



**UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ**  
**INSTITUTO DE TECNOLOGIA**  
**PROGRAMA DE PÓS – GRADUAÇÃO EM CIÊNCIA E TECNOLOGIA DE**  
**ALIMENTOS**

**REBECA DESIREÉ SOUSA DA COSTA**

**OBTENÇÃO DE UM PRODUTO ALIMENTÍCIO À BASE DE**  
**PUPUNHA E TUCUPI POR REFRACTANCE WINDOW**

**BELÉM**

**2015**



**UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ**  
**INSTITUTO DE TECNOLOGIA**  
**PROGRAMA DE PÓS – GRADUAÇÃO EM CIÊNCIA E TECNOLOGIA DE**  
**ALIMENTOS**

**REBECA DESIREÉ SOUSA DA COSTA**

**OBTENÇÃO DE UM PRODUTO ALIMENTÍCIO À BASE DE**  
**PUPUNHA E TUCUPI POR REFRACTANCE WINDOW**

Dissertação submetida ao Programa de Pós Graduação em Ciência e Tecnologia de Alimentos da Universidade Federal do Pará para a obtenção do Título de Mestre em Ciência e Tecnologia de Alimentos.

**ORIENTADORA:**

Prof<sup>a</sup>. Dr<sup>a</sup>. Luiza H. Meller da Silva

**BELÉM**

**2015**

**OBTENÇÃO DE UM PRODUTO ALIMENTÍCIO À BASE DE PUPUNHA E TUCUPI  
POR REFRACTANCE WINDOW**

**Por**

**REBECA DESIREÉ SOUSA DA COSTA**

DATA: \_\_\_\_\_

CONCEITO: \_\_\_\_\_

**BANCA EXAMINADORA**

---

Prof. Dr<sup>a</sup>. Luiza H. Meller da Silva (PPGCTA/ITEC/UFPA – Orientadora)

---

Prof. Dr. Antonio Manoel da Cruz Rodrigues (PPGCTA/ITEC/UFPA – Membro interno)

---

Prof. Dr. Rosinelson da Silva Pena (PPGCTA/ITEC/UFPA – Membro interno)

---

Prof. Dr. João Borges Laurindo (PPGEA/UFSC – Membro externo)

**BELÉM**

**2015**

Dedico este trabalho aos meus queridos pais, Maria de Fátima de Sousa e João Ferreira da Costa, pelo incentivo em todas as minhas realizações.

“O tempo que você se dedica a Deus, é o tempo que você dedica a você. Deus não vai nos livrar das lutas, mas vai nos ajudar a alcançar resultados.”

Padre Fábio de Melo

## AGRADECIMENTOS

A realização deste trabalho só foi possível com a ajuda e apoio de muitas pessoas. As palavras são poucas para expressar tamanha gratidão a elas.

Agradeço a Deus por estar me iluminando, protegendo e me dando forças para seguir em frente.

À minha querida e amada mãe, Maria de Fátima de Sousa, por ser a minha maior fonte de inspiração. Pelo seu amor, carinho, paciência, força, dedicação e incentivo em todos os momentos, sejam eles, bons ou ruins. À minha tia Maria do Carmo pela sua paciência e infinitas histórias que muitas vezes me fizeram sorrir. Ao meu pai, de alma e coração, pelo seu incentivo e orgulho, apesar de achar que ainda sou uma menina rs. À minha querida madrastra, Maria, pela mudança em que se tornou em minha vida, sou eternamente grata a você.

À Universidade Federal do Pará, ao Programa de Pós Graduação em Ciência e Tecnologia de Alimentos pela oportunidade, ao LEQ e todos os funcionários que direta ou indiretamente contribuíram para realização deste trabalho.

Aos colegas do PPGCTA pelo seu auxílio nas tarefas desenvolvidas durante o curso.

A CAPES pela provisão da bolsa de mestrado.

Agradeço a Prof<sup>a</sup>. Dr<sup>a</sup>. Luiza Helena Meller da Silva pelos vários anos confiança, paciência, incentivo e orientação.

Ao Prof. Dr. Antonio Manoel da Cruz Rodrigues pelos seus conhecimentos em engenharia e construção de equipamentos. Pela confiança, incentivo e por fazer parte da banca avaliadora.

Ao Prof. Dr. Rosinelson da Silva Pena e ao Prof. Dr. João Laurindo por terem aceitado participar da banca avaliadora e pelas inúmeras vezes que se disponibilizaram a me ajudar.

Ao Núcleo de Microscopia e Microanálise (CCB/UFV) pela utilização do MEV.

Agradeço à minha querida e eterna amiga Ana Raiza Pastana por entender o quão difícil foi manter a nossa amiga intacta durante esses 2 anos de mestrado, muitíssimo obrigada pela sua compreensão (as vezes rs) e pelas infinitas vezes em que tive seu apoio.

Ao Fernando Pereira pelos anos de amizade, companheirismo e confidencias. E aos seus pais por me tratarem tão bem, me fazendo sentir parte da família.

Agradeço aos amigos Isaías Santos e Bruna Ribeiro pela amizade durante e após a graduação.

Aos amigos Caroline Carvalho, Gyorgy Sampaio e Juliane Veiga, amigos que a engenharia de alimentos me proporcionou a conhecer. Agradeço pelos momentos de descontração e de muitas risadas.

Agradeço aos colegas de laboratório (LAMEFI), de maneira geral, pela ajuda com as análises e nos momentos de descontração. Mas em particular, à Carolina Vieira e Aline Nakata pelos vários conselhos; ao Danilo Oliveira e Danielle Corrêa pelos anos de convivência e amizade; Paula Hellayne e Cintieley Santos pela ajuda no processo de secagem, à Márlia, Samiria, Wasley, Natália, Paulo, Giselle que acompanharam esta jornada e compartilharam de momentos bons e ruins.

A todos os familiares, amigos e colegas pela dedicação, todos de uma forma ou outra são responsáveis por esta vitória.

## RESUMO

COSTA, Rebeca Desireé Sousa, **Obtenção de um produto alimentício à base de pupunha e tucupi por Refractance Window**, 2015, 80f, Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-graduação em Ciência e Tecnologia de Alimentos. Universidade Federal do Pará, Belém.

A pupunha (*Bactris gasipaes*) é considerada como importante alternativa alimentar, principalmente por causa de seu valor nutritivo, por apresentar elevados teores de fibras, gordura,  $\beta$ -caroteno e aminoácidos essenciais, e baixo teor de sódio e açúcares. O tucupi é um ingrediente muito apreciado e utilizado pela população do Norte do Brasil, subproduto da fabricação da farinha de mandioca seca. Este trabalho teve como objetivo a obtenção de filme comestível através do processo de secagem da pasta de tucupi e pupunha por Refractance Window, utilizando um aparato em regime descontínuo com os princípios do equipamento comercial, para a criação de alternativas tecnológicas e de agregação de valor a produtos como o tucupi e a pupunha. Os experimentos foram conduzidos a 70°C, temperatura da água de aquecimento, e utilizando folha de plástico de politereftalato de etileno (Mylar) transparente. Foi realizada a cinética de secagem da pasta de tucupi e pupunha para calcular os coeficientes individuais de transporte, importantes na predição dos tempos de secagem, e a aplicação de dez modelos matemáticos, para a representação do processo de secagem por Refractance Window. Nas amostras de pupunha, tucupi, pasta e nos filmes comestíveis, obtidos no processo de secagem de diferentes pastas de tucupi e pupunha, foram realizadas as análises de composição centesimal, cor instrumental, carotenoides totais, propriedades tecnológicas, propriedades mecânicas e microscopia eletrônica de varredura. O processo de secagem ocorreu totalmente à taxa decrescente, e os modelos que melhor representaram o processo de secagem foram o de Newton e o de Page. Os valores médios do coeficiente de difusividade efetiva variaram de  $1,42 \times 10^{-11}$  a  $4,05 \times 10^{-11}$  m<sup>2</sup>/s, e esses valores encontram-se dentro dos valores referenciados pela literatura para alimentos em geral. As propriedades tecnológicas demonstraram que os diferentes lotes de filme comestível apresentaram diferença significativa entre si. Quanto à higroscopicidade, os produtos se mostraram pouco higroscópicos, variando 7,29 a 8,94 (g de H<sub>2</sub>O absorvida/100 g de matéria seca). Para os resultados de cor, os valores de ( $\Delta E^*$ ) variaram significativamente para os filmes comestíveis com as mesmas condições de secagem. Além disso, os filmes apresentaram resistência à tensão e alongação na ruptura quando comparado com filmes à base de amido de frutas.

**Palavras-chave:** Pupunha, tucupi, secagem, pasta, filme comestível.

## ABSTRACT

COSTA, Rebeca Desireé Sousa, **Obtaining of a food product composed of peach palm and tucupi by Refractance Window**, 2015, 80f, Thesis (Master) - Program Graduate in Food Science and Technology. Federal University of Pará, Belém.

The peach palm (*Bactris gasipaes*) is considered as an important alternative food, mainly because of its nutritional value, because it has high fiber content, fat,  $\beta$ -carotene and essential amino acids, and low sodium and sugars contents. The tucupi is a very popular ingredient and used by the Northern population of Brazil, by-product from the manufacture of dried cassava flour. This work aimed to obtain edible film through the drying process of tucupi and peach palm paste by Refractance Window, using an apparatus in a batch regime with the principles of commercial equipment, for the creation of technological alternatives and adding value to products like tucupi and peach palm. The experiments were conducted at 70°C, heating water temperature, using transparent plastic sheet of polyethylene terephthalate (Mylar). The drying kinetics of tucupi and peach palm paste was performed to calculate the individual transport coefficients, which are important in predicting the drying times, and the application ten mathematical models to the representation of the drying process by Refractance Window. The analyzes of proximate composition, instrumental color, carotenoids, technological properties, mechanical properties and scanning electron microscopy were performed for samples of peach palm, tucupi, pastes and edible films, obtained in the drying process of different tucupi and peach palm pastes. The drying process occurred totally in falling rate, and the models that best represented the drying process were the Newton and Page. The average values of the effective diffusivity coefficient ranged from  $1.42 \times 10^{-11}$  to  $4.05 \times 10^{-11}$  m<sup>2</sup>/s, and these values are within the range referenced in the literature for food in general. The technological properties showed that different batches of edible film had significant difference between them. Regarding hygroscopicity, the products showed little hygroscopic, ranging from 7.29 to 8.94 (g H<sub>2</sub>O absorbed/100 g dry matter). For the color results, the values of ( $\Delta E^*$ ) varied significantly to the edible films with the same drying conditions. In addition, the films showed tensile strength and elongation at break when compared to the films composed of fruit starch.

**Keywords:** Peach palm, tucupi, drying, paste, edible film.

## LISTA DE FIGURAS

<b>Figura 1</b> Imagem ilustrativa: pupunheira da variedade <i>Bactris gasipaes</i> Kunth.....	4
<b>Figura 2</b> Cachos maduros de pupunha, com frutos de diferentes tipos, especialmente quanto à coloração e ao tamanho.....	5
<b>Figura 3</b> Fluxograma simplificado de processamento da manipueira para obtenção do tucupi.....	8
<b>Figura 4</b> Representação esquemática do processo de secagem por <i>spray-dryer</i> .....	11
<b>Figura 5</b> Regiões características do leite de jorro.....	12
<b>Figura 6</b> Esquema do Refractance Window.....	13
<b>Figura 7</b> Diagrama esquemático da transferência de calor na secagem por Refractance Window.....	14
<b>Figura 8</b> Transferência de calor por condução devido à atividade molecular.....	15
<b>Figura 9</b> Absorção, reflexão e transmissão da radiação incidente sobre uma superfície.....	18
<b>Figura 10</b> Espectro eletromagnético de radiação.....	19
<b>Figura 11</b> Curvas típicas de secagem, taxa de secagem e temperatura do produto.....	20
<b>Figura 12</b> Pupunhas ( <i>Bactris gasipaes</i> ) utilizadas no estudo. (A) Lote 1; (B) Lote 2; (C) Lote 3 e (D) Lote 4.....	22
<b>Figura 13</b> Esquema do dispositivo experimental utilizado na secagem por Refractance Window.....	25
<b>Figura 14</b> Espaço de cor CIELAB (Sistema de cores Hunter).....	29
<b>Figura 15</b> Diagrama CIELAB com sequencia de nuances de cores e orientação do ângulo de Hue ( $H^\circ$ ).....	30
<b>Figura 16</b> Atividade de água durante o processo de secagem de pasta de tucupi: pupunha a $70^\circ\text{C}$ .....	35
<b>Figura 17</b> Curvas de secagem experimentais de pasta de tucupi: pupunha a $70^\circ\text{C}$ , modelo de Newton (a) e Page (b), respectivamente.....	37
<b>Figura 18</b> Ajuste linear aos dados experimentais de acordo com a solução aproximada do Modelo Difusional de Fick.....	39
<b>Figura 19</b> Parâmetros de cor (L, $a^*$ e $b^*$ ) da pasta e do produto desidratado por	45

Refractance Window.....	
<b>Figura 20</b> Filme comestível obtido através do processo de secagem de pasta de tucupi: pupunha ( <i>Bactris gasipaes</i> ).....	46
<b>Figura 21</b> Parâmetros de cor (C, H° e ΔE, respectivamente) dos diferentes lotes de pasta de tucupi: pupunha e de filme comestível.....	46
<b>Figura 22</b> Micrografias eletrônicas de varredura (MEV) de diferentes filmes comestíveis obtidos por Refractance Window, ampliação de 2.00kx (10 μm) com aceleração de 15.00 kV. (a) Lote 1, (b) Lote 2, (c) Lote 3 e (d) Lote 4.....	52

## LISTA DE TABELAS

<b>Tabela 1</b> Composição de diferentes partes da pupunha ( <i>Bactris gasipaes</i> ).....	6
<b>Tabela 2</b> Composição nutricional da polpa de pupunha ( <i>Bactris gasipaes</i> ).	7
<b>Tabela 3</b> Caracterização físico-química do tucupi.....	9
<b>Tabela 4</b> Características físico-químicas do tucupi.....	10
<b>Tabela 5</b> Modelos semi-empíricos ajustados aos dados de secagem.....	28
<b>Tabela 6</b> Coeficiente de determinação, qui-quadrado e estimativa dos erros quadráticos médios dos ajustes as curvas de cinética de secagem.....	38
<b>Tabela 7</b> Coeficientes de difusão calculados a partir do ajuste do Modelo Difusional de Fick. Parâmetros das retas ( $\ln(X/X_0) = A.t + B$ ) ajustadas com respectivos coeficientes de correlação.....	39
<b>Tabela 8</b> Composição centesimal de 4 diferentes lotes de pupunha cozida.....	41
<b>Tabela 9</b> Composição centesimal da amostra de tucupi.....	42
<b>Tabela 10</b> Composição da pasta obtida a partir de 4 diferentes lotes de pupunha cozida	43
<b>Tabela 11</b> Composição centesimal de produto obtido por Refractance Window.....	44
<b>Tabela 12</b> Concentrações de carotenoides totais nos diferentes lotes de pupunha cozida, pasta e filme comestível.....	48
<b>Tabela 13</b> Higroscopicidade (HG), índice de absorção (IAA) e solubilidade (ISA) em água de filmes comestíveis.....	49
<b>Tabela 14</b> Propriedades mecânicas dos filmes comestíveis à base de tucupi e pupunha.	51

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b>	<b>1</b>
<b>2</b>	<b>OBJETIVO</b>	<b>3</b>
2.1	OBJETIVO GERAL	3
2.2	OBJETIVOS ESPECÍFICOS	3
<b>3</b>	<b>REVISÃO BIBLIOGRAFIA</b>	<b>4</b>
3.1	A PUPUNHEIRA ( <i>Bactris gasipaes</i> Kunth)	4
3.2	PUPUNHA	5
<b>3.2.1</b>	<b>Variedades</b>	<b>5</b>
<b>3.2.2</b>	<b>Composição</b>	<b>6</b>
3.3	TUCUPI	8
<b>3.3.1</b>	<b>Mandioca (<i>Manihot esculenta</i> Crantz)</b>	<b>8</b>
<b>3.3.2</b>	<b>Processamento</b>	<b>8</b>
<b>3.3.3</b>	<b>Parâmetros de qualidade</b>	<b>10</b>
3.4	SECAGEM	10
<b>3.4.1</b>	<b>Secagem de pastas e suspensões</b>	<b>11</b>
3.4.1.1	Refractance Window (RW)	13
3.4.1.1.1	Condução	15
3.4.1.1.2	Convecção	16
3.4.1.1.3	Radiação	17
3.5	CINÉTICA DE SECAGEM	20
<b>4</b>	<b>MATERIAL E MÉTODOS</b>	<b>22</b>
4.1	MATÉRIA – PRIMA	22
<b>4.1.1</b>	<b>Obtenção da pasta</b>	<b>23</b>
4.2	PROCESSO DE SECAGEM	25
<b>4.2.1</b>	<b>Cinética de secagem e modelagem matemática</b>	<b>26</b>
<b>4.2.2</b>	<b>Análises físico-químicas</b>	<b>29</b>
4.2.2.1	Cor Instrumental	29
4.2.2.2	Carotenoides totais	31
4.2.2.3	Determinação das propriedades tecnológicas	31
<b>4.2.3</b>	<b>Propriedades mecânicas</b>	<b>32</b>
<b>4.2.4</b>	<b>Microscopia eletrônica de varredura (MEV)</b>	<b>33</b>
4.3	ANÁLISE ESTATÍSTICA DOS RESULTADOS	33

<b>5</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÃO</b>	<b>35</b>
5.1	CINÉTICA DE SECAGEM	35
<b>5.1.1</b>	<b>Modelagem matemática</b>	<b>36</b>
5.1.1.1	Difusividade efetiva ( $D_{\text{eff}}$ )	38
5.2	CARACTERIZAÇÃO FÍSICO-QUÍMICA	40
5.3	COR INSTRUMENTAL	44
5.4	CAROTENOIDES TOTAIS	47
5.5	PROPRIEDADES TECNOLÓGICAS	49
5.6	PROPRIEDADES MECÂNICAS	50
5.7	MICROSCOPIA ELETRÔNICA DE VARREDURA (MEV)	52
<b>6</b>	<b>CONCLUSÃO</b>	<b>54</b>
<b>7</b>	<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS</b>	<b>55</b>
	<b>ANEXO</b>	<b>65</b>

## 1 INTRODUÇÃO

A Região Norte do Brasil se caracteriza por apresentar uma disponibilidade de frutos ricos em pró-vitamina A, e entre eles destaca-se a pupunha (*Bactris gasipaes*). O cultivo da pupunheira tem sido realizado em larga escala devido o crescente interesse pelas múltiplas possibilidades de uso, uma vez que a grande variedade de espécies de palmeiras dos países tropicais representa fonte para a produção de óleo, farinha e amido, e seus produtos têm sido tradicionalmente utilizados pelas populações como fonte alimentícia. A característica amilácea da pupunha indica sua utilização para a produção de farinha e de bebidas alcoólicas (YOKOMIZO; NETO, 2003). O principal uso do fruto é cozido na forma inteira e consumido como parte do lanche ou do café da manhã.

A pupunha é considerada como importante alternativa alimentar, principalmente por causa do valor nutritivo, em termos de níveis elevados de fibra, gordura, carotenoides (ROJAZ-GARDANZO et al., 2011) e aminoácidos essenciais (YUYAMA et al., 2003). Segundo Clement et al. (2004); Da Silva e Clement (2005) e Leterme et al. (2005), a pupunha possui alto valor energético por apresentar valores consideráveis de amido e gordura.

No Pará, o principal produto extraído da mandioca é a farinha de mesa, porém, durante o processo de fabricação da farinha, as raízes de mandioca brava de polpa amarela são trituradas e prensadas para a remoção do líquido denominado manipueira (FERREIRA et al., 2001).

Tais produtos deterioram com grande facilidade, dificultando a comercialização de toda a safra *in natura*. A industrialização se apresenta como uma importante alternativa para o excedente de produção. Mais especificamente, as frutas desidratadas ou secas são produtos com maior valor agregado e entram na composição de diversos produtos da agroindústria de alimentos, que são consumidos no mercado interno brasileiro e também bastante apreciados no mercado externo. A crescente demanda do mercado consumidor por novos produtos estimula a utilização de matérias-primas regionais, como é o caso da pupunha (*Bactris gasipaes*) e do tucupi (CLEMENT; MORA-URPÍ, 1987; CARVALHO; NASCIMENTO; MÜLLER, 2010).

A demanda dos consumidores por alimentos saudáveis em sua dieta tem aumentado nos últimos anos, todavia o tempo para a realização das refeições tem diminuído e a busca por alimentos industrializados, que mantenham as características originais, é cada vez maior (PARK et al., 2006).

A secagem é uma das formas de processo mais utilizadas para preservar os alimentos, pois promove a redução da atividade da água do produto, o que inibe o crescimento microbiano e reduz as reações de degradação, resultando em uma maior estabilidade (PAVAN; SCHIMIDT; FENG, 2012).

A secagem por Refractance Window (RW) é um método relativamente novo, que envolve a aplicação do produto, em uma camada fina, sobre uma folha de plástico transparente, a qual apresenta estabilidade térmica e resistência a altas temperaturas e deformação. Sob a folha de plástico, circula água quente que transporta energia térmica, condução, convecção e radiação, para o produto (NINDO; TANG, 2007). O método utiliza temperaturas moderadas ou temperaturas elevadas, e curtos tempos de secagem, conforme reportado por alguns autores como Abonyi et al. (2002) e Nindo et al. (2003), para resultar em produtos de alta qualidade.

Nesse contexto, será estudado neste trabalho o processo de secagem por Refractance Window, visando compreender processo e procedimentos adequados para a produção de um filme comestível à base de pupunha (*Bactris gasipaes*) e tucupi.

## 2 OBJETIVO

### 2.1 OBJETIVO GERAL

Estudar e analisar o processo de secagem por Refractance Window para a criação de alternativas tecnológicas e de agregação de valor a produtos como o tucupi e a pupunha (*Bactris gasipaes*), no desenvolvimento de um novo produto, com qualidade funcional e tecnológica superior, resguardando características sensoriais do produto *in natura*, no que diz respeito à cor e ao sabor.

### 2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Estudar a cinética de secagem da pasta de pupunha e tucupi, por Refractance Window, com objetivo de calcular os coeficientes individuais de transporte, importantes para a predição dos tempos de secagem e para o projeto de equipamentos;
- Caracterizar o produto final, quanto ao conteúdo de umidade, atividade de água, pH, cor instrumental e carotenoides totais;
- Estudar propriedades tecnológicas, como: higroscopicidade, índice de absorção e solubilidade em água do filme comestível;
- Estudar as propriedades mecânicas do produto, como: resistência à tração e a porcentagem de alongação até a ruptura;
- Analisar as características morfológicas do filme comestível através da microscopia eletrônica de varredura (MEV).

### 3 REVISÃO BIBLIOGRAFIA

#### 3.1 A PUPUNHEIRA (*Bactris gasipaes* Kunth)

A pupunheira (Figura 1) é uma palmeira nativa da região Amazônica, bastante comum nos Estados do Pará, Amazonas, Acre, Roraima e Amapá, e também pode ser encontrada no Maranhão e em outros estados, nos quais já se adaptou, como a Bahia e São Paulo. Pertencente à família Aracaceae, e produz frutos comestíveis de sabor muito apreciado na região. Considerado alimento básico em algumas regiões, o fruto possui alto valor nutritivo e definitivamente está integrado aos hábitos alimentares da população amazônica (CLEMENT, 2000).



**Figura 1** Imagem ilustrativa: pupunheira da variedade *Bactris gasipaes* Kunth.

**Fonte:** Celestino Pesce (2009).

Os frutos da pupunheira, geralmente consumidos após cozimento em água e sal, podem também ser utilizados na fabricação de farinhas para usos variados (FERREIRA; PENA, 2003), representando uma fonte de alimento potencialmente nutritivo, por causa do seu alto conteúdo em carotenoides biodisponíveis (ROJAZ-GARDANZO et al., 2011).

O cultivo da pupunheira é realizado em toda Amazônia. O pico da safra coincide com a estação chuvosa e os frutos, em cachos, são comercializados em feiras. Pesquisas mostram diferença na concentração da maioria dos constituintes químicos do fruto (CLEMENT;

ARKCOLL, 1985), porém, para os consumidores, a quantidade de água e gordura influencia na preferência e delimitam a finalidade de uso.

## 3.2 PUPUNHA

### 3.2.1 Variedades

Segundo Clement et al. (2004), a pupunha foi domesticada pelos Ameríndios, o que resultou em diversas variedades tradicionais, que se diferenciam principalmente pelo tamanho do fruto e pela percentagem de óleo; porém, estudos sobre as variedades de pupunha ainda não estão bem definidos. De forma geral, as variedades de pupunha são agrupadas segundo a coloração (Figura 2) da casca dos frutos (do vermelho intenso ao alaranjado e do amarelo ao rajado de verde-amarelo), o teor de lipídios na polpa e a existência ou não de sementes nos frutos.



**Figura 2** Cachos maduros de pupunha, com frutos de diferentes variedades, especialmente quanto à coloração e ao tamanho.

**Fonte:** Clement et al. (2004).

As pupunheiras são classificadas, também, em espécies, com base na espessura da polpa, isto é, microcarpa, mesocarpa e macrocarpa (EMBRAPA, 2007). E de acordo com Pesce (2009) as pupunheiras e seus frutos podem ser classificados como:

- a. Pupunha-marajá (*Guilielma speciosa* var. *flava* Barb. Rodr. = *Bactris gasipaes* Kunth): esta variedade cresce em moitas, é árvore não muito grande, com frutos de cor verde-amarelada. Não são tão oleosas quanto às outras variedades. Os frutos desta variedade possuem o peso médio de 26,5 gramas quando verdes e uma umidade de 60%.

- b. Pupunha-piranga (*Guilielma speciosa* var. *coccinea* Barb. Rodr. = *Bactris gasipaes* Kunth): que produz frutos com menos polpa, porém mais saborosos.
- c. Tapiré (*Guilielma speciosa* var. *ochracea* Barb.Rodr.): Árvore de produto de cultivo, há anos apresenta caracteres diferentes das variedades selvagens. Há poucos espinhos no tronco e os frutos não têm sementes. Os índios a chamam de pupunha, alteração de pipinha, de pipele, pinha, e brasa.

### 3.2.2 Composição

Na Tabela 1 estão apresentados valores referentes aos componentes de diferentes partes do fruto da pupunheira (PESCE, 2009).

**Tabela 1** Composição de diferentes partes da pupunha (*Bactris gasipaes*).

Parte do fruto	Componentes (%)
Massa externa oleosa	82,70
Caroço lenhoso	9
Amêndoa	8,3

**Fonte:** Celestino Pesce (2009).

Dependendo da variedade o peso do fruto pode variar de 20 a 100 g, a polpa apresenta consistência seca, feculenta ou oleosa. Para o consumo direto do fruto cozido, preferem-se variedades que tenham, como características, frutos grandes e com 10 a 20% de lipídio na polpa (EMBRAPA, 2007).

Os frutos da pupunheira apresentam teor de umidade, que dependendo da variedade pode chegar a 65 g/100g de amostra (b.u) (CARVALHO et al., 2013). A alta perecibilidade dos frutos, aliada as dificuldades de armazenamento nos meses de safra gera a necessidade de desenvolvimento de novas tecnologias para minimizar os efeitos adversos provocados nos alimentos. Esse é o caso das frutas desidratadas utilizadas para consumo imediato ou como ingredientes na formulação de diversos tipos de alimentos, tais como em produtos de confeitaria, sorvetes, sobremesas congeladas, saladas de frutas e iogurtes, ou seja, evitar à saturação do mercado de frutos *in natura* e diversificar a demanda para a pupunha.

Os frutos da pupunheira constituem um alimento essencialmente energético, contém quantidades significativas de lipídios, caroteno (pró – vitamina A), vitaminas B e C; e pequenas quantidades de proteínas e ferro (ROJAZ-GARDANZO et al., 2011). Os frutos e

seus derivados quando crus contém uma enzima que inibe a digestão (peroxidase) de proteínas, e um ácido que provoca irritação na mucosa da boca.

A Tabela 2 demonstra a diferença na composição nutricional entre as pupunhas *in natura* e cozidas.

**Tabela 2** Composição nutricional da polpa de pupunha (*Bactris gasipaes*).

Componentes*	<i>In natura</i>		Cozida	
	Pires (2013)	Andrade, Pantoja e Maeda (2003)	Pires (2013)	Andrade, Pantoja e Maeda (2003)
Umidade (g/100g)	57,43 ± 0,7	46,0 ± 0,42	55,8 ± 10,2	54,63 ± 0,28
Lipídios (g/100g)	4,3 ± 0,2	5,93 ± 0,43	5,91 ± 0,2	4,52 ± 0,23
Proteínas (g/100g)	1,97 ± 0,1	1,30 ± 0,09	2,06 ± 0,02	1,16 ± 0,07
Cinzas (g/100g)	0,45 ± 0,01	0,72 ± 0,16	0,57 ± 0,02	0,50 ± 0,13
Carboidratos (g/100g)	35,85 ± 0,5	NI	34,99 ± 0,4	NI
Fibras totais (g/100g)	NI	0,76 ± 0,12	NI	0,69 ± 0,20
Carotenoides (µg/100g)	NI	2,46 ± 0,31	NI	4,71 ± 0,40

\*Valores expressos em base úmida;

NI Valores não identificados.

A população da Região Amazônica conserva e/ou utiliza os frutos na forma desidratada (farinha), apertizada (juntamente com xarope de açúcar ou salmoura), frita (como tira – gosto) e cozida (com ou sem adição de sal). A conservação e processamento ainda são realizados de forma artesanal e em escala doméstica; porém, quantidades maiores são processadas em algumas regiões produtoras, destacando-se as do projeto “Reca” (Reflorestamento Econômico Consorciado e Adensado) e “Aspruve” (Associação dos Produtores Rurais Vendedora).

Na Região Norte e Nordeste, o potencial econômico dos frutos da pupunheira decorre da grande aceitação e diversas formas de consumo, alta qualidade alimentícia em função do seu valor energético e pró – vitamínico (ROJAZ-GARDANZO et al., 2011) e alta produtividade agrícola (CLEMENT, 1987).

### 3.3 TUCUPI

#### 3.3.1 Mandioca (*Manihot esculenta* Crantz)

A mandioca (*Manihot esculenta* Crantz) destaca-se entre as tuberosas mais comercializadas pelos países em desenvolvimento pela facilidade de plantio, pois é produzida em pequenas áreas sem a necessidade de recursos tecnológicos avançados. A mandioca destaca-se como importante produto da agricultura familiar no Norte e Nordeste do Brasil, onde números expressivos de indivíduos do meio rural vivem da produção e processamento da farinha e outros produtos, constituindo atividades de baixo investimento e fácil comercialização (CHISTÉ; COHEN, 2011).

A mandioca pertence ao grupo de plantas cianogênicas por apresentar glicosídeos cianogênicos em sua composição. De acordo com Cagnon et al. (2002), tais glicosídeos, como a linamarina e lotaustralina (proporção de 93:7 no tubérculo), após ruptura da estrutura celular da raiz, entram em contato com as enzimas presentes (linamarase), e degradam liberando ácido cianídrico (HCN), que é o princípio tóxico da mandioca e cuja ingestão, ou mesmo inalação, representa sério perigo à saúde, podendo haver casos extremos de envenenamento.

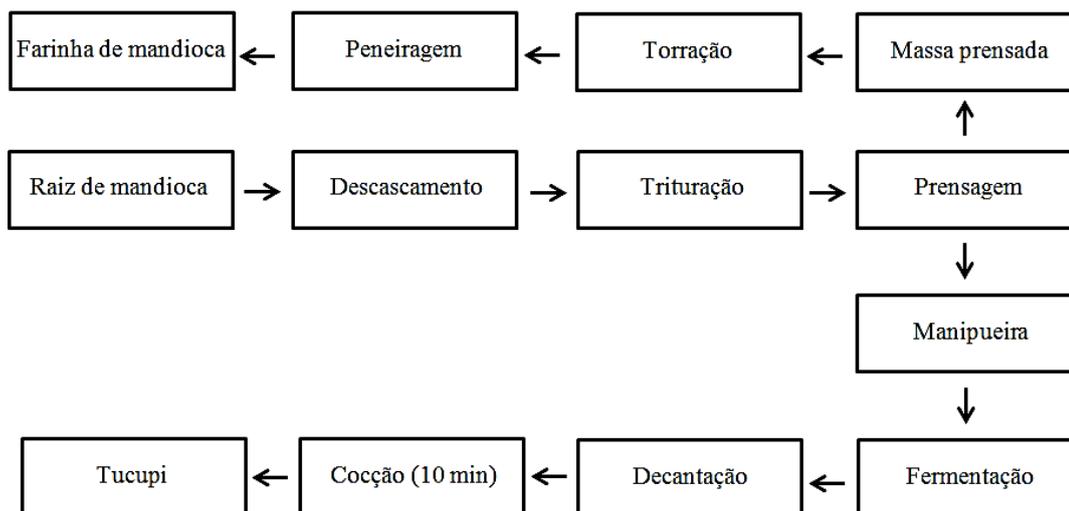
De acordo com Bourdoux et al. (1982) as mandiocas podem ser classificadas em 3 categorias, quanto ao seu potencial tóxico, com base em seu conteúdo cianogênico:

- a. Inócuas: menos do que 50 mg HCN.kg<sup>-1</sup> polpa frescas;
- b. Moderadamente venenosas: entre 50 e 100 mg HCN.kg<sup>-1</sup> de polpa fresca;
- c. Perigosamente venenosas (mandioca brava): acima de 100 mg HCN.kg<sup>-1</sup>.

#### 3.3.2 Processamento

Uma das principais formas de aproveitamento das raízes de mandioca é na produção de farinha. Durante o processo de fabricação da farinha de mandioca, as raízes trituradas são prensadas para a remoção de seu líquido, e a massa prensada segue para a torração. O resíduo líquido é denominado de manipueira. Da manipueira produz-se o tucupi, molho parcialmente fermentado e condimentado que é considerado um ingrediente muito apreciado e utilizado na culinária paraense. O tacacá e o pato no tucupi são exemplos de pratos típicos da Região Norte, muito apreciados por sua população, cujo ingrediente principal na formulação é o tucupi (CHISTÉ; COHEN, 2011).

Segundo Chisté e Cohen (2011), a produção de tucupi (Figura 3) é semelhante à utilizada nas casas de farinha do interior do Pará, onde as raízes de mandioca são lavadas, descascadas, trituradas, prensadas (para a remoção da manipueira) e o líquido obtido é fermentado e deixado em repouso por 3 dias a temperatura ambiente. Durante o repouso, há decantação do amido, que posteriormente é removido. Após a etapa de fermentação da manipueira é realizada cocção para obtenção do tucupi.



**Figura 3** Fluxograma simplificado de processamento da manipueira para obtenção do tucupi.

**Fonte:** Adaptado de Chisté e Cohen (2011).

Na Tabela 3 é apresentada a caracterização físico-química de amostra de tucupi produzido e comercializado em Belém (PA).

**Tabela 3** Caracterização físico-química do tucupi.

Componentes	Tucupi
Umidade (%)	95,05 ± 0,00
Sólidos totais (%)	4,95 ± 0,00
Cinzas (%)	0,70 ± 0,01
Acidez (meq NaOH.100 mL <sup>-1</sup> )	4,23 ± 0,00
pH	4,35 ± 0,01
Proteínas (%)	0,61 ± 0,01

**Fonte:** Chisté, Cohen e Oliveira (2007).

Porém em 2008, a Comissão Estadual de Padronização de Produtos de Origem Vegetal estabeleceu um regulamento técnico criando o Padrão de Identidade e Qualidade do

Tucupi para comercialização no Estado do Pará, Instrução Normativa n° 001/2008 (ADEPARÁ, 2008). Onde o objetivo principal é estabelecer os padrões de identidade e as características mínimas de qualidade gerais a que deverá obedecer ao produto “TUCUPI” destinado ao consumo como alimento.

### 3.3.3 Parâmetros de qualidade

Chisté, Cohen e Oliveira (2007) estudaram o tucupi comercializado na cidade de Belém e a composição variou de 94,64 a 97,46 de umidade (g/100 g), 0,18 a 1,08 de resíduo mineral fixo (g/100 g), 0,33 a 0,66 de proteínas (g/100 g), sendo considerado alimento de pH baixo, 3,00 a 4,35.

De acordo com a Instrução Normativa n°001/2008, as amostras de tucupi produzidas no Estado do Pará, devem apresentar valores, referentes à composição físico-química, entre o máximo e mínimo permitidos pela Normativa (Tabela 4).

**Tabela 4** Características físico-químicas do tucupi.

Determinação	Mínimo	Máximo
Sólidos totais (g/100g)	2,5	6,5
pH	3,5	4,3
Acidez total expressa em ácido lático (g/100mL)	0,1	0,8
Cinzas (g/L)	3,912	-
Açúcares (g/L)	-	15

**Fonte:** ADEPARÁ (2008).

O tucupi produzido no Estado do Pará, além de se apresentar dentro dos padrões estabelecidos pela Tabela 4, deve obedecer as seguintes características, como: apresentar duas fases distintas, uma sólida e a outra líquida, cujas características são perceptíveis quando o produto está em repouso; coloração variando de amarelo claro ao amarelo intenso, quando homogeneizado; sabor levemente ácido e aroma próprio.

## 3.4 SECAGEM

O processo de secagem evoluiu a partir da simples utilização de energia solar, e com os avanços tecnológicos, criaram-se outros processos de secagem, como a secagem em estufa, a secagem em tabuleiro, a secagem em túnel, a secagem por pulverização, a secagem em tambor, a liofilização, a desidratação osmótica, a extrusão, a fluidização, e o uso de micro-

ondas e de rádio frequência (RF) e a Refractance Window (RW) (BARBOSA–CÁNOVAS, 2001).

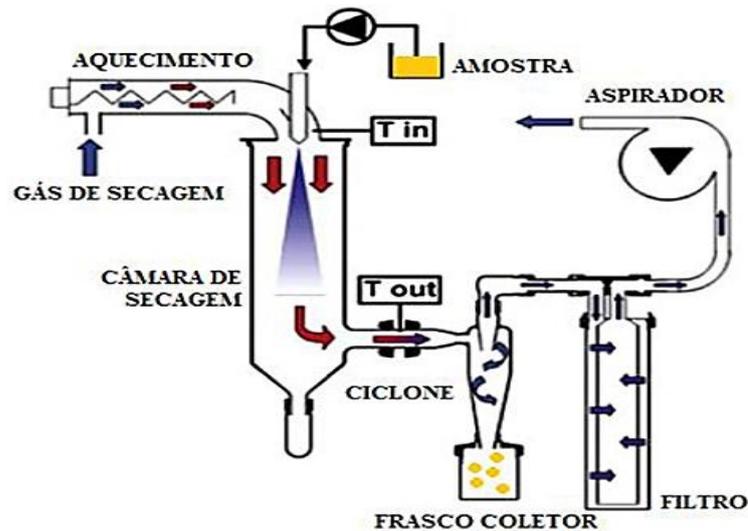
A secagem é um processo em que a água é removida para deter ou retardar o crescimento de micro-organismos, bem como a ocorrência de reações químicas. A secagem de alimentos não se limita à escolha de um método, pois os conceitos físico-químicos associados com a desidratação de alimentos precisam ser entendidos por uma avaliação adequada dos fenômenos de secagem em qualquer produto alimentício. Atividade de água, temperatura de transição vítrea, mecanismos e teorias de desidratação e alterações químicas e físicas devem ser reconhecidos como elementos-chave para qualquer operação de secagem de alimentos, fármacos, etc. (VEGA–MERCADO; GÓGORA–NIETO; BARBOSA–CÁNOVAS, 2001).

### 3.4.1 Secagem de pastas e suspensões

As pastas alimentícias podem ser consideradas, do ponto de vista reológico, como um sistema coloidal, ou seja, um sistema sólido-líquido constituído de partículas microscópicas ou de partículas coloidais dispersas em um líquido (FREIRE, 1992). A técnica de secagem de pastas e suspensões vem sendo utilizada em diversos tipos de materiais, tais como sangue animal, leveduras, polpas de frutas, algas e microalgas (MEDEIROS, 2001; JACOB-LOPES et al., 2006; SAFFARI; LANGRISH, 2014).

A secagem por pulverização, nebulização ou *spray-dryer* (Figura 4), iniciou na metade do século XVIII. Porém, a princípio, a utilização era em escala industrial. Os primeiros produtos obtidos em larga escala por *spray-dryer* foram o leite e o sabão em pó (MASTERS, 1991). A partir de então, se disseminou pela indústria de processos em geral, sendo, especialmente aplicada para a secagem de produtos alimentícios e farmacêuticos (CAL; SOLLOHUB, 2010).

A secagem por *spray-dryer* é uma técnica extremamente versátil, pois é possível secar os mais variados produtos, em diversas concentrações e condições (FREITAS et al., 2010). No que se refere ao processo, é possível o controle de variáveis como a temperatura de entrada e saída do ar de secagem, a vazão do ar, a vazão de alimentação do produto e o tipo de atomização. Permite também influenciar em importantes propriedades do produto seco, como o tamanho de partícula obtida, a higroscopicidade, a escoabilidade, atividade de água e a compressibilidade (OLIVEIRA; PETROVICK, 2010).

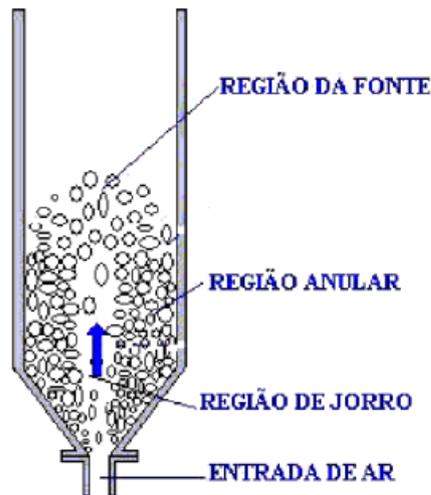


**Figura 4** Representação esquemática do processo de secagem por *spray-dryer*.

Fonte: Riekens (2013), adaptado de Aghbashlo et al. (2012)

A secagem em leito de jorro ocupa um lugar relevante nas operações envolvendo contato entre as partículas sólidas e fluidos. A técnica do leito de jorro, desenvolvida inicialmente para a secagem de produtos granulares, vem sendo aplicada também na secagem de cereais, recobrimento de partículas, cristalização, reações químicas e secagem de pastas e suspensões (MEDEIROS et al., 2002; NIAMNUY et al., 2008; KAHYAOGLU; SAHIN; SUMNU, 2010).

A Figura 5 apresenta o sistema de leito de jorro, que consiste basicamente de uma coluna cilíndrica de base cônica, contendo partículas sólidas de tamanho considerável, maiores que 1 mm, e de um orifício de entrada do fluido localizado na parte inferior central da base cônica. Essa base cônica é utilizada para aumentar o movimento de sólidos e eliminar espaços mortos no fundo do leito. O próprio vaso normalmente é um cilindro circular, entretanto, o uso de um vaso completamente cônico foi prática comum em alguns estudos (PASSOS et al., 1997).



**Figura 5** Regiões características do leito de jorro.

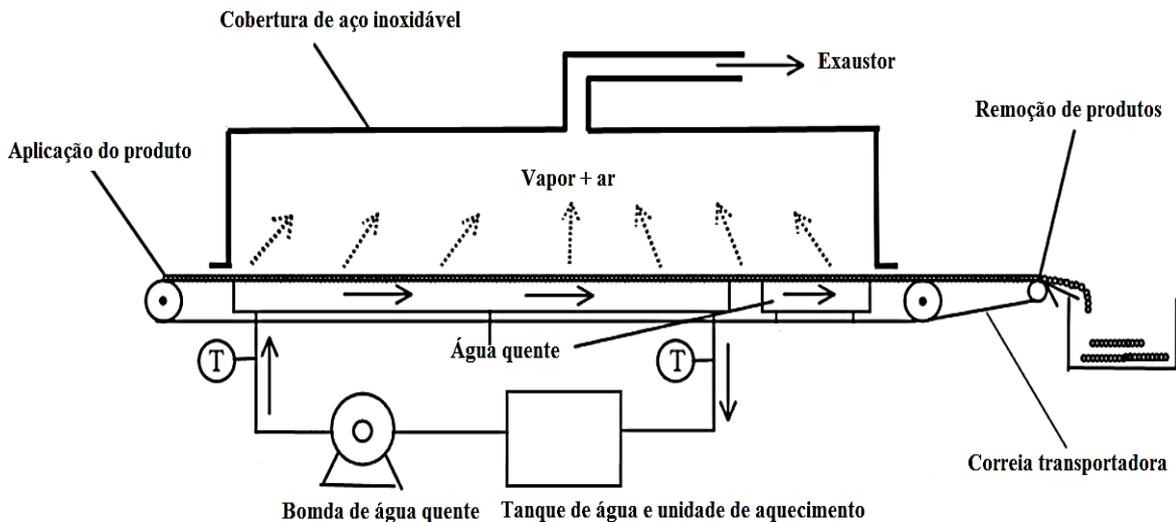
**Fonte:** Duarte (2006)

O ar em alta velocidade é adicionado a este conjunto pela base inferior do tronco de cone, permeando entre as partículas. A intensa circulação das partículas começa quando a vazão do ar é suficiente para promover o transporte pneumático das mesmas na região central do leito. Ao atingirem a fonte, as partículas perdem totalmente a sua energia cinética, caindo posteriormente na região anular e aí fazem um movimento descendente até regiões inferiores do leito. Sendo que região anular é caracterizada por possuir baixa porosidade (MATHUR; EPSTEIN, 1974; EPSTEIN; GRACE, 2011).

#### 3.4.1.1 Refractance Window (RW)

O processo de secagem por Refractance Window (Figura 6) foi patenteado por Magoon (1986) e foi introduzido pela empresa MCD Technologies no ano de 2000, em que a água é utilizada para transmitir o calor para o produto a ser seco.

Dependendo das condições de secagem e das condições intrínsecas de cada material a ser seco, o processo de Refractance Window pode diminuir o efeito da secagem dos alimentos e ingredientes no que diz respeito à cor, sabor e nutrientes, e tem sido estudado como um método potencial alternativo à liofilização, *spray-dryer* e secagem em tambor para produção de *flakes* e pós (EVRANUS, 2011).



**Figura 6** Esquema do Refractance Window.

**Fonte:** Nindo e Tang (2007), adaptado de Abonyi et al. (2001)

No processo de secagem por Refractance Window, uma fina camada do produto é uniformemente aplicada sobre a superfície de um filme de poliéster transparente especial (*Mylar*, do fabricante *DuPont*), que flutua em água quente (ou qualquer outro líquido), utilizada para transmitir o calor ao produto pelos mecanismos de condução, convecção e radiação, considerando que a radiação passa diretamente através da membrana para o produto a ser seco. Além de lidar com uma gama diversificada de produtos líquidos, o processo de Refractance Window se aplica a transformar polpa de frutas, legumes, ervas e outros produtos relacionados em pó, filmes comestíveis e concentrados com alto valor agregado (NINDO; TANG, 2007).

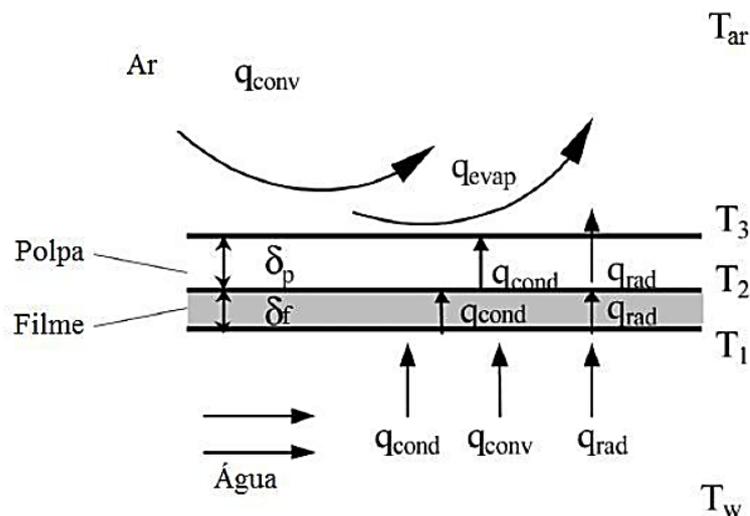
Abonyi et al. (2001) estudaram as características de retenção de qualidade de pastas de morangos e cenouras por Refractance Window em comparação com secagem em tambor, *spray-dryer* e liofilização. Nindo, Powers e Tang (2007) analisaram a influência da secagem por Refractance Window em comparação com a secagem em evaporador convencional (vitamina C em suco de mirtilo e de suco de cranberry) e o efeito de temperaturas de água do processo e produto da taxa de evaporação.

Ochoa-Martínez et al. (2011) compararam duas técnicas de secagem, secagem em bandeja e por Refractance Window, em relação à cinética de secagem, difusividade, e as características finais de fatias de manga (cor e atividade de água), para vários valores da espessura da amostra e através da utilização de um sistema estacionário.

Caparino et al. (2012) avaliaram a influência de quatro métodos de secagem (secagem por Refractance Window, liofilização, secagem em tambor e *spray-dryer*) sobre as

propriedades físicas e microestruturas de pós de manga para proporcionar um melhor entendimento na escolha de técnicas de secagem que pode ser aplicado para a produção de manga em pó.

O equipamento industrial (Figura 6) conta com um sistema de exaustão, para a remoção do vapor d'água. Na RW os três mecanismos de transferência de calor, condução, convecção e radiação, contribuem para a secagem (NINDO; TANG, 2007). A energia térmica para a secagem é oriunda da água quente, e é transferida para o material úmido por condução e radiação, através da interface do filme, o qual é relativamente transparente à radiação infravermelha (NINDO et al., 2007). A Figura 7 apresenta um esquema de como o calor é transferido da circulação de água quente para o produto a ser seco.



**Figura 7** Diagrama esquemático da transferência de calor na secagem por Refractance Window

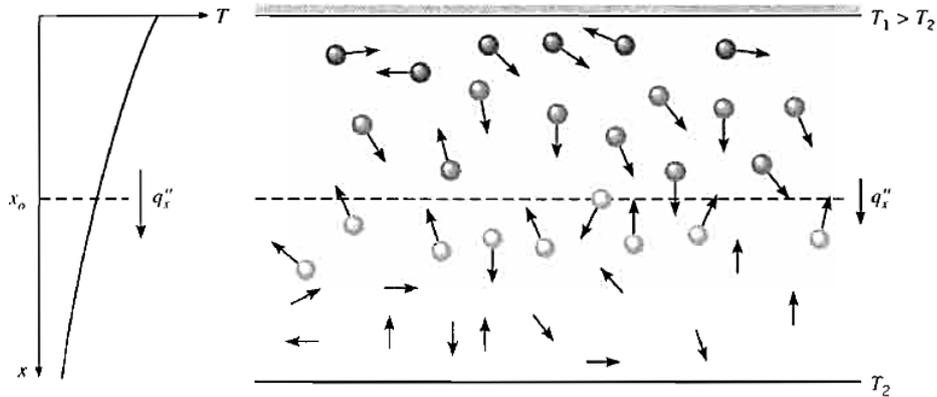
**Fonte:** Castoldi (2012) Adaptado de Nindo e Tang (2006).

Segundo Castoldi (2012), a tecnologia RW tem um amplo potencial, uma vez que o equipamento é simples, em comparação com outros secadores. Para a secagem de uma quantidade semelhante de produto, o custo de um equipamento de RW é cerca de um terço do custo de um liofilizador, e seu consumo de energia é inferior à metade (OCHOA-MARTÍNEZ et al., 2012).

#### 3.4.1.1.1 Condução

A condução é o processo de transferência de calor em que a energia térmica é transferida entre átomos e/ou moléculas de uma substância. Não há deslocamento global da matéria em escala macroscópica. As partículas mais energéticas transmitem a energia para as

partículas vizinhas, menos energizadas, devido às interações entre elas, como apresentado na Figura 8. Na presença de um gradiente de temperatura entre duas regiões em um mesmo meio ou entre dois meios em contato, a transferência de energia por condução ocorre na direção da diminuição da temperatura (BERGMAN et al., 2011).



**Figura 8** Transferência de calor por condução devido à atividade molecular.

**Fonte:** Bergman et al. (2011).

Processos de transferência de calor podem ser quantificados em termos de equações de taxa apropriadas. Essas equações podem ser utilizadas para calcular a quantidade de energia a ser transferida por unidade de tempo. Para a condução de calor, a equação da taxa é conhecida como Lei de Fourier (BERGMAN et al., 2011). Para um plano unidimensional de distribuição de temperatura, a equação do fluxo é expressa como (Equação 1):

$$q_x'' = -k \frac{dT}{dx} \quad \text{Eq. (1)}$$

Onde:

Fluxo de calor ( $\text{W}/\text{m}^2$ ) é a taxa de transferência de calor na direção  $x$  por unidade de área, perpendicular à direção de transferência e proporcional ao gradiente de temperatura,  $dT/dx$ , nessa direção.

O parâmetro  $k$  é uma propriedade de transporte conhecida como: condutividade térmica  $\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$  e é uma característica do material. O sinal negativo se deve ao fato do calor ser transferido na direção da diminuição da temperatura.

#### 3.4.1.1.2 Convecção

A convecção é um modo de transferência de calor constituído por dois mecanismos. A energia pode ser transferida devido ao movimento molecular aleatório (difusão) e pela

movimentação macroscópica de grandes quantidades do fluido (advecção). A advecção está associada com o fato de que, em qualquer instante, um grande número de moléculas está se movendo como agregados. Esse movimento, na presença de um gradiente de temperatura, contribui para a transferência de calor, uma vez que as moléculas no agregado conservam seu movimento aleatório (BERGMAN et al., 2011).

A convecção ocorre entre um fluido em movimento e uma superfície delimitadora, quando os dois estão em diferentes temperaturas. Uma consequência da interação de uma superfície e o fluxo de um fluido é o desenvolvimento de uma região no fluido através da qual a temperatura varia de  $T_s$  para  $y = 0$  até  $T_\infty$  para o fluxo exterior. Esta região é chamada de camada-limite térmica. Em qualquer caso, se  $T_s > T_\infty$ , a transferência de calor por convecção irá ocorrer a partir da superfície para o fluxo exterior (BERGMAN et al., 2011).

A transferência de calor por convecção pode ser classificada de acordo com a natureza do escoamento do fluido, mas independentemente da natureza do processo de transferência de calor por convecção, a taxa é expressa como (Equação 2):

$$q'' = h(T_s - T_\infty) \quad \text{Eq. (2)}$$

Onde:

Fluxo de calor por convecção  $q''$  ( $\text{W}/\text{m}^2$ ) é proporcional à diferença de temperatura entre a superfície e o fluido,  $T_s$  e  $T_\infty$ , respectivamente. Esta expressão é conhecida como Lei de Newton do arrefecimento, e o parâmetro  $h$   $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$  é denominado como coeficiente de transferência de calor por convecção.

#### 3.4.1.1.3 Radiação

A radiação térmica é a energia emitida por toda a matéria que se encontra a uma temperatura acima do zero absoluto. Independentemente da forma da matéria, a emissão pode ser atribuída a alterações nas configurações eletrônicas dos átomos ou moléculas constituintes. A energia radiativa é transportada por ondas eletromagnéticas ou, alternativamente, por fótons. Enquanto a transferência de energia por condução ou convecção requer a presença de um suporte material, a radiação não o faz. Na verdade, a transferência de calor por radiação ocorre mais eficientemente no vácuo (BERGMAN et al., 2011).

A radiação que é emitida pela superfície se origina a partir da energia térmica da matéria e a taxa na qual a energia é libertada, por unidade de área ( $\text{W}/\text{m}^2$ ), é denominada de poder emissivo,  $E$  (Equação 3). Existe um limite superior para o poder emissivo, que é previsto pela Lei de Stefan- Boltzmann:

$$E_b = \sigma T_S^4 \quad \text{Eq. (3)}$$

Onde:

$T_s$  é a temperatura absoluta (K) da superfície e  $\sigma$  é a constante de Stefan- Boltzmann ( $\sigma = 5.67 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}^4$ ). A superfície descrita pela Lei de Stefan-Boltzmann é chamada de radiador ideal ou corpo negro.

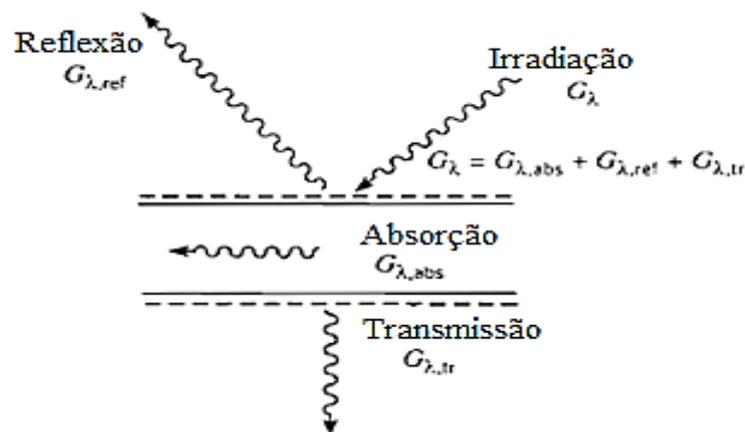
O fluxo de calor emitido por uma superfície real é menor do que a de um corpo negro à mesma temperatura e é dada pela Equação 4:

$$E = \varepsilon \sigma T_S^4 \quad \text{Eq. (4)}$$

Onde:

$\varepsilon$  é uma propriedade radiante da superfície, denominada de emissividade. Com valores de  $0 \leq \varepsilon \leq 1$ , esta propriedade diz respeito a capacidade de uma superfície emitir energia em relação a um corpo negro. Ela depende fortemente do material da superfície e de seu acabamento.

A taxa na qual toda radiação é incidente sobre uma unidade de área de superfície é definida como a irradiação  $G_\lambda$ . Tal como é apresentado na Figura 9, ao incidir calor por radiação sobre um meio semitransparente, uma fração desta energia  $G_\lambda$  é refletida ( $G_{\lambda,ref}$ ), outra fração é absorvida ( $G_{\lambda,abs}$ ) e outra fração é transmitida ( $G_{\lambda,tr}$ ), através do meio. A soma da emissão e da reflexão da radiação de um material é chamada de radiosidade ( $J$ ).



**Figura 9** Absorção, reflexão e transmissão da radiação incidente sobre uma superfície.

**Fonte:** Bergman et al. (2011).

Através da Equação 5, o princípio de conservação de energia, tem-se que (BERGMAN et al., 2011).

$$G_\lambda = \rho_\lambda G_\lambda + \alpha_\lambda G_\lambda + \tau_\lambda G_\lambda \quad \text{Eq. (5)}$$

Onde:

$\rho$ ,  $\alpha$  e  $\tau$ , correspondem à refletividade, absortividade e transmissividade, respectivamente.

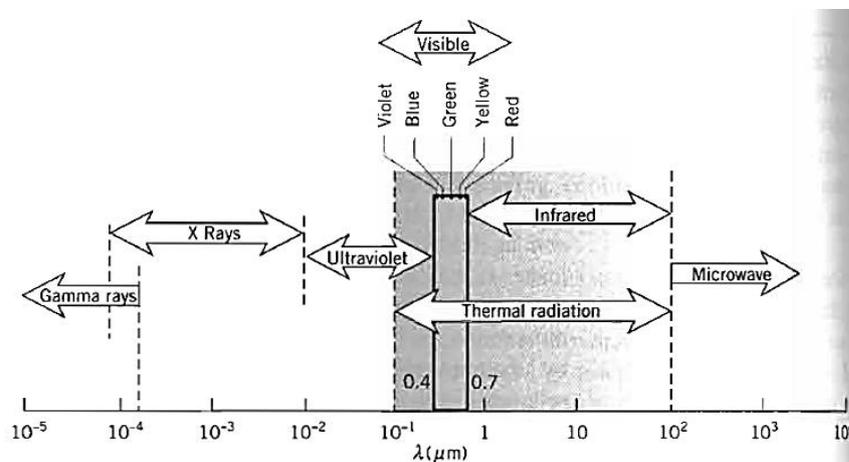
A partir da Equação 5, isolando  $G_\lambda$ :

$$1 = \rho_\lambda + \alpha_\lambda + \tau_\lambda \quad \text{Eq. (6)}$$

A Equação 6 considera a dependência espectral das propriedades radiativas. A relação entre a radiação incidente e a parcela transmitida define a transmissividade, dada pela Equação 7:

$$\tau_\lambda = \frac{G_{\tau, \text{tr}}}{G_\lambda} \quad \text{Eq. (7)}$$

A radiação eletromagnética compreende a corrente elétrica, as ondas de rádio, as micro-ondas, a radiação infravermelha, a luz visível, os raios ultravioleta (UV), os raios X e os raios gama. O espectro eletromagnético completo é delineado na Figura 10. A região intermediária do espectro, que inclui uma porção UV e toda a radiação visível e infravermelha (IV), é denominada térmica, pois afeta o estado térmico ou a temperatura da matéria. A radiação térmica emitida por uma superfície engloba uma gama de comprimentos de onda.



**Figura 10** Espectro eletromagnético de radiação.

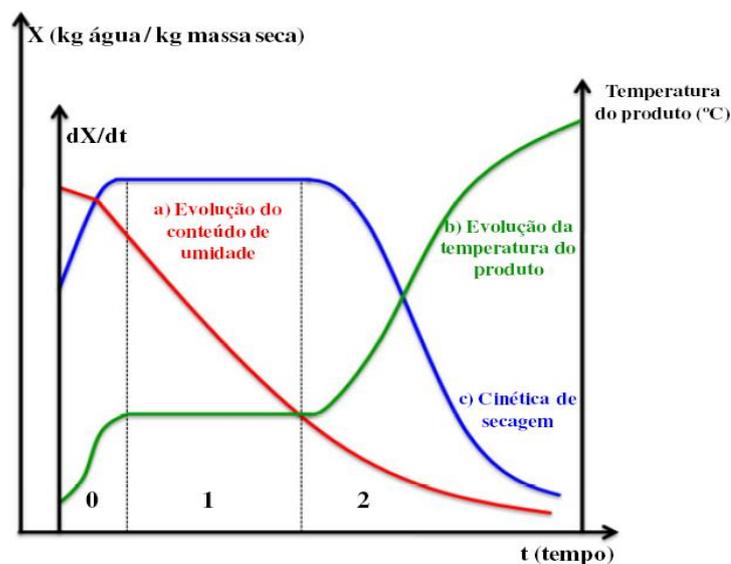
**Fonte:** Bergman et al. (2011).

### 3.5 CINÉTICA DE SECAGEM

A cinética de secagem deve ser completamente descrita usando propriedades do agente secante e do material, tal como as propriedades de transporte (condutividade térmica, difusividade térmica, difusividade mássica, coeficiente de transferência de calor e de massa). Diferentes teorias procuram explicar a cinética de secagem de materiais porosos. O principal objetivo é descrever como a umidade é transferida do interior do sólido para evaporar na sua superfície e qual mecanismo de transferência controla o processo de secagem. De acordo com **Piaia (2009)**, a secagem pode ser classificada em: período de taxa constante e período de taxa decrescente.

A avaliação da cinética de secagem do produto desejado é descrita através da análise da curva de secagem, curva da taxa de secagem e curva da evolução da temperatura do produto. O processo de secagem pode ser dividido em períodos. Na Figura 11 estão apresentadas as curvas em função do tempo para: (a) teor de umidade do material, (b) taxa de secagem e (c) variação da temperatura do produto durante a secagem.

A curva “a” representa o teor de umidade em função do tempo de secagem; a curva “b” representa a variação da temperatura do produto durante a secagem, e “c” representa a velocidade ou taxa de secagem do produto com o tempo ( $dX/dt$ ), ou seja, diferenciando a curva “a” resulta na curva “c” (PARK; YADO; BROD, 2001).



**Figura 11** Curvas típicas de secagem, taxa de secagem e temperatura do produto.

**Fonte:** Park; Yado e Brod (2001).

Analisando o processo de secagem percebe-se que o início do processo é caracterizado pelo aumento gradual da temperatura do produto e da pressão de vapor de água. Estas elevações ocorrem até o ponto em que a transferência de calor seja equivalente à transferência de massa, e inicia-se o período em que a velocidade de secagem é constante e a água livre do material é evaporada. Este período ocorre enquanto na superfície do produto houver quantidade de água suficiente para acompanhar a evaporação. Em seguida a taxa de secagem decresce, diminui a quantidade de água na superfície do produto e a transferência de calor não é compensada pela transferência de massa, sendo que o fator limitante é a redução da migração da água do interior para a superfície do produto, que faz aumentar sua temperatura até atingir a temperatura do ar de secagem. Quando o produto atinge o teor de umidade de equilíbrio em relação ao ar de secagem o processo é encerrado (PARK; YADO; BROD, 2001).

Outros fatores que influenciam a taxa de secagem incluem a composição e a estrutura do alimento. Por exemplo, altas concentrações de solutos como açúcares, sais, gomas, amidos, etc., aumentam a viscosidade e diminuem a atividade de água, reduzindo assim, a mobilidade da água. Da mesma forma, a umidade é mais facilmente removida dos espaços intercelulares do que do interior das células (FELLOWS, 2000).

Através da cinética é possível realizar a simulação do processo de secagem a partir de modelos matemáticos, onde diversos modelos teóricos, semi-teóricos e empíricos têm sido empregados para explicar o fenômeno de secagem. Estes são utilizados para estimar o tempo de secagem de diferentes produtos, gerar as curvas de secagem e a difusividade média (MIDILLI; KUCUK; YAPAR, 2002). O coeficiente de difusão contempla o efeito de todos os fenômenos que podem interferir na taxa de transferência de massa e a migração de água do interior do sólido para a superfície. A difusividade não é intrínseca ao material, uma vez que ela varia conforme as condições de secagem (FELLOWS, 2000). Entre os modelos semi-teóricos e empíricos, Aproximação da Difusão, Dois Termos, Midilli e Kucuk e Page, tem sido frequentemente utilizados para a modelagem matemática da cinética de secagem de produtos agrícolas (OZDEMIR; DEVRES, 1999; MIDILLI; KUCUK; YAPAR, 2002; PANCHARIYA; POPOVIC; SHARMA, 2002; CORRÊA et al., 2007; DOYMAZ, 2007).

## 4 MATERIAL E MÉTODOS

### 4.1 MATÉRIA – PRIMA

Para a realização do trabalho foram utilizadas pupunhas, cujas coletas foram realizadas nos meses de janeiro a junho de 2014 em diversas feiras localizadas na região metropolitana de Belém (PA) e identificadas como Lote 1, Lote 2, Lote 3 e Lote 4 (Figura 12). As amostras coletadas foram encaminhadas e processadas no Laboratório de Medidas Físicas – LAMEFI do Laboratório de Engenharia Química (LEQ/UFGPA). As etapas de seleção e classificação dos frutos foram realizadas manualmente, sendo os frutos retirados dos cachos, descartando aqueles que apresentavam algum dano físico, como defeitos na casca e/ou infectados e com presença de deterioração. Os frutos foram lavados com água corrente e sanitizados com solução de hipoclorito de sódio a 200 ppm por 15 minutos.



**Figura 12** Pupunhas (*Bactris gasipaes*) utilizadas no estudo. (a) Lote 1; (b) Lote 2; (c) Lote 3 e (d) Lote 4.

O cozimento dos diferentes lotes de pupunha foram realizados com auxílio de autoclave com temperatura de 121°C durante 30 minutos (Fluxograma 1). Foi necessário realizar o cozimento das pupunhas, pois de acordo com Clement e Arkcoll (1985) as amostras contém a enzima peroxidase, que inibe a digestão de proteínas, e o sal oxalato de cálcio que

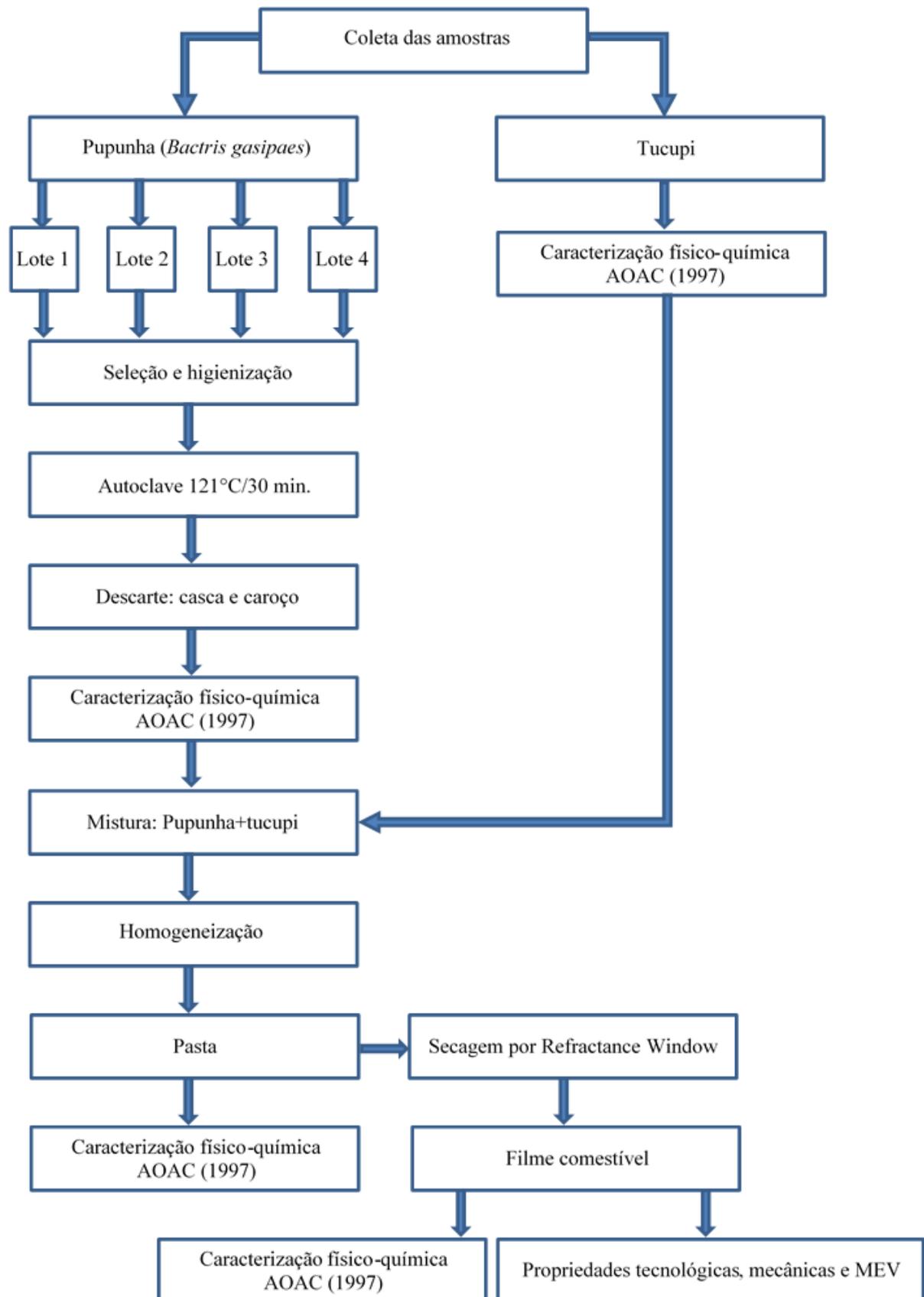
provoca irritação na mucosa da boca. E para produção de filmes, o amido deve estar gelatinizado.

As amostras de tucupi foram adquiridas da agricultura familiar estabelecida no município do Acará (PA), e encaminhadas até o Laboratório de Medidas Físicas onde foram realizadas as análises físico-químicas de acidez total, pH, sólidos totais e resíduo mineral fixo (cinzas), pré estabelecidas pela Normativa (ADEPARÁ, 2008).

#### **4.1.1 Obtenção da pasta**

As partes não comestíveis das pupunhas, como a casca e o caroço, foram removidas e a polpa cortada em pedaços, com auxílio de uma faca de aço inoxidável, em seguida, adicionou-se o tucupi, na proporção de 1:1, com objetivo de facilitar o espalhamento da pasta durante o processo de secagem. Em seguida, com auxílio de um processador de alimentos de bancada (modelo DIAMANTE 450W *black*, marca BRITÂNIA) homogeneizou-se as pastas, utilizando a configuração mais baixa de velocidade, por 2 minutos para a redução das partículas. Também se fixou o valor de 5,3 °Brix, pois assim, pode-se garantir que as pastas obtidas de diferentes lotes de pupunha apresentavam a mesma concentração de sólidos solúveis. As pastas de pupunha e tucupi obtidas foram utilizadas imediatamente no processo de secagem por Refractance Window.

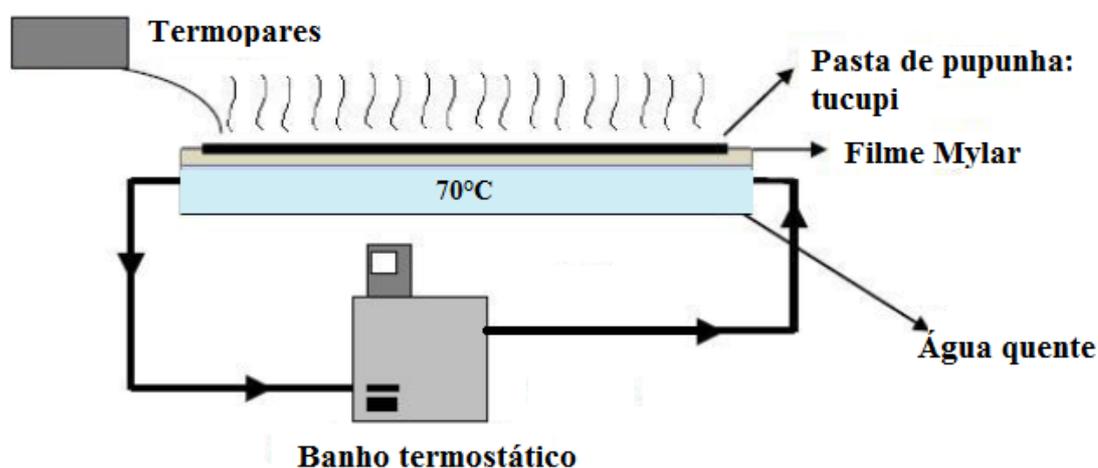
O Fluxograma 1 apresenta as principais etapas do processamento das amostras, até a etapa de obtenção da pasta à base de pupunha e tucupi.



**Fluxograma 1** Etapas do processamento para obtenção do produto desidratado a base de pupunha e tucupi.

## 4.2 PROCESSO DE SECAGEM

O equipamento utilizado para a realização dos experimentos de secagem por Refractance Window foi construído no Laboratório de Medidas Físicas (LAMEFI/LEQ/UFPa), utilizando os princípios do equipamento comercial, com a diferença de operar em regime descontínuo. Na Figura 13 é apresentado um esquema do aparato experimental.



**Figura 13** Esquema do dispositivo experimental utilizado na secagem por Refractance Window.

**Fonte:** Adaptado de Castoldi (2012)

O equipamento de secagem por Refractance Window consiste em um reservatório (bandeja de aço inoxidável) com água quente circulante, sobre o qual foi presa um filme de plástico resistente termoresistente. A água quente circulante é proveniente de um banho termostático (modelo M23211, marca QUIMIS). O secador possui dimensões de secagem de 50 x 75 cm.

A temperatura da água quente circulante foi continuamente monitorada nas seções de entrada e saída, e na região central da bandeja com auxílio de termopares do tipo J (modelo VC506, marca VOLTCRAFT). Os termopares foram calibrados na faixa de temperatura de 0 a 100°C com auxílio de um banho termostático.

Os experimentos utilizando pastas de tucupi: pupunha foram realizados com água de aquecimento a 70°C e espessura de espalhamento da pasta de 0,5 mm. Os filmes comestíveis obtidos no processo de secagem foram armazenados em embalagens de polietileno, e selados com auxílio de uma seladora a quente, e permaneceram fechados até o momento da realização das análises.

#### 4.2.1 Cinética de secagem e modelagem matemática

A cinética de secagem a 70°C foi determinada pelo acompanhamento do peso da amostra, em intervalos de tempo de 5 minutos. Para a obtenção da cinética de secagem, pesou-se a massa total de pasta e foram retiradas aproximadamente 5 gramas de amostra (espessura de 0,5 cm), para cada intervalo de tempo, e espalhada sobre o filme transparente, e ao término de cada intervalo de tempo, a amostra remanescente foi retirada do filme transparente e transferida para um cadinho, para a determinação do teor de umidade (Equação 8), quantificado pelo método gravimétrico em estufa de circulação forçada de ar em temperatura de 105 ± 1 °C até peso constante, de acordo com o método oficial da AOAC nº 925.10 (1997).

$$UBS = \left( \frac{m_0 - m_f}{m_f} \right) \times 100 \quad \text{Eq. (8)}$$

Onde:

UBS umidade da amostra em base seca.  $m_0$  e  $m_f$  massa da amostra antes e depois da secagem em estufa, respectivamente.

Os valores do MR foram definidos a partir da Equação:

$$MR = \frac{X_t - X_e}{X_0 - X_e} \quad \text{Eq. (9)}$$

Onde:

$X_t$  é o teor de umidade em um determinado momento,  $X_e$  é o teor de umidade de equilíbrio e  $X_0$  é o teor de umidade inicial (g de água/g de matéria seca).

Quando no período de taxa decrescente a difusão é controlada, a umidade movimenta-se para a superfície em virtude da difusão molecular. Esta teoria se apóia exclusivamente sobre a lei de Fick, que expressa que o fluxo de massa por unidade de área é proporcional ao gradiente de concentração de água. Utilizando a lei de Fick na equação de balanço de massa de água no interior do produto:

$$\frac{\partial X}{\partial t} = \nabla \cdot (D_{ef} \cdot \nabla X) \quad \text{Eq. (10)}$$

Onde:

$D_{ef}$  é o coeficiente de difusão líquido ( $m^2/s$ ) e  $X$  é a umidade do sólido expressa em kg de  $H_2O/kg$  de sólido seco.

A solução fornecida por Cranck (1975) para a Equação 11, sujeita às condições iniciais e de contorno.

$$\frac{X_t - X_e}{X_0 - X_e} = \frac{8}{\pi^2} \cdot \sum_{n=0}^{\infty} \frac{1}{(2n + 1)^2} \cdot \exp\left(- (2n + 1)^2 \frac{\pi^2 \cdot D_{ef} \cdot t}{l^2}\right) \quad \text{Eq. (11)}$$

Onde:

$X_{eq}$  é a umidade de equilíbrio do material (g  $H_2O/g$  sólido),  $X_0$  é a umidade inicial do material (g  $H_2O/g$  sólido),  $l$  é a espessura do material (m) e  $t$  é o tempo em segundos.

Pela lei de Fick a taxa decrescente de secagem é função do tempo, posição no corpo e da difusividade ( $D_{ef}$ ) (CRANCK, 1975). A solução analítica da segunda lei de Fick foi utilizada a fim de determinar a difusividade efetiva ( $D_{eff}$ ), determinado experimentalmente (Equação 10), considerando a geometria de uma placa semi-infinita com uma espessura de  $l$ , assumindo que o processo de secagem é controlado pela difusão de umidade interna em uma direção axial.

O comportamento da transferência de umidade na secagem de sólidos alimentícios normalmente não satisfaz as simplificações assumidas na solução da segunda lei de Fick; o sólido tem uma estrutura celular heterogênea, a transferência não é unidimensional, a difusão pode ocorrer sobre vários mecanismos (na fase gasosa, e/ou líquida, em pontos de várias dimensões), a temperatura do alimento aumenta durante o processo e ocorre o encolhimento com evaporação da água (LIMA, 2001).

Foram avaliados os ajustes de dez modelos semi – empíricos (Tabela 5), na predição das curvas de secagem ajustados aos dados experimentais.

**Tabela 5** Modelos semi-empíricos ajustados aos dados de secagem.

Modelo	Equação*
Newton	$MR = e^{-k \cdot t}$
Page	$MR = e^{-k \cdot t^n}$
Page modificado	$MR = e^{-(k \cdot t)^n}$
Henderson e Pabis	$MR = a \cdot e^{-k \cdot t}$
Logarítmico	$MR = a \cdot e^{-k \cdot t} + c$
Midilli	$MR = b \cdot t + a \cdot e^{-k \cdot t^n}$
Dois termos	$MR = a \cdot e^{-k_0 \cdot t} + b \cdot e^{-k_1 \cdot t}$
Aproximação da difusão	$MR = a \cdot e^{-k \cdot t} + (1 - a) \cdot e^{-k \cdot b \cdot t}$
Verma	$MR = a \cdot e^{-k \cdot t} + (1 - a) \cdot e^{-g \cdot t}$
Dois termos exponencial	$MR = a \cdot e^{-k \cdot t} + (1 - a) \cdot e^{-k \cdot a \cdot t}$

\*k, k<sub>0</sub>, k<sub>1</sub> – coeficientes de secagem, s<sup>-1</sup>;

\*a, b, c, n – constantes dos modelos.

**Fonte:** Akpınar, Bicer e Yildiz (2003).

O coeficiente de determinação ( $R^2$ ), o valor do qui - quadrado ( $\chi^2$ ) e a raiz quadrada do erro quadrático médio (RMSE), calculados através das Equações 12, 13 e 14 foram utilizados para avaliar os ajustes dos dados experimentais aos modelos matemáticos.

$$R^2 = \frac{\sum_{i=1}^N (MR_{pre} - MR_{pre,i}) \cdot \sum_{i=1}^N (MR_{pre} - MR_{pre,i})}{\sqrt{\left[ \sum_{i=1}^N (MR_{pre} - MR_{pre,i})^2 \right] \cdot \left[ \sum_{i=1}^N (MR_{pre} - MR_{pre,i})^2 \right]}} \quad \text{Eq. (12)}$$

$$\chi^2 = \frac{\sum_{i=1}^N (MR_{pre} - MR_{pred,i})^2}{N - z} \quad \text{Eq. (13)}$$

$$RMSE = \left[ \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (MR_{pre} - MR_{pre,i})^2 \right]^{1/2} \quad \text{Eq. (14)}$$

Onde:

$MR_{exp}$  é a relação de umidade determinada a partir dos dados experimentais;  $MR_{pre}$  relação de umidade predita pelos modelos ajustados; N número de observações e z é igual ao número de parâmetros do modelo.

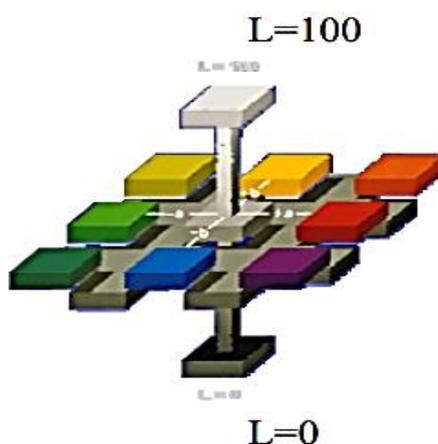
Os maiores valores de  $R^2$  e os menores valores de  $\chi^2$  e da raiz quadrada do erro quadrático médio (RMSE) foram tomados como critério de escolha do modelo que melhor se ajustou aos dados experimentais.

#### 4.2.2 Análises físico-químicas

Para a amostra de tucupi foram realizadas as análises de umidade, resíduo mineral fixo, acidez total titulável, pH e sólidos solúveis ( $^{\circ}$ Brix), de acordo com o método oficial da AOAC (1997). E para as amostras de pupunha cozida, pasta de tucupi: pupunha e filme comestível foram realizados as análises de umidade, lipídios totais, proteína bruta, resíduo mineral fixo, carboidratos, valor e calórico, de acordo com o método oficial da AOAC (1997). E atividade de água determinada em Termohigrômetro digital AquaLab Series 3TE da DECAGON. E Todas as análises foram realizadas em triplicata para obtenção da média e desvio padrão.

##### 4.2.2.1 Cor Instrumental

A cor instrumental do produto foi analisada em colorímetro MINOLTA CR310, operando no sistema CIE ( $L^*$ ,  $a^*$ ,  $b^*$ ), sendo  $L^*$  luminosidade,  $a^*$  intensidade da cor vermelha e  $b^*$  intensidade da cor amarela (Figura 14). A coordenada  $a^*$  varia do vermelho ( $+a^*$ ) ao verde ( $-a^*$ ), e a coordenada  $b^*$  do amarelo ( $+b^*$ ) ao azul ( $-b^*$ ) (HUNTERLAB, 1996).



**Figura 14** Espaço de cor CIELAB (Sistema de cores Hunter).

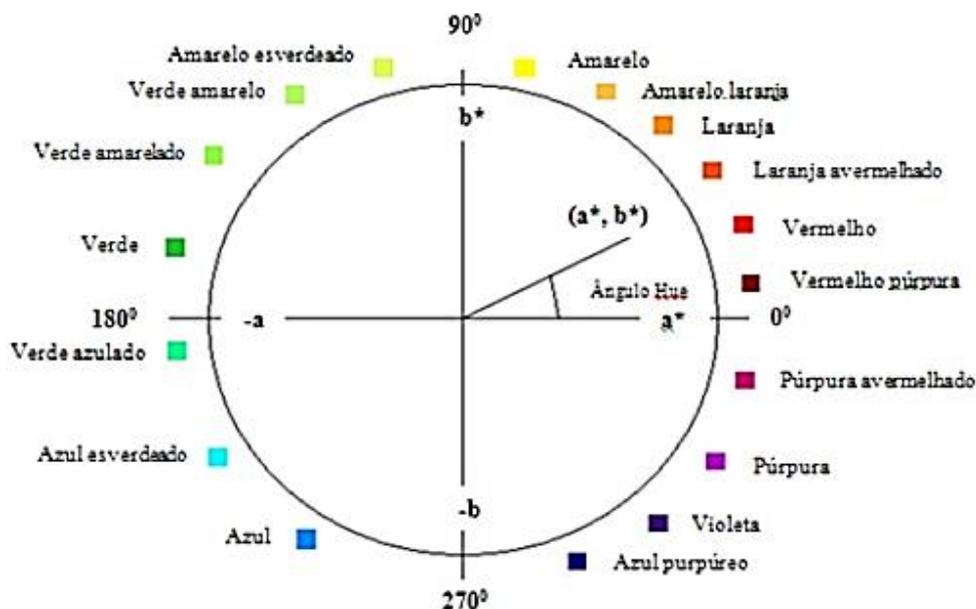
**Fonte:** Ribeiro et al., (2007).

O princípio do método consiste na decomposição de energia radiante de um objeto, em três componentes, de um dispositivo sensível, os quais correspondem às três cores primárias (vermelho, amarelo e azul). Os valores de  $a^*$  e  $b^*$  serão convertidos ao índice de Chroma (C) (Equação 15) e no ângulo Hue ( $^{\circ}H$ ) (Equação 16):

$$C = \sqrt{a^{*2} + b^{*2}} \quad \text{Eq. (15)}$$

$$H^{\circ} = \text{artcan } b^*/a^* \quad \text{Eq. (16)}$$

O índice Chroma (C), denota sobre a intensidade da saturação ou intensidade da cor. Valores de Chroma menores correspondem ao padrão de cor mais fraca (“aspectos fosco de objetos”) e valores mais altos ao padrão de cor mais forte (“cores vivas”). Com relação ao ângulo de Hue, que representa a tonalidade de cor da amostra,  $0^{\circ}$  vermelho,  $90^{\circ}$  amarelo,  $180^{\circ}$  verde e  $270^{\circ}$  azul (Figura 15).



**Figura 15** Diagrama CIELAB com sequência de nuances de cores e orientação do ângulo de Hue ( $H^{\circ}$ ).

**Fonte:** Adriano, Leonel e Evangelista (2011) Adaptado de Chitarra e Chitarra (2005)

Os valores delta ( $\Delta L^*$ ,  $\Delta a^*$  e  $\Delta b^*$ ) indicam o quanto a amostra diferiu do padrão para  $L^*$ ,  $a^*$  e  $b^*$ , e são frequentemente utilizados no controle de qualidade e ajustes de formulações (HUNTERLAB, 1996). A variação da coloração ( $\Delta E$ ) foi calculada pela Equação 17 e 18.

$$\Delta E = \sqrt{\Delta L^2 + \Delta a^2 + \Delta b^2} \quad \text{Eq. (17)}$$

$$\Delta E = \sqrt{(L_0^* - L_f^*)^2 + (a_0^* - a_f^*)^2 + (b_0^* - b_f^*)^2} \quad \text{Eq. (18)}$$

Onde:

$\Delta E$  é a variação da cor do produto desidratado com relação à pasta,  $L_0^*$  representa a luminosidade da pasta e  $L_f^*$  a luminosidade do produto,  $a_0^*$  e  $a_f^*$ ;  $b_0^*$  e  $b_f^*$  coordenadas de cromaticidade da pasta e do produto, respectivamente.

#### 4.2.2.2 Carotenoides totais

A determinação de carotenoides totais foi realizada segundo o método descrito por Rodriguez-Amaya (1999). Pesou-se 10g de amostra e adicionou-se 20 mL de acetona gelada, agitando-se o conteúdo por 10 minutos. O material foi filtrado sob vácuo em funil de buchner com papel filtro contendo celite, lavando a amostra com acetona até que o extrato ficasse incolor. O filtrado foi transferido para um funil de separação, onde se acrescentou 50 mL de éter de petróleo e em torno de 1000 mL de água destilada para a lavagem do extrato. Descartou-se a fase inferior e repetiu-se o procedimento por 4 vezes para ocorrer a remoção total da acetona. Transferiu-se o extrato superior para um erlenmeyer de 250 mL contendo sulfato de sódio anidro, em seguida transferiu-se o extrato para um balão de 250 mL completando-se o volume com éter de petróleo. A leitura foi realizada em espectrofotômetro fazendo uma varredura entre 20 a 500 nm, usando éter de petróleo como branco. O conteúdo de carotenoides foi determinado pela Equação 19.

$$CT (\mu\text{g/g}) = \frac{A \times V_{(\text{mL})} \times 10^4}{E_{1\text{cm}}^{1\%} \times m_{(\text{g})}} \quad \text{Eq. (19)}$$

Onde:

V volume do balão utilizado na diluição, em mL, A absorvância no maior pico detectado,  $E_{1\text{cm}}^{1\%}$  coeficiente de extinção do  $\beta$ -caroteno (2592) e m massa de amostra, em g.

#### 4.2.2.3 Determinação das propriedades tecnológicas

Para a determinação do índice de absorção em água (IAA), em um tubo de centrífuga (com tampa) previamente tarado foram colocados aproximadamente 2,5 g de amostra e 30 mL de água a 25°C. Os tubos foram agitados durante 30 minutos em um agitador mecânico e, em seguida, centrifugados a 3000 rpm por 10 minutos. Do líquido sobrenadante foi coletada uma

alíquota de 10 mL e colocada em cadinho de porcelana tarado que foi levado à estufa (105°C) por 8 horas. O tubo com o gel remanescente foi pesado sendo que o peso do resíduo da evaporação foi obtido pela diferença de peso do cadinho multiplicada por três e, o peso do resíduo da centrifugação, pela diferença de peso do tubo (ANDERSON et al., 1969) como mostra a Equação 20:

$$IAA = \frac{PCR \times 100}{PA - PRE} \quad \text{Eq. (20)}$$

Onde:

PRC peso de resíduo de centrifugação (g), PA peso da amostra (base seca) e PRE peso de resíduo de evaporação (g).

O índice de solubilidade em água (ISA) foi determinado segundo a metodologia proposta por Anderson et al. (1969), onde O ISA foi calculado pela relação entre o peso do resíduo de evaporação (PRE) e o peso seco da amostra (PA), conforme a Equação 21.

$$ISA = \frac{PRE}{PA} \quad \text{Eq. (21)}$$

A higroscopicidade (HG) foi determinada de acordo com a metodologia proposta por Cai e Corke (2000), com algumas modificações. Colocou-se cerca de 1 g de cada amostra em um recipiente hermético contendo uma solução saturada de NaCl (umidade relativa de 75,29%) a 25°C e, após uma semana, as amostras foram pesadas e a higroscopicidade foi expressa como g de umidade adsorvida por 100 g de massa seca da amostra (g/100g).

#### 4.2.3 Propriedades mecânicas

A análise das propriedades mecânicas foi realizada segundo a metodologia proposta por Davanço, Tanada-Palmu e Grosso (2007). A resistência à tração e a porcentagem de alongação na ruptura dos filmes foram determinadas utilizando um texturômetro Texture Analyzer (modelo QTS-25, marca Brookfield) e o programa Texture Pro, de acordo com o método padrão ASTM D-882 (1995). As amostras de filmes foram cortadas, apresentando 100 mm de comprimento e 25 mm de largura. A distância inicial de separação das garras e a velocidade de realização do teste foram fixadas em 50 mm e 2 mm/segundo, respectivamente.

A resistência à tração (Equação 22) foi calculada dividindo-se a força máxima no rompimento do filme, pela área de secção transversal.

$$RT = \frac{F_m}{A} \quad \text{Eq. (22)}$$

Onde:

RT é resistência à tração (MPa),  $F_m$  força máxima no momento da ruptura do filme (N); A é área da secção transversal do filme ( $m^2$ ).

A elongação na ruptura (Elon) (Equação 23) foi determinada dividindo-se a distância final de separação da “probe” pela distância inicial de separação (50 mm), multiplicada por 100 (ZAVAREZE et al., 2012).

$$\text{Elon}(\%) = \left( \frac{d_r - d_i}{d_i} \right) \times 100 \quad \text{Eq. (23)}$$

Onde:

Elon elongação em porcentagem,  $d_r$  distância no momento da ruptura (cm), que corresponde à diferença entre a distância de separação no momento da ruptura e a distância inicial (5 cm);  $d_i$  distância inicial de separação (5 cm).

A média das espessuras (mm) requeridas para o cálculo da área seccional foi determinada utilizando 5 medidas obtidas ao longo do filme com auxílio de um micrômetro digital (modelo 3103-25, marca Insize), com precisão de  $\pm 0,002$  mm.

#### 4.2.4 Microscopia eletrônica de varredura (MEV)

A microscopia eletrônica de varredura (MEV) foi realizada com um microscópio eletrônico de varredura ZEISS (modelo DSM 940 A, Oberkochen, Alemanha), utilizando amperagem de 80 mA, e voltagem de 5 kV. As amostras foram fixadas com fita dupla face em alumínio cilindros e revestida com uma camada de ouro BAL-TEC SCD 050.

#### 4.3 ANÁLISE ESTATÍSTICA DOS RESULTADOS

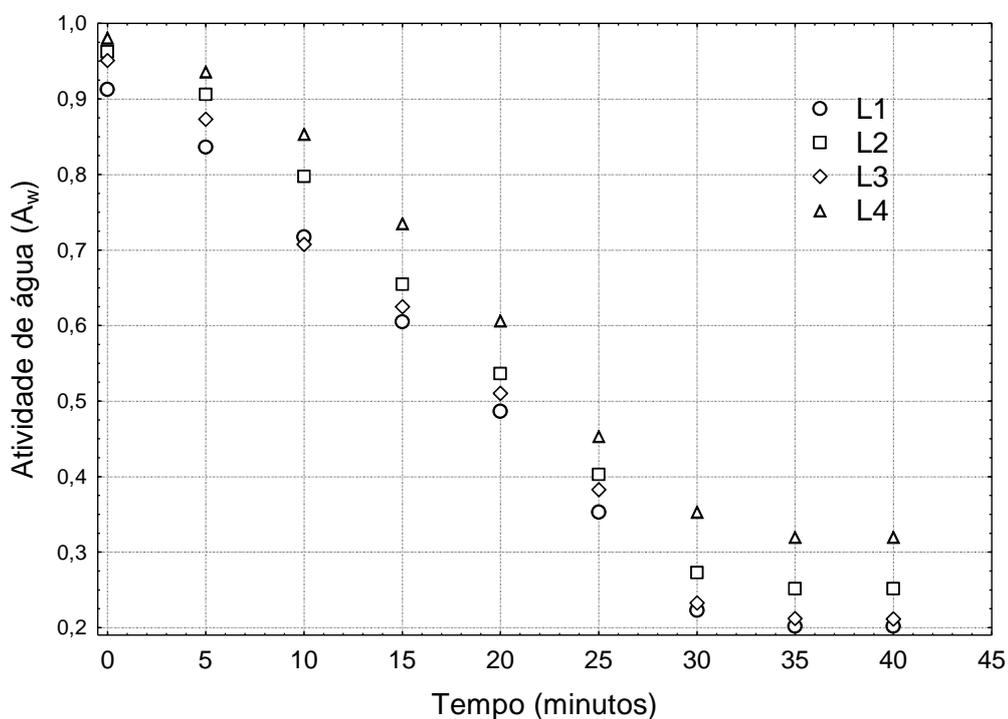
Todos os experimentos foram realizados em triplicata, e os resultados obtidos foram submetidos à análise de variância (ANOVA), teste de médias de Tukey. Para o ajuste dos modelos matemáticos, foi realizada análise de regressão não linear, pelo algoritmo Gauss Newton, utilizando o programa computacional Statistica 7.0® (STATSOFT INC., 2004). Como critério de seleção, para o modelo que melhor representasse o processo, foi considerada

a significância do coeficiente de regressão, pelo teste t, adotando-se o nível de 5% de significância, magnitude do coeficiente de determinação ( $R^2$ ), teste de Qui-quadrado ( $\chi^2$ ) e da raiz quadrada do erro quadrático médio (RMSE).

## 5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 5.1 CINÉTICA DE SECAGEM

A atividade de água ( $A_w$ ) é uma variável importante nos estudos de secagem, pois é um dos parâmetros que determina a estabilidade de um produto. A Figura 16 mostra que o processo de secagem por Refractance Window influenciou fortemente na redução da atividade da água.



**Figura 16** Atividade de água durante o processo de secagem de pasta de tucupi: pupunha a 70°C.

Para o filme comestível a atividade de água ficou em torno de 0,25, para as amostras L<sub>1</sub>, L<sub>2</sub> e L<sub>3</sub>, e 0,32 para amostra L<sub>4</sub>. Pavan, Schmidt e Feng (2012) ao estudarem a secagem de açaí (*Euterpeo leracea* Martius) por Refractance Window, e outros diferentes métodos de secagem, encontraram valores de atividade de água de 0,24, valores próximos aos encontrados no presente estudo. Caparino et al. (2012) obtiveram valores inferiores de atividade de água, 0,17 para pós de manga.

Caltoldi (2012) ao estudar a secagem de diferentes polpas de tomate por Refractance Window obteve pós com atividades de água entre 0,20 a 0,35, o que foi atribuído às diferentes

temperaturas de secagem utilizadas no processo (65, 75, 85 e 95°C), sendo que quanto maior a temperatura do ar de secagem, menor a atividade de água do produto.

O tempo de residência do filme comestível sobre o equipamento de secagem, para a redução da atividade de água de  $\pm 0,95$  até 0,35, foi 30 minutos. Segundo Ochoa-Martínez (2012), ao usar a técnica de Refractance Window, é possível reduzir a atividade de água a valores inferior de 0,5 em 60 minutos, enquanto que para secagem em bandeja, 240 minutos são necessários para atingir um valor de 0,5. Porém, um maior ou menor tempo de residência vai depender da temperatura da água circulante, dos componentes intrínsecos de cada amostra e como estes interagem com a água.

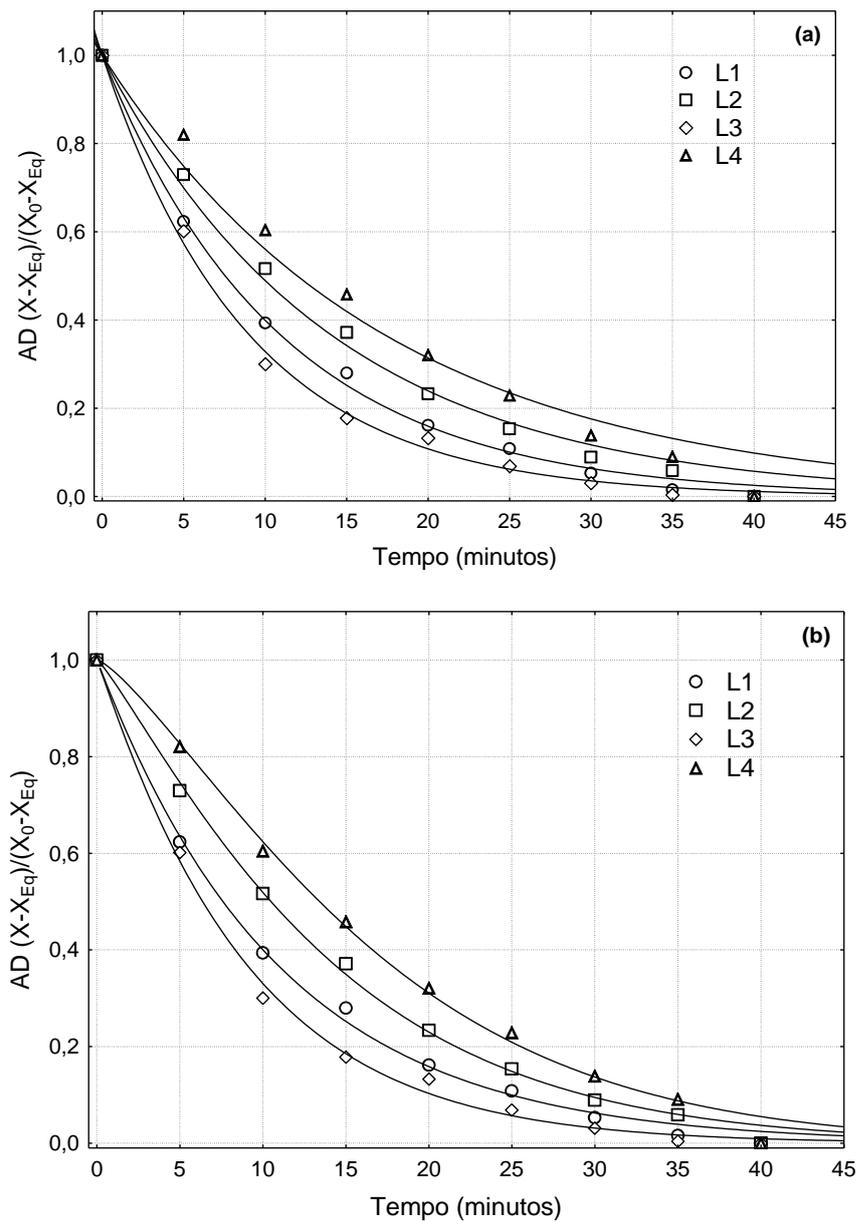
Nas análises dos dados de secagem, a razão de umidade é essencial para descrever diferentes modelos de secagem. A cada período de secagem, um teor de água é correlacionado com o teor de água inicial e o teor de água de equilíbrio, para condições específicas de secagem.

Abonyi et al. (2001), para reduzir a umidade de cenouras de 89,4 para 9,9 % (base úmida), obtiveram um tempo de secagem de 3,5 minutos por Refractance Window (RW) com água de aquecimento de 95°C. Para uma mesma temperatura da água de aquecimento do RW, Nindo et al. (2003) obtiveram um tempo de secagem de 7,5 minutos na secagem de polpa de abóbora com uma redução na umidade de 85,2 para 3,8 % (base úmida).

### 5.1.1 Modelagem matemática

Na Figura 17 são apresentadas as curvas de secagem de pasta de tucupi: pupunha ajustas aos modelos matemáticos de Newton e Page.

Dentre os modelos avaliados, a equação de Newton e Page foram os que melhor se ajustaram aos dados observados de razão de umidade. Ocoró-Zamora; Ayala-Aponte (2013) avaliaram os ajustes de dois modelos matemáticos de pasta de mamão papaya (*Carica Papaya* L.) com diferentes espessuras, por Refractance Window, e observaram que os modelos de Newton e Midilli se ajustaram satisfatoriamente aos dados experimentais, apresentando valores de  $R^2 > 0,99$  e erros quadráticos médios abaixo de 3,0%.



**Figura 17** Curvas de secagem experimentais de pasta de tucupi: pupunha a 70°C, modelo de Newton (a) e Page (b).

A partir da Figura 17 pôde-se observar uma diferença entre as curvas, tanto para o modelo de Newton quanto para o modelo de Page. Segundo Andrade (2014), pois o controle da espessura de filmes comestíveis por Refractance Window é difícil, sobretudo nos processos de produção de biofilmes, plásticos comestíveis, filmes biodegradáveis etc.

Na Tabela 6 são apresentados os resultados dos ajustes dos modelos aos dados experimentais (valores dos parâmetros, do coeficiente de determinação ( $R^2$ ), do qui-quadrado ( $\chi^2$ ) e da estimativa dos erros).

Quando se considera a estimativa dos erros, observa-se que ambos os modelos, e para todas as amostras de filme comestíveis estudadas, se ajustaram aos dados experimentais de secagem, apresentando valores de erros quadráticos médios abaixo de 10%.

**Tabela 6** Coeficiente de determinação, qui-quadrado e estimativa dos erros quadráticos médios dos ajustes as curvas de cinética de secagem.

Modelo	Amostra	Parâmetros				
		k	n	R <sup>2</sup> (%)	X <sup>2</sup>	RMSE (%)
Newton	L <sub>1</sub>	0,092	-	99,87	2,86x10 <sup>-4</sup>	1,59
	L <sub>2</sub>	0,077	-	99,60	9,13x10 <sup>-4</sup>	2,85
	L <sub>3</sub>	0,111	-	99,85	3,51x10 <sup>-4</sup>	1,77
	L <sub>4</sub>	0,058	-	98,85	2,70x10 <sup>-3</sup>	4,90
Page	L <sub>1</sub>	0,090	1,009	99,87	3,25x10 <sup>-4</sup>	1,59
	L <sub>2</sub>	0,045	1,164	99,88	3,16x10 <sup>-4</sup>	1,57
	L <sub>3</sub>	0,102	1,038	99,86	3,72x10 <sup>-4</sup>	1,70
	L <sub>4</sub>	0,023	1,309	99,78	5,84x10 <sup>-3</sup>	2,13

k – coeficiente de secagem, s<sup>-1</sup>

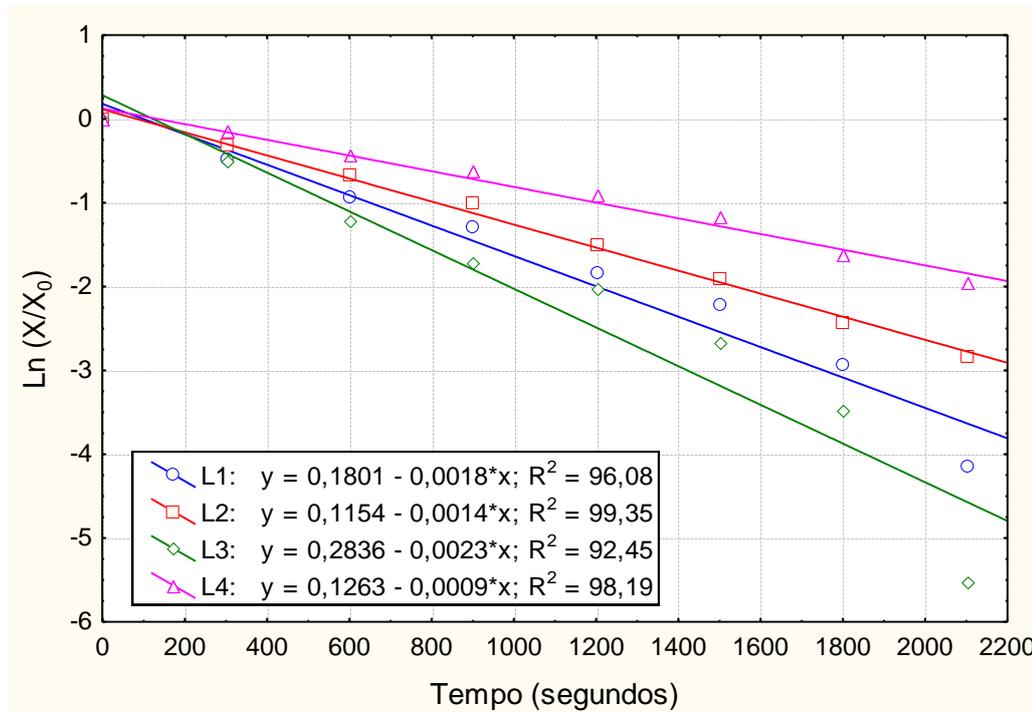
n – constante dos modelos.

Verificou-se ajuste satisfatório dos modelos avaliados. Pode-se observar que, em termos do coeficiente de determinação, todos os 10 modelos ajustados representam bem a cinética de secagem da pasta de tucupi: pupunha; onde em todos os casos o R<sup>2</sup> > 98%. Porém, os modelos com 3 e 4 parâmetros (Tabela A1 – ANEXO) exigem regressão não linear para a solução matemática dos mesmos, e conseqüentemente a utilização de uma ferramenta computacional. Então, recomenda-se a utilização dos modelos por apresentarem, no máximo dois parâmetros, serem facilmente linearizados, e conseqüentemente de mais fácil solução matemática.

#### 5.1.1.1 Difusividade efetiva (D<sub>eff</sub>)

O cálculo empregado para o modelo difusional baseada na segunda lei de Fick consistiu em linearizar a Equação 11 considerando o primeiro termo da série. zA partir disso construíram-se os gráficos do ln (X/X<sub>0</sub>) em função do tempo (Figura 18), supondo-se que a unidade de equilíbrio seria zero. A partir da equação da reta ajustada aos dados experimentais, determinou-se o coeficiente de difusão através do coeficiente angular A.

O modelo de Fick foi adequado para prever a secagem de pasta de tucupi: pupunha dos lotes 2 e 3, o que pode ser verificado por meio dos valores do coeficiente de determinação ( $R^2 > 0,92$ ) e ajuste dos parâmetros ( $p < 0,05$ ).



**Figura 18** Ajuste linear aos dados experimentais de acordo com a solução aproximada do Modelo Difusional de Fick.

Na Tabela 7 são mostrados os parâmetros das retas ajustadas aos dados experimentais. Observa-se que os maiores valores de difusividade efetiva foram obtidos para as amostras L<sub>1</sub> e L<sub>3</sub>.

**Tabela 7** Coeficientes de difusão calculados a partir do ajuste do Modelo Difusional de Fick. Parâmetros das retas ( $\ln(X/X_0) = A \cdot t + B$ ) ajustadas com respectivos coeficientes de correlação.

Amostra	$D_{\text{eff}}$ (m <sup>2</sup> /s)	$R^2$	$X^2$	RMSE (%)
L <sub>1</sub>	$4,05 \times 10^{-11}$	96,08	$2,77 \times 10^{-4}$	1,57
L <sub>2</sub>	$2,02 \times 10^{-11}$	99,35	$8,93 \times 10^{-4}$	2,82
L <sub>3</sub>	$8,15 \times 10^{-11}$	92,45	$3,45 \times 10^{-4}$	1,75
L <sub>4</sub>	$1,42 \times 10^{-11}$	98,19	$3,63 \times 10^{-3}$	5,68

Analisando o coeficiente de correlação, verifica-se que em todas as amostras estudadas, os valores obtidos encontram-se próximos da unidade. Já para os valores das

estimativas dos erros quadráticos médios obtidos, de uma maneira geral, a maioria foi inferior a 10%, indicando que o ajuste do modelo foi adequado.

Na Tabela 7 pode-se verificar a diferença de difusividade efetiva para as diferentes amostras, o que pode ser explicado devido à difusividade efetiva ser dependente da umidade de cada material. A difusividade efetiva envolve qualquer efeito interno que a secagem pode causar nos alimentos. Segundo Madamba (2003) os valores de difusividade efetiva para materiais alimentícios encontram-se dentro de uma faixa de  $10^{-11}$  a  $10^{-9}$  m<sup>2</sup>/s. Os resultados apresentados na tabela anterior encontram-se dentro desta faixa.

O modelo de Fick foi adequado para prever a secagem de pasta de tucupi e pupunha para os lotes 2 e 4, o que pode ser verificado por meio dos valores do coeficiente de determinação R<sup>2</sup> superiores a 97%.

Ocoró-Zamora; Ayala-Aponte (2013) obtiveram valores de D<sub>eff</sub> (0,4005 a  $3,1663 \times 10^{-10}$  m<sup>2</sup>/s) superiores, quando comparados com os resultados da Tabela 7, para a secagem de pasta de mamão papaia (*Carica Papaya* L.) por Refractance Window.

Ochoa-Martínez et al. (2012) encontram maiores valores de difusividade efetiva para RW ( $4,40 \times 10^{-10}$  m<sup>2</sup>/s) quando comparados com a secagem em tabuleiro ( $2,08 \times 10^{-11}$  m<sup>2</sup>/s) (para o mesmo valor de espessura da amostra).

## 5.2 CARACTERIZAÇÃO FÍSICO-QUÍMICA

Os resultados obtidos na caracterização das pupunhas cozidas são apresentados na Tabela 8. O teor de umidade encontrado neste estudo para as pupunhas foram inferiores aos encontrados por Ferreira e Pena (2003), os quais são justificáveis com base na utilização de uma variedade de pupunha diferente. A determinação de umidade nos alimentos é de grande importância, pois a água exerce influência em várias características dos alimentos, como: aparência, sabor, estrutura e susceptibilidade a deterioração.

Carvalho et al. (2013) ao estudarem características físicas e químicas de pupunha (*Bactris gasipaes* Kunth) no estado do Pará coletada de diferentes matrizes de pupunheira, encontraram valores de umidade que variaram de 43,9 a 65,39%. Andrade, Pantoja e Maeda (2003) verificaram umidade média de 54,63 g/100 g para polpa de pupunha cozida da raça Solimões.

**Tabela 8** Composição centesimal de 4 diferentes lotes de pupunha cozida.

Componentes (g/100g)*	Pupunhas ( <i>Bactris gasipaes</i> )			
	L <sub>1</sub>	L <sub>2</sub>	L <sub>3</sub>	L <sub>4</sub>
Umidade	50,76 ± 0,23 <sup>c</sup>	52,76 ± 0,14 <sup>b</sup>	50,69 ± 0,14 <sup>c</sup>	58,80 ± 0,62 <sup>a</sup>
Lipídios	5,50 ± 0,21 <sup>a</sup>	4,32 ± 0,20 <sup>b</sup>	2,24 ± 0,16 <sup>c</sup>	5,62 ± 0,11 <sup>a</sup>
Proteínas	1,39 ± 0,03 <sup>c</sup>	2,54 ± 0,10 <sup>a</sup>	1,91 ± 0,07 <sup>b</sup>	0,94 ± 0,07 <sup>d</sup>
Cinzas	1,27 ± 0,06 <sup>ab</sup>	1,15 ± 0,15 <sup>b</sup>	1,37 ± 0,01 <sup>a</sup>	0,74 ± 0,01 <sup>c</sup>
Carboidratos	41,07 ± 0,40 <sup>b</sup>	39,18 ± 0,21 <sup>c</sup>	43,77 ± 0,17 <sup>a</sup>	33,90 ± 0,49 <sup>b</sup>
Valor energético (kcal)	291,38 ± 0,49 <sup>a</sup>	205,93 ± 1,19 <sup>b</sup>	202,92 ± 0,92 <sup>b</sup>	189,92 ± 2,93 <sup>a</sup>
A <sub>w</sub>	0,985 ± 0,001 <sup>b</sup>	0,986 ± 0,001 <sup>b</sup>	0,984 ± 0,001 <sup>b</sup>	0,999 ± 0,001 <sup>a</sup>

\*Valores expressos em base úmida;

Letras diferentes na mesma linha indicam diferença significativa ( $p \leq 0,05$ );

Valores médios (média ± desvio-padrão) de três replicatas.

Clement et al. (2004); Da Silva e Clement (2005) e Leterme et al. (2005), encontram valores significativos de lipídios e de valor energético nas pupunhas. Os teores de lipídios encontrados por Carvalho et al. (2013), variaram bastante, com valores entre 4,62 a 22,91% (base úmida). Andrade, Pantoja e Maeda (2003) encontraram valores de lipídios de 4,52 g/100 g (base úmida) para pupunha cozida, valores estes, próximos aos encontrados no presente estudo. No entanto, Pardo, Martinez e Martinez-Correa (2014) encontraram 12,95 g de lipídios/100 g de polpa em base úmida ao estudarem a extração de compostos bioativos de polpa de pupunha (*Bactris gasipaes*), usando CO<sub>2</sub> supercrítico. Rodríguez-Amaya (2001) e Leterme et al. (2006) mostraram que um elevado teor de lipídios, em conjunto com uma cor avermelhada no mesocarpo pode indicar elevado teor de carotenoides na pupunha.

Os valores de carboidratos obtidos no estudo confirmam a pupunha como um alimento essencialmente energético. Os lotes 2 e 4 apresentaram diferença significativa entre todas as amostras estudadas quanto aos teores de carboidratos e cinzas, respectivamente. Valores de cinzas estão abaixo dos encontrados por Andrade, Pantoja e Maeda (2003), em que se verificaram teor de 0,50 g/100g (base úmida) para pupunha cozida.

De acordo com a Tabela 8, todas as amostras de pupunha apresentaram valores de A<sub>w</sub> acima de 0,98. Segundo Gava (2000) os macro e micro nutrientes, que compõem os produtos destinados à alimentação dependem da presença de água. Entretanto, a água pode ser o principal fator na deterioração do produto. Nos alimentos, ricos em água, com valores de A<sub>w</sub> maiores que 0,9, como os apresentados acima, formam soluções diluídas com componentes dos alimentos que servirão de substrato para micro-organismos.

Os resultados da caracterização físico-química do tucupi, produzido no município de Acará (PA), são apresentados na Tabela 9. Segundo Chisté, Cohen e Oliveira (2007), a umidade de um alimento está relacionada com a estabilidade, qualidade e composição e pode afetar tanto o processamento, quanto a embalagem e estocagem. Sendo o tucupi um alimento líquido, pode-se observar o seu alto teor de umidade, valor este, que pode ser associado a uma possível e rápida deterioração do produto, devido à presença e ao crescimento de microorganismos.

**Tabela 9** Composição centesimal da amostra de tucupi.

Componentes (g/100g)*	Tucupi
Umidade	93,48 ± 0,83
Sólidos totais	6,52 ± 0,83
Cinzas	0,05 ± 0,01
Acidez (meq NaOH/100 mL)	3,62 ± 0,03
pH	3,86 ± 0,06
Sólidos solúveis (°Brix)	5,73 ± 0,15

\*Valores expressos em base úmida;  
Valores médios (média ± desvio-padrão) de três replicatas.

A partir da Tabela 9 pode se observar baixos valores de acidez titulável total, valores estes, que estão de acordo aos encontrados por Chisté, Cohen e Oliveira (2007) para amostras de tucupi comercializadas na cidade de Belém, PA, (3,9 a 10,6 meq NaOH/100 mL). Porém, Chisté e Cohen (2011) encontraram valores superiores de acidez (12,3 meq NaOH/100 mL) para o tucupi, o que pode ser explicado devido às propriedades do tucupi dependerem diretamente do processo de fermentação, assim como da variedade de mandioca utilizada no processo de extração da manipueira (CHISTÉ; COHEN, 2011).

De acordo com os resultados apresentados, o tucupi se apresentou como um alimento de baixo pH (3,86), valor inferior a pH 4,5, valor este, que delimita o crescimento de microrganismos, se classificando como um alimento ácido (CHISTÉ; COHEN, 2011). O pH é um fator importante que influencia na atividade de enzimas.

Na Tabela 10 são apresentados os resultados da composição centesimal das pastas de tucupi: pupunha. Analisando os resultados, observou-se um aumento no teor de umidade das pastas, quando comparadas com as matérias-primas separadamente. Esse aumento pode ser explicado pela adição do tucupi, pois como já foi citado, o mesmo é constituído basicamente

por água. Porém, este aumento da umidade facilita a espalhabilidade da pasta sobre o equipamento de secagem.

**Tabela 10** Composição da pasta obtida a partir de 4 diferentes lotes de pupunha cozida.

Componentes (g/100g)*	Tucupi: pupunha			
	L <sub>1</sub>	L <sub>2</sub>	L <sub>3</sub>	L <sub>4</sub>
Umidade	75,48 ± 0,33 <sup>c</sup>	79,37 ± 0,12 <sup>a</sup>	78,38 ± 0,17 <sup>b</sup>	79,75 ± 0,10 <sup>a</sup>
Lipídios	1,13 ± 0,10 <sup>b</sup>	2,10 ± 0,20 <sup>a</sup>	1,23 ± 0,22 <sup>b</sup>	2,18 ± 0,04 <sup>a</sup>
Proteínas	0,63 ± 0,02 <sup>b</sup>	0,60 ± 0,02 <sup>b</sup>	1,16 ± 0,10 <sup>a</sup>	0,40 ± 0,02 <sup>c</sup>
Cinzas	0,59 ± 0,12 <sup>a</sup>	0,39 ± 0,03 <sup>a</sup>	0,59 ± 0,10 <sup>a</sup>	0,42 ± 0,02 <sup>a</sup>
Carboidratos	22,17 ± 0,44 <sup>a</sup>	17,54 ± 0,14 <sup>c</sup>	18,64 ± 0,24 <sup>b</sup>	17,26 ± 0,15 <sup>c</sup>
Valor energético (kcal)	101,34 ± 0,82 <sup>a</sup>	91,41 ± 1,26 <sup>b</sup>	90,30 ± 1,30 <sup>b</sup>	90,24 ± 0,45 <sup>b</sup>
A <sub>w</sub>	0,991 ± 0,001 <sup>a</sup>	0,989 ± 0,001 <sup>b</sup>	0,988 ± 0,001 <sup>b</sup>	0,990 ± 0,001 <sup>b</sup>

\*Valores expressos em base úmida;

Letras diferentes na mesma linha indicam diferença significativa ( $p \leq 0,05$ );

Valores médios (média ± desvio-padrão) de três replicatas.

Verificou-se que houve uma redução nos teores de lipídios, proteínas e carboidratos quando comparadas com as amostras de pupunha e tucupi isoladas, sendo esses valores justificáveis, pois os macros e micros componentes das amostras se encontram em soluções diluídas pelo seu alto teor de umidade.

Para os valores de A<sub>w</sub> somente a amostra do lote 1 apresentou diferença em nível de significância de 95%. Com valores elevados de umidade e A<sub>w</sub> as pastas se encontram na zona de atividade de água - favorável ao crescimento de micro organismos. Para reduzir o valor de A<sub>w</sub>, geralmente, aplicam-se processos de secagem para remoção parcial da água.

Na Tabela 11 são apresentados os valores físico-químicos dos diferentes filmes comestíveis. O maior valor de umidade dos filmes à base de tucupi e pupunha foi obtido na secagem do lote 4 (12,17 g de H<sub>2</sub>O/100 g de matéria seca), que pode ser justificável pelo seu alto teor de lipídios, dificultando assim, o processo de secagem. Alimentos com alto teor de gordura, também apresentam um comportamento diferenciado durante a secagem, pois ao decorrer do processo uma camada de gordura se formada na superfície do alimento dificultando a evaporação da água.

**Tabela 11** Composição centesimal de produto obtido por Refractance Window.

Componentes (g/100g)*	Filme comestível			
	L <sub>1</sub>	L <sub>2</sub>	L <sub>3</sub>	L <sub>4</sub>

Umidade	7,84 ± 0,12 <sup>b</sup>	8,44 ± 0,26 <sup>b</sup>	6,44 ± 0,26 <sup>c</sup>	12,17 ± 0,45 <sup>a</sup>
Lipídios	10,23 ± 0,45 <sup>b</sup>	8,39 ± 0,33 <sup>c</sup>	4,50 ± 0,34 <sup>d</sup>	13,79 ± 0,36 <sup>a</sup>
Proteínas	3,59 ± 0,07 <sup>c</sup>	4,88 ± 0,05 <sup>b</sup>	6,17 ± 0,21 <sup>a</sup>	2,23 ± 0,03 <sup>d</sup>
Cinzas	1,79 ± 0,20 <sup>b</sup>	1,76 ± 0,11 <sup>b</sup>	3,16 ± 0,04 <sup>a</sup>	1,73 ± 0,03 <sup>b</sup>
Carboidratos	76,55 ± 0,75 <sup>a</sup>	76,53 ± 0,67 <sup>a</sup>	78,07 ± 0,82 <sup>a</sup>	70,07 ± 0,72 <sup>b</sup>
Valor energético (kcal)	412,65 ± 1,58 <sup>a</sup>	401,18 ± 1,40 <sup>b</sup>	392,41 ± 0,34 <sup>c</sup>	413,34 ± 1,90 <sup>a</sup>
A <sub>w</sub>	0,391 ± 0,010 <sup>d</sup>	0,356 ± 0,001 <sup>b</sup>	0,304 ± 0,001 <sup>c</sup>	0,598 ± 0,002 <sup>a</sup>

\*Valores expressos em base seca;

Letras diferentes na mesma linha indicam diferença significativa ( $p \leq 0,05$ );

Valores médios (média ± desvio-padrão) de três replicatas.

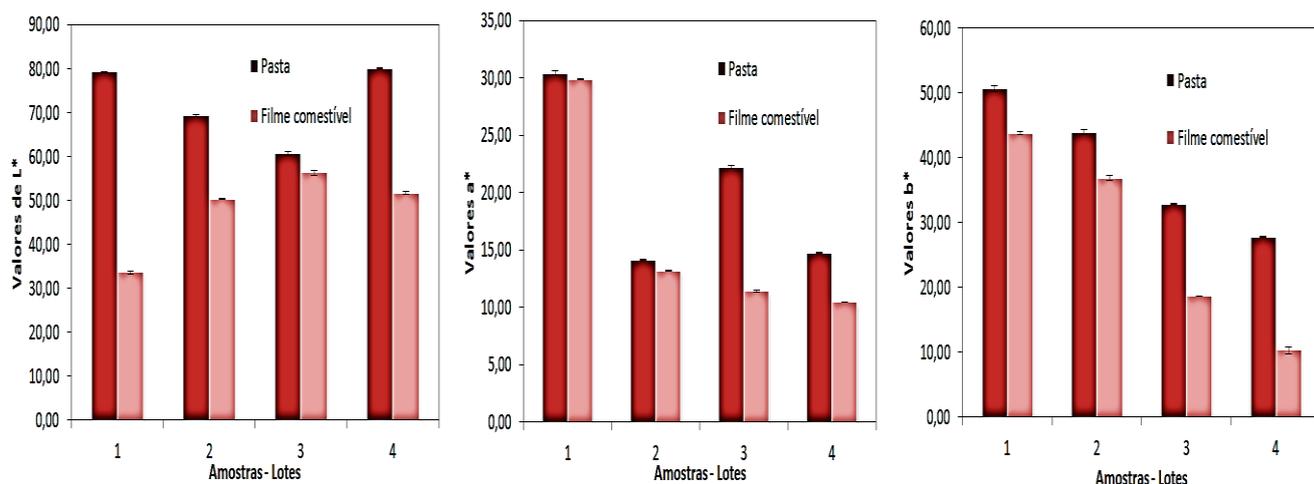
Valores superiores de umidade (17 g de H<sub>2</sub>O/100 g de matéria seca) foram observados por Caparino et al. (2012), quando comparado com o presente estudo, para pós de mangas obtidos através do processo de secagem por Refractance Window a 95±2°C e para outros tipos de secadores (liofilização, *spray-dryer* e secador de tambor). Porém, Topuz et al. (2010) encontraram valores inferiores de umidade de 4,76 g de H<sub>2</sub>O/100 g de matéria seca de páprica (*Capsicum annuum* L.) por Refractance Window.

Os valores de lipídios, proteínas e cinzas, encontrados na Tabela 11, apresentaram próximos aos encontrados para a pupunha cozida (Tabela 8). Porém, para os valores de carboidratos e valor energético, os resultados foram maiores, visto que, o processo de secagem por Refractance Window eliminou, aproximadamente, 80% da água que estava presente na amostra de pasta de tucupi e pupunha, concentrando assim os sólidos secos nas amostras desidratadas.

Segundo a Tabela 11, foram observados valores inferiores a 0,6 de A<sub>w</sub>. Rahman (1995) relata que a perda de qualidade dos alimentos secos começa a aumentar em A<sub>w</sub> > 0,3, sendo que alimentos com A<sub>w</sub> > 0,6 estão mais propensos ao crescimento de micro-organismos. Portanto, os valores da atividade de água encontrados para a secagem de pasta de tucupi e pupunha por RW são favoráveis para a garantia da estabilidade dos filmes comestíveis.

### 5.3 COR INSTRUMENTAL

A cor é um importante indicador de qualidade, visto que reflete a atratividade e a qualidade sensorial do produto obtido no processo de secagem. A Figura 19 apresenta os parâmetros de cor em escala CIELAB, referente à análise de cor instrumental.

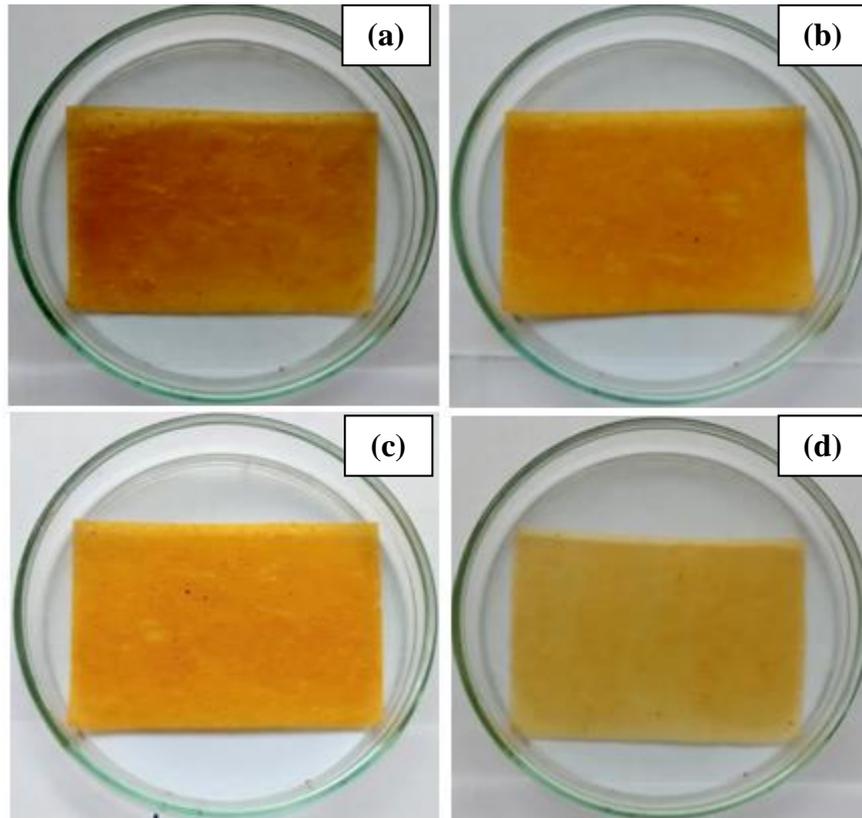


**Figura 19** Parâmetros de cor (L, a\* e b\*) da pasta e do produto desidratado por Refractance Window.

L Luminosidade (+L claro, -L escuro), a\* Coordenada de cromaticidade (-a verde, +a vermelho) e b\* Coordenada de cromaticidade (-b azul, +b amarelo).

Todas as amostras estudadas apresentaram perda de luminosidade em relação a padrão (pasta). Como L\* varia de branco (máximo) a preto (mínimo), pode-se afirmar que estas amostras ficaram mais escuras, provavelmente devido à temperatura de secagem utilizada no processo e a oxidação do  $\beta$ -caroteno.

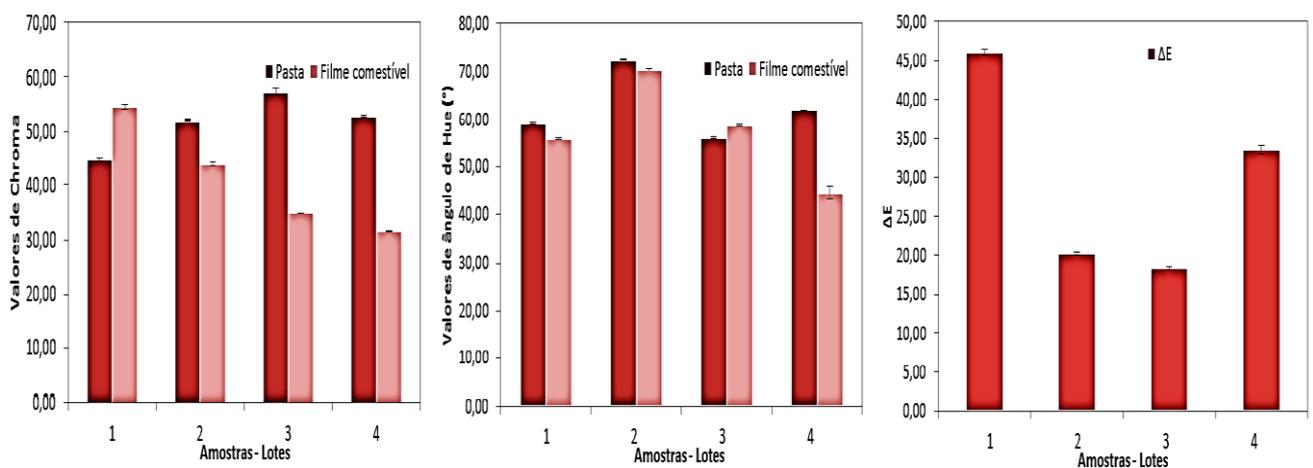
De acordo com os resultados obtidos na Figura 19 a amostra L<sub>1</sub> apresentou maiores valores de a\* e b\*, significando que o produto obtido apresenta tonalidades vermelha e amarela, respectivamente (Figura 20). O valor de b\* apresentado deve-se principalmente à presença de carotenoides com tonalidade amarela, uma vez que são os principais pigmentos encontrados na pupunha cozida (ROJA-GARDANZO et al., 2011).



**Figura 20** Filme comestível obtido através do processo de secagem de pasta de tucupi: pupunha (*Bactris gasipaes*).

(a) Lote 1; (b) Lote 2; (c) Lote 3 e (d) Lote 4.

Os dados de C (cromaticidade),  $H^\circ$  (tonalidade) e a diferença total de ( $\Delta E$ ) cor, das amostras em pastas e dos filmes comestíveis, podem ser observados na Figura 21.



**Figura 21** Parâmetros de cor (C,  $H^\circ$  e  $\Delta E$ , respectivamente) dos diferentes lotes de pasta de tucupi: pupunha e de filme comestível.

De acordo com a Figura 21, as amostras referentes ao lote 1 apresentaram maiores valores de cromaticidade, ou seja, as mesmas amostras já relatadas para a intensidade de cor amarela ( $b^*$ ). Como o chroma é dependente de  $a^*$  e  $b^*$  na mesma intensidade, verificou-se que estes resultados sofrem maior influência da cor amarela que da cor vermelha, o que já era esperado, visto que a polpa da pupunha apresenta uma coloração amarelada, independente da cor da sua casca, que pode variar entre o vermelho, o amarelo e o verde.

Na Figura 21 são apresentados os valores referentes ao ângulo de tonalidade ou ângulo de Hue ( $H^\circ$ ), o qual mede a propriedade de cor da amostra. A amostra  $L_2$  apresentou os maiores valores de  $H^\circ$  quando comparada com as demais, tanto para as pasta de tucupi: pupunha quanto para os filmes comestíveis. Porém, todas as amostras apresentaram valores de ângulo de Hue abaixo de  $90^\circ$  apresentando tonalidades de laranja ao amarelo.

De acordo com a Figura 21, os resultados referentes à  $\Delta E$  foram diferentes entre si, as amostras  $L_1$  e  $L_4$  apresentaram maiores variações de cor com o processo de secagem por Refractance Window. Essas variações de cor podem ser justificadas pela diminuição da concentração dos carotenoides totais, visto que as maiores perdas foram observadas para as amostras citadas anteriormente.

De acordo com os valores obtidos, observou-se que o processo de secagem não causou alterações muito elevadas nas características dos produtos finais, apresentando variações de  $\Delta E$  similares (para as amostras  $L_2$ ,  $L_3$  e  $L_4$ ) aos encontrados por alguns autores, como Nindo et al., (2003) (22,4) e Ocoró-Zamora e Ayala-Aponte (2013) (13 a 24), ao estudarem a secagem de pasta de aspargo e mamão papaia por Refractance Window, respectivamente.

#### 5.4 CAROTENOIDES TOTAIS

Na Tabela 12 são apresentados os resultados referentes às concentrações de carotenoides totais para as amostras de pupunha, pasta e filme comestível.

O efeito do tratamento térmico sobre carotenoides tem sido estudado por vários autores. Normalmente, o tratamento térmico reduz ou aumenta o teor de carotenoides e pode alterar as propriedades de vários compostos bioativos. Alterações no teor de carotenoides estão associadas a fatores tecnológicos, associação de carotenoides com ácidos graxos ou proteínas no fruto, o perfil de carotenoides e conteúdo de carotenoides totais (LESSIN; CATIGANI; SCHWARTZ, 1997; ABUSHITA; DAOOD; BIACS, 2000; DE SÁ; RODRÍGUEZ-AMAYA, 2004 e GAMA; SYLOS, 2005).

**Tabela 12** Concentrações de carotenoides totais nos diferentes lotes de pupunha cozida, pasta e filme comestível.

Amostra	Carotenoides ( $\mu\text{g}/100\text{g}$ )*		
	Pupunha	Pasta	Filme comestível
L <sub>1</sub>	42,83 $\pm$ 0,34 <sup>aA</sup>	41,17 $\pm$ 0,21 <sup>aB</sup>	25,10 $\pm$ 0,21 <sup>bC</sup>
L <sub>2</sub>	32,82 $\pm$ 0,27 <sup>bA</sup>	30,11 $\pm$ 0,30 <sup>bB</sup>	27,24 $\pm$ 0,19 <sup>aC</sup>
L <sub>3</sub>	23,45 $\pm$ 0,13 <sup>cA</sup>	22,14 $\pm$ 0,76 <sup>cA</sup>	18,86 $\pm$ 0,53 <sup>cB</sup>
L <sub>4</sub>	22,34 $\pm$ 0,05 <sup>dA</sup>	20,58 $\pm$ 0,25 <sup>dB</sup>	16,05 $\pm$ 0,10 <sup>dC</sup>

\*Valores expressos em base úmida;

Letras minúsculas diferentes na mesma coluna indicam diferença significativa ( $p \leq 0,05$ );

Letras maiúsculas diferentes na mesma linha indicam diferença significativa ( $p \leq 0,05$ );

Valores médios (média  $\pm$  desvio-padrão) de três replicatas.

Na Tabela 12 os valores de carotenoides totais para a pupunha cozida variaram de 22,34 a 42,83  $\mu\text{g}/100\text{g}$  de amostra, enquanto Carvalho et al. (2013) encontraram valores de 8,02 a 124,90  $\mu\text{g}$  de carotenoides totais/100 g de pupunha (base seca), com destaque para a matriz com melhoramento genético, ao estudarem as características físicas e químicas de diferentes frutos de pupunheiras no estado do Pará.

A intensificação no teor de carotenoides totais é mostrada também, através do tratamento térmico, cujos valores aumentaram de 24,60 para 47,01  $\mu\text{g}/100\text{g}$  para a pupunha *in natura* e cozida (base úmida), respectivamente, sugerindo mudanças químicas nesses pigmentos provavelmente pela descomplexação de carotenoides, o que reflete na intensificação da coloração alaranjada e aumento do teor de carotenoides totais na pupunha cozida. (ANDRADE; PANTOJA, MAEDA, 2003).

Segundo Rojas-Garbanzo et al. (2011) o  $\beta$ -caroteno é o principal pigmento encontrado na pupunha, tanto na forma *in natura* quanto cozida. Os autores encontraram valores médios de  $\beta$ -caroteno de 17,21  $\mu\text{g}/100$  g de amostra (base úmida) para pupunha cozida, ao estudarem a identificação e quantificação de carotenoides por HPLC-DAD de pupunha (*Bactris gasipaes* HBK).

Para o filme comestível, pode-se observar que os valores de carotenoides totais foram inferiores quando comparados com os obtidos para a pupunha cozida. A secagem por Refractance Window diminuiu, em média 9%, a concentração dos carotenoides totais. Esse comportamento pode ser devido à presença de reações sensíveis ao calor, envolvendo a degradação de pigmentos responsáveis pela coloração amarela.

Segundo Rodriguez-Amaya (2001), os carotenoides são relativamente estáveis em processamento envolvendo calor, porém em temperaturas elevadas podem sofrer mudanças em suas estruturas químicas. Segundo Lago-Vanzela et al. (2013) durante o processo de secagem a 70°C, os carotenoides podem ser degradados pela exposição ao calor e ao oxigênio, com um aumento dos carotenoides isômeros *cis*.

## 5.5 PROPRIEDADES TECNOLÓGICAS

Os resultados para índice de higroscopicidade, solubilidade e índice de absorção de água são apresentados na Tabela 13.

A solubilidade em água é uma propriedade importante dos filmes comestíveis no que se refere ao seu emprego, pois algumas aplicações requerem insolubilidade em água para manter a integridade do produto (PEREZ-GAGO; KROCHTA, 2001).

**Tabela 13** Higroscopicidade (HG), índice de absorção (IAA) e solubilidade (ISA) em água de filmes comestíveis.

Filme comestível*	HG (g de H <sub>2</sub> O absorvida/100 g de matéria seca)	IAA (g de H <sub>2</sub> O/g de matéria seca)	ISA (%)
L <sub>1</sub>	8,73 ± 0,15 <sup>a</sup>	5,28 ± 0,01 <sup>a</sup>	7,54 ± 0,02 <sup>a</sup>
L <sub>2</sub>	7,32 ± 0,41 <sup>b</sup>	5,01 ± 0,02 <sup>b</sup>	3,15 ± 0,65 <sup>b</sup>
L <sub>3</sub>	8,94 ± 0,57 <sup>a</sup>	5,20 ± 0,02 <sup>a</sup>	7,28 ± 0,54 <sup>a</sup>
L <sub>4</sub>	7,29 ± 0,31 <sup>b</sup>	5,01 ± 0,06 <sup>b</sup>	2,73 ± 0,63 <sup>b</sup>

\*Letras diferentes na mesma coluna indicam diferença significativa ( $p \leq 0,05$ ); Valores médios (média ± desvio-padrão) de três replicatas.

Pode-se observar que os maiores valores de ISA foram encontrados para os filmes comestíveis de Lote 1 e 3, os quais apresentaram menores valores de umidade (7,84 e 6,54 g de H<sub>2</sub>O/g de amostra em base seca, L<sub>1</sub> e L<sub>3</sub> respectivamente). Valores estes, bem diferentes aos encontrados por Caparino et al. (2012), que comparando a solubilidade de pós de manga, obtiveram uma solubilidade de 90% para os pós obtidos por Refractance Window, com umidade de 17 g de H<sub>2</sub>O/g de matéria seca.

De acordo com os resultados apresentados na Tabela 13 pode-se constatar a baixa absorção de água dos filmes comestíveis, estes baixos valores sugerem que a água se liga fracamente com o filme. Outro componente que pode ter influenciado nos baixos valores de índice de absorção de água foi o teor de lipídios, visto que, a absorção reflete a capacidade de absorção e retenção de água, e depende da exposição de grupos hidrofílicos e/ou hidrofóbicos

das moléculas de uma determinada amostra (ANDRADE, 2014). Amostras com baixa umidade, nas condições citadas anteriormente, apresentaram também maiores valores de IAA quando comparadas com os filmes L<sub>2</sub> e L<sub>4</sub>.

Segundo Martins (2001), a higroscopicidade é a propriedade de adsorver água da atmosfera. Dependendo do tipo de produto alimentício, a higroscopicidade pode ser benéfica, como no caso de pães e bolos, ou prejudicial como no caso de balas, preparos sólidos para refresco, açúcares, filmes/ plásticos /revestimentos comestíveis etc.

Sendo um produto higroscópico, os filmes comestíveis têm a propriedade de absorver ou “perder” água do ambiente, tendendo a manter uma relação de equilíbrio de água e com ambiente. Os valores de higroscopicidade apresentados na Tabela 13 são inferiores aos obtidos por Caparino et al. (2012) ao estudarem o efeito de diferentes métodos de secagem sobre as propriedades físicas e das microestruturas da manga (*Philippine ‘Carabao’* var.), quando armazenadas em ambiente com umidade relativa de 75%. Porém as médias de higroscopicidade foram similares às encontradas por Santos (2014) (7,90 a 9,27%), ao estudar a obtenção de filmes comestíveis à base de tucupi, jambu (*Acmella oleracea*) e banana verde (*Musa cavendishii*), através do processo de secagem por Refractance Window.

Dessa forma, segundo Nunes, Duarte e Mata (2009), a higroscopicidade de um alimento está ligada à sua estabilidade física, química e microbiológica, e por isso, torna-se importante o conhecimento do comportamento higroscópico desses produtos.

## 5.6 PROPRIEDADES MECÂNICAS

Os dados experimentais das medidas de espessura, resistência à tração e alongação dos filmes comestíveis estão descritos na Tabela 14. Os diferentes filmes obtidos a partir da secagem de pasta de tucupi e pupunha apresentaram espessura média de 0,20 mm, sem diferença significativa entre si, evidenciando homogeneidade entre os filmes.

Os resultados encontrados na Tabela 14 estão de acima ao encontrados com Farias et al. (2012) ao estudarem filmes comestíveis de amido adicionado de acerola (*Malpighia emarginata* D.C.) (0,121 a 158 mm). Entretanto, os valores estão dentro da faixa relatada por Park e Chinnan (1995) ao estudarem filmes à base de zeína de trigo (0,120-0,310 mm). Zavareze et al. (2012) encontraram espessuras para filmes biodegradáveis à base de proteínas miofibrilares de pescado que, variaram de 0,137 a 0,223 mm. Andrade (2014) encontrou valores médios de 0,242 mm para filmes à base de resíduos de frutas e hortaliças.

**Tabela 14** Propriedades mecânicas dos filmes comestíveis à base de tucupi e pupunha.

Filme comestível	Espessura (mm)	RT (MPa)*	Elon (%)*
L <sub>1</sub>	0,20 ± 0,03 <sup>a</sup>	7,86 x 10 <sup>-2</sup> ± 0,03 <sup>b</sup>	4,76 ± 1,97 <sup>a</sup>
L <sub>2</sub>	0,21 ± 0,05 <sup>a</sup>	8,19 x 10 <sup>-2</sup> ± 0,03 <sup>b</sup>	7,04 ± 2,00 <sup>a</sup>
L <sub>3</sub>	0,21 ± 0,04 <sup>a</sup>	6,32 x 10 <sup>-2</sup> ± 0,04 <sup>b</sup>	6,60 ± 0,94 <sup>a</sup>
L <sub>4</sub>	0,17 ± 0,06 <sup>a</sup>	2,89 x 10 <sup>-1</sup> ± 0,11 <sup>a</sup>	7,48 ± 1,97 <sup>a</sup>

\*RT resistência à tração (megaPascal);

\*Elon alongação na ruptura;

Letras diferentes na mesma coluna indicam diferença significativa ( $p \leq 0,05$ );

Valores médios (média ± desvio-padrão) de cinco replicatas.

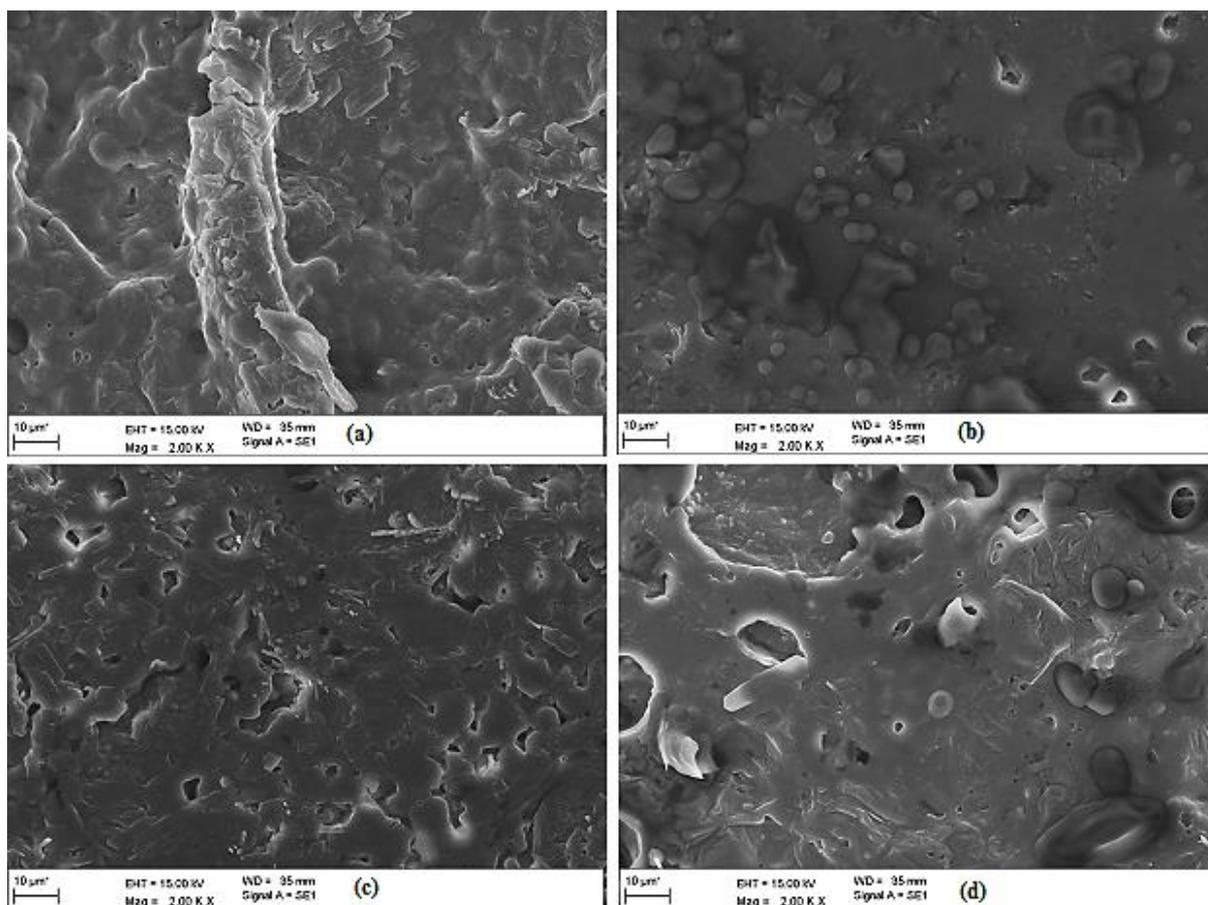
Com os dados apresentados na Tabela 14 pode-se observar que a resistência à tração para o filme comestível L<sub>4</sub> foi significativamente maior do que os demais filmes, o que pode ser explicado devido à amostra L<sub>4</sub> apresentar um maior valor de umidade (12,17 g de H<sub>2</sub>O/100 g de matéria seca), ocasionando uma sutil elasticidade ao filme comestível. Porém, todas as amostras apresentaram baixos valores de resistência à tração, fato que pode ser justificado pelo alto teor de amido (aproximadamente 35 a 54 g de amido/100 g de pupunha cozida) encontrado na pupunha (YUYAMA et al., 1991 e ANDRADE; PANTOJA; MAEDA, 2003).

A média de resistência à tração obtida foi inferior a de filmes comestíveis de amido adicionado de acerola (*Malpighia emarginata* D.C.) (0,775 a 3,972 MPa) (FARIAS et al., 2012). Entretanto, os valores estão dentro da faixa relatada para filmes à base de resíduos de frutas e hortaliças (2,7 a 8,4x10<sup>-2</sup> MPa) (ANDRADE, 2014).

A alongação na ruptura é a variação máxima de comprimento de uma amostra teste, submetida a uma tensão, antes de se romper (PEREDA; AMICA; MARCOVICH, 2012). As amostras de filmes comestíveis não apresentaram diferença significativa entre si para a porcentagem de alongação na ruptura. A média da alongação dos filmes foi similar a de filmes elaborados à base de vegetais (aproximadamente 7%) (MCHUGH; OLSEN, 2002), de filmes compostos de gelatina, triacetina, ácido esteárico ou capríco (3,6% e 7%, filme com ácido esteárico e ácido capríco, respectivamente) (DAVANÇO; TANUDA-PALMU; GROSSO, 2007). Assim, como na resistência à tração a ruptura, a alongação dos filmes sofre influência pela ação das cadeias poliméricas, dificultando a flexibilidade e extensibilidade dos filmes (PARRA et al., 2004).

### 5.7 MICROSCOPIA ELETRÔNICA DE VARREDURA (MEV)

A Figura 22 apresenta algumas microfotografias por microscopia eletrônica de varredura (MEV) dos filmes obtidos a partir da secagem de pasta de tucupi e pupunha por Refractance Window. As morfologias foram avaliadas em relação a superfícies externas dos filmes comestíveis e com ampliação de 2000x.



**Figura 22** Micrografias eletrônicas de varredura (MEV) de diferentes filmes comestíveis obtidos por Refractance Window, ampliação de 2.00kx (10 µm) com aceleração de 15.00 kV. (a) Lote 1, (b) Lote 2, (c) Lote 3 e (d) Lote 4.

Vários estudos envolvendo a avaliação de filmes e envoltórios comestíveis têm utilizado a microscopia eletrônica de varredura como ferramenta, buscando correlacionar as propriedades dos mesmos com a estrutura morfológica (SOUZA, 2001). A microscopia permite observar as estruturas de materiais poliméricos e os efeitos dos diversos tratamentos a esses materiais.

As micrografias das superfícies dos filmes revelaram estruturas externas pouco homogêneas, pois segundo Souza, Sobral e Menegalli (2004) essas heterogeneidades se

devem provavelmente, aos canais formados nos interiores das estruturas dos filmes, devido à saída da água durante o processo de secagem, com consequente formação de poros superficiais.

Segundo os resultados da microscopia eletrônica de varredura (MEV), nas Figuras 22b e 22c pôde-se observar a presença de partículas de diferentes formas e tamanhos, alguns grânulos de amido não gelatinizados ou parcialmente gelatinizados. Para o filme comestível de lote 3 (Figura 22c), as morfologias aparecem como um conjunto desordenado de partículas cristalizadas de diferentes tamanhos. Segundo Pires (2013), quando se avalia as micrografias eletrônicas de varredura, observa-se, que após o cozimento, estes grânulos de amido de pupunha alteram sua estrutura interna, porém mesmo após o cozimento a 121°C/60 minutos alguns grânulos de amido ainda podem ser observados, o que sugere resistência deste grânulo a temperatura ao qual foi submetida.

Outro fenômeno que pode ser explicado pela migração da umidade durante a secagem é o surgimento de cristais distribuídos regularmente na superfície do filme (Figura 22c). Segundo Souza, Sobral e Menegalli (2004) esses cristais podem ser visíveis em algumas regiões da superfície do filme, devido à migração de sais ocorrendo em paralelo com a migração da umidade, fenômeno conhecido como incrustação.

Os filmes comestíveis L<sub>3</sub> e L<sub>4</sub> (Figura 22c e 22d) apresentaram algumas fraturas nas superfícies, o que podem ser provenientes do enrugamento da superfície devido ao processo de secagem. Rigo (2006) também observou fraturas na superfície ao estudar e caracterizar filmes comestíveis a partir de amido (nativo e modificado) e alginato de sódio. Caprino et al. (2012) ao estudarem a secagem de purê de manga por Refractance Window encontraram microestruturas lisas e escamosas com espessuras uniformes. A uniformidade da espessura do produto foi devido ao resultado de uma alimentação controlada de purê de manga e usando uma barra de afastamento (espalhador) na secção de entrada do secador de RW.

## 6 CONCLUSÃO

Os resultados obtidos para os filmes comestíveis foram promissores, tendo em vista a utilização de matérias-primas regionais para elaboração de um novo produto, que pode ser utilizado como um separador de componentes, por exemplo, em pizzas, onde apresenta baixa umidade e o recheio alta umidade, ou na substituição de algas em sushis ou como *snacks*.

Os filmes elaborados com tucupi e pupunha foram homogêneos em relação à espessura e de coloração alaranjada, devido às quantidades significativas de carotenoides. Apresentaram fácil manipulação e desprendimento do suporte de secagem. Os baixos teores de umidade e atividade de água dos filmes obtidos demonstraram ser favoráveis para a garantia da estabilidade microbiológica. Os filmes comestíveis à base de pupunha e tucupi podem ser considerados excelentes fontes de carboidratos, concentração maior de que 60% e excelente fonte de energia, em média 407 kcal/100g.

Revestimentos comestíveis, biofilmes ou filmes biodegradáveis podem ajudar a reduzir o volume de plástico descartado no ambiente. As embalagens de alimentos são planejadas para o descarte imediato após o consumo do produto, o que gera uma grande quantidade de lixo. Já o filme comestível não gera lixo.

No geral, o estudo conclui que o método de secagem por RW pode produzir filmes comestíveis qualidade superior em comparação com os filmes obtidos por adição de soluções filmogênicas como: à base de amido de mandioca, de farinhas de resíduos de frutas e hortaliças, de propileno glicol, de proteínas miofibrilares e quitosanas.

## 7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABONYI, B. I.; FENG, H.; TANG, J.; EDWARDS, C. G.; CHEW, B. P.; MATTINSON, D. S.; FELLMAN, J. K. Quality Retention in Strawberry and Carrot Purees Dried with Refractance Window System. **Journal of Food Science**, v. 67, n. 2, p. 1052-1056, 2001.

ABUSHITA, A.; DAOOD, H.; BIACS, P. Change in carotenoids and antioxidant vitamins in tomato as a function of varietal and technological factors. **Journal of Agricultural and Food Chemistry**, v. 48, p. 2075–2081, 2000.

ADRIANO, E.; LEONEL, S.; EVANGELISTA, R. M. Qualidade de fruto da aceroleira cv. Olivier em dois estádios de maturação. **Revista Brasileira de Fruticultura**, v. 33, p. 541-545, 2011.

AGHBASHLO, M.; MOBLI, H.; RAFIEE, S.; MADADLOU, A. Energy and exergy analyses of the spray drying process of fish oil microencapsulation. **Biosystems Engineering**, v. 111, p. 229-241, 2012.

AKPINAR, E. K.; BICER, Y.; YILDIZ, C. Thin layer drying of red pepper. **Journal. Food Engineering**, v. 59, n. 1, p. 99-104, 2003.

ANDERSON, R. A.; CONWAY, H. F.; PFEIFER, V. F.; GRIFFIN JUNIOR, E. L. Gelatinization of corn grits by roll-and extrusion-cooking. **Cereal Science Today**, Minneapolis, v. 14, n. 1, p. 44-11, 1969.

ANDRADE, J. S.; PANTOJA, L.; MAEDA, R. N. Melhoria do rendimento e do processo de obtenção da bebida alcoólica de pupunha (*Bactris gasipaes* Kunth). **Ciência e Tecnologia de Alimentos**, Campinas, v. 23, p. 34-38, 2003. Suplemento

ANDRADE, R. M. S. Desenvolvimento e caracterização de filmes biodegradáveis à base de resíduos de frutas e hortaliças. Dissertação de Mestrado - Programa de Pós-Graduação em Alimentos e Nutrição, Universidade Federal do Estado do Rio de Janeiro (UNIRIO), Rio de Janeiro, 2014.

AOAC. **Association of Official Analytical Chemists**. Official methods of analysis. Washington, 1997.

BARBOSA-CÁNOVAS G.; V.; MERCADO, V.; H. Deshidratación de Alimentos. **Editorial ACRIBIA S.A.** Zaragoza (España), p. 89-134, 2000.

BARBOSA, S. J. Qualidade de suco em pó de mistura de frutas obtido por *spray-drying*. Dissertação de Mestrado - Programa de Pós-Graduação em Produção Vegetal no Semiárido. p. 22, Universidade de São Carlos (UNIMONTES), Janaúba, Minas Gerais, Brasil, 2010.

BERGMAN, T. L.; Incropera, F. P.; DeWitt, D. P.; Lavine, A. S. **Introduction to Heat Transfer**. 6 th edition, John Wiley & Sons, p. 750-751, 2011.

BOURDOUX, P., SEGHERS, P., MAFUTA, M., VANDERPAS, J., VANDERPAS-RIVERA, M., DELANGE, F., ERMANS, A.M. Cassava products: HCN content and detoxification processes. In: DELANGE, F.; ITEKE, F.B.; ERMANS, A.M. (Ed.) **Nutritional factors involved in the goitrogenic action of cassava**. Ottawa: IDRC, p. 100, 1982.

CAI, Y.Z.; CORKE, H. Production and properties of spray-dried *Amaranthus* betacyanin pigments. **Journal of Food Science**, v.65, n.6, p.1248-1252, 2000.

CAL, K.; SOLLOHUB, K. *Spray-Drying* Technique. I: Hardware and Process Parameters. **Journal of Pharmaceutical Sciences**, v. 99, n. 2, p. 575-586, 2010.

CAGNON, J. R; CEREDA, M. P, PANTAROTTO, S. Glicosídeos cianogênicos da cassava: biossíntese, distribuição, destoxificação e métodos de dosagem. **In:** Cereda MP, coordenador. Tuberosas amiláceas latino-americanas. São Paulo: Fundação Cargill, p. 83-99, 2002.

CAPARINO, O. A.; TANG, J.; NINDO, C. I.; SABLANI, S. S.; POWERS, J. Q.; FELLMAN, J. K. Effect of drying methods on the physical properties and microstructures of mango (Philippine 'Carabao' var.) powder. **Journal of Food Engineering**, v. 111, n. 1, p. 135-148, 2012.

CARVALHO, J. E. U. DE NASCIMENTO, W. M. O.; MÜLLER, C. H. **Abieiro**: Jaboticabal Funep, p. 33. 2010.

CARVALHO, V. C.; BECKMAN, J. C.; MACIEL, R. A. M.; NETO, J. T. F. Características físicas e químicas de frutos de pupunheira no estado do Pará. **Revista Brasileira de Fruticultura**, Jaboticabal - SP, v. 35, n. 3, p. 763-768, 2013.

- CASTOLDI, M. Estudo do Processo de Secagem de Polpa de Tomate por Refractance Window. Dissertação de Mestrado em Engenharia de Alimentos. Florianópolis: Universidade Federal de Santa Catarina, 2012.
- CEREDA, M. P. Caracterização dos subprodutos da industrialização da mandioca. **In:** Cereda MP, coordenador. Manejo, uso e tratamento de subprodutos da industrialização da mandioca. São Paulo: Fundação Cargill, p.13-37, 2002.
- CHISTÉ, R. C, COHEN, K. O; OLIVEIRA, S. S. Estudo das propriedades físico-químicas do tucupi. **Ciência e Tecnologia de Alimentos**, v. 3, n. 27, p. 787-92, 2007.
- CHISTÉ, R. C; COHEN, K. O. Teor de cianeto total e livre nas etapas de processamento do tucupi. **Revista Instituto Adolfo Lutz**, v. 1, n. 70, p. 41-6, 2011.
- CHITARRA, M. I. F.; CHITARRA, A. B. **Pós-colheita de frutas e hortaliças: fisiologia e manuseio**. 2º ed. Lavras: UFLA, p. 785, 2005.
- CLEMENTE, C. R. Pupunha uma árvore domesticada. **Ciência Hoje**, v. 5, n. 29, 1987.
- CLEMENTE, C. R.; ARKOLL.; D. B. The *Bactris gasipaes* H. B. K. (*Palmae*) as an oil producing crop: potential and priorities of investigation. **In: Informe del Seminario – Taller sobre Oleaginosas Promisorias** L., E. Forero P. (Ed). Bogotá (Colombia): Programa Interdisciplinarias de Recursos Biológicos (Spanish), 1985.
- CLEMENT, C.R.; MORA-URPÍ, J. The pejobaye (*Bactris gasipaes* H.B.K., Arecaceae): multi-use potential for the lowland humid tropics {A pupunha: potencial multi-uso para os trópicos úmidos baixos}. **Economic Botany**, v. 41 n. 2, p. 302-311, 1987.
- CLEMENT, C.R. Pupunha (*Bactris gasipaes* Kunth, *Palmae*). Jaboticabal, SP: **Fundep** (Série Frutas Nativas), v.8, p. 48, 2000.
- CLEMENT, J. C.; WEBER, C.; VAN LEEUWEN, D. M.; ASTORGA, L. A.; COLE, H. A.; AGUELLO, H. Why extensive research and development did not promote use of peach palm fruit in Latin America. **Agroforestry Systems**, v. 61, p. 195–206, 2004.
- CORRÊA, P.C.; RESENDE, O.; MARTINAZZO, A.P.; GONELI, A.L.D.; BOTELHO, F.M. Modelagem matemática para a descrição do processo de secagem do feijão (*Phaseolus vulgaris* L.) em camadas delgadas. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v.27, n.2, p.501-507, 2007.

- CRANK, J. **The mathematics of diffusion**. 2ed. Laredron Press Oxford, p. 414, 1975.
- DA SILVA, J. B.; CLEMENT, C. H. Wild pejibaye (*Bactris gasiapes* Kunth var. *chichagui*) in southeastern Amazonia. **Acta Botanica Brasilica**, v. 19, n. 2, p. 281–284, 2005.
- DAVANÇO, T.; TANADA-PALMU, P.; GROSSO, C. Filmes compostos de gelatina, triacetina, ácido esteárico ou caprótico: efeito do pH e da adição de surfactantes sobre a funcionalidade dos filmes. **Ciência Tecnologia de Alimentos**, Campinas, v. 27, n. 2, p. 408-416, 2007.
- DE SÁ, M. C.; RODRÍGUEZ-AMAYA, D. B. Optimization of HPLC quantification of carotenoids in cooked green vegetables — Comparison of analytical and calculated data. **Journal of Food Composition and Analysis**, v. 17, p. 37–51, 2004
- DOYMAZ, I. The kinetics of forced convective air-drying of pumpkin slices. **Journal of Food Engineering**, v. 79, n. 1, p. 243-248, 2007.
- DUARTE, C. R. Estudo experimental e de simulação da fluidodinâmica e revestimento de partículas em leite de jorro. 197 f. Tese de Doutorado em Engenharia Química - Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia-MG, 2006.
- EMBRAPA. **Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária**. Brasília, DF, 2007.
- EPSTEIN, N.; GRACE, J. R. Spouted and Spout-Fluid Beds – Fundamentals and Applications. Cambridge, 2011.
- EVРАНUZ, E. O. Drying vegetables: new technology, equipment and examples. Em **Handbook of Vegetables and Vegetable Processing**. Ed. Sinha, N. K. Blackwell Publishing Ltd, 299-315, 2011.
- FAKHOURI, F. M. Coberturas comestíveis aplicadas na preservação de goiabas in natura (*Psidium guajava* L.) Dissertação de Mestrado - Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia de Alimentos, Campinas, 2002.
- FARIAS, M. G.; FAKHOURI, F. M.; CARVALHO, C. W. P.; ASCHERI, J. P. R. Caracterização físico-química de filmes comestíveis de amido adicionado de acerola (*Malpighia emarginata* D.C.). **Química Nova**, v. 35, n. 3, p. 546-552, 2012.

FELLOWS, P. J. Principles and practice. 2 ed. **Food Processing Technology**. Cambridge: Woodhead Publishing Limited, p. 575, 2000.

FERREIRA, W de A.; BOTELHO, S. M.; CARDOSO, E. M. R.; POLTRONIERI, M. C. Manipueira: um adubo orgânico em potencial. Belém: Embrapa Amazônia Oriental (Embrapa Amazônia Oriental. Documentos, 107), p 21, 2001.

FERREIRA, C. D.; PENA, R. S. Comportamento higroscópico da farinha de pupunha (*Bactris gasipaes*). **Ciência e Tecnologia de Alimentos**, Campinas, v. 23, n. 2, p. 251-255, 2003.

FREIRE, J.T. Drying of pastes in spouted bed. **In** Special Topics in Drying. Freire, J.T., Sartori, D.J.M., Eds.; São Carlos, Brazil, 1992.

FREITAS, L. A. P.; ANDRADE, T. C.; TEIXEIRA, C. C. C.; TACON, L. A.; TSUKADA, M. Innovative applications of spray drying. **In**: JOSÉ, M. J. S. (Ed.). **Advances in Chemical Engineering**, cap. 1, p.1-13, 2010.

GAMA, J.; SYLOS, C. Major carotenoids composition of Brazilian Valencia orange juice: Identification and quantification by HPLC. **Food Research International**, v. 38, p. 899–903, 2005.

HUNTERLAB. Applications note: CIE L\* a\* b\* color scale. v. 8, n. 7, Virginia, 1996.

KAHYAOGLU, L. N.; SAHIN, S.; SUMNU, G. Physical properties of parboiled wheat and bulgur produced using spouted bed and microwave assisted spouted bed drying. **Journal of Food Engineering**, v. 98, n. 2, p. 159-169, 2010.

JACOB-LOPES, E.; ZEPKA, L. Q.; PINTO, L. A. P.; QUEIROZ, M. I. Secagem da microalga *Aphanothece microscopica* Nägeli em leito de jorro. **Alimentos e Nutrição**, v. 17, n. 4, p. 387-392, 2006.

LAGO-VANZELA, E. S.; DO NASCIMENTO, P.; FONTES, E. A. F.; MAURO, M. A.; KIMURA, M. Edible coatings from native and modified starches retain carotenoids in pumpkin during drying. **LWT - Food Science and Technology**, v. 50, n. 2, p. 420-425, 2013.

LESSIN, W.; CATIGANI, G.; SCHWARTZ, S. Quantification of cis–trans isomers of provitamin A carotenoids in fresh and processed fruits and vegetables. **Journal of Agricultural and Food Chemistry**, v. 45, p. 3728–3732, 1997.

- GAVA, A. J. **Princípios de tecnologia de alimentos**. São Paulo: Nobel, p. 200, 2000.
- LETERME, M. F.; GARCÍA, A.; LONDOÑO, M.; ROJAS, A.; BULDGEN, W. Souffrant Chemical composition and nutritive value of peach palm (*Bactris gasipaes* Kunth) in rats. **Journal of the Science and Food Agriculture**, v. 85, p. 1505–1512, 2005.
- LIMA, L. M. O. Estudo do aproveitamento do bagaço de frutas tropicais, visando a extração de fibras. Dissertação de Mestrado em Engenharia Química - Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, p. 187, 2001.
- MADAMBA, P. S. Thin layer drying models for osmotically pré-dried young coconut. **Drying technology**, v.21, n.9, p.1759-1780, 2003.
- MAGOON, R. E. Method and apparatus for drying fruit pulp and the like. **US Patent**: 4,631,837, 1986.
- MALI, S.; GROSSMANN, M. V. E.; YAMASHITA, F. Filmes de amido: produção, propriedades e potencial de utilização. **Semina: Ciências Agrárias**, v. 31, n. 1, p. 137-156, 2010.
- MARTINS, M. Açúcar invertido: Propriedades e aplicações. **Revista Food Ingredients: Guia 2001 de Fornecedores**, v. 2, n. 10, p. 1-97, 2001.
- MASTERS, K. **Spray-Drying Handbook**. 5th ed. New York, USA: Wiley, 1991.
- MATHUR, K. B.; EPSTEIN, N. **Spouted Beds**. 1.ed London: Academic Press, p.304, 1974.
- MEDEIROS, M. F. D. Influência da composição química dos materiais no desempenho do processo de secagem de polpas de frutas em leito de jorro. Tese de Doutorado em Engenharia Química. Universidade Estadual de Campinas, Campinas (SP), 2001.
- MEDEIROS, M. F. D.; ROCHA, S. C. S.; ALSINA, O. L. S.; JERÔNIMO, C. E. M.; MEDEIROS, U. K. L.; DA MATA, A. L. M. L. Drying of pulps of tropical fruits in spouted bed: effect of composition on dryer performance. **Drying Technology**, v. 20, n. 4/5, p. 855-881, 2002.
- MCHUGH, T. H.; OLSEN, C. W. Tensile properties of fruit and vegetable edible films. **In: Annual Meeting and Food Expo**, Anaheim, California. 2002.

- MIDILLI, A.; KUCUK, H.; YAPAR, Z. A. New model for single-layer drying. **Drying Technology**, v. 20, n.7, p. 1503–1513, 2002.
- MOHAPATRA, D.; RAO, P. S. A thin layer drying model of parboiled wheat. **Journal of Food Engineering**, London, v. 66, n. 4, p. 513-518, 2005.
- NIAMNUY, C.; DEVAHASTIN, S.; SOPONRONNARIT, S.; RAGHAVAN, G. S. V. Modeling coupled transport phenomena and mechanical deformation of shrimp during drying in a jet spouted bed dryer. **Chemical Engineering Science**, v. 63, n. 22, p. 5503-5512, 2008.
- NINDO, C.I.; SUN, T.; WANG, S. W.; TANG, J.; POWERS, J. R. Evaluation of drying technologies for retention of physical quality and antioxidants in asparagus (*Asparagus officinalis*, L.). **LWT - Food Science and Technology**, v. 36, n. 5, p. 507–516, 2003.
- NINDO, C. I.; TANG, J. Refractance Window dehydration technology: a novel contact drying method. **Drying Technology**, v. 25, p. 37-48, 2007.
- NUNES, L. S.; DUARTE, M. E. M.; MATA, M. E. R. M. C. AVALIAÇÃO DO COMPORTAMENTO HIGROSCÓPICO DE AMIDO DE INHAME. **Revista Brasileira de Produtos Agroindustriais**, Campina Grande, v. 11, n. 2, p.149-158, 2009.
- OCHOA-MARTÍNEZ, C. I.; QUINTERO, P. T.; AYALA, A. A.; ORTIZ, M. J. Drying characteristics of mango slices using the Refractance Window technique. **Journal of Food Engineering**, v. 109, p. 69–75, 2012.
- OCORÓ-ZAMORA, M. U.; AYALA-APONTE, A, A. Influence of thickness on the drying of papaya puree (*Carica papaya* L.) through Refractance Window technology. **Dyna**, v. 80, n. 182, p. 147-154, 2013.
- OLIVEIRA, O. W.; PETROVICK, P. R. Secagem por aspersão (*spray-drying*) de extratos vegetais: bases e aplicações. **Revista Brasileira de Farmacognosia**, v. 20, n. 4, p. 641-650, 2010.
- OZDEMIR, M.; DEVRES, Y. O. The thin layer drying characteristics of hazelnuts during roasting. **Journal of Food Engineering**, v. 42, n. 4, p. 225-233, 1999.
- PANCHARIYA, P. C.; POPOVIC, D.; SHARMA, A. L. Thin-layer modeling of black tea drying process. **Journal of Food Engineering**, v. 52, n. 04, p. 349-357, 2002.

PARDO, F. A. E.; MARTINEZ, J.; CORREA, H. A. M. Extraction of bioactive compounds from peach palm pulp (*Bactris gasipaes*) using supercritical CO<sub>2</sub>. **The Journal of Supercritical Fluids**, v. 93, p. 2-6, 2014.

PARK, H. J.; CHINNAN, M. S. Gas and water vapor barrier properties of edible films from protein and cellulosic materials. **Journal of Food Engineering**, v. 25, n. 4, p. 497-507, 1995.

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

PARK, K.J.; BROD, F.P.R.; ALONSO, L.F.T. Secagem de produtos agrícolas. **In: XI SEMAGRI – Semana de Engenharia Agrícola da Unicamp. Campinas (SP): Agrológica – Empresa Júnior de Engenharia Agrícola, p. 41-55, 2006.**

PARRA, D. F.; TADINI, C. C.; PONCE, P.; LUGÃO, A. B. Mechanical properties and water vapor transmission in some blends of cassava starch edible films. **Carbohydrate Polymers**, v. 58, n. 4, p. 475–481, 2004.

PASSOS, M. L.; MASSARANI, G.; FREIRE, J. T.; MUJUMDAR, A. S. Drying of pastes in spouted beds of inert particles: design criteria and modeling. **Drying Technology**, v.15, n.2, p. 605-624, 1997.

PAVAN, M. A. Effects of freeze drying, Refractance Window drying and hot-air drying on the quality parameters of açaí.. Thesis (**Master of Science in Food Science and Human Nutrition**). 88 f, 2010.

PAVAN, M. A.; SCHIMIDT, S. J.; FENG, H. Water sorption behavior and thermal analysis of freeze-dried, Refractance Window-dried and hot-air dried açaí (*Euterpe oleracea* Martius) juice. **Journal of Food Science and Technonoly**, v. 48, p. 75-78, 2012.

PEREDA, M.; AMICA, G.; MARCOVICH, N. E. Development and characterization of edible chitosan/olive oil emulsion films. **Carbohydrate Polymers**, v. 87, n. 2, p. 1318-1325, 2012.

PEREZ-GAGO, M.B.; KROCHTA, J.M. Denaturation time and temperature effects on solubility, tensile properties, and oxygen permeability of whey protein edible films. **Journal of Food Science**, v.66, p.705-710. 2001.

PESCE, C. Oleaginosas da Amazônia. 2 ed., rev. e atual./ Celestino Pesce;. – Belém: Museu Paraense Emílio Goeldi, Núcleo de Estudos Agrários e Desenvolvimento Rural, 2009.

PIAIA, J. C. Z. Secagem da linguiça calabresa: experimentação e modelagem 3D aplicadas a fornos industriais. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis (SC), 2009.

PIRES, M. B. Obtenção de farinhas de pupunha (*Bactris gasipaes*) para aplicação no desenvolvimento de produtos. Dissertação de Mestrado – Universidade Federal do Pará, Belém (PA), 2013.

RAHMAN, S. **Food Properties Handbook**. CRC Press, 1995.

RIBEIRO, S. C. A.; RIBEIRO, C. F. A.; PARK, K. J.; ARAUJO, E. A. F.; TOBINAGA, S. Alteração da cor da carne de Mapará (*Hypophthalmus edentatus*) desidratada osmoticamente e seca. **Revista Brasileira de Produtos Agroindustriais**, v. 9, n. 2, p. 125-135, 2007.

RIEKES, M. K. Nimodipino: do polimorfismo à obtenção de dispersões sólidas amorfas destinadas ao tratamento da hipertensão arterial. Dissertação de Mestrado - Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis (SC), p. 73, 2013.

RIGO, L. N. Desenvolvimento e caracterização de filmes comestíveis. Dissertação de Mestrado – Universidade Regional Integrada do Alto do Uruguai e das Missões, Erechim (RS), 2006.

RODRIGUEZ-AMAYA, D. B. **A Guide to Carotenoid Analysis in Foods**. Washington DC: International Life Sciences Institute (ILSI) Press, p. 64, 1999.

RODRIGUEZ-AMAYA, D. B. **A Guide to Carotenoid Analysis in Foods**. ISLI Press, Washington DC, USA, 2001.

ROJAS-GARBANZO, C.; PÉREZ, A. M.; BUSTOS-CARMONA, J.; VAILLANT, F. Identification and quantification of carotenoids by HPLC-DAD during the process of peach palm (*Bactris gasipaes* H.B.K.) flour **Food Research International**, v. 44, n. 7, p. 2377-2384, 2011.

SAFFARI, M.; LANGRISH, T. Effect of lactic acid in-process crystallization of lactose/protein powders during spray drying. **Journal of Food Engineering**, v. 137, p. 88-94, 2014.

SANTOS, P. H. C. Obtenção de um produto desidratado à base de tucupi, jambu e banana verde através do processo de Refractance Window. Dissertação de Mestrado- Universidade Federal do Pará, Belém (PA), 2014.

SOUZA, S. M. A. Elaboração e caracterização de filmes comestíveis biodegradáveis a base de proteínas miofibrilares de origem bovina. Tese de Doutorado – Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia de Alimentos, Campinas, 2001.

SOUZA, S. M. A.; SOBRAL, J. P. A.; MENEGALLI, F. C. Extração de proteínas miofibrilares de carne bovina para elaboração de filmes comestíveis. *Ciência e Tecnologia de Alimentos*, v. 24 n. 4, p. 619-626, 2004.

TOPUZ, A.; DINCER, C.; ÖZDEMİR, K. S.; FENG, H.; KUSHAD, M. Influence of different drying methods on carotenoids and capsaicinoids of paprika (Cv., Jalapeno). **Food Chemistry**, v. 129, p. 860–865, 2011.

VEGA-MERCADO, H.; GOONGORA-NIETO, M. M.; BARBOSA-CAANOVAS, G. V. Advances in dehydration of foods. **Journal of Food Engineering**, v. 49, p. 271–289, 2001.

YOKOMIZO, G. K.; NETO, J. T. F. Caracterização fenotípica e genotípica de progênies de pupunheira para palmito. **Pesquisa agropecuária brasileira**. v. 38. n. 1. p. 67-72, 2003.

YUYAMA, L. K. O.; FÁVARO, R. M. D.; YUYAMA, K.; VANNUCHI, H. Bioavailability of vitamin a from peach palm (*Bactris gasipaes* H.B.K.) and from mango (*Mangifera indica* L.) in rats. **Nutrition Research**, v. 11, p. 1167-1175, 1991.

ZAVAREZE, E. A.; HALAL, S. L. M.; TELLES, A. C.; PRENTICE-HERNÁNDEZ, C. Filmes biodegradáveis à base de proteínas miofibrilares de pescado. **Brazilian Journal Food Technology**, v. 15, n. spe, p. 1981-6723, 2012.

## ANEXO

Tabela A1 Parâmetros dos ajustes dos modelos matemáticos.

Modelo	Amostra	Parâmetros										
		a	b	c	k	k <sub>o</sub>	k <sub>1</sub>	n	g	R <sup>2</sup>	x <sup>2</sup>	RMSE
Page modificado	Lote 1	-	-	-	0,091	-	-	0,995	-	99,87	3,18x10 <sup>-4</sup>	1,6
	Lote 2	-	-	-	0,066	-	-	1,093	-	99,68	7,93x10 <sup>-4</sup>	2,5
	Lote 3	-	-	-	0,110	-	-	1,038	-	99,86	3,72x10 <sup>-4</sup>	1,7
	Lote 4	-	-	-	0,048	-	-	1,373	-	99,42	1,50x10 <sup>-3</sup>	3,4
Henderson e Pabis	Lote 1	0,997	-	-	0,091	-	-	-	-	99,87	3,17x10 <sup>-4</sup>	1,6
	Lote 2	1,013	-	-	0,068	-	-	-	-	99,59	1,43x10 <sup>-3</sup>	2,8
	Lote 3	1,006	-	-	0,112	-	-	-	-	99,85	5,51x10 <sup>-4</sup>	1,8
	Lote 4	1,060	-	-	0,052	-	-	-	-	98,38	5,58x10 <sup>-3</sup>	5,7
Logarítmico	Lote 1	1,012	-	-0,021	0,086	-	-	-	-	99,91	2,79x10 <sup>-4</sup>	1,4
	Lote 2	1,101	-	-0,110	0,053	-	-	-	-	99,88	3,55x10 <sup>-4</sup>	1,5
	Lote 3	1,012	-	-0,008	0,109	-	-	-	-	99,86	4,38x10 <sup>-4</sup>	1,7
	Lote 4	1,719	-	-0,713	0,021	-	-	-	-	99,82	5,52x10 <sup>-4</sup>	1,9
Midilli	Lote 1	1,001	-0,001	-	0,112	-	-	0,892	-	99,96	1,13x10 <sup>-7</sup>	1,0
	Lote 2	1,002	-0,003	-	0,077	-	-	0,878	-	99,94	2,08x10 <sup>-4</sup>	1,1
	Lote 3	1,003	0,000	-	0,105	-	-	1,020	-	99,86	5,12x10 <sup>-4</sup>	1,7
	Lote 4	1,007	-0,007	-	0,029	-	-	1,018	-	99,82	6,39x10 <sup>-4</sup>	1,9
Dois termos	Lote 1	0,498	0,498	-	-	0,091	0,091	-	-	99,87	4,44x10 <sup>-4</sup>	1,6
	Lote 2	0,506	0,506	-	-	0,068	0,068	-	-	99,59	1,43x10 <sup>-3</sup>	2,8
	Lote 3	0,503	0,503	-	-	0,112	0,112	-	-	99,85	5,51x10 <sup>-4</sup>	1,8
	Lote 4	0,530	0,530	-	-	0,052	0,052	-	-	98,38	5,81x10 <sup>-4</sup>	5,7
Aproximação da difusão	Lote 1	0,020	0,061	-	1,459	-	-	-	-	99,88	3,59x10 <sup>-4</sup>	1,6

	Lote 2	0,054	0,997	-	0,097	-	-	-	-	99,70	$8,68 \times 10^{-4}$	2,4
	Lote 3	0,065	0,065	-	1,800	-	-	-	-	99,87	$3,92 \times 10^{-4}$	1,8
	Lote 4	0,408	0,996	-	0,095	-	-	-	-	99,36	$1,92 \times 10^{-3}$	3,6
Verma	Lote 1	0,101	-	-	0,091	-	-	-	0,091	99,87	$3,72 \times 10^{-4}$	1,6
	Lote 2	0,074	-	-	0,067	-	-	-	0,067	99,58	$1,23 \times 10^{-3}$	2,9
	Lote 3	0,110	-	-	0,111	-	-	-	0,111	99,85	$4,67 \times 10^{-4}$	1,8
	Lote 4	0,030	-	-	0,049	-	-	-	0,049	98,07	$5,77 \times 10^{-3}$	6,2
Dois termos exponencial	Lote 1	0,021	-	-	0,435	-	-	-	-	99,88	$3,07 \times 10^{-4}$	1,6
	Lote 2	0,004	-	-	0,834	-	-	-	-	99,57	$1,07 \times 10^{-3}$	2,9
	Lote 3	1,000	-	-	0,111	-	-	-	-	99,85	$4,01 \times 10^{-4}$	1,8
	Lote 4	0,002	-	-	0,884	-	-	-	-	98,04	$5,01 \times 10^{-3}$	6,2

