model for single-layer drying. **Drying Technology**, v. 20, n. 7, p. 1503-1513, 2002.

MIRANDA, F.M.N. **Propriedades termodinâmicas e cinética de secagem de folhas de *Bauhinia forficata* Link**.2016.35 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Agrícola)- Universidade Federal da Grande Dourados-UFGD, Dourados, 2016.

MUJUMDAR, A. S. **Handbook of industrial drying**. ed. New York: Marcel Dekker, 1987. p.

OLIVEIRA, R. A.; OLIVEIRA, W. P.; PARK, K.J. Determinação da difusividade efetiva de raiz de chicória. *Engenharia Agrícola*, v.26, n.1, p.181-189, 2006)

OTERO, Deborah et al. Bioactive compounds in fruits from different regions of Brazil. **Rev. chil. nutr.**, Santiago, v. 47, n. 1, p. 31-40, feb. 2020.

PARK, K. L; VOHNIKOVA, Z. BROD, F. P. R. **Evaluation of drying parameters and desorption isotherms of garden mint leaves (*Metha crispa L.*)**. Oxford, 2002.

PERRÉ, P. The Proper Use of Mass Diffusion Equations in Drying Modeling: Introducing the Drying Intensity Number. **Drying Technology**, v. 33, n. 15-16, p. 1949-1962, 2015.

PIRES, J. F. M. **Modelação semi-empírica da secagem de bacalhau salgado verde**. 2013. 187 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica)- Universidade de Aveiro, Portugal, 2013.

RESENDE, O.; CORRÊA, P. C.; GONELI, A. L. D.; BOTELHO, F. M.; RODRIGUES, S. **Modelagem matemática do processo de secagem de duas variedades de feijão (*Phaseolus vulgaris L.*)**. *Revista Brasileira de Produtos Agroindustriais*, v. 10, n. 1 p. 17-28, 2008.

RODRIGUES, L.M. **Secadores rotatórios**. 2019. 54 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Química)- Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2019.

RIBEIRO, Maria Isabel et al. Qualidade nutricional e tecnológica dos alimentos na ótica do consumidor. **Rev. de Ciências Agrárias**, Lisboa, v. 40, n. spe, p. 341-350, dez. 2017.

SABLANI, S. S.; BAIK, O.-D.; MARCOTTE, M. Neural networks for predicting thermal conductivity of bakery products. **Journal of Food Engineering**, v. 52, n. 3, p. 299-304, 2002.

SALIMI, Azadeh; HOSEINNIA, Fatemeh. Optimization of coconut osmotic drying preceded by microwave treatment by Response Surface Methodology. **Braz. J. Food Technol.**, Campinas, v. 23, e2018249, 2020.

SANTOS, D. C.; QUEIROZ, A. J. M.; FIGUERÊDO, R. M. F.; OLIVEIRA, E. N. A. Difusividade efetiva e energia de ativação em farinhas de grão residuais de urucum. **Comunicata Scientiae**, v. 5, n.1, p.75-82,2014.

SANTOS, G. M.; MAIA, G.; SOUSA, P. H. M.; FIGUEIREDO, R. W.; COSTA, J. M. C.; FONSECA, A. V. V. **Atividade antioxidante e correlações com componentes bioativos de produtos comerciais de cupuaçu**. *Ciência Rural*, Santa Maria, 2010.

SARIMESELI, A. Microwave drying characteristics of coriander (*Coriandrum sativum* L.) leaves. **Energy Conversion and Management**, v. 52, n. 2, p. 1449-1453, 2011.

SUHERMAN; PEGLOW, M.; TSOTSAS, E. On the Applicability of Normalization for Drying Kinetics. **Drying Technology**, v. 26, n. 1, p. 90-96, 2007.

TIMM, Thaynã Gonçalves et al. Processo de secagem de Lentinula edodes: Influência da temperatura no teor de  $\beta$ -glucanas e ajuste de modelos matemáticos. **Ciênc. agrotec.**, Lavras, v. 43, e025719, 2019.

VIEIRA, A. S. **Secagem de resíduos de goiaba em secador convectivo de bandejas: modelagem matemática e análise do processo**. 2014. 173 f. Tese (Doutorado em Engenharia Química)Faculdade de Engenharia Química, Universidade Federam do Rio Grande do NorteNatal, 2014.

VILLA-VÉLEZ, H. A.; VÁQUIRO, H. A.; BON, J.; TELIS-ROMERO, J. Modelling Thermodynamic Properties of Banana Waste by Analytical Derivation of Desorption Isotherms. **International Journal of Food Engineering**, v. 8, n. 1, p. 1-21, 2012.

YAGCIOGLU, A. Drying characteristic of laurel leaves under different conditions. **Proceedings of the 7<sup>th</sup> International congress on agricultural mechanization and energy**, 1999, p. 565-569, 1999.

ZOGZAS, N. P.; MAROULIS, Z. B.; MARINOS-KOURIS, D. Moisture Diffusivity Data Compilation in Foodstuffs. **Drying Technology**, v. 14, n. 10, p. 2225-2253, 1996.