



**KELLE JESSICA SILVA DE SOUSA**

**ESTUDO DA SECAGEM E MODELAGEM MATEMÁTICA DE  
SISTEMA ESPUMANTE COM ADIÇÃO DE EXTRATO DE  
JUÇARA (*Euterpe edulis*)**

São Luís  
2022

**KELLE JESSICA SILVA DE SOUSA**

**ESTUDO DA SECAGEM E MODELAGEM MATEMÁTICA DE  
SISTEMA ESPUMANTE COM ADIÇÃO DE EXTRATO DE  
JUÇARA (*Euterpe edulis*)**

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. Romildo Martins Sampaio

São Luís  
2022

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

Sousa, Kelle Jessica Silva de.  
ESTUDO DA SECAGEM E MODELAGEM MATEMÁTICA DE SISTEMA  
ESPUMANTE COM ADIÇÃO DE EXTRATO DE JUÇARA *Euterpe edulis* /  
Kelle Jessica Silva de Sousa. - 2022.  
45 f.

Orientador(a): Romildo Martins Sampaio.  
Curso de Engenharia Química, Universidade Federal do  
Maranhão, São Luis-MA, 2022.

1. Cinética de secagem. 2. *Euterpe edulis*. 3.  
Sistemas espumantes. I. Sampaio, Romildo Martins. II.  
Título.

**BANCA EXAMINADORA:**

Prof. Dr. ROMILDO MARTINS SAMPAIO  
Orientador – DEEQ/CCET/UFMA

Prof. Dr. HARVEY ALEXANDER VILA-VELLE  
Membro – DEEQ/CCET/UFMA

Profa. Dra. DIANA MARIA CANO HIGUITA  
Membro – DEEQ/CCET/UFMA

**02 de agosto de 2022**

**DADOS CURRICULARES****KELLE JESSISA SILVA DE SOUSA**

**NASCIMENTO** 01/10/1992 – SÃO LUIS / MA

**FILIAÇÃO** Selene Maria Pereira da Silva  
Pedro da Alcanta de Souza

**2015/2022** Curso de Graduação  
Engenharia Química - Universidade Federal do Maranhão

*Dedico a minha família, aos meus amigos  
e a todos que contribuíram de alguma forma,  
para minha formação intelectual, pessoal  
e profissional*

## **AGRADECIMENTOS**

Em primeiro lugar a Deus, pela vida, saúde e fé, que me foi sustento em quaisquer situações, me fazendo acreditar que a realização de mais esta etapa seria possível.

Agradeço à toda minha família, em especial a minha mãe, Selene Maria, pelo amor incondicional, por não medir esforços para que pudesse me dedicar aos estudos.

Ao meu orientador, Prof. Dr. Romildo Martins, por todo ensinamento, paciência, confiança e apoio depositado a mim.

Ao professor Harvey Alexander por todo o apoio e incentivo durante a realização desse trabalho e em toda a graduação.

À todos os professores, servidores e colegas que cruzaram meu caminho, durante toda a minha jornada, e me ensinaram lições que eu levarei para à vida.

À UFMA, pela oportunidade e por ter sido a minha segunda casa durante esses anos.

*“Talvez não tenha conseguido fazer o melhor, mas lutei para que o melhor fosse feito. Não sou o que deveria ser, mas Graças a Deus, não sou o que era antes”.*

*Marthin Luther King*

SOUSA, K. J. S. **Estudo da secagem e modelagem matemática de sistema espumante com adição de extrato de juçara (*Euterpe edulis*):** 2022. 43 f. Trabalho de Conclusão de Curso de Engenharia Química do Centro de Ciências Exatas e Tecnologia da Universidade Federal do Maranhão, São Luís, 2022.

## RESUMO

A palmeira Juçara (*Euterpe edulis*), nativa da Mata Atlântica, possui fruto rico em diferentes nutrientes, como os compostos fenólicos e as antocianinas, bastante perecível à temperatura ambiente. A secagem em leito de espuma pode ser uma alternativa para o processamento produto, permitindo uma maior vida útil e uma aplicação industrial mais ampla. Assim, o presente trabalho teve como objetivo estudar a secagem da polpa de juçara em quatro temperaturas (30, 40, 50 e 60 °C) utilizando o método leito de espuma. O extrato da polpa de juçara foi adicionado a um sistema espumante, formulado com 20 g de albumina, 10 g de maltodextrina e 10 g de amido, nas proporções polpa de juçara: sistema espumante de 20:80 % (p/p). O sistema foi submetido à secagem convectiva em um secador de bandejas, com umidade relativa temperatura controlada. As curvas de secagem obtidas apresentaram um período de taxa decrescente, típica de alimentos e produtos com alto conteúdo de umidade e proteína. Os coeficientes de difusividade efetiva para a secagem do sistema espumante com polpa de juçara foram iguais a  $3,7819 \times 10^{-13}$ ,  $8,0563 \times 10^{-13}$ ,  $5,9179 \times 10^{-13}$  e  $8,3834 \times 10^{-13}$  m<sup>2</sup>/s, para as temperaturas de 30, 40, 50 e 60 °C, respectivamente. Com esses resultados, encontrou-se um valor de energia de ativação de 336,0832 kJ/mol para o sistema com geometria de placa plana infinita.

**Palavras-chave:** *Euterpe edulis*. Cinética de secagem. Sistemas espumantes.

SOUSA, K. J. S. **Study of drying and mathematical modeling of system with addition of juçara extract (*Euterpe edulis*)**. 2022. 43 f. Graduate Work (Graduate in Chemical Engineering) – Curso de Engenharia do Centro de Ciências Exatas e Tecnologia da Universidade Federal do Maranhão, São Luís, 2022.

### ABSTRACT

The Juçara palm (*Euterpe edulis*), native to the Atlantic Forest, has a fruit rich in different nutrients, such as phenolic compounds and anthocyanins, very perishable at room temperature. Foam mat drying can be an alternative for processing this product, allowing for a longer useful life and greater industrial application. Thus, the present work aimed to study the drying of juçara at four temperatures (30, 40, 50 and 60 °C) by the foam mat method. The juçara pulp extract was added to a foaming system, formulated with 20 g of albumin, 10 g of maltodextrin and 10 g of starch, in the proportions of juçara pulp: foaming system of 20:80% (w/w). The system was subjected to convective drying in a tray dryer, with temperature-controlled relative humidity. The drying curves obtained showed a period of decreasing rate, typical of foods and products with high moisture and protein content. The effective diffusivity coefficients for drying the system with juçara pulp were equal to  $3.7819 \times 10^{-13}$ ,  $8.0563 \times 10^{-13}$ ,  $5.9179 \times 10^{-13}$  and  $8.3834 \times 10^{-13} \text{ m}^2/\text{s}$ , for temperatures of 30, 40, 50 and 60 °C, respectively. With these results, a defining energy value of 336.0832 kJ/mol it was calculated for the infinite flat plate geometry system.

**Keywords:** *Euterpe edulis*. Drying kinetics. Foam mat drying.

**LISTA DE FIGURAS**

Figura 1 – Fruto de juçara.....	05
Figura 2 – Processamento dos frutos de juçara .....	06
Figura 3 – Polpa de açaí-juçara “in natura” e polpa desidratada.....	07
Figura 4 – Curvas de secagem .....	09
Figura 5 – Secador de bandejas .....	13
Figura 6 – Sistema espumante.....	17
Figura 7 – Curva da secagem experimental.....	19
Figura 8 – Simulação das cinéticas de secagem .....	22
Figura 9 – Simulação das curvas de secagem a partir da difusividade efetiva.....	23

**LISTA DE TABELAS**

Tabela 1 – Composição química da polpa de juçara. ....	04
Tabela 2 – Valores médios da umidade de secagem.....	18
Tabela 3 – Parâmetros estimados para os modelos de camada fina .....	21
Tabela 4 – Coeficientes de difusão efetiva da água.....	22

## SUMÁRIO

	FOLHA DE APROVAÇÃO.....	iv
	DADOS CURRICULARES.....	v
	DEDICATÓRIA.....	vi
	AGRADECIMENTOS.....	vii
	EPÍGRAFE.....	viii
	RESUMO.....	ix
	ABSTRACT.....	x
	LISTA DE FIGURAS.....	xi
	LISTA DE TABELAS.....	xii
	SUMÁRIO.....	xiii
<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO.....</b>	<b>1</b>
<b>2</b>	<b>OBJETIVOS.....</b>	<b>3</b>
2.1	Objetivo geral.....	3
2.2	Objetivos específicos.....	3
<b>3</b>	<b>REFERENCIAL TEÓRICO.....</b>	<b>4</b>
3.1	A juçara.....	4
3.2	Secagem .....	7
3.2.1	Curvas de secagem e umidade de equilíbrio .....	8
3.2.3	Secagem de polpas e frutas .....	9
3.3	Sistemas espumantes .....	10
3.4	Secagem em leito de espuma .....	11
<b>4</b>	<b>MATERIAL E MÉTODOS .....</b>	<b>13</b>
4.1	Material.....	13
4.2	Local da pesquisa.....	13
4.3	Instrumentos/equipamentos/software utilizados.....	13
4.4	Análises, métodos e procedimentos experimentais.....	14
<b>5</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÃO.....</b>	<b>17</b>
<b>6</b>	<b>CONCLUSÃO.....</b>	<b>25</b>
	<b>REFERÊNCIAS.....</b>	<b>26</b>

## 1 INTRODUÇÃO

A secagem está entre as práticas mais antigas utilizadas na preservação de alimentos. As Guerras Mundiais desempenharam um importante papel no desenvolvimento da técnica, devido à necessidade de preservação dos alimentos para as tropas americanas. A técnica passou então a ser considerada uma tecnologia em desenvolvimento, que possibilitaria a obtenção de produtos de alta qualidade e ótima conservação (MELONI, 2003).

A conservação de alimentos por secagem permite a remoção da água, reduzindo assim, a deterioração microbiológica e as reações de degradação, aumentando a vida útil e impedindo a perda de valor comercial, além da redução de massa e volume do produto, favorecendo as etapas de transporte e de armazenamento (HARDY; JIDEANI, 2015).

O método de secagem em camada de espuma transforma alimentos líquidos e semilíquidos em uma espuma estável através da adição de agentes com propriedades emulsificantes e espessantes (SOARES et al., 2001). A porosidade da espuma e a maior relação área superficial-volume proporcionam altas taxas de transferência de calor e massa nessa técnica, reduzindo o tempo do processo e melhorando a qualidade do produto seco que se apresenta poroso e facilmente reidratável (DEHGHANNYA et al., 2018).

Baixas temperaturas de secagem e tempos reduzidos de secagem resultam em um produto de alta qualidade, pois ocorrem menores perdas de voláteis e nutrientes durante o processo. A espuma aumenta a eficiência de secagem através do aumento da área superficial e incremento da transferência de calor e massa. (FELLOWS, 2006).

A palmeira Juçara, nativa da Mata Atlântica, tem como principal produto de exploração o palmito (PEREIRA et al., 2017). A prática extrativista é responsável pela extinção da espécie em diversas regiões. Desta forma o incentivo da utilização de seu fruto é uma forma de exploração sustentável, uma vez que não causa a morte da planta com o seu consumo. mais sustentável para sua gestão e preservação do meio ambiente (PEREIRA et al., 2018).

A Juçara comercializada de diferentes formas (in natura, polpa, cremes etc), tem sido cada vez mais consumida, principalmente pelos benefícios á saúde e alto teor energético (HENZ, 2019). É assim considerado um “superfruto”, rico em diferentes nutrientes, entre eles os antioxidantes, principalmente antocianinas e demais compostos fenólicos (SCHULZ et al., 2016).

A ingestão diária de alimentos com alto teor de compostos fenólicos está intimamente relacionada com a prevenção de doenças cardiovasculares, alguns tipos de câncer, cataratas, arteriosclerose, Alzheimer e Parkinson (LIMA et al., 2012). Estudos apontam que

suplementação com polpa de Juçara apresenta efeitos positivos sobre a peroxidação lipídica, resposta antioxidante, modulação do estado inflamatório e efeitos antidiabéticos (NUNES, 2018).

O estudo do processo de secagem da polpa de juçara em leito de espuma pode assim, trazer benefícios para toda a cadeia produtiva, constituindo-se numa alternativa para a distribuição e comercialização da fruta. Nesse contexto, considerando o consumo crescente da juçara, na forma in natura, de polpa ou de diferentes produtos da cadeia agroindustrial, associado à necessidade de se estudar novos métodos que ofereçam alternativas ao seu processamento e utilização tradicionais, são a principal motivação para realização deste trabalho, que busca estudar, formular e avaliar a secagem de sistemas espumantes compostos de amido, albumina em pó, maltodextrina e água, adicionados de polpa de juçara.

## **2 OBJETIVOS**

### **2.1 Objetivo geral**

Estudar o processo de secagem em sistemas espumantes adicionados de extrato de polpa de juçara

### **2.1 Objetivos específicos**

- Formular sistemas espumantes a partir de materiais de grau alimentício como albumina de ovo, maltodextrina e amido. E adicionar extrato de polpa de juçara ao material espumante formulado
- Determinar as cinéticas de secagem do sistema espumante com adição de polpa de juçara a diferentes temperaturas (30, 40, 50 e 60 °C);
- Ajustar modelos matemáticos aos dados das cinéticas de secagem do sistema espumante com adição de polpa de juçara.

### 3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

#### 3.1 A JUÇARA

A palmeira juçara (*Euterpe edulis* Martius) é considerada uma espécie de grande importância para a Floresta Atlântica (GALLETI et al. 1999). Possui um fruto rico em compostos fenólicos antocianinas, que é utilizado como corante e antioxidante natural em produtos alimentícios (BORGES, 2018). Além da sua utilização como corantes naturais, as antocianinas apresentam benefícios para a saúde, como efeitos anticancerígenos, antimutagênicos, antimicrobianos, antiinflamatórios, antineurodegenerativos e proteção contra o dano oxidativo induzido por UVB, tanto in vitro como in vivo (KHOO et al., 2017)

Em sua composição nutricional, a polpa de juçara apresenta alto valor energético, pois apresenta um elevado conteúdo lipídico, além de ser rica em fibras, vitamina E, proteínas e minerais (SCHULZ et al., 2016). Possui também alto teor de ácidos graxos poli-insaturados e menor teor de lipídios saturados (GUERGOLETTTO et al., 2016). A tabela 1 traz a composição química aproximada da polpa de juçara.

**Tabela 1.** Composição química da polpa de juçara. (*Euterpe edulis*)

COMPOSIÇÃO QUÍMICA		
LIPÍDEOS (18 a 44%)	ÁCIDO OLEICO	44 a 55%
	ÁCIDO LINOLEICO	18 a 25%
CINZAS		1,5 a 3,3%
PROTEÍNAS		5 a 8%
UMIDADE		88 a 90%

Fonte: Adaptado de Borges et al. (2011).

O fruto da palmeira juçara (*Euterpe edulis*), apresentado na figura 1, é muito semelhante ao fruto do açaí (*Euterpe oleracea*), apresentando drupa esférica com pericarpo pouco espesso e liso. A coloração passa do verde ao roxo durante a maturação (CERISOLA et al., 2007). Outra característica convergente entre os frutos da *E. edulis* e da *E. oleracea* é o elevado teor de antocianinas e compostos fenólicos.

**Figura 1.** Fruto de juçara (A) e cacho (B) de frutos de juçara.



Fonte: Schulz et al. (2016).

Da mesma forma que o açaí, o fruto da palmeira Juçara pode ser utilizado como alimento funcional, devido às propriedades antioxidantes. Possibilitando assim o uso de maneira sustentável (LIMA et al., 2012). Sendo uma alternativa à exploração predatória de palmito, atividade que está ameaçando a espécie de extinção.

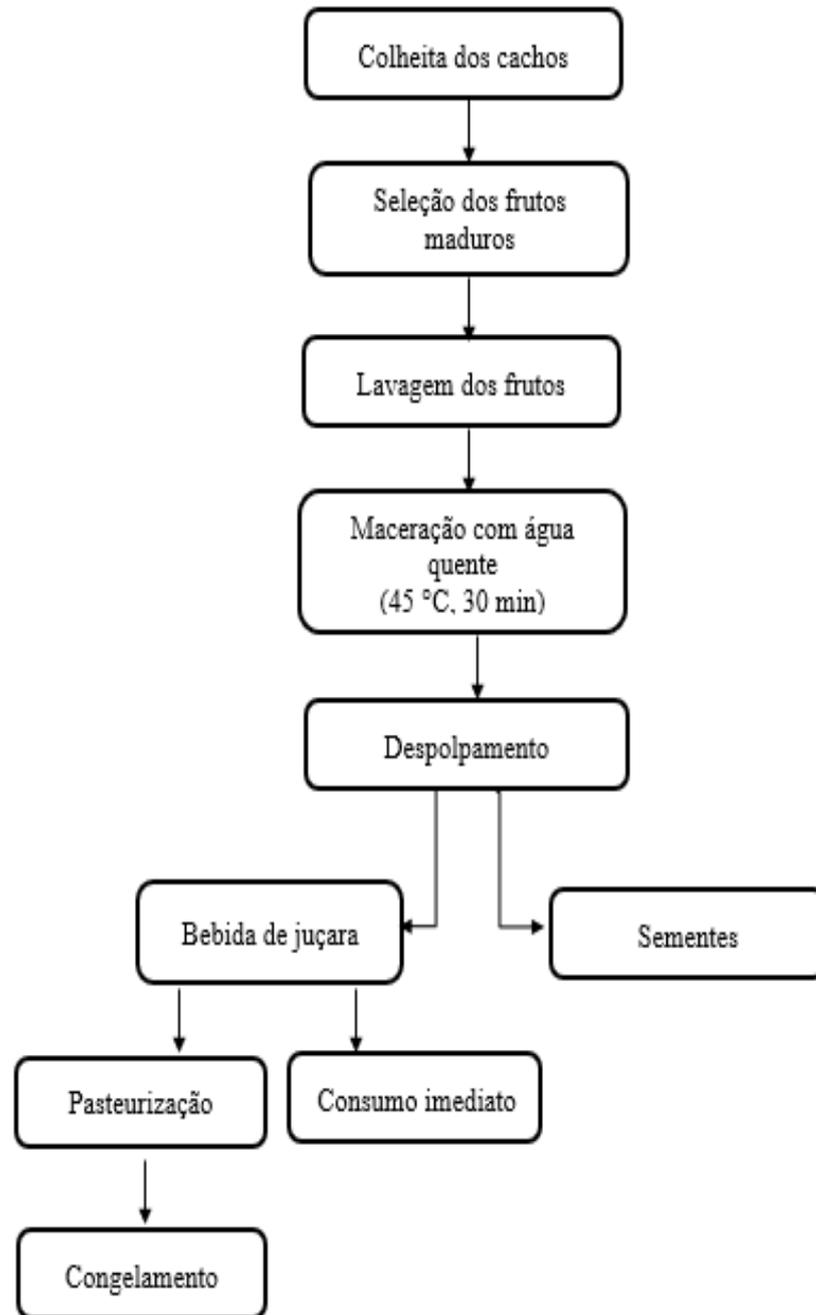
Por possuírem uma pequena porção comestível, os frutos não são comercializados para consumo *in natura*. Estes são então processados para produção de uma bebida cremosa, seguindo as etapas mostradas na figura 2, de cor púrpura intensa e sabor característico, comumente chamada de bebida de juçara, a qual é constituída por água (80 a 90 %) e epicarpo e mesocarpo dos frutos (BICUDO et al., 2014).

A polpa é utilizada para a produção de sucos, sorvetes, picolés e alimentos energéticos. É consumida com farinha de mandioca, camarão ou carne em alguns estados brasileiros. Nas regiões produtoras, a polpa é comercializada à temperatura ambiente “*in natura*”, sendo então consumida imediatamente. Quando se destina aos comércios distantes, a polpa é congelada ou desidratada (figura 3), o que pode ocasionar perdas nutritivas, que modificam as propriedades originais (MATTA et al., 2005).

A polpa de juçara é perecível à temperatura ambiente (PEREIRA et al., 2017), favorecendo reações químicas e enzimáticas que aceleraram a deterioração do produto. (FERNANDES, 2015). A secagem em leito de espuma pode ser uma alternativa para o

processamento desse produto, permitindo uma maior vida útil e uma aplicação industrial mais ampla.

**Figura 2.** Processamento dos frutos de juçara.



Fonte: Adaptado de Schulz et al. (2016).

**Figura 3** — Polpa de açaí-juçara “in natura” e polpa desidratada.



Fonte: Embrapa (1998).

### 3.2 SECAGEM

A secagem é uma operação unitária destinada à remoção mecânica de um líquido agregado a um sólido para uma fase gasosa insaturada através de vaporização térmica, ou seja, remoção da umidade. Esta ocorre em uma temperatura inferior à da ebulição do líquido na pressão do sistema. O mecanismo de vaporização térmica para a remoção da umidade distingue a secagem dos processos de filtração e centrifugação (PACHECO, 2002).

É um processo complexo de transferência de calor e massa entre o produto e o ar, ocorrendo remoção de umidade do meio poroso, pela difusão desta e evaporação, normalmente causada por convecção forçada de ar aquecido, garantindo a manutenção de sua qualidade durante o período de armazenagem (BORGES, 2016).

Apesar da perda de propriedades nutritivas do alimento após o processo, a secagem possui muitas vantagens: aumento da vida útil do produto; o alimento continua nutritivo e mais concentrado; maior facilidade no transporte e comercialização devido à sua perda de volume; é econômico e a mão-de-obra não precisa ser especializada, além dos produtos desidratados possuírem baixo custo de transporte e armazenagem, e ocorre uma significativa redução nas perdas após a colheita (CELESTINO, 2010).

A convecção forçada consiste no escoamento do fluido sobre uma superfície sólida a uma temperatura diferente, porém, induzida artificialmente através de uma força externa (ENGEKHARDT; ARRIECHE, 2016). Neste processo, pode-se afirmar que o material é submetido à ação do ar aquecido na câmara de secagem a intervalos regulares de tempo em que a umidade e o aquecimento são controlados e homogêneos. É um método mais rápido que a secagem natural e mais eficiente na distribuição da umidade e redução de danos físicos no

material a ser secado. Além disso, ainda é possível que se escolha a temperatura do ar aquecido de acordo com o processo (GARCIA, 2014).

### **3.2.1 Curvas de secagem e umidade de equilíbrio**

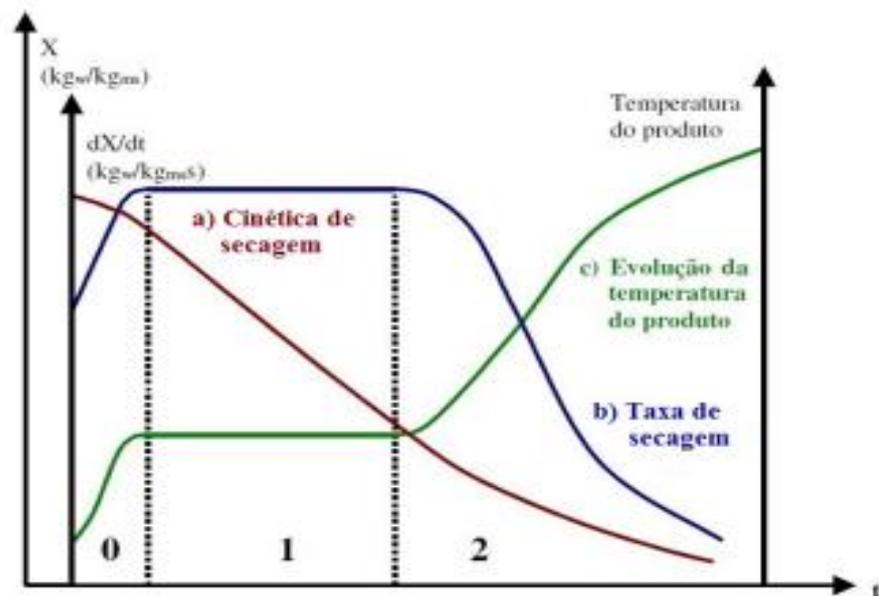
A cinética de secagem consiste na rapidez com que um produto perde umidade. Esta é analisada de acordo com o produto pelas variáveis temperatura, velocidade e umidade relativa do ar. A cinética de secagem fornece as características sobre o fenômeno complexo que envolve simultaneamente a transferência de calor e massa (FERREIRA; PENA, 2010).

Segundo Soares (2009), quando um alimento é desidratado, ele não perde água a uma velocidade constante ao longo do processo. Com o progresso da secagem, sob condições fixas, a taxa de remoção de água diminui. A forma precisa de uma curva de secagem normal, varia conforme o alimento, com os diferentes tipos de secadores, e em resposta às variações das condições de secagem tais como temperatura, umidade, velocidade do ar, sentido do ar e espessura do alimento, entre outros fatores (MELONI, 2003).

De acordo com Celestino (2010), a curva correspondente à variação da umidade em relação ao tempo de secagem corresponde ao período em que o produto se adapta às condições de secagem. A característica dessa curva consiste no decréscimo do teor de umidade ao longo do tempo até que se atinja um valor constante em relação ao tempo, denominada de umidade de equilíbrio. A curva é desenhada de acordo com as características do sólido. A curva de cinética de secagem geralmente apresenta três períodos distintos: período 0 ou período de se entrar em regime operacional; período 1 ou período de secagem a taxa constante; e período 2 ou de secagem a taxa decrescente (PARK; 2001), conforme figura 4.

A importância do estudo das curvas de secagem de um produto é que essas indicam a velocidade de remoção de água em qualquer tempo medido a partir do início do processo. Uma maior ou menor inclinação da curva indica a facilidade ou dificuldade de remoção de água durante o processo de secagem (MELONI, 1995). Em virtude disso, o estudo da cinética de secagem é fundamental para a seleção do método, do tempo e da temperatura adequados para a secagem de produtos agrícolas, com o intuito de manter a qualidade dos produtos (AVHAD; MARCHETTI, 2016).

**Figura 4.** Curvas de secagem.



Fonte: Oliveira, 2007

### 3.2.2 Secagem de polpas de frutas

Para produtos alimentícios, a secagem ocorre quando a água presente na superfície do material transforma-se em vapor e é transferida para a atmosfera, diminuindo a umidade da superfície e criando um gradiente de umidade do interior para a superfície do alimento. A pressão de vapor será mais alta do que na superfície, forçando a transferência de água na direção da mesma (CELESTINO, 2010). Em comparação com outros procedimentos de conservação de alimentos, como refrigeração ou tratamentos químicos por exemplo, a secagem se destaca pelo menor custo e por ser mais simples (ARAUJO et al., 2017).

É necessário avaliar as variáveis tempo/temperatura de secagem, para entender se é viável utilizar temperaturas mais elevadas diminuindo o tempo de secagem e, conseqüentemente, o tempo de exposição do produto ao aquecimento. Entretanto, é importante evidenciar que o curto tempo de exposição ao aquecimento em temperaturas mais elevadas pode também minimizar as perdas e garantir a qualidade nutricional do alimento (VASCONCELOS; MELO, 2016).

Dentre os processos de secagem para obtenção dos pós de polpa de frutas, destaca-se a secagem da manta de espuma. É um método em que o alimento líquido ou semilíquido é misturado a agentes espumosos e transformado em espuma por agitação, sendo então submetido à secagem com ar quente (BAPTESTINI *et al.*, 2015).

### 3.3 SISTEMAS ESPUMANTES

A espuma é um sistema com duas fases (fase dispersa e contínua) separadas por uma fina camada de película líquida conhecida como fase lamelar (parede fina de bolha) (HARDY; JIDEANI, 2015), sendo o volume da fase dispersa maior que o da fase contínua. Sua produção pode ocorrer mecanicamente (agitação), quimicamente (agentes de crescimento) e de forma biológica (leveduras)

De acordo com Gutiérrez (2015), a forma da bolha nas espumas vai depender da densidade das mesmas. Quando se tem densidade baixa, estas terão formas poliédricas, contrastando com espuma densa, cuja forma será esférica. Independentemente de sua forma, as bolhas possuem tamanho definido e apresentam desordem na estrutura.

Segundo Soares (2009), a estabilidade das espumas depende de dois fatores principais: a tendência dos filmes líquidos sofrerem drenagem e se tornarem mais finos e a tendência à ruptura em consequência de perturbações aleatórias, fazendo necessário a utilização de aditivos que aumentem a estabilidade cinética do sistema, de modo que este se torne mais estável e homogêneo.

A obtenção de um alimento em pó de alta qualidade ocorre através da seleção do melhor método de formação da espuma, agentes espumantes, estabilizadores, tempo, método e temperatura de secagem (SANGAMITHRA et al., 2015). Segundo Santos (2008), agentes espumantes são substâncias que quando batidas, agitadas ou aeradas são capazes de formar espumas, ou seja, emulsões em que um gás, geralmente o ar, permanece disperso numa fase contínua líquida ou semi-sólida.

Existe um grande número de emulsificantes conhecidos por serem utilizados em sistemas espumantes, que possuem características e aplicações próprias. Alguns deles são: albumina, emustab®, superliga®. Os emulsificantes reduzem a tensão superficial e são importantes modificadores da textura (proteína e amido), modificando as propriedades físicas do alimento (SANTOS, 2008).

Albumina é uma proteína derivada do ovo, reconhecida como a mais rica proteína animal. Na indústria de alimentos, é empregada como aditivo emulsificante e espumante (WEIJERS, 2002). Em solução, a albumina tem como característica uma relativa estabilidade ao tratamento térmico (ALMEIDA, 2010). As proteínas do ovo possuem muitas propriedades tecnológicas tais como a capacidade de formação de espuma, géis e emulsões. O processo de geleificação ocorre quando as moléculas são desnaturadas em presença de calor e se agregam formando uma rede proteica orientada (MATSUMURA; MORI, 1996).

Uma vez que o emulsificante exerça sua função de aderir à superfície das bolhas de ar, faz-se necessário muitas vezes o uso de estabilizante. Estes garantem por mais tempo a estabilidade dos sistemas aerados (BAPTESTINI, 2015). Os estabilizantes e espessantes são geralmente formados por polissacarídeos (amido, proteínas, gelatinas), que aumentam a viscosidade e estabilidade e melhoram a consistência das emulsões.

As maltodextrinas são biopolímeros originados da hidrólise parcial do amido e têm extensa utilização como ingrediente por proporcionar características desejáveis a alimentos processados (SOARES, 2009). Apesar de suas aplicações variadas, normalmente a adição destes hidrolisados de amido não é suficiente para suprir as características e qualidades desejadas, sendo necessária a adição de outros carboidratos e proteínas para conferir maior viscosidade e estabilidade e fornecer maior proteção aos alimentos.

O amido é o agente espessante mais utilizado, por ser relativamente barato, abundante e geralmente não conferir qualquer gosto perceptível quando utilizado em baixa concentração (SAHA; BHATTACHARYA, 2010).

### 3.4 SECAGEM EM LEITO DE ESPUMA

Nas últimas décadas, essa tecnologia relativamente antiga, conhecida como secagem *foam-mat*, recebeu atenção renovada, devido à sua grande capacidade para lidar com materiais de difícil secagem; obter produtos com propriedades específicas (por exemplo, fácil reidratação e densidade controlada), e reter os voláteis que, de outra forma, seriam perdidos durante a secagem sem espuma (SOARES, 2009). De acordo com Soares (2009), na desidratação em leito de espuma (*foam-mat*), o material líquido ou semi-líquido é transformado numa espuma estável e submetido à secagem com ar aquecido, até o ponto em que impeça o crescimento de microrganismos e desenvolvimento de reações químicas e/ou enzimáticas indesejáveis.

A secagem em leito de espuma é utilizada com o intuito de aumentar a taxa secagem de alimentos líquidos e semi-líquidos. Esse tipo de processo consiste basicamente de três etapas: modificação na consistência líquida do suco ou polpa em uma espuma estável, pela adição de agentes espumantes; secagem do material em camada fina e pulverização do material desidratado (TRAVAGLINI et al., 2001).

O método de secagem em leito de espuma oferece diversas vantagens em relação à secagem de produtos não espumados, utilizando o mesmo tipo de secador, tais como a possibilidade do uso de menores temperaturas de desidratação e menor tempo de secagem,

levando a uma redução da degradação térmica dos produtos secos em comparação à secagem convencional por convecção (FREITAS, 2016).

Como desvantagens do método, tem-se a necessidade da utilização de agentes espumantes, que podem modificar as características sensoriais do alimento como sabor, aroma e cor. Outra desvantagem e ponto crítico do processo é a dificuldade encontrada na formação da espuma e sua estabilidade durante o processo de secagem. A formação, a densidade e a estabilidade das espumas são afetadas por diversas variáveis como a natureza química do material, teor de sólidos solúveis e, principalmente, pelo tipo e concentração do agente espumante (CARNEIRO, 2008; MARQUES, 2009).

Aplicações do método de secagem em leito de espuma são encontrados em trabalhos recentes, para uma grande variedade de vegetais, como polpa de coco verde (OLIVEIRA, 2019), casca de berinjela (SILVA, 2017), batata doce (PEGADO, 2016), caju (MACHADO, 2019), cenoura (DELMIRO, 2016) e acerola (ARAUJO et al., 2017).

## 4 MATERIAL E MÉTODOS

### 4.1 MATERIAL

A polpa da juçara (*Euterpe edulis*) foi obtida em lote único no Mercado Central de São Luís - MA, e imediatamente armazenada em freezer até o momento das análises. Para fabricação do sistema espumante foi utilizado a albumina de ovo em pó (CPovos, Mogi das Cruzes, Brasil), maltodextrina (Growth Supplements, Bombinha, Brasil) e amido de milho (Maizena, Refinações Milho do Brasil).

### 4.2 LOCAL DA PESQUISA

A pesquisa foi realizada no Laboratório de Petróleo e Sistemas Complexos/CCET, localizado no campus sede da Universidade Federal do Maranhão (UFMA), em São Luís, Maranhão.

### 4.3 EQUIPAMENTOS UTILIZADOS

O sistema espumante formulado foi desidratado utilizando um secador convectivo (modelo PE14, Pardal, Brasil), conforme mostrado na figura 5, e seu peso mensurado através de uma balança semi-analítica (Modelo UX220H, Shimadzu, Japão). Durante a realização da secagem, a umidade relativa foi monitorada com o emprego de um higrômetro (modelo INS-28, Instrusul, Brasil).

**Figura 5-** Secador de bandejas (modelo PE14, Pardal, Brasil)



Fonte: [www.pardal.com.br/desidratador-pe-14analogico](http://www.pardal.com.br/desidratador-pe-14analogico) (acesso em 15/04/2022).

## 4.4 ANÁLISES, MÉTODOS E PROCEDIMENTOS EXPERIMENTAIS

### 4.4.1 Preparação e caracterização dos sistemas espumantes

Com o uso de uma balança semi-analítica (Modelo UX220H, Shimadzu, Japão), foram pesados 20g de albumina, 10g de maltodextrina e 10g de amido para formulação do sistema espumante. 75mL de água destilada foi adicionada a albumina e misturada vigorosamente por cerca de 4 minutos com auxílio de um mixer de cozinha (Modelo 2615R, Oster, USA), até que fosse obtido uma mistura com consistência adequada. Após receber a adição de maltodextrina e amido, o sistema foi novamente misturado por 3 minutos, até sua estabilização. Em seguida, o sistema foi adicionado de polpa de juçara para se alcançar a proporção equivalente de 20:80 de polpa:sistema espumante (p/p), proporção que foi definida em estudos anteriores.

Após, o sistema espumante adicionado de polpa de fruta foi colocado em bandejas cilíndricas de alumínio, com diâmetro de 9,2 cm e altura de 2,5 cm, e em seguida, submetido à secagem em uma estufa por 24h sob diferentes temperaturas de secagem (30, 40, 50 e 60 °C) e velocidade de ar de secagem constante.

O conteúdo de umidade do sistema espumante adicionado de polpa de juçara foi determinado em triplicata. As amostras foram inicialmente pesadas, e, depois, colocadas em uma estufa à temperatura de 105 °C, durante 5 horas, quando então, foram novamente pesadas, sendo a umidade determinada pela diferença de peso entre a amostra inicial e a final (AOAC, 2007).

### 4.4.2 Cinéticas de secagem

O sistema espumante adicionado de polpa de juçara foi submetido a secagem convectiva nas temperaturas de 30, 40, 50 e 60 °C, para uma velocidade de ar de 3,0 m/s. Para isto, o sistema espumante adicionado de polpa de fruta foi colocado em bandejas cilíndricas de 9,2 cm de diâmetro e 2,5 cm de espessura, que por sua vez, foram postas na estufa de secagem onde tiveram suas massas medidas ao longo do tempo, até atingir peso constante. Os resultados do peso de cada sistema para diferentes tempos de secagem foram expressos em base seca (b.s), multiplicando cada peso pela umidade inicial do produto em base seca (NAMSANGUAN et al., 2004; KALEEMULLAH; KAILAPPAN, 2006).

#### 4.4.3 Modelagem e simulação do processo de secagem

Para ajustar matematicamente os dados experimentais de secagem dos sistemas espumantes adicionados de polpa de juçara, foram utilizados os seguintes modelos de camada fina, nas diferentes temperaturas empregadas: Weibull (Equação 1), Peleg (Equação 2), Henderson-Pabis (Equação 3), Lewis (Equação 4), Aproximação por Difusão (Equação 5), Page (Equação 6), Midilli (Equação 7), Logarítmico (Equação 8) e Wang e Sing (Equação 9). Para a etapa da modelagem, foi utilizado a função Solver do software Excel 2020 (Microsoft).

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

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

$$X = X_e + (X_o - X_e) * k_1 * \exp(-k_2 * t) \quad (3)$$

$$X = X_e + (X_o - X_e) * \exp(-k_1 * t) \quad (4)$$

$$X = X_e + (X_o - X_e) * k_1 * \exp(-k_2 * t) + (1 - k_1) * \exp(-k_2 * k_3 * t) \quad (5)$$

$$X = X_e + (X_o - X_e) \exp(-k_1 t^n) \quad (6)$$

$$X = X_e + (X_o - X_e) * \exp(-k_1 * t^{k_2}) + k_3 * t \quad (7)$$

$$X = X_e + (X_o - X_e) * k_1 * \exp(-k_2 * t) + k_3 \quad (8)$$

$$X = X_e + (X_o - X_e) * (k_1 * t^2 + k_2 * t + 1) \quad (9)$$

onde: X é o conteúdo de umidade no tempo t (kg/kg, b.s.); X<sub>o</sub> é o teor inicial de umidade (kg/kg, b.s.); X<sub>e</sub> o teor de umidade de equilíbrio (kg/kg, b.s.); k<sub>1</sub>, k<sub>2</sub>, k<sub>3</sub> e k<sub>4</sub> são constantes de velocidade de secagem (s<sup>-1</sup>)(KALEEMULLAH; KAILAPPAN, 2006; GONÇALVES et al., 2016).

Os parâmetros teóricos e empíricos dos modelos de ajuste das cinéticas de secagem foram estimados através da função Solver do software Excel 2020. O coeficiente de determinação ajustado (R<sup>2</sup> adj) (Equação 10) e o erro relativo médio (MRE) (Equação 11) foram usados para avaliar a qualidade do ajuste dos modelos matemáticos testados.

$$R_{adj}^2 = 1 - \left(\frac{n-1}{n-n_p}\right) (1 - R^2) \quad (10)$$

$$MRE = \frac{100}{n} \sum_{i=1}^n \frac{|X_i - X_i^*|}{X_i^*} \quad (11)$$

onde,  $R^2$  é o coeficiente de determinação entre os valores experimentais e calculados pelo melhor modelo de ajuste,  $X$  e  $\bar{X}^*$  representam os valores experimentais e os valores calculados,  $n$  é o número de dados experimentais e  $n_p$  é o número de parâmetros do modelo.

A difusividade efetiva foi calculada através da Lei de Fick para geometria de placa plana infinita (Equação 12) . Utilizou-se a Teoria Difusional, a qual se baseia na equação da difusão líquida (Segunda Lei de Fick), onde o fluxo de massa é proporcional ao gradiente de concentração no interior da matriz sólida. Crank (1975) propôs uma solução analítica, considerando a distribuição de umidade inicial uniforme e ausência de qualquer resistência térmica para uma placa plana infinita:

$$Y = \frac{X - X_e}{X_0 - X_e} = \frac{8}{\pi^2} \sum_{i=0}^{\infty} \frac{1}{(2i+1)^2} \exp \left[ -(2i + 1)^2 \frac{\pi^2 D_{ef}}{4L^2} t \right] \quad (12)$$

onde,  $D_{ef}$  é a difusividade efetiva ( $m^2/s$ ),  $i$  é o número de termos na série,  $t$  é o tempo de secagem (s) e,  $L$  é a meia espessura da amostra (m).

## 5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os ensaios ocorreram nas temperaturas de 30, 40, 50 e 60 °C, com uma variação de  $\pm 1,5$  °C. A figura 6 mostra o resultado do processo de secagem do sistema espumante adicionado de extrato de polpa de juçara. O produto obtido apresentou textura esponjosa e de coloração marrom para todas as temperaturas testadas.

**Figura 6** – Sistema espumante (A), sistema espumante adicionado de 20% de extrato de juçara (B), sistema após o processo de secagem na temperatura 60 °C (C).



Fonte: Própria autora (2021).

A tabela 2 apresenta os resultados de umidade X (kg/kg), dados em base seca (b.s) obtidos experimentalmente, nas diferentes temperaturas de secagem para o sistema espumante adicionado de 20 % de extrato de juçara.

A umidade relativa do ar seco, variando de 10 – 38,7%, e a espessura das amostras equivalentes a  $1,15 \pm 0,150$  cm foram determinadas nos experimentos. As amostras apresentaram o mesmo conteúdo de água evaporada ( $X_0$ ), 2,533 kg/kg, nas diferentes temperaturas avaliadas. A umidade de equilíbrio ( $X_e$ ) foi de 1,774, 1,181, 0,948 e 0,204 kg/kg, às temperaturas de 30,40, 50 e 60 °C, respectivamente.

De acordo com Dantas (2010), a secagem do processo foarm-mat ocorre em taxa decrescente, precedida ou não de um período de taxa constante (DANTAS, 2010). Segundo Reis et al. (2015), “*O comportamento linear, que representa o período no qual a transferência de calor entre o material e o ar de secagem é constante ao longo do tempo, deve-se principalmente ao aumento da diferença de temperatura, que é proporcional à taxa de transferência de calor*”.

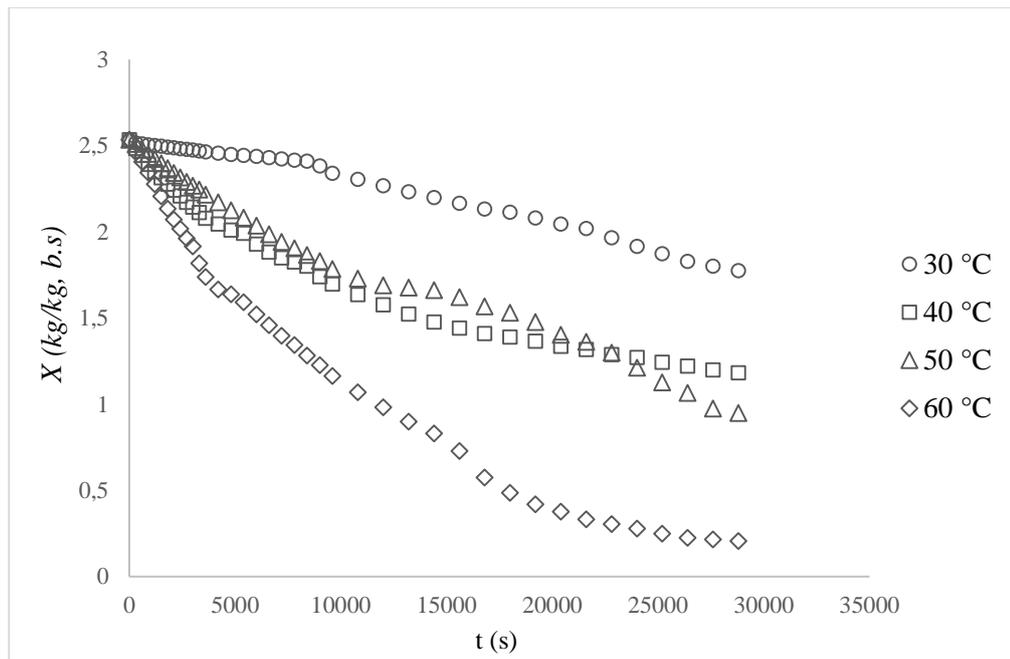
**Tabela 2.** Valores médios da umidade de secagem nas temperaturas de 30, 40, 50 e 60 °C.

<b>t (s)</b>	<b>X (kg/kg, bs)</b>			
	<b>30°C</b>	<b>40°C</b>	<b>50°C</b>	<b>60°C</b>
<b>0</b>	2,533±0,000	2,533±0,000	2,533±0,000	2,533±0,000
<b>300</b>	2,515±0,005	2,484±0,022	2,509±0,019	2,462±0,044
<b>600</b>	2,509±0,003	2,442±0,031	2,476±0,009	2,405±0,053
<b>900</b>	2,504±0,002	2,391±0,030	2,451±0,009	2,343±0,058
<b>1200</b>	2,500±0,002	2,349±0,023	2,422±0,009	2,276±0,070
<b>1500</b>	2,496±0,002	2,313±0,026	2,396±0,009	2,205±0,076
<b>1800</b>	2,491±0,002	2,276±0,023	2,368±0,009	2,133±0,083
<b>2100</b>	2,486±0,002	2,241±0,022	2,341±0,011	2,070±0,079
<b>2400</b>	2,482±0,002	2,207±0,020	2,316±0,014	2,016±0,086
<b>2700</b>	2,478±0,002	2,171±0,026	2,290±0,012	1,961±0,088
<b>3000</b>	2,473±0,002	2,142±0,026	2,266±0,015	1,914±0,088
<b>3300</b>	2,469±0,003	2,111±0,028	2,245±0,014	1,816±0,118
<b>3600</b>	2,462±0,004	2,077±0,029	2,215±0,016	1,738±0,119
<b>4200</b>	2,456±0,004	2,045±0,025	2,171±0,019	1,665±0,125
<b>4800</b>	2,449±0,004	2,009±0,039	2,124±0,019	1,636±0,339
<b>5400</b>	2,443±0,004	1,992±0,022	2,081±0,022	1,591±0,136
<b>6000</b>	2,437±0,004	1,927±0,036	2,034±0,018	1,520±0,133
<b>6600</b>	2,430±0,004	1,882±0,028	1,985±0,018	1,457±0,139
<b>7200</b>	2,423±0,004	1,849±0,020	1,940±0,023	1,397±0,135
<b>7800</b>	2,416±0,004	1,824±0,025	1,904±0,021	1,342±0,143
<b>8400</b>	2,409±0,004	1,800±0,036	1,865±0,023	1,281±0,145
<b>9000</b>	2,382±0,032	1,738±0,071	1,829±0,026	1,226±0,140
<b>9600</b>	2,339±0,024	1,695±0,080	1,784±0,018	1,163±0,170
<b>10800</b>	2,304±0,026	1,636±0,084	1,727±0,006	1,069±0,165
<b>12000</b>	2,266±0,025	1,575±0,084	1,688±0,030	0,981±0,164
<b>13200</b>	2,231±0,023	1,522±0,079	1,685±0,025	0,898±0,158
<b>14400</b>	2,199±0,023	1,477±0,083	1,660±0,007	0,829±0,162
<b>15600</b>	2,165±0,024	1,440±0,075	1,621±0,032	0,728±0,188
<b>16800</b>	2,132±0,021	1,409±0,072	1,566±0,029	0,574±0,128
<b>18000</b>	2,113±0,005	1,389±0,090	1,530±0,022	0,485±0,047
<b>19200</b>	2,079±0,005	1,365±0,098	1,476±0,023	0,418±0,045
<b>20400</b>	2,045±0,005	1,335±0,095	1,402±0,029	0,375±0,045
<b>21600</b>	2,018±0,005	1,316±0,081	1,361±0,029	0,332±0,033
<b>22800</b>	1,965±0,005	1,287±0,080	1,298±0,037	0,303±0,036
<b>24000</b>	1,916±0,005	1,270±0,093	1,212±0,036	0,278±0,033
<b>25200</b>	1,871±0,004	1,243±0,094	1,126±0,034	0,247±0,026
<b>26400</b>	1,828±0,007	1,221±0,089	1,064±0,034	0,224±0,026
<b>27600</b>	1,800±0,007	1,198±0,085	0,975±0,032	0,207±0,026
<b>28800</b>	1,774±0,007	1,181±0,085	0,948±0,032	0,204±0,000

Fonte: Própria autora (2021).

As curvas obtidas no presente experimento apresentaram um período de taxa decrescente (figura 7). A natureza do teor de umidade na espuma, em que a água superficial livre pode estar presente na forma de suspensão e solução (açúcares e outras moléculas), com uma pressão de vapor inferior à da água pura, pode explicar a ausência de um período de taxa constante (FRANCO et al., 2015).

**Figura 7.** Curva da secagem experimental.



Fonte: Própria autora (2021).

A figura 7 apresenta as curvas de secagem do sistema espumante adicionado de extrato de juçara, nas temperaturas de 30, 40, 50 e 60 °C. Observa-se o comportamento da taxa de secagem ( $dX/dt$ ) em função da umidade da amostra  $X$  ( $kg/kg$ ,  $bs$ ), evidenciando que a secagem está ocorrendo a um período de taxa decrescente. Analisando as curvas observa-se que à medida que a temperatura aumenta o tempo de secagem diminui. A curva na temperatura de 60 °C apresentou um ângulo mais pronunciado do que a curva de 40°C e 50°C, e ainda mais pronunciado que a curva de 30 °C.

Constatou-se que a secagem com temperatura de 60° C apresentou melhores resultados de retirada de água livre do material, o que resultou em um material visivelmente mais seco e que apresentou uma melhor representação gráfica do processo.

Esse comportamento é similar ao observado por Araújo (2019) no estudo da secagem em camada de espuma de polpa de goiaba, em que o autor constatou que as espumas secaram

mais rapidamente no início do processo do que no final e que menores temperaturas resultaram em secagens mais longas.

Segundo Fellows (2006), os estudos da cinética de secagem de materiais fornecem importantes informações que permitem determinar o tempo de secagem em secador específico, além de permitir através de balanços de massa, calcular a quantidade de material desidratado que pode ser produzido.

Para a simulação da cinética de secagem, utilizou-se diferentes modelos matemáticos para ajustar os valores experimentais de umidade em função do tempo, nas temperaturas de 30, 40, 50 e 60 °C. Os modelos utilizados na modelagem matemática foram os de camada fina de Weibull, Peleg, Henderson-Pabis, Logarítmico, Wang e Singh, Lewis, Page, Midilli, Dois Termos e Aproximação por Difusão, que empregam diferentes parâmetros como descrito no item 4.4.3. para avaliar a qualidade do ajuste matemático do modelo aos dados experimentais.

Para todos os modelos empregados os valores das constantes apresentaram tendência de aumento com a elevação da temperatura, mesmo comportamento observado por (ALEXANDRE et al., 2006) ao estudar a cinética secagem em camada de espuma da polpa de pitanga.

Como pode-se observar na Tabela 3, foram obtidos bons coeficientes de determinação para as temperaturas de 40°C e 60°C, com valores variando entre 0,9821 e 0,9981. Os modelos de Midilli (com  $R^2_{adj} \geq 0,9852$ ;  $MRE \leq 3,2465$ ) e Aproximação por Difusão (com  $R^2_{adj} \geq 0,9910$ ;  $MSE \leq 8,3720$ ) apresentaram os maiores  $R^2_{adj}$ , além de MRE aceitáveis em todas as temperaturas avaliadas.

O parâmetro estatístico  $R^2_{adj}$ , conhecido como a variação explicada, ajusta o coeficiente de determinação baseado no número de parâmetros do modelo, sendo um critério que define o sucesso do modelo ao mesmo tempo em que avalia a variação dos dados experimentais. Tem importante utilidade quando se compara modelos com um número diferente de coeficientes embutidos (VILLA-VÉLEZ et al., 2012; CANO-HIGUITA et al., 2015).

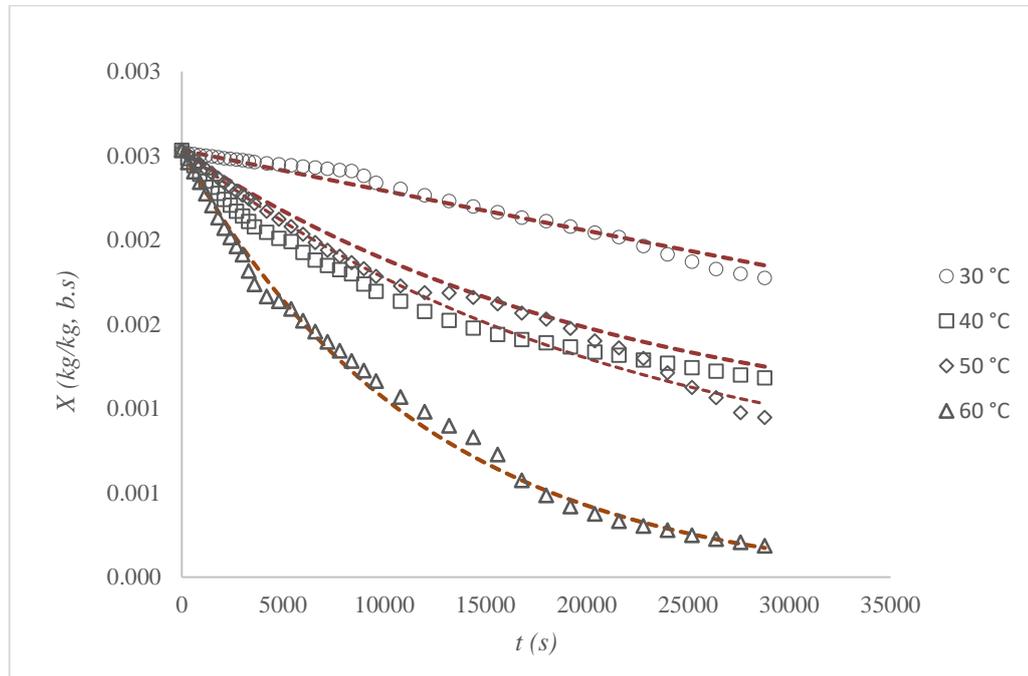
A figura 8 mostra a modelagem das curvas de secagem para o modelo de Aproximação por Difusão. Analisando as curvas de secagem, é possível perceber a influência da temperatura no tempo de secagem. Em temperaturas mais altas as curvas apresentaram maior inclinação, o que representa uma maior transferência de calor e massa e, conseqüentemente, menores tempos de secagem.

**Tabela 3.** Parâmetros estimados para os modelos de camada fina nas temperaturas de 30, 40, 50 e 60 °C.

MODELOS	PARÂMETRO ESTATÍSTICO	TEMPERATURA (° C)			
		30	40	50	60
Weibull	$k_1$	$6,232 \times 10^7$	$7,159 \times 10^4$	$3,202 \times 10^8$	$2,279 \times 10^8$
	$k_2$	$2,784 \times 10^3$	7,560	$2,031 \times 10^4$	$2,691 \times 10^4$
	$R^2_{adj}$	0,962	0,998	0,989	0,992
	MRE (%)	2,791	1,336	3,313	1,202
Peleg	$k_1$	$66,874 \times 10^{-8}$	$1,981 \times 10^{-5}$	$2,369 \times 10^{-7}$	$5,346 \times 10^{-8}$
	$k_2$	$1,673 \times 10^{-5}$	1,197	1,783	1,835
	$R^2_{adj}$	0,990	0,995	0,886	0,985
	MRE (%)	1,218	3,246	22,233	13,274
Henderson-Pabis	$k_1$	1,055	0,982	1,008	1,051
	$k_2$	$4,787 \times 10^{-5}$	$1,028 \times 10^{-4}$	$6,563 \times 10^{-5}$	$1,231 \times 10^{-4}$
	$R^2_{adj}$	0,968	0,999	0,981	0,986
	MRE (%)	1,218	3,246	22,233	13,274
Logarítmico	$k_1$	1,059	$9,821 \times 10^{-1}$	1,059	1,052
	$k_2$	$4,811 \times 10^{-5}$	$1,029 \times 10^{-4}$	$6,555 \times 10^{-5}$	$1,232 \times 10^{-4}$
	$k_3$	0,000	0,000	0,000	0,000
	$R^2_{adj}$	0,959	0,998	0,988	0,989
	MRE (%)	2,543	1,284	3,242	11,029
Wang e Sing	$k_1$	$2,947 \times 10^{-10}$	$1,5524 \times 10^{-9}$	$1,963 \times 10^{10}$	$2,784 \times 10^{-10}$
	$k_2$	$-3,264 \times 10^{-10}$	$-7,340 \times 10^{-9}$	$-6,185 \times 10^{-10}$	$-9,780 \times 10^{10}$
	$R^2_{adj}$	0,965	0,985	0,973	0,981
	MRE (%)	1,627	0,650	1,961	1,231
Lewis	$k_1$	$3,562 \times 10^{-5}$	$6,074 \times 10^{-5}$	$1,305 \times 10^{-5}$	$1,320 \times 10^{-5}$
	$R^2_{adj}$	0,958	0,991	0,985	0,988
	MRE (%)	1,113	0,833	2,178	1,570
Page	$k_1$	$6,868 \times 10^{-8}$	$1,994 \times 10^{-5}$	$2,947 \times 10^{-8}$	$5,341 \times 10^{-8}$
	$k_2$	1,666	1,193	1,783	1,783
	$R^2_{adj}$	0,991	0,995	0,886	0,984
	MRE (%)	1,212	3,246	7,582	13,274
Midilli	$k_1$	$1,220 \times 10^{-7}$	$2,437 \times 10^{-5}$	$1,219 \times 10^{-7}$	$7,276 \times 10^{-8}$
	$k_2$	1,607	1,154	1,187	1,751
	$k_3$	$9,656 \times 10^{-4}$	0	$9,656 \times 10^{-4}$	0
	$R^2_{adj}$	0,991	0,995	0,996	0,985
	MRE (%)	1,212	3,246	0,178	0,300
DoisTermos	$k_1$	1,058	1,019	1,008	1,047
	$k_2$	$4,806 \times 10^{-5}$	$1,006 \times 10^{-4}$	$6,554 \times 10^{-5}$	$1,220 \times 10^{-4}$
	$k_3$	0	0	0	0
	$k_1$	1,058	1,020	1,008	1,047
	$R^2_{adj}$	0,959	0,997	0,988	0,989
	MRE (%)	2,543	10,460	3,242	11,028
Aproximação por Difusão	$k_1$	23,304	1,334	1,314	1,104
	$k_1$	23,304	1,334	1,314	1,104
	$k_3$	$2,355 \times 10^{-5}$	$2,380 \times 10^{-5}$	0,029	0,002
	$R^2_{adj}$	0,991	0,991	0,993	0,998
	MRE (%)	1,270	8,372	2,693	1,270

Fonte: Própria autora (2022).

**Figura 8.** Simulação das cinéticas de secagem da polpa de juçara, adicionada de sistema espumante através do modelo Aproximação por difusão para as temperaturas de 30, 40, 50 e 60 °C



Fonte: Própria autora (2021).

É possível notar que o erro quadrático médio aumenta com a temperatura, provavelmente devido à influência do tempo de secagem do sistema para alcançar o equilíbrio. Do mesmo modo, os valores das constantes aumentam com a temperatura.

Os coeficientes de difusão efetiva ( $m^2/s$ ), para cada temperatura estudada, foram calculados utilizando a Teoria Difusional e estão apresentados na tabela 4. A Teoria Difusional é um modelo teórico bastante utilizado, que se apoia exclusivamente na Lei de Fick, que expressa que o fluxo de massa é proporcional ao gradiente de concentração de água no interior do produto (ARAYA-FARIAS; RATTI, 2009).

**Tabela 4.** Coeficientes de difusão efetiva da água ( $Def$ ) em função da temperatura, e energia de ativação para o processo de secagem de sistema espumante com polpa de juçara.

T (°C)	Def ( $m^2/s$ )	R <sup>2</sup>	Ea (KJ/mol)
30	$3,782 \times 10^{-13}$	0,937	336,083
40	$8,056 \times 10^{-13}$	0,938	
50	$5,918 \times 10^{-13}$	0,933	
60	$8,383 \times 10^{-13}$	0,952	

Fonte: Própria autora (2022).

Na tabela 4 é possível observar que o aumento da temperatura favoreceu o processo de transferência de massa interna e, conseqüentemente, o aumento do coeficiente de difusividade, que variou de  $3,7819 \times 10^{-13}$  a  $8,3833 \times 10^{-13} \text{ m}^2/\text{s}$ .

Segundo Elpídio (2021, p. 94)

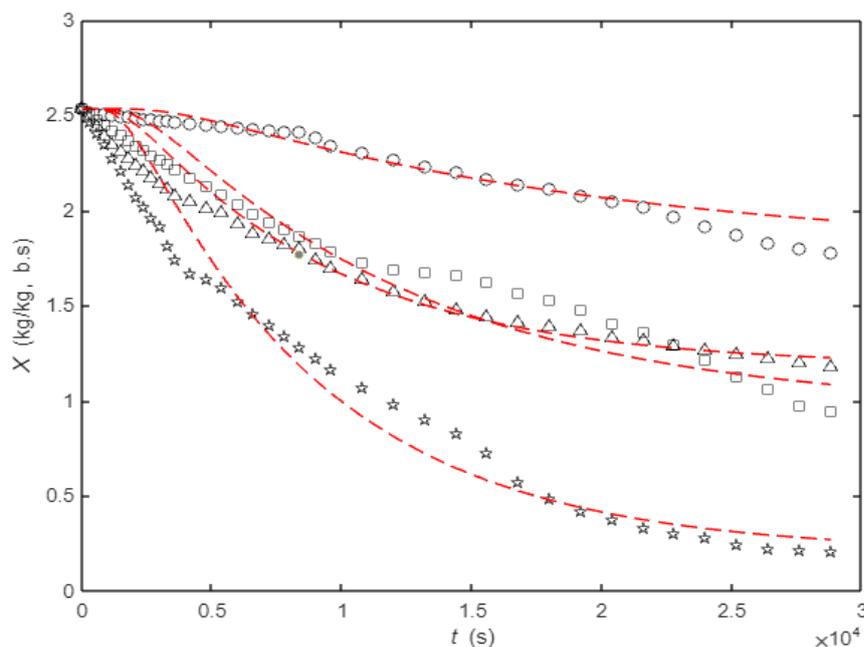
Quanto menor a densidade da espuma, menor será a condutividade térmica e, ainda assim, menor será o tempo de secagem, tendo em vista que a difusividade efetiva será maior e, desta forma, favorecerá os efeitos de transferência de massa durante a secagem da espuma.

De acordo com Alves et al. (2019), os valores de Def para materiais alimentícios encontram-se dentro de uma faixa de  $10 \times 10^{-11}$  a  $10 \times 10^{-9} \text{ m}^2/\text{s}$ , facilitando assim, a difusão das moléculas. Os valores obtidos para a secagem do sistema espumante com adição de extrato de juçara se encontram fora dessa faixa.

Em processos nos quais há movimento interno de umidade, mensurar a difusividade efetiva (Deff) é essencial, uma vez que este é um parâmetro importante da transferência de massa e auxilia na avaliação e otimização de processos (FRANCO et al., 2015)

A figura 9 traz o ajuste das curvas de secagem experimental ao modelo de difusividade efetiva para a placa infinita, nas temperaturas testadas.

**Figura 9.** Simulação das curvas de secagem do sistema espumante adicionado do extrato de polpa juçara a partir da difusividade efetiva para placa plana infinita para as temperaturas de 30 (○), 40(□), 50(△) e 60 °C (☆)



Fonte: Própria autora (2021)

Segundo Kashaninejad et al. (2007), a energia de ativação do processo difusivo é a energia mínima necessária para iniciar uma reação. A energia de ativação para o processo de secagem nas diferentes temperaturas empregadas foi de 336,0832 kJ/mol.

## 6 CONCLUSÃO

Com base nos resultados obtidos, o sistema espumante adicionado de 20% de polpa de juçara se mostrou estável nas temperaturas de secagem avaliadas, indicando a possibilidade de seu uso em formulações com alimentos. Como esperado, as variáveis temperatura e tempo influenciaram a taxa de secagem, com o tempo exibindo um comportamento inversamente proporcional à temperatura.

Os modelos de Midilli e Aproximação por difusão mostraram os melhores resultados de ajuste, principalmente para as temperaturas de 40°C e 60°C, apresentando os maiores coeficientes de determinação e erros médios relativos aceitáveis.

Os coeficientes de difusividade efetiva para a secagem do sistema espumante com polpa de juçara foram iguais a  $3,7819 \times 10^{-13}$ ,  $8,0563 \times 10^{-13}$ ,  $5,9179 \times 10^{-13}$  e  $8,3834 \times 10^{-13}$  m<sup>2</sup>/s, para as temperaturas de 30, 40, 50 e 60 °C, respectivamente. Com esses resultados, encontrou-se um valor de energia de ativação de 336,0832 kJ/mol para o sistema com geometria de placa plana infinita.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AOAC. **Official Methods of analysis – AOAC International**. Gaithersburg: AOC International 2007.
- ALVES, J. S. **Modelagem matemática de secagem da casca de abóbora moranga (*Cucurbita maxima*).** 2019. 29 f. Trabalho de conclusão de curso (Graduação em Engenharia de Alimentos), IFECT, 2019.
- AVHAD, M. R.; MARCHETTI, J. M. **Mathematical modelling of the drying kinetics of Hass avocado seeds**. *Industrial Crops and Products*, London, v. 91, n. 8. 2016
- ARAUJO, C. A. et al. **Cinética de secagem de acerola em leite de espuma e ajuste de modelos matemáticos**. *Brazilian Journal of Food Technology*, v. 20, n. 2016152, 28 2017. ISSN 1981-6723. 2017
- ARAYA-FARIAS, M.; RATTI, C. **Dehydration of Foods: General Concepts**, Capítulo de livro: *Advances in Food Dehydration*, New York. Ed. 2009
- ALEXANDRE, H. V.; FIGUEIRÊDO, R. d.; QUEIROZ, A. d. M. **Cinética de secagem da polpa de pitanga formulada**. In: congresso brasileiro de engenharia agrícola. 2006.
- ALMEIDA, M. A. **Transglutaminase e albumina de ovo em reestruturados cozidos congelados de frango**. Dissertação (Mestrado em Ciências)-Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2010.
- BAPTESTINI, F. M.; CORRÊA, P. C.; JUNQUEIRA, M. S.; RAMOS, A. M. *et al.* Modelagem matemática da secagem de espuma de graviola. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, 19, n. 12, p. 1203-1208, 2015.
- BICUDO, M. O. P.; RIBANI, R. H.; BETA, T. **Anthocyanins, phenolic acids and antioxidant properties of juçara fruits (*Euterpe edulis* M.) along the on-tree ripening process**. *Plant Foods for Human Nutrition*, v. 69, p. 142-147, 2014.
- BORGES, G.C.C. **Atividade antioxidante de extrato de açaí de juçara (*Euterpe edulis martius*) e aplicação em iogurtes**. Trabalho de Conclusão de curso (Bacharelado em Química), Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Pato Branco 2018.
- BORGES, G. S. C.; VIEIRA, F. G. K.; CAPETTI, C.; GONZAGA, L. V.; ZAMBIAZI, R. C.; MANCINI FILHO, J.; FETT, R. **Chemical characterization, bioactive compounds, and antioxidant capacity of Jussara (*Euterpe edulis*) fruit from the Atlantic Forest in southern. Brazil**. *Food Research International* 2011.
- BORGES, F. **Descrição da secagem convectiva de grãos de milho através de modelos difusivos**. -Tese (Doutorado em Engenharia de Processos) Universidade Federal de Campina Grande. Campina Grande–PB, 2016.
- CANO-HIGUITA, D.M.; VILLA-VÉLEZ, H.A.; TELIS-ROMERO, J.; VÁQUIRO, H.A.; TELIS, V.R.N. **Influence of alternative drying aids on water sorption of spray dried mango mix powders: a thermodynamic approach**. *Food and Bioproducts Processing*, v.93, p.19- 28. 2015.

CARNEIRO, D. D.; **Desidratação de alimentos por Foam-Mat Drying**. Seminário: Programa de Pós-Graduação em Ciência e Tecnologia de Alimentos. Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro. Seropédica - RJ, 2008.

CRANK, J. **The Mathematics of Diffusion**. 2nd Edition, Oxford University Press, London, 1975.

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

CERISOLA, C.M.; ANTUNES, A.Z.; PORT-CARVALHO, M. **Consumo de frutos de *Euterpe edulis* Martius (Arecaceae) por vertebrados no Parque Estadual Alberto Løfgren, São Paulo, Sudeste do Brasil**. Revista do Instituto Florestal e IF Série Registros, n.31, p.167-71, 2007.

DANTAS, S. C. M. **Desidratação de polpas de frutas pelo método foam- mat. Dissertação de mestrado, Cinética de secagem de polpa de manga (*Mangifera indica* L.) em camada de espuma**. Rev.Bras.de Gestão Ambiental (Pombal, PB),13(03) 11-19, jul./set. 2019. Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal- RN. 2010.

DELMIRO, T. M. **Secagem da cenoura (*daucus carota*) pelo método foamat**. 2016. 50 f. TCC (Graduação) - Química, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2016.

DEGHANNYA, J.; POURAHMAD, M.; GHANBARZADEH, B.; GHAFFARI, H. **Influence of foam thickness on production of lime juice powder during foam-mat drying: Experimental and numerical investigation**. Powder Technology, Vol 328, p. 470–484. 2018.

ELPÍDIO, C. M. D. A. **Secagem de ameixa pelo método de camada de espuma: otimização dos parâmetros e caracterização do produto**. Tese (Doutorado) - Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Centro de Tecnologia, Programa de Pós-graduação em Engenharia Química, Natal, RN, 2021.

ENGELHARDT, B. A. S.; ARRIECHE, L. da S. **Análise da secagem de amêndoas de cacau por convecção forçada a partir de diferentes secadores**. Brazilian Journal of Production Engineering, [S. l.], v. 2, n. 2, p. 18–26, 2016. Disponível em: [https://periodicos.ufes.br/bjpe/article/view/BJPEWEQ\\_03](https://periodicos.ufes.br/bjpe/article/view/BJPEWEQ_03). Acesso em: 6 jun. 2022.

EMBRAPA – CNPF. **Zoneamento ecológico para plantio florestais no Estado de Santa Catarina**. Curitiba, 1998.

FERREIRA, M. F. P.; PENA, R. S. **Estudo da secagem da casca do maracujá amarelo**. Revista Brasileira de Produtos Agroindustriais, v.12, p.15-28, 2010.

FELLOWS, P. J. **Tecnologia do processamento de alimentos: Princípios e prática**. 2 ed. Porto Alegre: Artmed, 2006. 602p

FERNANDES, A. A. **Avaliação da bioacessibilidade in vitro de compostos fenólicos e atividade antioxidante em polpa comercial de frutos da palmeira juçara (*Euterpe edulis***

**Martius**). 69 f. Trabalho de Conclusão (Curso de Ciência e Tecnologia de Alimentos) - Centro de Ciências Agrárias, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2015.

FRANCO, T. S. **Desidratação de suco de Yacon pelo método de camada de espuma**. Tese (doutorado). Programa de Pós Graduação em Engenharia de Alimentos. Centro de Tecnologia. Universidade Federal do Paraná. Curitiba – PR. 2015.

FREITAS, R. C. P. **Caracterização do processo de secagem em leito de espuma para obtenção de pó de manga ubá**. 100 p. Tese (Doutorado em Engenharia Agrícola) – Universidade Federal de Viçosa, Minas Gerais, 2016.

GALLETTI, M.; ZIPARRO, V.; MORELLATO, L.P. **Fruiting phenology and frugivory on the palm *Euterpe edulis* in a lowland Atlantic forest of Brazil**. *Ecotropica*, 1999.

GARCIA, R. T.; GONELI A. L. D. ; JORDAN R. A. **Protótipo de Secador Experimental para a Secagem de Produtos Agrícolas em Camada Delgada**. 8° ENEPE UFGD – 5° EPEX UEMS, Dourados – MS, 2014.

GONÇALVES, J. Q., SILVA, M. A. P., PLÁCIDO, G. R., CALIARI, M., SILVA, R. M., MOURA, L. C., & SOUZA, D. G. **Secagem da casca e polpa da banana verde (*Musa acuminata*): propriedades físicas e funcionais da farinha**. Global Science and Technology. 2016

GUTIÉRREZ, A. M. C. **Desidratação de polpa de manga em leito de espuma com e sem intermitência térmica**. São José do Rio Preto. 2015.

GUERGOLETTI, K. B., COSTABILE, A., FLORES, G., GARCIA, S., & GIBSON, G. R. **In vitro fermentation of juçara pulp (*Euterpe edulis*) by human colonic microbiota**. *Food Chemistry*, 196, 251-258. 2016.

HARDY, Z.; JIDEANI, V.A. **Foam-mat Drying Technology: A Review, Critical Reviews in Food Science and Nutrition**. 2015.

HENZ, K. L. K., AMARAL, R. C. BELLAVER, M., **Influência do pré-tratamento do fruto da juçara (*euterpes EDULIS martius*) nos compostos bioativos para produção de polpa**. In: Anais Do Simpósio Latino Americano De Ciência Dos Alimentos, 2017, Campinas. Anais eletrônicos... Campinas, Galoá, 2017. Disponível em: <<https://proceedings.science/slaca/slaca-2017/papers/influencia-do-pre-tratamento-do-fruto-da-jucara--euterpes-edulis-martius--nos-compostos-bioativos-para-producao-de-polpa?lang=en>>. Acesso em: 07 Jun. 2022.

KALEEMULLAH, S; KAILAPPAN, R. **Drying Kinetics of Red Chillies in a Rotary Dryer**. *Biosyst. Eng.*, v.92, n.1, p.15-23, 2005.

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

KHOO, H. E., Azlan, A., Tang, S. T., & Lim, S. M. **Anthocyanidins and anthocyanins: colored pigments as food, pharmaceutical ingredients, and the potential health benefits**. *Food and Nutrition Research*, 61, 2017.

LIMA, C.P.; CUNICO, M.M.; MIYAZAKI, C.M.S.; MIGUEL, O.G.; CÔCCO, L.C.; YAMAMOTO, C.I.; MIGUEL, M.D. **Conteúdo polifenólico e atividade antioxidante dos frutos da palmeira Juçara (*euterpe edulis martius*)**. Rev. Bras. Pl. Med., Botucatu, v.14, n.2, p.321-326, 2012.

MACHADO, A. K. T. **Secagem de caju (*Anacardium occidentale*) pelo método foam-mat com otimização prévia da espuma**. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Química), Departamento de Engenharia Química, Universidade Federal do Rio Grande do Norte. Natal, p. 57. 2019.

MARQUES, G. M. R. **Secagem de caldo de cana em leite de espuma e avaliação sensorial do produto**. 84f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Alimentos) - Universidade Estadual do Sudoeste da Bahia, Itapetinga, BA, 2009.

MATTA, V. M.; FREIRE, M. J.; CABRAL, L. M. C.; FURTADO, A. A. L.. **Polpa de fruta congelada**- Brasília, DF. Embrapa Informação Tecnológica, 2005.

MATSUMURA, Y.; MORI, T. **Methods of testing protein functionality**. 1 ed. London: Chapman e Hall. p. 76-109, 1996.

MELONI, P. L. S. **Produção de Frutas Desidratadas**, Viçosa - MG: CPT, 2003.

MELONI, P. L. S. **Estudos dos Parâmetros Operacionais na Secagem de Cenoura (*Daucus carota L*)**; Dissertação (Mestrado em Ciência e Tecnologia de Alimentos) - Universidade Federal de Viçosa, Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior. 1995.

NAMSANGUAN, YUVANAREE, TIA, WUARUNEE, DEVAHASTIN, SAKAMON, & SOPONRONNARIT, SOMCHART. **Drying kinetics and quality of shrimp undergoing different two- stage drying processes**. Drying Technology. 2004

NUNES, C. F.; JACOBINA, D. S.; FREY, I. A; MOREIRA, E. L. G. **Prospecção tecnológica do palmito-juçara (*euterpe edulis martius*)**. Revista INGI, v. 2, n.3, p.150-157, Jul/Ago/Set, 2018.

OLIVEIRA, A. G. P. **Secagem da polpa de coco verde pelo método de camada de espuma**. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Química), Departamento de Engenharia Química, Universidade Federal do Rio Grande do Norte. Natal, p. 48. 2019.

PACHECO, C. R. F. **Conceitos Básicos de Secagem**. São Paulo, 2002.

PARK, K. J.; YADO, M. K. M.; BROD, F. P. R. **Estudo de secagem de pera bartlett (*pyrus sp.*) em fatias**. v. 1, n. 1, p. 288-292, 2001.

PEGADO, W. R. D. Q. **Obtenção da farinha de batata-doce (*Ipomoea Batatas*) pelo processo Foam Mat**. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Química), Departamento de Engenharia Química, Universidade Federal do Rio Grande do Norte. Natal, p. 43. 2016.

PEREIRA, D. C. de S., CAMPOS, A. N. da R.; MARTINS, M. L.; MARTINS, E. M. F. **Frutos da palmeira juçara: contextualização, tecnologia e processamento**. 1. ed. Rio Pomba, MG: IF Sudeste MG – Campus Rio Pomba, 2017.

PEREIRA, D. C. de S.; CAMPOS, A. N. da R.; MARTINS, M. L.; MARTINS, E. M. F. **Extração de compostos bioativos dos frutos da juçara: o açaí da Mata Atlântica**. *Higiene Alimentar*, v. 32, p. 113-120, 2018.

SAHA, D.; BHATTACHARYA, S. **Hydrocolloids as thickening and gelling agents in food: a critical review**. *J Food Sci Technol*, 47(6):587–597, 2010.

SANTOS, L. V. **Emulsificantes – modo de ação e utilização nos alimentos**. Trabalho acadêmico apresentado ao Curso de Bacharelado em Química de Alimentos. Universidade Federal de Pelotas, Pelotas. 2008.

SANGAMITHRA, A.; VENKATACHALAM, S.; JOHN, S. G; KUPPUSWAMY, K. **Foam mat drying of food materials: a review**. *Journal of Food Processing and Preservation*, v. 39, n. 6, p. 3165–3174, 2015.

SCHULZ, M.; BORGES, G.; GONZAGA, L.; COSTA, A.; & FETT, R.; Juçara fruit (*Euterpe edulis* Mart.): Sustainable exploitation of a source of bioactive compounds. *Food Research International*. 89. 10.1016/j.foodres.2016.

SILVA, R. H. **Secagem do extrato da casca da berinjela (*Solanum melongena* L.) em spray dryer com adição de adjuvantes**. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Química) - Departamento de Engenharia Química, Universidade Federal do Rio Grande do Norte. Natal, p. 53. 2017.

SOARES, E. S. **Caracterização de aditivos para secagem de araçá-boi (*Eugenia stipitata* Mc Vaugh) em leite de espuma**. 2009. 89 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Alimentos) - Universidade Estadual do Sudoeste da Bahia, Itapetinga, 2009.

SOARES, E.C.; OLIVEIRA, G.S.F.; MAIA, G.A.; MONTEIRO, J.C.S.; SILVA Jr., A.S.; FILHO, M.S. **Desidratação da polpa de acerola (*Malpighia emarginata* D.C.) pelo processo foam-mat**. *Ciência e Tecnologia de Alimentos*, Campinas-SP, v. 21, n. 2, p.164-170, 2001.

TRAVAGLINI, D. A.; AGUIRRE, J. M.; SIQUEIRA, E. T. F. **Desidratação de frutas**. Campinas: CETEA/ITAL, 40 p. 2001.

VASCONCELOS, M. A. D. S.; MELO, F. A. B. D. **Conservação de alimentos**. 2016.

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

WEIJERS M.; SAGIS, L. M. C.; VEERMAN, C.; SPERBER, B.; LINDEN, E V. D. **Rheology and structure of ovalbumin gels at low pH and low ionic strength**. *Food Hydrocolloids*, n. 16, v. 3, p. 269-276, 2002.